ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

PROJET D'APPLICATION PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DU
DOCTORAL EN INGENIERIE
Ph.D.

PAR
FLAVIO PRIETO

MÉTROLOGIE ASSISTÉE PAR ORDINATEUR : APPORT DES CAPTEURS 3D SANS CONTACT

MONTRÉAL, JANVIER 2000

© droits réservés de Flavio Prieto 1999

Sommaire

Ce travail de recherche concerne l'inspection automatique de pièces industrielles à partir du modèle CAO de la pièce et de son image 3D obtenue à l'aide d'un capteur laser de haute précision. Tout d'abord nous déterminons et modélisons les différents paramètres qui influencent la précision du capteur laser lors du processus de numérisation d'une pièce. Ce modèle est utilisé pour générer automatiquement une stratégie d'acquisition pour la numérisation complète et précise d'une surface ou d'une pièce complète. La stratégie d'acquisition consiste en la détermination d'un ensemble de points de vue qui définissent la position spatiale et l'orientation exacte du capteur par rapport à la pièce, ainsi que d'autres paramètres du capteur. Le but de la stratégie de numérisation est d'améliorer l'exactitude des mesures de profondeur afin de pouvoir utiliser ce nuage de points 3D dans des tâches de métrologie. Les contraintes imposées au système sont : la connaissance de la position et de l'orientation initiale de la pièce et de son modèle CAO en format IGES. Il n'y a pas de limitations quant à la géométrie de l'objet à inspecter, par conséquent il est possible de contrôler des pièces avec des surfaces simples ou complexes.

Le nuage de points issu de la numérisation d'une pièce est recalé avec son modèle CAO et postérieurement segmenté. La segmentation est réalisée par le calcul de la distance minimale du point 3D aux surfaces du modèle CAO et par la comparaison de propriétés géométriques du point 3D avec son homologue appartenant à la surface. Les résultats de la segmentation sont utilisés pour contrôler les tolérances dimensionnelles et géométriques de la pièce. En utilisant le modèle du bruit, nous avons introduit une valeur de dispersion sur chacun des points 3D acquis par le capteur. Cette valeur de dispersion est présentée comme un facteur de pondération dans les résultats de l'inspection.

Abstract

This work is related to the automatic inspection of manufactured parts by using the CAD model of the part and the cloud of 3D points obtained by the digitization of the part with a laser range sensor. Initially we determine and model the parameters most influent for the accuracy of the range sensor in the digitalization of a part. This model is used to produce automatically a sensing plan in order to acquire completely and precisely the geometry of a surface or of the whole part. A sensing plan includes the set of viewpoints which defines the exact position and orientation of the camera relative to the part and other digitization parameters. The goal of the sensing plan is to improve the accuracy of the depth measurement in order to be able to use the cloud of 3D points in inspection tasks. The requirements of the system are the exact position and orientation of the part and its CAD model in IGES format. There is no limitation in the geometry of the part to be digitized, hence simple/complex parts can be scanned.

After registration between the 3D data and the CAD model, the cloud is segmented. The segmentation is fulfilled by computing the minimal distance from the 3D point to the surfaces (of the CAD model) and comparing some local geometric properties of the 3D point with the closest one on the surfaces. Segmentation results are used to check dimensional and geometric tolerances of the part. By using the noise model, we introduced a dispersion value for each 3D point acquired by the range sensor. This value of dispersion is shown as a weight factor in the inspection results.

Je dédie ce mémoire de doctorat à tous ceux qui m'ont aidé et soutenu dans cette période de ma vie.
Je pense en particulier à mes parents pour leurs sacrifices et leur amour inépuisable, à mes frères pour leur complicité fraternelle, à mes amis de Lyon et de Montréal avec lesquels j'ai passé de trés bons moments, à mes amis en Colombie et ailleurs qui malgré la distance ont toujours su rester proches de moi, et aux amis qui ne sont plus là mais seront pour toujours dans mon cœur.
Que ce mémoire soit un témoignage de mon affection.

Remerciements

Ce travail a été effectué dans le cadre d'une collaboration franco-canadienne, au Laboratoire d'Automatique Industrielle de l'INSA de Lyon, au Laboratoire d'Imagerie, de Vision et d'Intelligence Artificielle de l'ÉTS, Université du Québec à Montréal et à l'Institut des Technologies de l'Information du Conseil National de Recherches du Canada situé à Ottawa.

Je voudrais exprimer mes remerciements les plus sincères à Monsieur Alain JUTARD, précédent directeur du LAI pour m'avoir accueilli dans son laboratoire et pour m'avoir fait l'honneur de participer à mon jury de thèse. Je remercie également Monsieur Serge SCAVARDA actuel directeur du LAI. De même, mes remerciements les plus sincères s'adressent à Monsieur Richard LEPAGE directeur du LIVIA pour son accueil chaleureux, sa disponibilité, son soutien et ses précieux conseils tout au long de ce travail, et à Monsieur Jacques DOMEY, directeur du groupe des Technologies de l'Information Visuelle du CNRN, pour m'avoir permis de m'intégrer à son groupe de recherche.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Messieurs Tanneguy REDARCE et Pierre BOULANGER à la fois pour leurs conseils ciblés, leur grande disponibilité et leurs encouragements pendant ces trois dernières années de thèse.

Je suis très reconnaissant à Madame Sylvie DORE et à Monsieur Alain BERNARD pour l'intérêt qu'ils témoignent à mes travaux et pour la tâche de rapporteur qu'ils ont bien voulu accepter. Outre son rôle de rapporteur, Madame DORE m'a été d'une grande aide lors de l'usinage des pièces utilisées dans ce travail.

Je remercie Messieurs Denis POUSSART et Etienne DOMBRE d'avoir accepté d'examiner mes travaux et pour ce dernier d'avoir présidé le jury de ma thèse.

Mes sincères remerciements vont également à Stéphane RAYNAUD, Bernard BOURGEAY et Pascal ROUX de l'UMQ du CAST de l'INSA, pour l'aide technique lors de la conception et l'inspection "à contact" des pièces utilisées dans ce travail. Merci également à Achille VALISOLALAO de l'AIP-RAO pour ses conseils autour des systèmes de CFAO. Que Luc COURNOYER et J.-Angelo BERALDIN du CNRC et la société Hymarc trouvent ici mes remerciements pour leur grande collaboration lors de la numérisation des pièces.

Je ne voudrais pas oublier le personnel du LAI, du LIVIA et de l'ITI, en particulier mes collègues doctorants pour l'amitié et le soutien qu'ils m'ont témoignés et qui m'ont permis d'effectuer ce travail dans des conditions exceptionnelles et

très agréables. Je réserve une pensée toute particulière à Mademoiselle Monique SANCHEZ (secrétaire du LAI).

Merci enfin à la coopération scientifique FRANCE QUEBEC du Ministère des Affaires Etrangères (France) et à COLCIENCIAS (Colombie) pour sa participation financière sans laquelle cette thèse en co-tutelle n'aurait pas été possible.

Table des matières

Introduction **1**

1 Inspection automatique de pièces manufacturées **4**
1.1 Problématique et rappels 4
1.1.1 Le problème de l'inspection automatique 5
1.1.2 La modélisation des pièces 8
1.1.3 Les méthodes de numérisation 16
1.1.4 Placement automatique du capteur 22
1.2 Etat de l'art 24
1.2.1 Planification de l'acquisition des images 25
1.2.2 Vérification automatique de tolérances 39
1.2.3 Modèle du bruit des systèmes de numérisation 49
1.3 Formulation du problème 55
1.3.1 La méthode d'inspection proposée 55
1.3.2 Banque des pièces manufacturées 58

2 Les systèmes de numérisation 3D **59**
2.1 Introduction 59
2.2 Les capteurs de profondeur 60
2.2.1 Le capteur Biris 62
2.2.2 Le capteur Autosynchronisé 63
2.3 Le support mécanique 65
2.4 Calibrage des capteurs 66
2.5 Problèmes physiques lors de la numérisation 68
2.5.1 La réflectivité de la surface 69
2.5.2 Surface réfléchissante 70
2.5.3 Surface avec des discontinuités 70
2.5.4 Le faisceau est partiellement occlus 71
2.5.5 La granularité laser ou *speckle* 72
2.6 Modèle du bruit du système de numérisation 73
2.6.1 Modèle de bruit du capteur autosynchronisé 75
2.6.2 Modèle de bruit du capteur Biris 82

2.7 Le bruit de speckle . . . 86
2.7.1 Propriétés fondamentales du *speckle* . . . 86
2.7.2 Réduction du *speckle* . . . 87
2.8 Conclusion . . . 89

3 Stratégie d'acquisition optimale de points 3D 90
3.1 Introduction . . . 90
3.2 Définition du Problème . . . 91
3.2.1 Stratégie de numérisation . . . 92
3.2.2 Contraintes . . . 93
3.2.3 Critères pour la stratégie de numérisation . . . 95
3.3 La Stratégie d'acquisition . . . 96
3.3.1 Traitement des données d'entrée . . . 97
3.3.2 Recherche de l'ensemble X de points de vue . . . 103
3.3.3 Estimation de la précision des données 3D . . . 119
3.3.4 Présentation optimale de l'ensemble X de points de vue . . . 123
3.4 Résultats synthétiques de la stratégie . . . 124
3.5 Conclusion . . . 125

4 Vérification de tolérances 129
4.1 Introduction . . . 129
4.2 Recalage entre l'image 3D d'une pièce et son modèle CAO . . . 130
4.2.1 L'algorithme LMS . . . 132
4.2.2 L'algorithme ICP . . . 133
4.2.3 Précision de la Méthode de recalage . . . 134
4.3 Segmentation de données 3D . . . 135
4.3.1 Calcul de la distance point 3D/surface NURBS . . . 136
4.3.2 Calcul et comparaison des propriétés géométriques . . . 140
4.4 Définition et contrôle des tolérances . . . 142
4.4.1 Tolérances dimensionnelles . . . 146
4.4.2 Contrôle de tolérances dimensionnelles . . . 147
4.4.3 Tolérances angulaires . . . 148
4.4.4 Contrôle des tolérances angulaires . . . 148
4.4.5 Tolérances géométriques . . . 149
4.4.6 Contrôle des tolérances géométriques . . . 151
4.5 Système d'inspection visuelle . . . 155
4.5.1 Inspection déterministe . . . 155
4.5.2 Inspection non-déterministe . . . 157
4.6 Conclusion . . . 165

5 Résultats **167**
5.1 Introduction 167
5.2 Numérisation des pièces 3D 168
5.2.1 Processus de numérisation standard 169
5.2.2 Données 3D en utilisant une stratégie d'acquisition 170
5.2.3 Apport de la stratégie 172
5.2.4 Discussion 176
5.3 Inspection de tolérances 178
5.3.1 Inspection supervisée 178
5.3.2 Inspection déterministe 180
5.3.3 Inspection non-déterministe 185
5.3.4 Discussion 187
5.4 Conclusion 189

Conclusions **190**

Bibliographie **193**

A La banque de pièces **203**

B Processus de modélisation et bruit de *speckle* **207**

C Entités du fichier CAO en format IGES **211**

D Tolérances géométriques **216**

Table des figures

1.1 Modélisation géométrique d'une pièce 3D 11
1.2 La technique de triangulation 19
1.3 La technique de stéréovision 21

2.1 La triangulation optique 60
2.2 Triangulation optique en utilisant un masque de double ouverture . . 63
2.3 Triangulation optique qui utilise le principe d'autosynchronisation . . 64
2.4 Erreur dans le point de profondeur due à la réflectivité de la surface . 70
2.5 Erreur dans le point de profondeur due à une surface réfléchissante . . 71
2.6 Erreur dans le point de profondeur due à une discontinuité de la surface 71
2.7 Erreur dans le point de profondeur due à une occlusion partielle . . . 72
2.8 Influence du *speckle* sur la triangulation traditionnelle 73
2.9 Taux de convergence de la valeur moyenne des mesures 75
2.10 Paramètres α et β 76
2.11 Variance en x en fonction de l'angle d'incidence α 77
2.12 Covariance xz en fonction de l'angle d'incidence α 78
2.13 Variance en z en fonction de l'angle d'incidence α 79
2.14 Variance en z en fonction de l'angle d'incidence β 80
2.15 Variance en z en fonction de la distance d 81
2.16 Variance en z en fonction de l'angle d'incidence α 83
2.17 Variance en z en fonction de l'angle d'incidence β 84
2.18 Variance en z en fonction de la distance d 85
2.19 Fluctuation de la mesure de profondeur versus la moyenne de la distance 88

3.1 Stratégie de numérisation pour l'inspection 91
3.2 Définition des paramètres d'un point de vue 93
3.3 Schéma-bloc de l'algorithme pour déterminer une stratégie de numérisation optimale 97
3.4 Surface NURBS (paramétrique) découpée 101
3.5 Le *voxel* V_{ijk} et la représentation en *voxels* du profil de la surface $\vec{s}(u,v)$ 103
3.6 Image binaire et discrète d'une surface 105
3.7 Rectangle de numérisation pour le système A 107

3.8 Trajectoire de points de vue projetés pour numériser une surface cylindrique. 109
3.9 Trajectoire de points de vue projetés avec les plus petites distances de balayage impliquant des surfaces planes. 110
3.10 Numérisation de la largeur entière d'une surface 111
3.11 Rectangle de numérisation pour le système B 112
3.12 Variation de l'angle d'incidence sur une surface courbe 113
3.13 Nombre minimal de points de vue 114
3.14 La solution optimale en changeant les paramètres d 114
3.15 Ensemble de points de vue de numérisation pour le système capteur auto-synchronisé/MMT 116
3.16 Ensemble de points de vue de numérisation pour le système capteur Biris/bras de robot 117
3.17 Recherche d'un nouveau point de vue libre du problème d'occlusion . 119
3.18 Points de vue sans problème d'occlusion pour le système capteur auto-synchronisé/MMT 120
3.19 Points de vue solution sans problèmes d'occlusion pour le système capteur Biris/bras de robot 121
3.20 Evaluation des paramètres α et β. 122
3.21 Stratégie de numérisation pour une pièce simple 126
3.22 Stratégie de numérisation pour une pièce complexe 127

4.1 Recalage entre un nuage de points et le modèle CAO d'une pièce . . . 134
4.2 Distance entre un point 3D et une surface NURBS 136
4.3 Segmentation de quelques surfaces à partir d'un nuage de points recalés avec le modèle CAO de la pièce 143
4.4 Distribution de la distance entre chaque point 3D et la surface de référence 146
4.5 Spécification des tolérances dimensionnelles et angulaires sur une pièce 147
4.6 Contrôle de tolérances dimensionnelles 147
4.7 Contrôle de tolérances angulaires 149
4.8 Tolérances géométriques de forme, d'orientation et de position 150
4.9 Spécification des tolérances géométriques sur une pièce 151
4.10 Contrôle des tolérances de forme : planéité 152
4.11 Contrôle des tolérances de forme quelconque 153
4.12 Contrôle des tolérances d'orientation 154
4.13 Famille d'ellipses résultant de l'intersection du $b(\vec{r})$ avec des plans de probabilité constante 158
4.14 Ellipses de dispersion fonction des paramètres α, β et d 160
4.15 Position de t_m par rapport à t_s 162

5.1 Capteur autosynchronisé développé au CNRC 168

5.2 Capteur Biris développé au CNRC 169
5.3 Processus de numérisation standard d'une pièce 170
5.4 Nuages de points obtenus par la numérisation standard 171
5.5 Stratégie de numérisation et nuage de points pour les pièces un et deux 173
5.6 Stratégie de numérisation et nuage de points pour les pièces huit et complexe un 174
5.7 Numérisation des surfaces sans superposition des données 177
5.8 Visualisation rapide des défauts en utilisant l'interface graphique . . . 179
5.9 Spécification des tolérances sur la pièce un et sous-ensembles de points 3D utilisés pour leur contrôle 181
5.10 Spécification des tolérances géométriques sur la pièce deux et sous ensemble de points 3D utilisés pour leur contrôle 182
5.11 Stratégie d'acquisition pour le contrôle de la tolérance de forme quelconque 188

A.1 Pièces de la banque de données avec des surfaces simples 205
A.2 Pièces de la banque de données avec des surfaces complexes 206
A.3 Modèle CAO en format STL de quelques pièces de la banque de données 206

B.1 Variation de la position et de l'orientation du capteur 208
B.2 Bruit de *speckle* en deux positions différentes 209
B.3 Bruit de *speckle* en réalisant un nombre différent de mesures 210

Liste des tableaux

4.1 Quantification de la réponse d'inspection non-déterministe 164

5.1 Mesure de la distance entre chaque point 3D et le point le plus proche sur la surface NURBS 175
5.2 Contrôle de tolérances en utilisant la MMT 183
5.3 Contrôle déterministe de tolérances en utilisant le nuage de points issu du processus de numérisation standard avec le capteur Biris . . . 184
5.4 Contrôle déterministe de tolérances en utilisant le nuage de points issu du processus de numérisation standard avec le capteur autosynchronisé185
5.5 Contrôle déterministe de tolérances en utilisant le nuage de points issu du processus de numérisation avec la stratégie d'acquisition (capteur auto-synchronisé) 185
5.6 Valeur de la dispersion pour le sous ensemble de points lié à chaque surface 186
5.7 Contrôle non-déterministe de tolérances 187
5.8 Grandeur des tolérances qui peuvent être contrôlées 188

D.1 Tolérances géométriques 221
D.2 Distribution des tolérances géométriques dans la banque de pièces . . 222

Introduction

La CAO (Conception Assistée par Ordinateur) est maintenant, et cela depuis de nombreuses années, utilisée dans l'industrie, et les logiciels continuent à évoluer en permanence.

A partir du noyau central de ces logiciels (conception de pièces mécaniques) sont apparus des logiciels de FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur) et de robotique, ceux-ci permettant, en plus de la visualisation en statique des encombrements et des contacts avec l'environnement, de simuler des trajectoires soit d'outils soit de robots.

Après la conception de l'objet, puis la programmation des machines à commande numérique et les machines de transfert (robots, perirobotique, etc.), il reste une dernière tâche importante qui jusqu'à maintenant n'a pas bénéficié de toute l'énergie nécessaire : la *métrologie*. Actuellement, lorsque l'on veut automatiser un contrôle dimensionnel ou de tolérance, on écrit un programme qui va permettre de déplacer les différents axes d'une machine à mesurer afin d'acquérir des points 3D avec une grande précision (de l'ordre du μm). Il suffira d'utiliser ce programme à chaque fois que ce type de pièce se présentera, et après l'avoir positionné correctement sur la MMT (Machine à Mesurer Tridimensionnelle), nous obtiendrons un nuage de points. L'intérêt de ce type de machine est que l'on obtient une très grande précision, mais avec le compromis d'une très grande lenteur, plusieurs dizaines de minutes pour obtenir un nuage d'une centaine de points. Ce nuage de points sera ensuite traité par un logiciel qui donnera automatiquement les résultats du contrôle.

Cette dernière étape de la production, le contrôle, qui est l'un des points les plus importants, car c'est ici que l'on décidera de l'acceptation ou du rejet d'une pièce en fin de chaîne de fabrication, n'a pas bénéficié de l'intégration telle qu'elle existe en fabrication. Nous pensons que le concept de Métrologie Tridimensionnelle Assistée par Ordinateur (MTAO) est à l'heure actuelle envisageable, et même nécessaire du fait de la tendance à l'accélération permanente des différentes tâches de l'entreprise, et de la nécessité de plus en plus importante du contrôle systématique.

Enfin, la réalisation de prototypes grâce aux machines de prototypage rapide, qui sont associées à des logiciels de CFAO, permettent d'obtenir des pièces en quelques heures. Ce gain de temps sera complètement annihilé si on ne peut effectuer le contrôle, donc valider la conception en quelques minutes.

La rapidité du contrôle ne pourra être effective que si l'on dispose de capteurs autres que les capteurs à contact montés sur une MMT. Un seul type de capteur permettra ce gain de temps significatif, ce sont les télémètres laser à balayage. Ils autorisent une vitesse de numérisation de l'ordre de 20000 *points par seconde* avec des précisions de l'ordre de $25\mu m$ pour les meilleurs. Il devient alors possible d'envisager le développement d'applications de MTAO intégrant les données de conception.

Le seul frein à cette intégration est que les logiciels de CAO actuels ne permettent pas de récupérer les informations géométriques sur les volumes ou les surfaces. Les données de cotation et de tolérancement ne sont accessibles que par lecture visuelle sur un plan.

L'autre point faible est la précision largement inférieure des capteurs sans contact par rapport au capteur avec contact. Si l'on veut s'en rapprocher, il est nécessaire de développer des stratégies de numérisation permettant d'améliorer cette précision. Enfin, si le contrôle dimensionnel est relativement simple à exécuter, il est nécessaire de développer des méthodologies de contrôle de tolérances géométriques. C'est uniquement de cette façon que nous pourrons automatiser ce type de contrôle.

Notre travail de doctorat repose sur l'analyse et la démonstration de la faisabilité

de réalisation d'applications de MTAO automatique.

Ce mémoire est organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre nous permet de présenter la problématique de l'inspection automatique, les méthodes de numérisation 3D existantes et le problème du placement automatique du capteur. Nous présentons également une bibliographie très détaillée de ce que l'on trouve actuellement dans la littérature sur ce sujet. Le chapitre conclut avec la proposition d'une solution à ce problème.

Ensuite nous présentons dans le deuxième chapitre, les capteurs télémétriques que nous avons utilisé ainsi que les problèmes liés à leur utilisation. Afin de connaître le bruit introduit lors de la numérisation d'une pièce, nous avons modélisé ce bruit pour chacun d'eux.

Dans le chapitre suivant, pour améliorer la précision de la numérisation, nous proposons d'utiliser une stratégie d'acquisition permettant de placer le capteur le plus optimal possible par rapport à la précision des données acquises. Celle-ci utilise le modèle du bruit du capteur et nous permet d'associer une valeur de dispersion à chaque point acquis.

La vérification des tolérances est présentée dans le chapitre 4 ; une méthodologie de contrôle de tolérances (dimensionnelles et géométriques) en utilisant les données 3D issus d'un capteur de télémétrique est exposée. La valeur de dispersion associée aux points 3D acquis est utilisée pour pondérer le résultat de l'inspection par un facteur de fiabilité.

Enfin dans le dernier chapitre nous présentons les résultats obtenus dans le cas d'une inspection dimensionnelle et de tolérance. Lors de cette inspection nous utilisons des données 3D obtenues par une numérisation standard et par une numérisation avec la stratégie d'acquisition.

La présentation de ce mémoire est suivie d'annexes contenant la description de la banque de pièces, les entités IGES et les tolérances géométriques.

Chapitre 1

Inspection automatique de pièces manufacturées

1.1 Problématique et rappels

Puisque l'inspection d'une pièce manufacturée consiste à vérifier l'exactitude de la pièce par rapport à un ensemble de spécifications (tolérances) données, il est nécessaire que la méthode utilisée pour réaliser cette inspection soit elle-même très précise. Dans la méthode d'inspection que nous présentons, nous allons comparer le modèle de conception de la pièce avec son image 3D. Afin d'obtenir un résultat fiable, il est nécessaire que le modèle de conception CAO modélise la pièce de la manière la plus exacte possible, et que le nuage de points 3D qui représente la mesure de cette pièce soit lui aussi précis que possible.

Après une introduction au problème d'inspection automatique, nous présentons les modes de création des modèles 3D, ainsi que les différents systèmes de numérisation des objets 3D ; nous concluons cette section par une introduction au problème de la numérisation automatique.

1.1.1 Le problème de l'inspection automatique

L'imprécision inévitable des procédés de mise en forme fait qu'une pièce ne peut pas être réalisée de façon rigoureusement conforme aux dimensions fixées au préalable. Le concepteur d'une pièce, conscient de ce problème, introduit des tolérances ou variations dans les dimensions, sur la dimension effective de la pièce, afin qu'elle puisse réaliser correctement sa fonction. L'inspection est l'opération par laquelle un produit réel est comparé, en entier ou en une partie, aux spécifications définies lors de sa conception.

L'inspection cherche à assurer la conformité aux espérances du client à ce qu'un produit devrait pouvoir faire. L'interchangeabilité du produit, la compatibilité, la fiabilité sont quelques exemples des demandes potentielles du client.

Dans l'industrie, l'inspection est habituellement réalisée par des contrôleurs humains sur un échantillon de pièces plutôt que sur la production totale, car ce type d'inspection diminue les coûts et les temps d'inspection. Cependant, dans certaines applications critiques tels que l'industrie spatiale ou médicale, toutes les pièces doivent être inspectées car même les plus petits défauts sont inacceptables.

Quelques caractéristiques pour lesquelles l'inspection automatique est souhaitable sont :

- Les inspecteurs humains ne sont pas toujours constants dans l'évaluation des produits, en partie à cause de la fatigue. L'uniformité de l'évaluation, appliquée objectivement grâce à l'inspection automatisée devrait permettre de prédire le niveau de qualité de la production.
- Plusieurs tâches d'inspection prennent beaucoup de temps, ce qui augmente leur coût de production. Pour l'inspection automatique, l'information sur le produit examiné est acquise et traitée à grande vitesse, ainsi la rapidité de l'inspection peut égaler la vitesse de production, même lorsque plusieurs exécutions complexes d'inspection sont réalisées dans le même cycle.

– L'inspection automatique permet d'inspecter les objets qui sont dans des endroits dangereux pour les humains.

Présentement, beaucoup de tâches automatisées d'inspection sont accomplies à l'aide des dispositifs d'inspection à contact, qui exigent que la pièce soit arrêtée, et soigneusement placée. Par ailleurs, la constante amélioration des technologies de production à grande vitesse a créé un besoin de nouvelles techniques d'inspection rapide. En effet, le développement rapide de produits (prototypage rapide) est capable de produire des pièces réelles à partir des modèles CAO et permet la réalisation de produits de grande complexité à grande vitesse. Donc, dans ce contexte de production rapide, il est nécessaire de développer de nouvelles méthodes d'inspection qui puissent suivre les cadences de production. L'inspection visuelle peut alléger le besoin d'interrompre la ligne de production et de positionnement précis, elle a aussi un faible risque d'endommagement du produit pendant l'inspection.

Historiquement, la plupart des systèmes d'inspection visuel utilisent des images binaires, de niveaux de gris ou de couleur pour l'inspection automatique, donc des images 2D. Les données binaires sont suffisantes pour les objets industriels qui peuvent être représentés par leur silhouette. Les objets plats, sans caractéristique surfacique par exemple, se prêtent très bien à ce type d'inspection. Peu de systèmes visuels d'inspection qui utilisent les images à niveaux de gris sont capables de travailler dans des environnements industriels, souvent dans des conditions de poussières et d'éclairage défavorables. La plupart de ces systèmes utilisent la soustraction d'images ou des méthodes d'histogrammes pour la détection des défauts. Les images couleur ont été utilisées principalement pour l'inspection de tissus ou de nourriture, où les changements d'ombrage ou de couleur indiquent un défaut.

Beaucoup d'applications, utilisent des images binaires pour l'inspection,

l'inspection d'aubes de turbines par exemple, est généralement impossible en utilisant des informations d'intensité, parce que les informations de silhouette sont pauvres et que les informations d'intensité peuvent contenir des variations de lumière réfléchie trop importantes. L'inspection des pièces qui présentent des variations de hauteur de déformation ou de relief trop grandes, demandent une mesure précise de profondeur, donc des systèmes de vision 3D.

Dans l'industrie, le standard pour l'inspection de pièces est la machine à mesurer tridimensionnelle. Une MMT est un système de mesure fiable et précis, composé de capteurs à contact électroniques, d'un logiciel de saisie de données, et d'un système informatique. Le principe de fonctionnement d'une MMT est d'enregistrer les points de contact entre le capteur et la pièce. Ces points sont tracés et enregistrés dans le système référentiel de la machine. Des algorithmes d'ajustement de données sont alors employés pour calculer la position et l'emplacement des caractéristiques de la pièce. En conséquence, des tolérances peuvent être calculées. Les MMTs ont été acceptées dans l'industrie pour leur souplesse à réaliser des tâches d'inspection et de vérification. Particulièrement dans les industries aéronautiques qui rencontrent fréquemment des surfaces complexes, les MMT sont devenus un des appareils majeurs pour l'inspection dimensionnelle.

Cependant, quelque soit le niveau technologique de la machine utilisée ou le niveau des techniques statistiques utilisées qui peuvent faciliter l'analyse des mesures, l'utilisation du capteur à contact a toujours l'inconvénient majeur de pouvoir endommager la surface du produit. Par conséquent, l'étude de systèmes d'inspection utilisant des systèmes visuels, qui peuvent être mis en application pour des mesures sans contact, est nécessaire pour l'inspection des produits faits de matériaux mous. Par ailleurs, des systèmes optiques tels que les capteurs basés sur des technologies laser, nous permettront d'avoir de grandes densités des points de mesure, dans un court laps de temps, ce qui est presque impossible avec les MMTs.

Des systèmes de conception et de fabrication assistée par ordinateur (CFAO) sont employés dans de nombreuses industries pour concevoir et créer les objets physiques à partir de modèles numériques. Dans ce contexte, ayant cette connaissance sur la géométrie de l'objet, l'inspection assistée par ordinateur consiste à comparer le modèle de conception d'une pièce physique avec ses mesures 3D.

L'intérêt d'utiliser des modèles CAO pour l'inspection assistée par ordinateur provient du fait qu'ils constituent une description exacte de l'objet. En effet, ceux-ci contiennent à la fois une description mathématique de la forme de l'objet, incluant une paramétrisation explicite de la forme des surfaces, et un codage explicite des relations entre les surfaces. Un autre avantage des modèles CAO est leur grande flexibilité, qui permet par exemple d'ajouter sans problème un nouvel objet dans le système d'inspection.

La numérisation de surfaces dans les systèmes industriels d'inspection visuelle nécessite une grande précision de mesure et une grande vitesse d'exécution. Les capteurs sans contact tels que : les systèmes de stéréovision, les capteurs télémétriques ou les systèmes de Moiré ont des avantages importants par rapport aux MMT.

Ces avantages incluent une grande vitesse de numérisation (jusqu'à 20000 points par seconde) et la capacité d'exécuter des mesures sur la surface complète d'une pièce sans contact physique. Les MMT sont capables d'une précision plus élevée, mais les progrès récents dans les systèmes commerciaux permettent aux capteurs de profondeur de mesurer les pièces dans l'intervalle de précision de $25\mu m$ nécessaire pour une grande majoritée des applications industrielles.

1.1.2 La modélisation des pièces

La modélisation de pièces émerge rapidement comme domaine de recherche et de développement dans des applications diverses telles que l'ingénierie et la

conception de produits, la fabrication assistée par ordinateur, le prototypage virtuel, la programmation hors ligne de robot, et la planification de mouvements. Toutes ces applications exigent de représenter la forme des objets physiques ; de telles représentations et des opérations de base sur ceux-ci peuvent être fournies par les modèles géométriques. La modélisation géométrique identifie traditionnellement un groupe de techniques qui peuvent représenter certaines classes de surfaces paramétriques. Elle est utilisée à l'heure actuelle dans de nombreuses industries, y compris l'automobile, l'espace, et la construction navale. En inspection elle est importante car elle nous fournit la forme et les propriétés géométriques de la pièce.

Les modèles géométriques

Un modèle géométrique est la représentation numérique (modèle mathématique) de la géométrie 3D d'un objet réel. L'origine de la modélisation géométrique peut être fixée au travail de Robert en 1963, concernant l'interprétation d'images filaires bidimensionnelles comme scène tridimensionnelle. En général, un modèle géométrique doit satisfaire les conditions suivantes :

1. La géométrie d'un objet est représentée avec précision de sorte que l'objet puisse être créé à partir du modèle.
2. Diverses propriétés géométriques telles que le volume, le centre de gravité et les arêtes, peuvent être dérivées du modèle.
3. Le modèle peut facilement être produit par des humains.

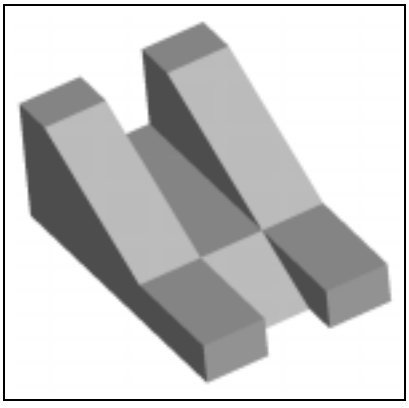
En CFAO (Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur), les modeleurs surfaciques et volumiques constituent d'excellents outils de conception qui permettent de représenter et de fabriquer des objets à partir d'un modèle numérique. Contrairement à l'usinage par commande numérique, qui peut se contenter d'un ensemble de surfaces indépendantes, les procédés de fabrication par couches demandent une modélisation parfaite en trois dimensions. Il existe plusieurs

approches de modélisation tridimensionnelle des objets physiques, nous allons décrire brièvement les plus connues.

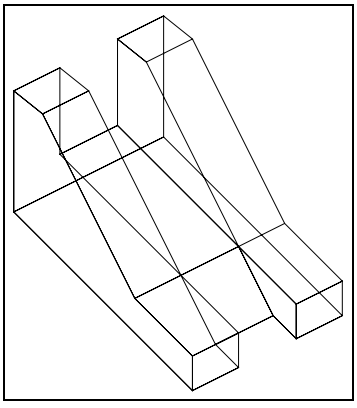
Modélisation filaire. La description fil fer d'un objet 3D se résume à une liste de sommets, associée à une liste de paires de sommets décrivant les arêtes du solide. Nous présentons dans la Figure 1.1(b) le modèle filaire de l'objet 3D montré dans la Figure 1.1(a). La modélisation filaire est très répandue, surtout pour la manipulation d'objets polyédriques, car sa simplicité permet des affichages très rapides ([BRO81], [GIG90]). Néanmoins, elle est souvent remplacée par la modélisation solide car les modèles filaires fournissent une représentation ambigüe du volume et des surfaces, ceci donne lieu à la confusion sur la présence ou sur l'orientation de l'objet. Les autres inconvénients liés à cette modélisation, sont l'impossibilité d'effectuer des calculs de masse, de volume et la difficulté de résolution du problème des parties cachées.

Modélisation surfacique. Dans cette modélisation l'objet solide est décrit par les surfaces qui le bordent (voir la Figure 1.1(c)). On distingue deux types, ou bien l'objet est modélisé par une seule surface aussi complexe que nécessaire ou bien l'objet est représenté par un assemblage de plusieurs surfaces plus simples, mais auxquelles on devra adjoindre des informations de topologie. Les types de surfaces utilisées sont très diverses : surfaces planes, surfaces de révolution, surfaces de Bézier [BEZ87], surfaces NURBS [PIE97].

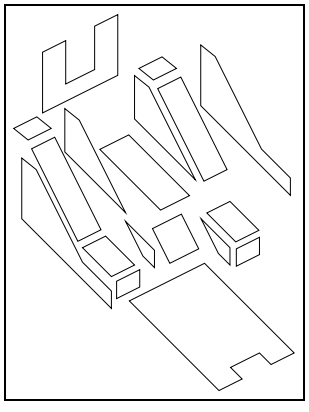
Dans la représentation par frontières (BREP : Boundary REPresentation) [FLY90], la frontière de l'objet est explicitement décrite. Cette information est très utile en CAO pour l'usinage des surfaces, pour le calcul rapide des masses, des centres de gravité. Elle est aussi utile en infographie, où la plupart des algorithmes de visualisation supposent connues des surfaces des objets. Ce modèle doit comprendre deux types d'information : des informations géométriques (coordonnées des points appelés nœuds et équations des surfaces), ainsi que des informations



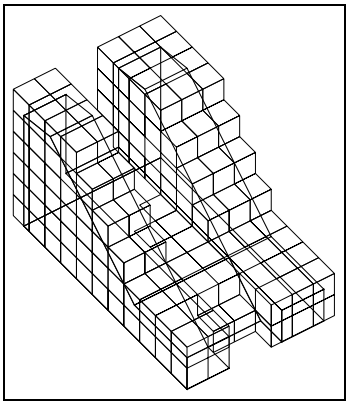
(a) Une pièce 3D



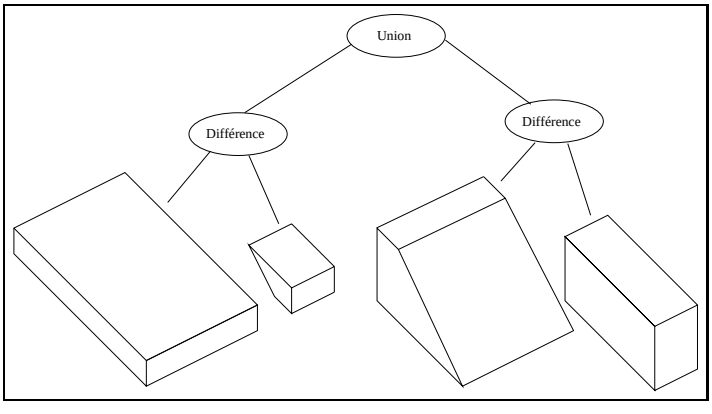
(b) Modèle filaire



(c) Modèle surfacique



(d) Occupation spatiale



(e) Géométrie solide constructive

FIG. 1.1: Modélisation géométrique d'une pièce 3D

topologiques (façon dont sont liées entre elles les informations géométriques). Les principaux inconvénients associés à cette modélisation sont la difficulté de réalisation d'opérations logiques, dues au grand nombre de faces constituant l'objet, et la difficulté de validation car les faces ne constituent pas un volume.

Modélisation par occupation spatiale. L'objet est représenté par un ensemble de cellules occupées par le volume de l'objet dans l'espace ([GIV88], [PER90]). Celles-ci peuvent être des volumes quelconques, mais l'usage de cubes de taille fixe est très fréquent. Ces cubes appelés *voxels* sont de petits éléments de volume discrétisé, qui sont localisés le plus souvent par les coordonnés d'un point 3D, par exemple le pied du cube qui est le plus proche de l'origine du système d'axes (voir la Figure 1.1(d)).

Un objet est représenté par un tableau de triplets (x, y, z) appelé tableau spatial, habituellement ordonné et dont l'ordre correspond à l'ordre de construction de l'objet. Cette approche est simple à mettre en œuvre. Elle facilite le calcul des propriétés physiques d'un objet et la mise en œuvre des opérations booléennes (union, intersection et différence) ainsi que relationnelles (jointure). Elle reste invariante en translation, mais ne l'est pas en rotation. Le principal inconvénient de la modélisation par occupation spatiale est qu'elle ne donne qu'une approximation plus ou moins grossière de l'objet, selon le niveau de résolution choisi, dont dépend également l'encombrement de mémoire.

Modélisation Géométrie Solide Constructive (CSG). L'objet est représenté à partir d'un ensemble de primitives volumiques et d'un ensemble d'opérateurs booléens et de positionnement. Les primitives de construction incluent généralement des parallélépipèdes, des cylindres, des sphères, des cônes et des tores. Quant aux opérateurs booléens, ce sont l'union, l'intersection et la différence. Les primitives volumiques sont paramètrées par leurs dimensions telles que largeur, hauteur, rayon. L'historique de la création du modèle est représenté par un graphe acyclique binaire appelé souvent arbre de construction CSG. Les feuilles de cet arbre sont occupées par

des exemplaires des primitives de base alors que les nœuds supérieurs contiennent des opérateurs booléens pour combiner ces primitives et de transformation pour les positionner (Figure 1.1(e)).

Les arbres CSG définissent de manière non-ambigüe les volumes et les surfaces et peuvent représenter des formes complexes avec un volume de données limité [REQ83]. La validation des objets obtenus par composition est rapide car ceux-ci sont également des volumes si les objets de base le sont, et si les opérateurs de composition sont régularisés. Par contre, les calculs nécessaires pour évaluer les propriétés géométriques et physiques d'un volume composé sont très importants. La représentation est cependant peu exploitable en vision, étant donnée la difficulté de représenter les objets présents dans les scènes naturelles par des primitives volumiques et la non unicité du modèle.

Modélisation par balayage. Un solide peut être représenté par le volume balayé par une courbe fermée, translatée dans l'espace. Plus généralement, la forme 2D peut évoluer lentement le long d'une trajectoire courbe et faire un angle variable avec celle-ci. La description et le stockage des volumes est simple puisqu'elle se limite aux données d'une courbe et d'une trajectoire. L'inconvénient principal provient de sa puissance de description, car on ne dispose pas d'algorithmes pour calculer les propriétés géométriques de ces volumes.

Modélisation par graphes d'aspects. Pour certaines applications, il est commode de stocker une bibliothèque de silhouettes 2D représentant les projections des modèles 3D. Particulièrement pour un objet 3D présentant un nombre réduit de configurations d'équilibre stable et dont les silhouettes sont assez différentes les unes des autres. Un nombre infini de projections étant possibles, on ne retient que certaines vues caractéristiques en groupant les projections en un nombre fini de classes d'équivalence topologique. A l'intérieur de l'une de ces classes, on peut passer d'une vue à l'autre par une transformation linéaire. Cette forme de représentation est

générale, puisqu'elle emmagasine la structure 3D d'un objet mais elle peut demander un gros volume de données.

La modélisation surfacique s'avère comme la plus adéquate pour la tâche d'inspection, car elle nous donne une représentation exacte de chaque surface de la pièce. Ceci nous permet d'utiliser seulement les surfaces d'intérêt, en plus nous pouvons extraire facilement les propriétés locales de la surface.

Les modèles CAO

Aujourd'hui il est nécessaire d'avoir un format commun pour les fichiers issus des modeleurs de CAO, afin de pouvoir communiquer ceux-ci d'un système à un autre. Traditionnellement, des dessins d'ingénierie et la documentation associée sont employés pour communiquer des données de définition de produits. Les systèmes interactifs commerciaux de graphisme, initialement développés comme aides à produire ces schémas bidimensionnels, se sont rapidement transformés en systèmes beaucoup plus sophistiqués pour la conception de solides tridimensionnels. Cette amélioration a produit une croissance rapide des applications de CFAO, permettant l'échange des données de définition de produits, lesquels utilisaient habituellement des représentations et des formats de données incompatibles.

Dans les systèmes CFAO, plusieurs représentations d'un même modèle peuvent cohabiter. Le choix de primitives CAO dépend de la classe géométrique des objets étudiés et de la technique utilisée pour extraire des primitives correspondantes dans la scène. Les niveaux de primitives utilisées par les systèmes de CFAO sont présentés par la suite.

Niveau zéro. Au ce niveau, on n'a que des primitives *ponctuelles*, qui sont représentées par leurs coordonnées dans l'espace de définition. Même si on peut utiliser cette description pour des étapes de calcul pendant la saisie de données brutes, son format est encombrant et désorganisé.

Niveau un. Est le niveau des primitives *curvilignes*, (coniques, Splines cubiques et d'approximation, courbes "offset", intersection de surfaces, silhouettes, courbes projetées), qui permettent la définition des modèles filaires. La description filaire décrit simplement les frontières des modèles polyédriques mais elle ne détermine pas de quel côté des faces se situe la matière. Ces modèles sont adaptés aux techniques de vision 2D basées sur la détection de contours dans l'image. Les frontières des faces visibles de l'objet sont des zones de gradient d'intensité important et qui résument simplement sa géométrie.

Niveau deux. Ce niveau correspond aux primitives *surfaciques* (surfaces de révolution, de Bézier, B-Splines, NURBS, cylindres tabulés), qui définissent la représentation par les frontières. Les représentations surfaciques permettent de décrire des formes complexes. Ces modèles sont adaptés aux techniques surfaciques de vision (photométrie stéréo, projection de grille, laser à temps de vol). Elles fournissent des cartes de la normale locale ou des cartes de profondeur qui décrivent localement la surface de l'objet.

Niveau trois. C'est le niveau des primitives *volumiques* (blocs, cônes, sphères, cylindres) et des modèles solides. Ces modèles sont adaptés aux techniques de vision qui caractérisent des volumes telles que l'intersection des volumes par plusieurs vues ou les techniques d'imagerie 3D comme la tomographie ou le scanner. Contrairement aux modèles filaires, ils ne sont pas ambigus et l'affichage d'une vue avec élimination des parties cachées est immédiat.

Le modèle CAO d'une pièce en format IGES (Initial Graphic Exchange Standard), issu des logiciels de CAO comme Unigraphics ou ProEngineer, donne la forme exacte de chaque surface en utilisant des surfaces NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) découpées. Celles-ci sont des surfaces pleines, limitées par des courbes de découpe. Dans ce travail, nous utiliserons des primitives de niveau un et deux dans

les modèles surfaciques des objets.

1.1.3 Les méthodes de numérisation

Il y a de nombreuses méthodes pour acquérir l'information sur la forme des pièces, elles reposent sur des technologies différentes.

Dans l'industrie, les capteurs mécaniques de contact montés sur les machines à mesurer tridimensionnelles sont employés pour enregistrer des points sur des surfaces pour une grande variété d'applications telles que les carrosseries de voiture ou des ailes d'aéronefs. On place le point à numériser en contact avec le capteur ; le déplacement nécessaire à partir d'une position de référence donne les coordonnées de ce point. Les mesures résultantes sont très précises, mais la technique est extrêmement lente et limitée aux matériaux qui peuvent résister au contact mécanique. Moins chères et moins précises, des sondes de numérisation 3D déterminent la position en utilisant des champs magnétiques ou des ultrasons. Cependant, ce type de numérisation exige une intervention humaine significative. Depuis peu de temps, les sondes mécaniques peuvent être remplacées par des capteurs de profondeur.

Beaucoup de systèmes de vision ont utilisé des capteurs d'intensité tels que des caméras CCD (charge-coupled device) pour obtenir des images. Les images résultantes contiennent des informations sur le fini de surface, l'éclairage ambiant et/ou actif, les informations souhaitées sur la géométrie de la scène sont présentes sous forme implicite. L'extraction explicite des informations est très difficile. Les chercheurs en vision par ordinateur continuent à s'attaquer à ce problème d'extraction d'information de profondeur à partir des images d'intensité en utilisant une grande variété d'approches forme-à-partir-de-X, telles que la forme à partir de l'ombre [STE97], la forme à partir de la texture [SUP95] et la forme à partir des occlusions des contours [CHI89]. Récemment ont a vu le développement d'une grande variété de techniques pour obtenir l'information de profondeur directement,

telles que les capteurs de temps de vol, les capteurs de lumière structurée, la vision stéréoscopique, les systèmes de Moiré ou encore des techniques acoustiques, d'infrarouge ou d'holographie interférométrique. Nitzan [NIT88] présente une revue des différentes techniques utilisées par les capteurs de profondeur.

Les tentatives de regroupement des capteurs de profondeur dans des classes, selon leurs propriétés, ont souvent abouti à : actifs ou passifs si l'environnement est illuminé ou non par le capteur, monoculaire ou multioculaire si le système produit une ou plusieurs images.

Vision passive. Comme la vision humaine, la vision par ordinateur tente d'interpréter l'environnement en s'appuyant sur l'image d'intensité d'une ou plusieurs caméras. Les capteurs passifs mesurent l'énergie ambiante réfléchie par la scène. Si les conditions d'éclairage ne sont pas maîtrisées et les images obtenues posent de sérieux problèmes de compréhension dans un cadre général.

Vision active. Les capteurs actifs émettent de l'énergie, mise en forme spatialement, spectralement ou temporellement et mesurent son interaction avec la surface. La connaissance des caractéristiques de l'émetteur et du récepteur et l'interprétation du rayonnement réfléchi permet de remonter à l'information 3D. Les capteurs actifs optiques maîtrisent les conditions d'éclairage et sont capables d'interpréter non seulement l'intensité mais aussi le temps de vol d'une impulsion lumineuse ou la phase de l'onde réfléchie.

Vision monoculaire. Ces capteurs fournissent une seule image de la scène, que l'on essaie d'interpréter pour extraire l'information de profondeur de l'objet visée. Généralement des points de vue complémentaires sont indispensables pour la reconstruction de l'intégralité de l'objet. L'exploitation d'une séquence d'images peut simplifier le problème. Mais quoi qu'il en soit, ces méthodes, regroupées sous le terme de forme-à-partir-de-X, ne sont actuellement pas suffisamment précises. Elles

sont plutôt destinées à la reconnaissance des formes et à d'autres applications ne nécessitant qu'une description qualitative ou approximative de la scène.

Vision multioculaire. Dans ces systèmes, l'information de profondeur de la scène est calculée à partir de deux ou plusieurs images. Les capteurs Binoculaires traitent deux images afin d'obtenir la profondeur. Quelques systèmes de type radar laser produisent des images de profondeur et d'intensité recalées. Les images multiples peuvent fournir des informations complémentaires, mais la difficulté consiste à mettre l'information visuelle en correspondance. La stéréovision atteint une précision suffisante pour être utilisée dans des applications comme la photogrammétrie ou la reconstruction du relief à partir d'images aériennes ou satellitaires.

Par la suite, nous présentons les principales techniques utilisées en vision par ordinateur, pour obtenir l'information de profondeur.

Techniques radar. Les capteurs qui utilisent cette technique sont souvent étiquetés comme actifs car ils illuminent l'objet avec une source lumineuse (souvent un laser [CHE91], [CHE93]), et calculent l'information de profondeur à partir de l'énergie reflétée. La plupart des capteurs de profondeur de ce type utilisent des lasers comme source d'illumination et portent le nom de capteurs de profondeur laser. L'utilisation la plus intuitive des techniques de radar pour la numérisation de profondeur est la mesure du temps de vol. Puisque les rayons électromagnétiques voyagent à une vitesse constante, la distance à un point sur la surface d'un objet peut être déterminée en dirigeant une impulsion de lumière laser vers ce point et en mesurant la période de temps nécessaire pour que l'impulsion réfléchie du laser arrive au capteur. Cette méthode est tout à fait faisable pour la numérisation à longue distance, comme dans des capteurs de profondeur qui utilisent des techniques de radar laser, où le capteur est localisé à plusieurs centaines de mètres des objets à numériser. Une alternative à la mesure du temps de vol est d'illuminer sans interruption le point

sur la surface avec un signal laser modulé en amplitude. La différence de phase entre le signal laser incident et réfléchi est proportionnelle à la valeur de profondeur recherchée.

Techniques de triangulation. Les capteurs à triangulation sont très peu coûteux à construire, une simple caméra et un projecteur de lumière sont suffisants [BLA88]. Cependant, le logiciel nécessaire à l'obtention de l'information de distance est souvent plus complexe. L'idée fondamentale de la triangulation est la suivante : on projette sur l'objet un faisceau lumineux ponctuel, ensuite on étudie l'intersection du faisceau avec l'objet ce qui nous permet de calculer les coordonnées des points. En effet, connaissant la position de la source lumineuse (projecteur de rayon ou plan laser) par rapport à l'observateur (caméra), il est facile (par trigonométrie) de retrouver la distance du point considéré. Fréquemment, le rapport géométrique est obtenu par un procédé de calibration. Un diagramme simple d'un capteur de triangulation apparaît sur la Figure 1.2.

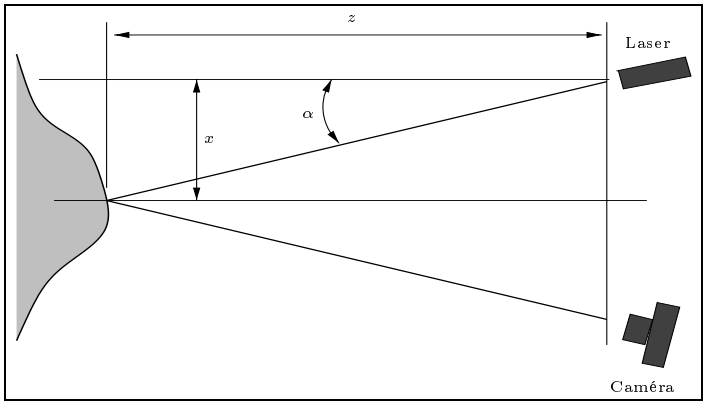


FIG. 1.2: La technique de triangulation

On peut classifier les capteurs par triangulation selon le type de lumière projetée :

– Projection d'un point. Un faisceau lumineux, habituellement issu d'un laser, illumine un point sur la surface de l'objet. Un détecteur monodimensionnel, tel qu'une barrette de photodiodes, suffit à l'acquisition du signal réfléchi.

A chaque acquisition, un point unique est numérisé sur la surface de l'objet mesuré.

- Projection d'un trait. Le faisceau peut être remplacé par un trait lumineux. Ce type de capteur est potentiellement plus rapide que les capteurs à projection de point, parce qu'à chaque acquisition, l'ensemble de la trace lumineuse est numérisé. Toutefois, un détecteur bidimensionnel est nécessaire, habituellement une matrice CCD.
- Projection d'un patron de lumière structurée. Il est également possible de projeter un nuage de points, des traits parallèles et des grilles [HAR90]. Ces méthodes permettent l'échantillonnage immédiat de toute une surface. Elles posent néanmoins des problèmes d'interprétation et sont intrinsèquement moins précises.

Techniques de stéréovision. Les techniques passives de stéréovision utilisent des contraintes entre deux ou plusieurs caméras pour calculer l'information de distance. La Figure 1.3 illustre le principe de la stéréovision. Tout point p d'une surface visible depuis les deux caméras se projette en p_1 sur le plan image P_1 et en p_2 sur le plan image P_2. Les plans de coordonnées de l'image de deux caméras sont reliés par une transformation connue. L'identification des points dans les deux images qui correspondent au même point 3D dans la scène nous permet de calculer les coordonnées du point 3D. Les problèmes difficiles dans la vision stéréo sont la sélection de caractéristiques identiques dans les deux images et l'établissement des correspondances. Typiquement, des points de haut gradient (bords de l'image) sont choisis comme points candidats pour la correspondance, et des procédures heuristiques de recherche tentant de former les correspondances.

Selon la provenance des images, la vision stéréo peut être classifiée en vision stéréoscopique statique et vision stéréoscopique dynamique.

- La vision stéréoscopique statique, utilise plusieurs vues prises selon des

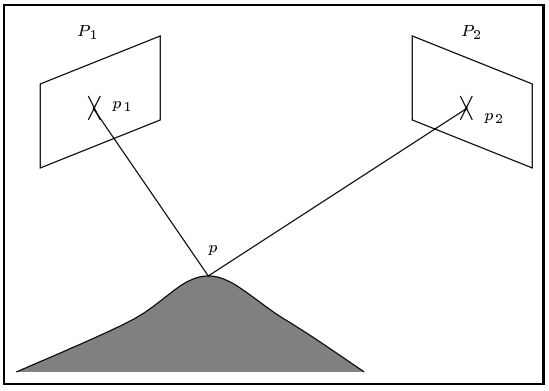


FIG. 1.3: La technique de stéréovision

positions différentes et au même instant ([BOL91], [CHA91a]).

– La vision stéréoscopique dynamique, utilise plusieurs vues prises à des instants différents. Pour une scène fixe, on déplace la caméra ([HOR93], [TIR92]). Pour le capteur fixe, on déplace l'objet.

Techniques de Moiré. On projette sur l'objet des grilles sinusoïdales de haute fréquence. En se basant sur le principe de différence de phase on crée des franges d'interférence. L'information contenue dans l'image de ces franges permet de retrouver le relief de la forme. Cette technique donne des mesures fiables, mais elle demande un appareillage important pour l'analyse les signaux.

Techniques acoustiques. C'est le principe de la télémétrie : on mesure le temps écoulé entre l'émission et la réception d'un train d'impulsions ultrasonores. L'inconvénient de cette méthode réside, d'une part dans la basse fréquence des impulsions ultrasonores qui peuvent donner des mesures erronées, et d'autre part l'acquisition des données par cette méthode est lente.

Techniques d'holographie interférométrique. Les interféromètres holographiques utilisent la lumière cohérente émise par une source laser pour produire des figures d'interférence. L'espacement en profondeur de deux franges

d'interférence holographique est proportionnel à la longueur d'onde de la lumière utilisée de même qu'il est proportionnel à la période des lignes de réseau pour des franges d'interférence de Moiré.

A part la stéréovision, l'image résultante de l'une des techniques citées correspond à un ensemble des points répartis sur une grille rectangulaire. Chaque point de cette grille est caractérisé par ses coordonnées (x, y, z), données soit dans le repère (référentiel) lié au capteur, soit dans le repère global.

La structuration régulière des points donne une information directe sur la notion de voisinage, information importante pour le calcul local des propriétés différentielles. De plus, cette structuration implique la constance de la densité sur l'ensemble de points du nuage.

Ainsi, la plupart des outils développés dans le domaine d'analyse d'images, qui permettent d'extraire des informations et de décrire les images, sont basés sur une structuration de grille régulière. Or dans de nombreux cas une vue est insuffisante pour englober l'objet, plusieurs vues souvent à directions croisées sont nécessaires, ce qui nous donne généralement un nuage de points non organisé.

Pour l'obtention de nos images 3D, nous utiliserons des capteurs télémétriques laser ; ce sont des capteurs actifs, monoculaires qui utilisent la technique de triangulation. Ils sont présentés plus en détail dans le chapitre suivant.

1.1.4 Placement automatique du capteur

Tout système de vision industrielle peut se décomposer en trois sous-systèmes [BEN94] :

1. Un module d'acquisition d'images, qui fournit les images issues des caméras d'intensité ou de profondeur.
2. Un module du traitement d'images, qui exploite les images issues du module précédent.

3. Un module d'interprétation des images, qui utilise les informations précédentes pour analyser la scène.

Le module d'acquisition d'images est généralement composé d'un sous-système de numérisation (caméra) et d'un sous-système pour le support et déplacement de la caméra. En effet, quand une caméra visualise des caractéristiques d'un objet depuis un point de vue particulier, une partie des caractéristiques de l'objet peuvent ne pas être visibles. Les raisons de ceci peuvent être : *i.* La caractéristique est cachée par une ou certaines parties de l'objet ou par d'autres objets dans l'environnement, *ii.* Les caractéristiques se trouvent en dehors des limites du champ visuel du capteur. Plusieurs images prises à différents points de vue sont donc nécessaires pour numériser toutes les caractéristiques visibles d'un objet. Donc, soit l'objet, soit le capteur doit être déplacé.

Dans la pratique, le capteur doit être mobile pour éviter les occlusions et pour pouvoir se positionner optimalement de façon à numériser les caractéristiques d'intérêt. Cette mobilité du capteur produit un nouveau problème : la gestion du déplacement du capteur. Pourtant, un module de choix automatique du placement des caméras peut s'avérer très utile pour donner au système de vision plus d'autonomie et de flexibilité. Ce module peut être intégré dans les séquences d'analyse d'images et mettre en évidence par conséquent la relation qui existe entre une tâche de vision donnée et les configurations acceptables des capteurs et des sources pendant l'exécution de cette tâche. Les avantages de passer par une telle procédure sont nombreux :

- Le positionnement de la caméra est automatique et systématique.
- Les erreurs humaines sont éliminées.
- Les procédures de synthèse de positionnement de la caméra conduisent à une description complète des positions acceptables du capteur.

La question qui se pose alors est la suivante : comment placer le ou les capteurs pour numériser un objet (ou un ensemble d'objets) donné ? L'étude d'un tel problème

conduit généralement à un ensemble de positions possibles de capteurs et se ramène donc à un problème d'optimisation du placement selon des critères bien précis.

La détermination de la meilleure position d'emplacement de la caméra a toujours été une question importante dans des domaines de recherche telles que la navigation de robot, la reconnaissance d'objets, l'inspection et la manipulation automatiques. Le but de l'inspection est de tester si un objet convient pour une tâche donnée. Dans le contexte industriel ceci implique d'évaluer la conformité des objets 3D manufacturés aux tolérances géométriques. Pourtant, la réalisation de ce but exige que les dimensions de l'objet soient exactement mesurées. Les systèmes de vision conviennent aux tâches d'inspection non seulement en raison de leur vitesse, mais également en raison de l'exactitude et de la flexibilité élevée de mesure offertes. La flexibilité se trouve dans la capacité de modifier l'emplacement et l'orientation des points de vue de la caméra pour adapter des changements dans la forme de l'objet à examiner.

L'information qui est souvent disponible peut être employée à déterminer automatiquement beaucoup de paramètres pour l'emplacement du capteur. Par exemple, l'information géométrique et physique des objets peut être extraite à partir des modèles de CFAO de ces pièces qui sont souvent disponibles dans l'environnement de fabrication contemporain.

L'automatisation complète de la tâche d'inspection de pièces manufacturées exige la mise au point des stratégies de placement du capteur pour l'acquisition des données.

1.2 Etat de l'art

L'état de l'art que nous avons réalisé est composé de trois parties. Tout d'abord, dans la section 1.2.1 nous présentons la littérature concernant le problème de planification du placement du capteur pour l'acquisition des images 3D. Dans une

deuxième partie (section 1.2.2), nous discutons des articles qui traite du problème d'inspection ; finalement nous terminons dans la section 1.2.3 par une analyse des travaux sur la calibration de l'ensemble support mécanique-caméra, ainsi que sur la modélisation du bruit dans le processus de numérisation. Dans chaque section nous présentons un résumé des travaux les plus représentatif et une discussion plus globale de ces travaux par en fonction de notre domaine d'intérêt, qui est le contrôle de tolérances à l'aide de capteurs télémétiques.

1.2.1 Planification de l'acquisition des images

Le problème de la planification des points de prise de vue d'un capteur peut être présenté de la façon suivante : pour une information donnée concernant l'environnement (objet sous observation, capteur disponible) et la tâche que le système doit accomplir (détection de caractéristiques, reconnaissance d'objets, reconstruction, inspection), développer des stratégies qui de façon automatique déterminent les paramètres des capteurs (la position, l'orientation et les paramètres optiques des capteurs) pour réaliser la tâche avec un degré spécifié de satisfaction.

Tarabanis [TAR95a] a fait un compte rendu dans le domaine de la planification des capteurs de vision (caméras, capteurs télémétriques, appareils d'illumination) basés sur des modèles. Il classifie les travaux en trois groupes :

1. Le premier groupe traite de la détection des caractéristiques des objets. Ici plusieurs travaux essaient de déterminer de façon automatique les paramètres des capteurs de vision pour une caractéristique et une position connues et qui satisfont quelques contraintes spécifiées lors de la numérisation. Dans ce cas nous avons besoin d'une connaissance *a priori* de l'environnement, ainsi que des positions initiales des objets. Les paramètres des capteurs sont généralement déterminés dans un processus hors ligne et utilisés lors du processus de numérisation.
2. Dans le deuxième groupe Tarabanis présente les travaux qui développent des

stratégies de numérisation pour les tâches de reconnaissance et de localisation des objets, basées sur des modèles. Les informations connues *a priori* sur la scène sous forme de modèles des objets possibles, des modèles de capteur, et l'information acquise à ce point sont compilées pour établir les stratégies de localisation et d'identification.

3. Finalement, le troisième groupe étudie le problème de la détermination de stratégies de numérisation pour la reconstruction des pièces. Le modèle de la scène est construit petit à petit par des numérisations successives du monde inconnu à partir de certaines configurations, qui sont déterminées en utilisant l'information qui a déjà été acquise. A chaque étape de la numérisation, une nouvelle configuration des capteurs est choisie, basée sur un critère particulier, par exemple l'habilité de numériser la plus grande partie de l'espace inconnu.

Les travaux de planification du processus de numérisation pour la tâche d'inspection sont classés dans le premier groupe. Car en inspection, souvent, on n'est intéressé à numériser que quelques surfaces sur lesquelles on a défini des tolérances. La stratégie doit connaître la position et l'orientation de la pièce. La détermination de points de vue de numérisation est un processus qui est généralement fait hors ligne. Notre travail est similaire à celui du deuxième groupe car nous avons une connaissance *a priori* des modèles des objets. Quant au troisième groupe, malgré notre connaissance *a priori* de la pièce, nos travaux sont néanmoins similaires, parce que la configuration du capteur change au fur et à mesure que le processus de numérisation avance. Par la suite nous présentons les travaux récents dans ces trois groupes.

Travaux orientés vers la détection des caractéristiques et vers l'inspection des objets

Les travaux dans cette catégorie sont portés sur différents types des systèmes physiques de numérisation (capteurs, supports mécaniques), mais leur stratégie de

numérisation est, en général, optimisée pour obtenir le minimum de points de vue, ce qui permet d'avoir une image complète de l'objet ou de ses caractéristiques d'intérêt. Par contre, nous voulons optimiser la stratégie pour obtenir des données 3D avec la plus grande précision, tout en reléguant le nombre des points de vue à un niveau moins important.

Tarbox et Gottschlich [TAR95d], [TAR95c] proposent le système IVIS (Integrated Volumetric Inspection System) pour la planification d'un ensemble d'opérations qui mesurent complètement la surface d'une pièce à inspecter. Le système d'acquisition utilisé se compose d'une caméra CCD et d'une source lumineuse structurée qui sont rigidement montés à une distance fixe l'un de l'autre. La source lumineuse émet un plan de lumière et est montée sur un moteur pas à pas de sorte que le plan balaye un volume conique lors de la rotation de la source lumineuse. IVIS procède en deux étapes : une phase hors ligne, où un plan d'acquisition est produit pour chaque objet de référence, et une phase en ligne où on exécute le plan d'acquisition préplanifié. Les contraintes imposées au système sont : *i.* Les focales de la caméra CCD et de la source lumineuse doivent être placées dans une sphère (la sphère de vision), *ii.* La caméra CCD et la source lumineuse sont dirigées vers le centre de la sphère, *iii.* la source lumineuse doit être placée à une distance fixe de la caméra CCD, *iv.* la pièce à inspecter doit être totalement comprise dans la sphère de vision, et *v.* le système doit avoir une bonne estimation de la position initiale de la pièce. Pour Tarbox, un point d'une surface est mesurable s'il est visible par la caméra et par la source lumineuse. Le problème de planification est défini comme étant celui de trouver une séquence d'opérations de détection, de façon qu'elle soit capable de mesurer tous les points mesurables d'une surface ou d'une pièce. Ce problème se présente comme étant un problème général de recherche dans un graphe, où les nœuds du graphe représentent les états d'inspection et les arcs représentent les opérations de la numérisation. Trois algorithmes ont été évalués afin d'obtenir la meilleure prochaine vue en fonction de

la mesurabilité des points. En fonction des défauts détectés sur l'objet, des séquences d'acquisition supplémentaires peuvent être générées en ligne.

Trucco *et al* [TRU97] présentent le système GASP (General Automatic Sensor Planning) pour la planification de capteur. GASP détermine les positions optimales pour la tâche d'inspection, en ayant connaissance des modèles des capteurs et des pièces. Le système physique est composé d'une caméra télémétrique laser et de trois caméras CCD. Les caméras sont montées sur une table de translation mécanique. La pièce est limitée seulement par la taille car la caméra sur le support mécanique doit pouvoir se déplacer. Les modèles de l'objet et des capteurs doivent être connus. GASP utilise une heuristique de génération et de test pour déterminer les points de vue optimaux pour l'inspection. Un nombre fini de points de vue sont simulés et sont placés dans une grille sphérique entourant l'objet. Le mérite de chaque point de vue, qui est fonction de la visibilité et de la mesurabilité, est déterminé à partir de la connaissance de la tâche du système, des modèles et des capteurs. Son maximum définit la configuration de numérisation optimale. GASP utilise une représentation appelée FIR (Feature Inspection Representation) qui contient pour chaque caractéristique la solution explicite du problème du positionnement du capteur. La génération de FIR est une opération qui prend beaucoup de temps, mais qui est réalisée hors ligne. Plusieurs représentations peuvent être obtenues efficacement à partir de la représentation de base : *i.* Inspection simultanée de plusieurs dispositifs : il est souhaitable qu'un capteur examine plusieurs aspects simultanément à partir d'une position fixe dans l'espace. *ii.* Inspection stéréo : qui consiste à trouver la position optimale d'un système stéréo (deux caméras) à l'intérieur de la région de visibilité de l'aspect à examiner. *iii.* Inspection séquentielle : pour un ensemble d'aspects donné, l'objectif est de trouver un chemin de numérisation dans l'espace qui mène le capteur aux positions optimales d'inspection associées à chaque aspect. Des exemples de placements optimaux

calculés par GASP sont présentés dans l'article.

Mason et Grün [MAS95a] proposent une méthode de placement automatique d'un système de vision passif multiposte, pour l'obtention des dimensions d'un objet 3D. Le terme "poste" est employé pour dénoter la position et l'orientation à laquelle une image est prise. Une configuration d'un minimum de deux postes séparés dans l'espace est exigée pour ainsi pouvoir mesurer la profondeur d'un objet en utilisant la méthode de triangulation. Cependant, quand des dimensions précises d'objet sont souhaitées, l'utilisation d'un système multiposte est préférable. Un système multiposte est défini comme la mesure d'un objet quand toutes (ou au moins, la plupart) des régions d'intérêt apparaissent et sont mesurables sur trois ou plusieurs images séparées dans l'espace. La méthode *bundle*, qui est un modèle mathématique rigoureux pour estimer les quantités inconnues dans la triangulation optique, est utilisée. Pour la conception d'un système multiposte il est nécessaire de connaître les divers paramètres de conception tels que la précision et la fiabilité du placement du dispositif. La conception est divisée en trois types : *i.* Conception d'ordre zéro, habituellement pour exprimer la position spatiale de l'objet dans un système référentiel 3D. *ii.* Conception de premier ordre, principalement pour déterminer le nombre de postes qui doivent composer le système, où ils devraient être placés, et comment ils devraient être orientés. *iii.* Conception de deuxième ordre, pour déterminer la variance des mesures. Le système CONSENS (CONfiguration of SENSor configurations) est présenté. Il est composé de trois logiciels : un système expert commercial pour les représentations de la connaissance et du raisonnement hybride, un module de CAO, et le logiciel de la méthode *bundle*. L'entrée à CONSENS inclut les caractéristiques d'inspection, un modèle CAO, et une définition d'arrangement d'observations. Le modèle de CAO consiste en une description surfacique polyédrique de l'objet sous inspection et de la zone de travail. Un système multiposte composé de 4 postes a été utilisé pour examiner une

surface de $2m \times 1m$, située dans une zone de travail contenant un certain nombre d'obstructions, et l'exactitude de mesure exigée était de $\pm 0.25mm$.

Tarabanis *et al* [TAR95b], [TAR96] décrivent une méthode de planification nommée *planification de système de vision* (Machine Vision Planning). Le système MVP détermine automatiquement les valeurs de paramètres de capteur de vision qui répondent à certaines exigences des tâches de détectabilité de caractéristiques. Le système est composé d'une caméra CCD montée sur un robot manipulateur à cinq degrés de liberté, dans une configuration *hand/eye*[1]. MVP inclut une méthode qui prend comme entrée des informations sur la géométrie de l'objet à partir du modèle CAO et des modèles de la caméra et des lentilles, et détermine les poses et les configurations pour lesquelles les caractéristiques d'intérêt des objets polyédriques sont : *i.* visibles (des positions exemptes d'occlusion du capteur), *ii.* resolvables par le capteur selon les spécifications données, *iii.* en focus, et *iv.* contenues entièrement dans le champ visuel du capteur. Les paramètres planifiés par le MVP et qui définissent un point de vue sont : *i.* la position du capteur par rapport à la pièce, *ii.* l'orientation du capteur, et *iii.* les paramètres optiques (la longueur focale, distance du point nodal au plan de l'image et l'ouverture des lentilles). Les contraintes imposées au système sont les suivantes : *i.* Les modèles des objets ainsi que des surfaces d'intérêt doivent être connus pour satisfaire le critère de visibilité. *ii.* Le système doit connaître la distance maximale entre pixels voisins, pour bien déterminer la résolution du capteur. *iii.* Pour satisfaire le critère de focus, le système doit connaître la dimension minimale de chaque pixel dans le plan de l'image. Tout point de vue sélectionné garantit que les contraintes du système sont respectées. Le regroupement de ces contraintes est formulé comme un problème d'optimisation sous contraintes. Une solution est retenue si elle satisfait les contraintes avec un certain degré de tolérance.

[1]Configuration où la caméra est montée sur la poignée du bras d'un robot.

Abrams *et al* [ABR97] ont développé un système capable de planifier les positions, les orientations et les paramètres optiques d'une caméra pouvant être utilisée dans un milieu dynamique. Ce travail peut être considéré comme une extension du travail de Tarabanis. Nous rappelons que dans un système dynamique les pièces peuvent être en mouvement. Pour pouvoir satisfaire la contrainte de visibilité en tout temps, les modèles de mouvement de tous les objets présents dans la scène sont requis. Une période de temps de validité est associée à chaque point de vue.

Travaux orientés vers les tâches de reconnaissance et de localisation

Les travaux dans ce groupe ont une connaissance *a priori* des objets à reconnaître ou à localiser, elle est représentée par des modèles qui donnent une forme grossière des objets, car leur intérêt n'est pas l'inspection. Leur stratégie planifie le prochain point de vue en maximisant certaines fonctions de probabilité ou en minimisant des fonctions d'incertitude.

Whaite et Ferrie [WHA91], [WHA97] définissent l'exploration autonome comme un processus dans lequel un observateur peut agir avec son entourage en se déplaçant et en rassemblant de l'information afin de se renseigner sur son environnement. Ces propriétés sont essentielles pour les systèmes autonomes qui doivent fonctionner dans les environnements non structurés où il est difficile (sinon impossible) de caractériser l'environnement à l'avance. En effet, recevoir passivement des mesures du monde extérieur n'est pas assez, car les données que l'on obtient sont toujours incomplètes, et les inférences faites à partir d'elles sont souvent inacceptables. Si l'on doit construire des machines qui fonctionnent de façon autonome, elles seront toujours confrontées à ce dilemme, et ne peuvent réussir que si elles jouent un rôle beaucoup plus actif. Les auteurs présentent une machine autonome qui cherche délibérément ces régions de l'environnement qui maximisent la fidélité de ses représentations internes, et continue à rechercher jusqu'à ce que

ces représentations soient acceptables. Ils utilisent des modèles volumiques (non-linéaires) pour représenter les surfaces dans une scène 3D ; cependant, le système est linéarisé, et une analyse linéaire est appliquée. Dans un premier temps, les auteurs développent une description d'un système où l'emplacement du capteur est déterminé par un ensemble de paramètres de contrôle, et dans lequel l'interaction entre le capteur et son environnement est modelisée par la combinaison linéaire d'un ensemble arbitraire de fonctions de base. Ils réalisent une évaluation de maximum de vraisemblance des paramètres modèles (inconnus) à partir d'un ensemble de mesures bruitées. Ils rapportent que les paramètres de covariances représentent et définissent le modèle d'incertitude. Ils considèrent le problème comme la réduction de l'incertitude en prenant une mesure supplémentaire, et trouvent une solution théorique à ce problème : que les meilleurs emplacements du capteur sont ceux où la capacité de prévoir est la plus mauvaise. Ceci mène à une stratégie de planification qui utilise ce modèle d'incertitude comme base pour choisir les points de vue. La convergence de la stratégie quand elle est appliquée aux modèles linéaires est prouvée, et des résultats expérimentaux pour les modèles non-linéaires sont présentés.

Ye et Tsotsos [YE 95], [YE 99] proposent une stratégie de planification de capteur par un robot équipé d'une caméra pour la recherche d'un objet. La connaissance de l'emplacement de l'objet par la caméra est codée comme une densité de probabilité discrète qui est mise à jour chaque fois qu'une action de numérisation se produit. Chaque action de numérisation de la caméra est définie par un point de vue, une direction de la vue, un champ visuel, et l'application d'un algorithme d'identification. La planification du capteur est évaluée comme un problème d'optimisation : le but est de maximiser la probabilité de détecter l'objet avec le coût minimum. Afin de déterminer efficacement (vis-à-vis du temps) les actions de numérisation, l'espace complet des actions possibles de la caméra est décomposé dans un ensemble fini

d'actions qui doivent être considérées. La prochaine action est choisie parmi cet ensemble en comparant la probabilité de détection et le coût de chaque action. Quand la détection est peu probable à la position actuelle, le robot est déplacé à une autre position pour laquelle la probabilité de la détection de l'objet est plus élevée.

Kovačič *et al* [KOV98] présentent une méthode de planification de séquences de vue pour l'identification et la détermination de l'orientation des objets 3D de forme quelconque. La méthode se compose d'une étape d'apprentissage dans laquelle un plan d'identification et de détermination de l'orientation est obtenu et d'une étape dans laquelle l'identification réelle et la détermination de l'orientation ont lieu. Dans l'étape d'apprentissage, les objets sont observés selon toutes les vues possibles et chaque vue est caractérisée par un vecteur d'aspect. Ces vecteurs sont alors employés pour structurer les vues dans des groupes basés sur leur proximité dans l'espace d'aspects. Selon l'ensemble d'objets, les différents types d'aspect choisis pour caractériser les vues, et la fiabilité du processus d'identification et de détermination de la position, ces groupes peuvent contenir seulement quelques-unes ou beaucoup de vues. Pour résoudre l'ambiguïté restante dans chacun des groupes, une stratégie qui exploite l'idée d'adopter des positions supplémentaires a été conçue. Ils ont développé un processus qui analyse la transformation de différents groupes sous des points de vue changeants, dans plusieurs groupes plus petits. Ceci a comme conséquence une planification optimale du prochain point de vue quand les vues supplémentaires sont nécessaires pour résoudre les ambiguïtés. Ce plan guide alors l'identification réelle et la détermination de l'orientation d'un objet inconnu dans une position inconnue. Des résultats sont montrés en utilisant un système physique composé d'une plaque tournante motorisée et une caméra CCD.

Travaux orientés vers la reconstruction

Dans ces travaux, aucun modèle d'objet n'est connu et les systèmes planifient le prochain point de vue de façon à reconstruire les objets tout en utilisant des propriétés géométriques obtenues à partir des données qui ont été déjà acquises. Les problèmes d'occlusion et de collision sont traités avec un intérêt particulier.

Pito [PIT96], [PIT97] présente une solution au problème de la détermination automatique de la meilleure position suivante (NBV - *Next Best View*) d'une caméra télémétrique pendant le processus de numérisation d'une pièce pour sa reconstruction. Le système est composé d'une caméra laser, d'une plaque tournante commandée par ordinateur et munie d'un gabarit de recalage sur lequel la pièce à numériser est placée. La caméra projette des rayons laser dans le volume de visibilité qui est un cylindre. Une image de profondeur est prise en déplaçant la caméra autour d'un point fixe et en acquérant les données. Pito fait quelques suppositions pour le bon fonctionnement du système : *i.* il est possible de déterminer la surface normale pour chaque point de l'image, *ii.* l'information de discontinuité de profondeur peut être obtenue à partir des données de profondeur, et *iii.* les aires dans les surfaces de la pièce qui ont déjà été numérisées et qui ne présentent pas de discontinuités ont été numérisées avec une densité de données acceptable. Une fois le rayon de rotation de la caméra laser fixé, on détermine les paramètres de prise d'échantillons en calibrant le système. Le seul paramètre qui reste variable et qui définit la NBV est l'angle de rotation de la plaque tournante. L'algorithme trouve une NBV telle qu'elle numérise une nouvelle portion de la pièce déjà numérisée, et telle qu'elle numérise la plus grande portion possible de pièce qui n'a pas encore été numérisée.

Papadopoulos [PAP97a], [PAP97b] propose une méthode pour automatiser la numérisation géométrique de surfaces tridimensionnelles à l'aide d'un capteur à triangulation active avec une faible profondeur de champ. Le support physique

du capteur est composé de quatre platines mécaniques motorisées, fixées sur un banc de mesure en granit. Le capteur est orientable manuellement autour de son axe, avec seulement quatre positions prédéfinies séparées de 90°. Son objectif est la numérisation exhaustive de la géométrie de la scène. Le critère d'arrêt de la numérisation est que les points échantillonnés (points sur la surface reconstruite) doivent être séparés d'une distance inférieure au pas d'échantillonnage souhaité. Comme le capteur a une faible profondeur de champ, le problème de collisions est pris en compte. Pour éviter celles-ci, le logiciel de planification doit clairement identifier les parties occupées et les parties libres de l'espace, et pour cela, le système doit maintenir une représentation de la scène. Cette représentation sert aussi à juger l'exhaustivité des données et arrêter le processus de numérisation. Pour l'obtention de cette représentation, l'objet à numériser est confiné à l'intérieur d'un espace de travail étiqueté *inconnu*, hors duquel le capteur peut se déplacer sans risque de collision. Le capteur doit peu à peu identifier l'espace *vide* pour se rapprocher de l'objet et arriver à le numériser. La stratégie de numérisation est divisée en deux étapes. Initialement le capteur utilise uniquement les mouvements de translation (avec une orientation constante) et génère une image de profondeur plane. Le deuxième niveau combine différentes vues pour obtenir la numérisation complète de l'objet. Le problème du choix de la prochaine vue reste à résoudre.

Maver et Bajcsy [MAV93], [MAV95] présentent une stratégie pour acquérir des données 3D dans une scène inconnue. La scène est mesurée par un système de triangulation : une source lumineuse qui produit un plan de lumière couplée à une caméra CCD. L'image de profondeur est obtenue en balayant la scène avec une série de plans d'éclairage parallèles. Ceci peut être réalisé en déplaçant le support de scène à une vitesse constante et perpendiculaire au plan d'éclairage ou en déplaçant l'origine du système de triangulation dans un plan orthogonal au plan d'illumination. Le problème de la numérisation de pièces 3D est divisé en deux sous-problèmes dus

à deux types d'occlusion : *i.* Occlusion de la caméra, qui surgit quand une partie de la surface éclairée de la scène est cachée à la caméra CCD par une autre partie de la scène. *ii.* Occlusion de lumière, qui apparaît quand le rayon de lumière n'atteint pas une partie de la surface dans la scène parce qu'il est réfléchi par une autre partie de la scène. Après l'acquisition de l'image de profondeur d'une scène, les régions sans mesurer (occlusion de premier type) sont extraites. Les données manquantes sont acquises en tournant le système de capteur dans le plan de numérisation, qui est défini par le premier balayage. Dès qu'une image complète de la surface illuminée a été réalisée, les régions de données manquantes dues au deuxième genre d'occlusions sont localisées. Puis, les directions des prochains plans de lecture pour l'acquisition des données 3D sont calculées.

Banta [BAN95] présente un système de numérisation capable de déterminer automatiquement les meilleures position et orientation suivantes pendant le processus de reconstruction d'une pièce. L'espace de travail est observé par un capteur qui se déplace sur une sphère à distance constante autour de l'objet. Dans leur simulation, seule l'orientation de la caméra est prise en compte, sans que la position de la source lumineuse et les phénomènes d'ombre et d'occlusion propres aux capteurs à triangulation n'interviennent dans les calculs. Dans chaque image de profondeur, les trois points de plus forte courbure sont identifiés. A chacun de ces trois points correspond une position du capteur sur la sphère, définie par la normale moyenne au voisinage du point. L'espace de travail est représenté par un volume de 128 X 128 X 128 voxels étiquetés *occupés* ou *inoccupés* à travers lesquels une projection de rayon permet de choisir parmi les trois orientations celle qui traverse le plus de voxels *occupés*. Ceci n'a été appliqué qu'à des données synthétiques.

ZHA *et al* [ZHA97] proposent une approche au problème de création des modèles 3D sur la base de la planification du meilleur point de vue. Afin de modéliser l'objet, un bras de robot est utilisé pour placer la pièce dans une position arbitraire par

rapport à un capteur de profondeur fixe. L'image de profondeur est prise par un système stéréo laser et un modèle initial de l'objet est produit. Par la suite, les quatre étapes suivantes sont répétées : *i.* Détermination du meilleur point de vue et utilisation du bras de robot pour déplacer l'objet à la position correspondant au point de vue déterminé. *ii.* Prendre l'image de profondeur. *iii.* Faire le recalage entre l'image prise et le modèle partiel de l'objet. *iv.* Intégrer l'image au modèle. Le processus se termine quand toutes les surfaces d'objet ont été numérisées. Un algorithme pour résoudre le problème du meilleur point de vue est présenté. Il consiste en une évaluation analytique ou heuristique des divers points de vue possibles et détermine le meilleur point de vue suivant. L'évaluation est basée sur le calcul des facteurs tels que l'extension de la numérisation, la superposition, et des contraintes d'adoucissement sur l'intégration de données. Des points de vue potentiels sont définis en subdivisant l'espace de travail en petites cellules. Tous les points de vue potentiels sont situés sur la surface d'une sphère avec l'objet à son centre.

Discussion

Nous avons vu que la définition et la mise en œuvre d'un algorithme d'acquisition d'images 3D est un problème complexe qui dépend de l'objectif que l'ont s'est fixé. Celui-ci est fonction de caractéristiques tels que :

- **Que veut-on faire.** Dans une première classification nous avons présenté des travaux orientés vers la détection des caractéristiques et vers l'inspection des objets [MAS95a], [TAR95b], [TAR95c], [TAR95d], [TAR96], [ABR97] et [TRU97]. Le but de ces travaux étant la détection et l'inspection des caractéristiques, les modèles précis des objets doivent être impérativement connus. Ces modèles sont utilisés pour réaliser la planification du processus de numérisation hors ligne. La stratégie de numérisation est optimisée pour numériser la pièce ou la caractéristique d'intérêt avec le minimum de points de vue.

Des travaux orientés vers les tâches de reconnaissance et de localisation sont présentés dans [WHA91], [YE 95], [WHA97], [KOV98] et [YE 99]. Le but de ceux-ci étant la reconnaissance et la localisation des objets, ils ne requièrent qu'un modèle grossier de ceux-ci. Puisque la position et l'orientation des objets ne sont pas connues, la planification du processus de numérisation est réalisée en ligne. La stratégie de numérisation est généralement optimisée pour pouvoir acquérir la plus grande quantité d'informations à partir du nouveau point de vue. Ces systèmes sont généralement confrontés à des problèmes des collisions. [MAV93], [BAN95], [MAV95], [PIT96], [PAP97a], [PAP97b], [PIT97] et [ZHA97] présentent des travaux dédiés à la reconstruction. Ceux-ci n'ont aucune information *a priori* des objets à reconstruire, par conséquent la planification de numérisation est un processus réalisé complètement en ligne. Un nouveau point de vue est obtenu, à partir de l'information déjà acquise, de façon à ce qu'il fournisse la plus grande quantité d'informations nouvelles. Ces systèmes sont confrontés à des problèmes d'occlusion et de collision.

– **Avec quoi veut-on le faire.** Les algorithmes diffèrent quant au type et au nombre de capteurs et de support mécanique.

  Pour le type et le nombre de capteurs, on trouve les systèmes composés par un capteur de profondeur [PAP97a], [PIT97] et [ZHA97] ; par une seule caméra CCD [TAR95b] et [KOV98] ; par une caméra CCD couplée à une source lumineuse [MAV95] et [TAR95c] ; et des systèmes composés par une source lumineuse et plus d'une caméra CCD [MAS95a] et [TRU97].

  Pour le type de support mécanique, on trouve des systèmes qui utilisent des bras de robot [TAR95b] et [ZHA97] ; des systèmes robotisés [YE 95] et [WHA97] ; des systèmes composés par une table de translation mécanique [MAS95a], [MAV95], [PAP97a] et [TRU97] ; ou encore par une table de rotation mécanique [TAR95c], [PIT97] et [KOV98]. Nous n'avons pas trouvé dans la littérature de travaux qui développent un algorithme d'acquisition d'images 3D pour des systèmes

utilisant comme support mécanique une machine à mesurer tridimensionnelle.

En fonction de l'objectif du système de numérisation chaque stratégie d'acquisition doit respecter les différentes contraintes imposées au système (topologie et dimensions de la pièce, connaissance du modèle de la pièce, etc). La sortie du système définit un ensemble de points de vue ou des paramètres de numérisation (position, orientation et trajectoire de déplacement des capteurs) qui sont obtenus en optimisant certaines variables (nombre des points de vue, plus grande information, trajectoires minimales) et en respectant des critères imposés au système (visibilité de l'objet, trajectoire libre de collisions, distribution des points acquis, etc).

Dans ce travail nous allons définir et mettre en œuvre un algorithme d'acquisition d'images 3D, en utilisant des capteurs télémétriques de haute précision montés soit sur une MMT soit sur un bras de robot, l'objectif étant le contrôle des tolérances de pièces industrielles. Par conséquent la principale variable à optimiser est la précision des données acquises. A notre connaissance, les stratégies de numérisation existantes n'optimisent pas cette variable.

1.2.2 Vérification automatique de tolérances

Beaucoup de travaux utilisant des images 2D ont été réalisés pour l'inspection. **Moganti *et al*** [MOG96] présentent une bonne revue des travaux d'inspection de PCB (Printed Card Board). Il y a moins de travaux portant sur l'inspection de caractéristiques géométriques en utilisant ce type d'images, la raison étant peut être du a la difficulté d'obtenir des données adéquates. Nous présentons rapidement quelques-uns de ces travaux.

Edinbarough *et al* [EDI95] présentent des modèles mathématiques et des algorithmes pour un système visuel d'inspection de tolérances géométriques d'objets circulaires. La détermination de l'erreur de circularité est basée sur l'approche de minimisation de zone. Le système utilise une caméra CCD noir et blanc. Après la numérisation de l'objet à contrôler, l'erreur de circularité est calculée à partir du

contour de l'objet en le comparant avec le modèle de circularité.

Chen et Su [CHE96] présentent un système d'inspection qui mesure des dimensions et la concentricité d'assemblage. Des images 2D sont prises avec une caméra CCD. Après quelques traitements, des algorithmes pour la reconnaissance de la forme des trous intérieurs sont utilisés. Dans le processus d'inspection les dimensions et la concentricité trouvés sont comparés aux valeurs de référence dans une base de données.

Modayur *et al* [MOD92] ont développé un système d'inspection basé sur une théorie de tolérancement cohérente pour vérifier des pièces manufacturées 3D à partir des images 2D. Les images 2D sont comparées aux modèles CAO des pièces. Les points importants de leur travail sont : *i.* L'utilisation de définitions précises des tolérances géométriques appropriées pour leur usage dans le traitement d'image. *ii.* Le développement des algorithmes de mesure correspondant directement à ces définitions. *iii.* L'utilisation des incertitudes dans les tâches de mesure. *iv.* L'utilisation de cette information d'incertitude dans le processus décisionnel. Les résultats expérimentaux vérifient les valeurs d'incertitude obtenues statistiquement et montrent que les probabilités d'erreur obtenues avec la propagation d'incertitude sont inférieures à celles obtenues sans la propagation d'incertitude.

Une revue très intéressante des systèmes et techniques dans le domaine de l'inspection automatique est celle présentée par **Newman et Jain** [NEW95a]. Ils élaborent une étude sur la taxonomie des systèmes d'inspection basés sur leur système de numérisation. Ce dernier englobe plusieurs systèmes qui utilisent des images binaires, des images à niveaux de gris, des images couleur et des images de profondeur. Les techniques d'inspection sont classées selon deux approches générales :

1. La première approche implique d'apparier un descripteur d'un modèle sans défaut (souvent c'est une image synthétique) à l'image numérisée de l'objet

examiné. Les objets qui n'ont pas de défauts s'ajustent bien au modèle.

2. La deuxième approche implique d'extraire des caractéristiques de l'objet numérisé et de comparer ces caractéristiques à une description ou à une liste de règles qui décrivent un modèle idéal. Si toutes les règles sont satisfaites, l'objet est considéré sans défaut.

Dans leur étude, quelques systèmes d'inspection basés sur les modèles CAO sont examinés en détail.

Noble [NOB95], présente les défis actuels des algorithmes de vision par ordinateur pour des applications de fabrication. Le travail est concentré sur les traitements basés sur les descripteurs. Les descripteurs géométriques fournissent une base pour l'analyse des caractéristiques et l'identification et l'adaptation du modèle en utilisant des méthodes statistiques. Trois observations, quant à la recherche sur les systèmes de vision industrielle, tirées de leur revue bibliographique sont que : *i.* La recherche en vision industrielle s'est traditionnellement concentrée sur l'évaluation des produits plutôt que sur l'amélioration des processus de fabrication. *ii.* L'approche la plus populaire pour l'inspection est basée sur les modèles de CAO. *iii.* Et que la technologie industrielle de vision tend à être assez inflexible et devient rapidement obsolète quand les processus de fabrication changent. L'intérêt d'utiliser des modèles CAO pour l'inspection provient du fait que ceux-ci constituent une description exacte de l'objet. Il existe cependant quelques barrières à leur utilisation pour l'inspection visuelle automatique : *i.* Les modèles de CAO ne sont pas toujours disponibles, car même s'ils existent, trop fréquemment ils ne sont pas mis à jour. *ii.* Une pièce manufacturée peut différer du modèle de conception mais peut être fonctionnellement acceptable. *iii.* Les normes de dimensionnement et tolérancement traitent seulement de l'incertitude géométrique. Il n'est pas certain que ces normes soient adéquates pour la métrologie visuelle où l'incertitude géométrique et l'erreur de mesure doivent être prises en considération.

Dans la section 1.2.1, nous avons présenté quelques travaux qui utilisent des images de profondeur dans le processus d'inspection. Nous y avons présenté quelques méthodes utilisées pour déterminer les points de vue de numérisation. Maintenant nous allons analyser les travaux portant sur l'inspection automatique que l'on trouve dans la littérature. Dans IVIS (Integrated Volumetric Inspection System), **Tarbox et Gottschlich** [TAR95C] présentent une approche de l'inspection visuelle automatisée basée sur la comparaison d'un modèle volumique d'un objet de référence à un modèle volumique d'un objet réel qui est créé itérativement à partir des données du capteur. La nouveauté de cette approche est la façon dont des objets sont modélisés et les comparaisons effectuées. Les objets sont modélisés comme des volumes plutôt que de comme une collection de surfaces ou de caractéristiques. Par conséquent, le modèle peut être comparé en exécutant des opérations volumiques et de positionnement. Les volumes sont représentés par des entités volumiques discrètes qui sont codées au moyen d'octrees. La justification la plus importante pour l'utilisation des représentations volumiques dans l'inspection est qu'une telle représentation se prête naturellement aux opérations de comparaison et d'analyse tridimensionnelle. Une deuxième raison pour leur utilisation est que des modèles volumiques partiels créés à partir des numérisations simples sont facilement combinés pour former un modèle complet d'objet. Un autre avantage significatif des représentations volumiques discrètes est qu'il n'y a aucun besoin d'identifier différents "aspects" géométriques pendant les opérations d'inspection. Cette caractéristique enlève également la nécessité de segmenter les données 3D, ce qui est souvent nécessaire avec les systèmes qui construisent les modèles de surface basés sur les données du capteur. Un dernier avantage est que des tolérances peuvent facilement être incorporées au modèle d'objet de référence aussi bien que des incertitudes du modèle numérisé de l'objet. IVIS contrôle les spécifications géométriques en vérifiant que l'image de la pièce est contenue dans l'objet de référence. Les auteurs argumentent que des analyses supplémentaires peuvent

facilement être exécutées en utilisant l'infrastructure d'IVIS. Celles-ci incluent : *i.* L'association d'une mesure de validité à l'objet d'inspection (très bon, bon, moyen, adéquat). *ii.* La détermination des opérations d'usinage pour rendre correct un objet imparfait. *iii.* La détermination des paramètres du processus qui peuvent être ajustés pour ne pas continuer à produire des objets incorrects. La grandeur des tolérances inspectées n'est pas reportée. Le principal inconvénient de ce système est que les représentations volumiques discrétisées ne sont pas aussi précises que d'autres représentations. Le degré de précision change avec le type de représentation surfacique utilisé et avec l'exactitude à laquelle la représentation surfacique doit apparier les données numérisées.

Trucco *et al* [TRU97] présentent un système complet d'inspection impliquant : le positionnement de l'objet 3D, la planification optimale de la position d'inspection et la mesure de certaines caractéristiques géométriques pour lesquelles le modèle géométrique (CAO) est connu. Le recalage 3D est résolu par une technique qui combine l'utilisation des invariants algébriques avec les modèles approximatifs de visibilité. Le bruit est modélisé par une distribution gaussienne, et les points aberrants sont séparés en utilisant une adaptation de l'algorithme LMS (Least Median of Squares). L'inspection se concentre sur des mesures de forme telles que la planéité d'une surface, l'angle entre surfaces et les diamètres des trous, en utilisant le vecteur normal des surfaces.

Dans un autre travail **Newman** [NEW94], [NEW95b] présente un système d'inspection automatique pour la détection des défauts dans des images de profondeur de moulages. Le système utilise l'information du modèle CAO dans plusieurs étapes de l'algorithme, y compris pour la classification et l'inspection de surfaces. L'image de profondeur est acquise en utilisant un capteur par triangulation qui projette une lumière structurée. Trois techniques pour l'inspection sont présentées. La premier technique est utile pour la détection des gros défauts

dans les bâtis. La deuxième, pour l'inspection des surfaces planes et cylindriques. La troisième, pour l'inspection des caractéristiques et des tolérances dimensionnelles. Le système recherche les gros défauts en comparant les caractéristiques obtenues à partir des images de profondeur avec celles du modèle. Pour la comparaison, il utilise la différence moyenne entre les vecteurs normaux dans l'image et le modèle, et l'erreur des moindres carrés entre l'image et le modèle. Les déviations de planéité ou de cylindricité, telles que celles rencontrées dans des trous, et les cas conditions de matière insuffisante ou excessive, sont calculées en examinant l'erreur d'ajustement de chaque ensemble de points qui représentent la surface. En ce qui concerne l'inspection des tolérances dimensionnelles qui est réalisée en utilisant les paramètres des surfaces extraites de l'image de profondeur, la tolérance était fréquemment très près de la résolution spatiale du capteur.

Marshall *et al* [MAR91] examinent la capacité pratique d'un système de vision pour accomplir des tâches automatiques d'inspection. Après la présentation du système de vision, une comparaison des méthodes de recalage et des stratégies de positionnement est établie et la performance de celles-ci pour l'inspection est évaluée. Le système de vision se compose de deux caméras appariées et d'un module de balayage à laser monté sur un banc optique. Les caméras sont de type CCD à haute sensibilité, chacune montée sur des plateaux tournants à vitesses indépendantes. Après le calibrage du système de vision, les images de profondeur de la scène sont prises. Le système fonctionne en projetant et en déplaçant le faisceau laser au travers de la scène pour obtenir une série de "lignes laser" verticales qui sont traitées par le système stéréo pour donner l'image de profondeur. Les problèmes principaux associés au traitement de l'information de profondeur afin de réaliser l'inspection automatique sont la segmentation des primitives et l'appariement de celles-ci à celles d'un modèle géométrique de l'objet. Une revue des méthodes de recalage dans la littérature est présentée et la méthode de Faugeras et Hebert [FAU86] a été

trouvée la meilleure pour la tâche d'inspection. Les diverses approches employées pour segmenter les primitives après qu'elles soient recalées sont : *i.* Points orientés, ce sont des ensembles de points sur l'objet qui ont un vecteur normal associé, celui dirigé vers l'extérieur de l'objet. *ii.* Bords, un bord se présente quand un changement marqué du gradient se produit à travers un ensemble de points. *iii.* Plans. Ils ont utilisé une méthode de croissance de régions qui, après un premier regroupement des points qui peuvent être ajustés parfaitement par de petits plans, fusionne les plans qui satisfont des contraintes de similitude. Les tâches d'inspection que leur système réalise sont : le contrôle des dimensions des caractéristiques, le contrôle de la position des caractéristiques et le contrôle des positions relatives des caractéristiques. Le processus d'inspection est réalisé de la façon suivante : *i.* Après le recalage du modèle avec la scène, une liste de primitives appariées et la transformation de recalage sont calculés. Cette transformation est alors appliquée au modèle, et une liste de primitives visibles est calculée. *ii.* En connaissant la position présumée du modèle d'une primitive visible et les dimensions de l'image de profondeur, la position correspondante de ces primitives dans la scène peut être obtenue. L'inspection a lieu en testant l'inclusion des points dans chaque primitive à l'intérieur de la zone de tolérance spécifiée. Le résultat de l'inspection montre que des tolérances de 0.25 mm peuvent être possibles avec leur système, mais l'inspection à moins de 0.25 mm n'est probablement pas possible, car seulement 25% des points de profondeur sont dans les tolérances.

Bispo et Fisher [BIS94] présentent un système d'inspection focalisé sur l'inspection des surfaces complexes. Après l'acquisition de l'image de profondeur par un système de triangulation laser, un processus de recalage de cette image avec son modèle CAO est exécuté. Suite au recalage, la pièce est inspectée en vérifiant que les points de l'image de profondeur soient selon la tolérance spécifiée par le modèle. Pour les surfaces complexes, ils utilisent des surfaces B-spline. Leur système

a une connaissance *a priori* de la position et de l'orientation de la pièce. Ils étudient l'utilisation des algorithmes comme ICP (Iterative Closest Point) pour améliorer l'exactitude du recalage. L'extraction des surfaces B-splines à partir de l'image de profondeur est présentée sans beaucoup de détails.

Nous considérons que les systèmes précédents sont les plus proches de notre travail, car ils utilisent des images de profondeur. Cependant, ces images ne sont pas optimales pour la tâche d'inspection, car lors de leur acquisition, le choix de l'emplacement du capteur n'a pas considéré la précision des données. Par ailleurs, ces systèmes ne considèrent pas le contrôle de tolérances géométriques.

Par la suite, nous présentons des travaux intéressants qui utilisent une MMT dans le processus d'inspection. **Cheng** [CHE95] combine un capteur laser ponctuel et une MMT et peut ainsi étendre les applications des MMTs à l'inspection des objets composés de matériaux mous. Un procédé de calibrage pour le système intégré Laser/MMT a été développé. Ce procédé est composé de deux parties : *i.* Un algorithme de transformation géométrique, qui définit le rapport géométrique entre le point d'inspection du laser et le centre de l'extrémité du palpeur. *ii.* Un algorithme de calibration qui définit le vecteur de conversion entre le palpeur et le capteur laser. Pour assurer l'exactitude de l'inspection, il est très important d'aligner le rayon laser et la normale de la surface au point examiné. Cheng présente un algorithme pour réaliser cet alignement. Les caractéristiques considérées sont : *i.* des caractéristiques simples telles que des lignes, des plans, des cercles et des cylindres, et *ii.* des caractéristiques complexes telles que des courbes et des surfaces de forme libre (surfaces complexes). Le problème de collisions est énoncé comme un problème à résoudre.

Pahk *et al* [PAH96], [PAH95] proposent un système pour inspecter la précision des moules ayant des caractéristiques définies par le modèle CAO. Les caractéristiques à examiner sont choisies à partir de l'environnement de la CAO, et la planification

d'inspection est réalisée pour chaque caractéristique. La planification de prise de mesures est effectuée de façon à éviter les collisions. La sortie de la planification est le code pour une MMT. Les stratégies de numérisation, selon la complexité de la surface sculptée, sont : distribution uniforme, distribution dépendante de la courbure et distribution hybride. Le calcul d'erreur est basé sur une comparaison des données mesurées avec le modèle CAO.

Menq *et al* [MEN92] présentent un système d'inspection dimensionnelle pilotée par la CAO. Le principe de ce système est de déterminer les points mesurés réels sur la surface nominale, tout en réduisant au minimum la somme des distances au carré des données de mesure de la surface. Deux applications importantes ont été examinées. La première application est la détermination du système référentiel du modèle de conception par rapport au système référentiel d'une MMT. La seconde est l'analyse comparative de la mesure de précision. Pour déterminer le référentiel de conception, une mesure de sensibilité est utilisée pour estimer l'effet commun des emplacements de mesure choisis et le nombre total de points de mesure. Pour l'analyse comparative d'erreur, un modèle statistique a été développé pour déterminer le nombre minimum de points de mesure, de sorte que les points acquis puissent représenter la population entière.

Tang et Davies [TAN95] présentent l'interface DMIS (Dimensional Measuring Interface Specification) pour l'intégration du système de planification de l'inspection INSPEX avec des MMT. INSPEX est un système pour la préparation des plans d'inspection à partir des modèles CAO tolérancés. DMIS est utilisé comme un format de données neutre, pour convertir les données de sortie du logiciel INSPEX dans un format d'échange de données qui puisse être reçu par la plupart des MMTs.

Roy [ROY95] discute les critères pour évaluer les caractéristiques géométriques des pièces manufacturées ; et le développement des procédures et des algorithmes systématiques pour comparer des données géométriques mesurées sur les pièces manufacturées avec les tolérances spécifiées lors de la conception.

Discussion

Dans la littérature on trouve beaucoup de travaux utilisant des images 2D pour l'inspection ([MOD92], [EDI95], [CHE96], [MOG96]). Pour le contrôle des tolérances des pièces industrielles les images 2D ne sont pas les plus adéquates car elles ne fournissent pas les informations relatives à la profondeur. Les systèmes de vision basés sur le principe de la triangulation optique donnent des informations 3D sur la topologie des pièces, par conséquent, ceux-ci sont plus intéressants pour l'inspection de pièces industrielles.

Les techniques d'inspection consistent généralement à comparer l'image numérisée de l'objet avec leur modèle CAO. Celui-ci est généralement un modèle surfacique [TRU97], [NEW95b] qui a l'avantage de fournir une représentation exacte de la pièce. Le modèle peut être aussi volumique [TAR95c], ce type de modèle se prête naturellement aux opérations de comparaison et d'analyse tridimensionnelle, mais a l'inconvénient que la représentation de la pièce n'est pas aussi précise que celle des modèles surfaciques.

En générale l'inspection est faite par la comparaison entre le modèle CAO et l'image 3D de la pièce, après leur recalage. La plupart des systèmes utilisent, lors de cette comparaison, l'image 3D complète de la pièce [BIS94], [NEW95b], [TAR95c], [TRU97]. Dans [MAR91] l'image 3D est segmentée en primitives après le recalage, mais les points associés a ces primitives ne sont pas utilisés pour réaliser un recalage plus fin avant l'inspection.

Il n'y a pas, à notre connaissance, de travaux qui définissent des méthodologies pour l'inspection des tolérances géométriques en utilisant des données 3D provenant d'un système de vision. Une telle méthodologie devrait prend en compte les données 3D associées aux surfaces de référence et celles associées à la surface sous contrôle.

Dans l'inspection, le principal inconvénient des systèmes de vision (par rapport aux MMTs) est la précision des données. Nous n'avons pas trouvé dans la littérature de travaux prennant en compte, lors de l'inspection, le bruit introduit par le système

de vision.

1.2.3 Modèle du bruit des systèmes de numérisation

A notre connaissance, il n'y a pas de travaux qui prennent en compte la calibration du support mécanique et de la caméra lors de la la modélisation du bruit afin optimiser le processus de numérisation d'une pièce manufacturée. Par contre, énormément de travaux ont été réalisés en calibration de caméra, de support mécanique (robot) et du système *hand/eye*. Nous ne citerons ici que les plus importants que l'on retrouve fréquemment dans la littérature.

Calibration du support mécanique

La calibration 3D d'un robot *hand/eye* consiste à déterminer la translation et la rotation relatives entre un référentiel placé au centre de la lentille de la caméra et un autre placé dans la poignée du robot. **Tsai** *et al* [TSA87], [TSA89] présentent une technique pour calculer la position 3D et l'orientation d'une caméra par rapport à la dernière articulation d'un robot manipulateur dans une configuration *hand/eye*. Le robot, tout en portant la caméra, effectue une série de déplacements en s'arrêtant dans les positions de calibration où la caméra acquiert une image d'un objet de calibration. L'objet de calibration est un bloc avec une matrice de points de calibration. La position de chaque point de calibration est connue avec une grande précision par rapport à un système des coordonnées choisi arbitrairement et placé sur le bloc. Une fois tous les mouvements réalisées, le système prend seulement quelques millisecondes pour réaliser la calibration. Les auteurs font cinq observations qui doivent être prises en compte pour améliorer la précision : *i.* L'erreur RMS de rotation entre la poignée et la caméra est inversement proportionnelle au sinus de l'angle entre les axes de rotation des positions de calibration. *ii.* Les erreurs de rotation et de translation sont inversement proportionnelles aux angles de rotation des positions de calibration. *iii.* La distance entre le centre de la lentille de la caméra

et le bloc de calibration a un effet important sur l'erreur de translation. *iv.* La transformation existant entre le référentiel du poignet du robot et la caméra a une très grande importance, par contre, les positions de l'ensemble robot/caméra dans l'espace ont peu d'importance pour effectuer une bonne calibration. *v.* L'erreur de rotation est directement proportionnelle à l'erreur d'orientation de chaque position de calibration. Le comportement des facteurs précédents est obtenu par simulation. Un processus de calibration réelle est présenté, ainsi que des résultats réels.

McLauchlan et Murray [McL96] décrivent une méthode de calibration qui exploite la capacité de la plate-forme head/eye à faire des mouvements avec une précision connue, dans un environnement non structuré. L'approche utilise toutes les mesures des caractéristiques de l'image obtenues par de multiples images, grâce à un calcul statistique. Le processus est entièrement intégré dans le système de vision, et fournit les mises à jour continuelles des paramètres de calibration aux autres modules du système de vision. L'algorithme utilise une nouvelle forme de filtre récursif qui permet d'incorporer les observations d'un nombre arbitraire de caractéristiques tracées. Le VSDF (Variable State-Dimension Filter) est une solution générale pour des problèmes statiques d'évaluation impliquant un état global et un nombre variable d'états locaux, couplés à l'état global mais pas entre eux. Dans ce travail les variables sont : les paramètres de calibration et les directions visuelles des caractéristiques tracées dans la scène. Les résultats de la calibration d'une caméra montée sur un robot sont présentés.

Kugiumtzis et Lillekjendlie [KUG95] présentent un modèle d'estimation pour la calibration de la cinématique des manipulateurs avec une structure géométrique parallèle. Une calibration complète de la cinématique est composée de trois points : *i.* Une formulation mathématique, basée sur le modèle cinématique du robot, qui aboutit à une équation d'observations d'où les sources d'erreur peuvent être calculées. *ii.* L'identification des sources d'erreur en utilisant les mesures de la

position actuelle et en appliquant des méthodes d'estimation des paramètres. *iii.* La compensation des erreurs dans le contrôleur pour obtenir un modèle précis de la cinématique. Un robot *Multicraft* est un bras série à cinq degrés de liberté. Initialement, une description du modèle cinématique du robot *Multicraft* série-parallèle est présentée, ainsi que les équations de la cinématique directe et inverse. Deuxièmement, une méthode pour le calcul du Jacobien de la cinématique directe est développée en utilisant les Jacobiens de la cinématique inverse. Finalement, un algorithme d'estimation est mis au point et des résultats synthétiques et réels sont présentés.

Calibration de la caméra

Trucco *et al* [TRU98] analysent la calibration et la consistance des mesures pour un capteur de profondeur laser basé sur la méthode de triangulation. Le capteur laser ainsi que deux caméras CCD sont placés statiquement, et l'objet est placé sur une plate-forme qui tourne. Ils utilisent une technique de calibration directe, qui ne requiert pas de modéliser les composants du capteur ou de l'objet observé, et qui pourtant ne limite pas la précision de la calibration, bien qu'il ne prenne pas en compte certaines sources d'erreur. L'idée de la méthode de calibration est la suivante : si les coordonnées de la caméra pour une grille de calibration (grille très dense de points dans l'espace de travail) peuvent être mesurées avec précision, alors la position de n'importe quel point peut être obtenue par l'inversion de la carte *scène à caméra* en faisant l'interpolation entre les points voisins. La calibration est réalisée en deux étapes : *i.* La grille de calibration pour chaque caméra est construite en utilisant un bloc de calibration composé de 145 marches de $2mm$ de longueur et $1mm$ en hauteur. *ii.* La grille de calibration est inversée et interpolée pour obtenir une carte complète pour chaque caméra. En réalisant une interpolation linéaire aux moindres carrés avec au moins cinq points de calibration, chaque pixel (i, j) dans l'image est associé avec une précision sous-pixel à un point 3D (x, y, z) dans l'espace

de travail qui a été calibré. Quelques paramètres de précision tels que : le pas de quantification δ_z, l'erreur moyenne e, son écart-type σ_e, l'erreur standard absolue e_a et son écart-type σ_{e_a} sont discutés pour des essais réels.

Pito [PIT95] présente une technique de calibration pour un capteur de profondeur laser. Le scanner est composé d'un système télémétrique qui mesure la distance entre un objet dans la scène et un système d'imagerie qui envoie le rayon laser aux différentes parties de la scène. Le système fonctionne grâce au pilotage de deux miroirs qui dirigent le rayon laser horizontalement et verticalement dans la scène. Le capteur est capable de contrôler la résolution en variant la vitesse de rotation des miroirs. Pour la calibration du capteur, les paramètres suivants doivent être estimés : *i.* le centre de l'image et *ii.* l'incrément angulaire entre chaque ligne et chaque colonne. Pito suppose que le centre du référentiel de la caméra est aligné avec celui du support mécanique. Le modèle de calibration utilisé est composé d'un ensemble de lignes droites et parallèles. La méthode de calibration pour chacun des paramètres est détaillée et utilise toujours le même modèle de calibration mais en le plaçant dans différentes orientations. La position du modèle de calibration est un facteur critique de la méthode. Une évaluation de la précision de la calibration est présentée et après l'analyse de cette évaluation, Pito conclut que la calibration du capteur est aussi bonne que possible.

Basu et Ravi [BAS95], [BAS97] présentent une technique de calibration de caméras CCD qui n'utilise aucun modèle de calibration prédéfini, ni de correspondance point à point. Le processus de calibration permet de déterminer quelques paramètres géométriques de la caméra tels que : la longueur focale et le centre de l'image. Cette technique requiert une scène avec des bords très accentués et stables. Avec une connaissance de l'image des contours, avant et après un petit déplacement de la caméra, une relation entre les paramètres des lentilles et l'information de l'image est obtenue. En effet, en utilisant les relations géométriques définies et en faisant de

petits mouvements, le centre et les valeurs calibrées de f_x et f_y (longueurs focales en pixels dans les directions x et y respectivement) d'une caméra active peuvent être obtenues par la résolution d'un système linéaire d'équations. Une analyse théorique de l'effet des erreurs provenants des sources différentes dans la détermination des longueurs focales et du centre de l'image est faite.

Modélisation du bruit du capteur

Hébert [HEB94] suggère la définition d'un modèle de surface et le développement d'un modèle d'erreur de données pour évaluer la qualité de la numérisation. Il définit une estimation de la surface numérisée comme un minimum stable de l'énergie fonctionnelle dont le domaine est l'espace des paramètres du modèle de surface. Dans la reconstruction de surfaces à partir des données 3D, un minimum stable doit au moins satisfaire trois conditions de base : *i.* sa position ne doit pas changer en présence de fausses valeurs, *ii.* sa position ne doit pas être modifiée par la sélection du système de coordonnées, et *iii.* sa position ne doit pas changer de manière significative pour une variation dans le processus de numérisation. Une méthode de numérisation spécifique n'est pas imposée. La surface est modélisée par un modèle polynomial. Hébert montre qu'un tel modèle est trouvé indépendamment du sous-ensemble de mesures et chaque fois qu'il y a assez de mesures pour appliquer le modèle. En plus, les modèles polynomiaux sont capables de décrire une grande quantité de pièces manufacturées et font une bonne approximation des surfaces gauches. Hébert propose l'utilisation d'une fonction de densité de probabilité gaussienne bi-dimensionnelle pour modéliser la distribution réelle des erreurs de mesure. Les paramètres de la fonction de densité de probabilité sont gouvernés par les conditions de l'acquisition : le mécanisme interne du capteur, la surface de l'objet, la position et l'orientation du capteur par rapport à la pièce. Une mesure réalisée sur une surface éloignée du capteur est moins précise. Une mesure obtenue avec un petit angle d'incidence est plus précise qu'une obtenue avec un grand angle. Le

modèle d'erreur est construit en réalisant des expériences réelles, et est donné par un ensemble de matrices de covariance dont les valeurs sont fonctions de l'angle de l'incidence et de la profondeur de numérisation. La distance de Mahalanobis[2] a été utilisée pour évaluer l'erreur entre le signal reconstruit et les mesures. La solution est présentée dans le contexte de numérisation 2D, mais une méthode pour l'extension à la numérisation 3D est suggérée.

Curless [CUR95], [CUR97] propose une méthode de numérisation basée sur l'analyse de l'évolution (dans le temps) des réflexions de la lumière structurée. Cette analyse appelée analyse de *spacetime* consiste à étudier le comportement du signal transmis par la source laser et le signal reçu par le capteur CCD. Par l'utilisation de cette analyse de *spacetime*, certains problèmes d'exactitude dans la détermination de la mesure de profondeur sont corrigés. Les principaux problèmes étudiés pour la numérisation des surfaces sont : la réflectivité, les discontinuités, les occlusions et le *speckle*.

Discussion

Dans la tâche d'inspection, la précision des données est un facteur primordial pour l'obtention des résultats de contrôle de tolérances fiables. Nous avons vu que beaucoup de travaux ont été réalisés pour la calibration des systèmes de numérisation robotisés (système *hand/eye*) [TSA89], [McL96], et pour le calibrage des capteurs [TRU98], [PIT95], [BAS97]. Les autres travaux sont orientés vers la modélisation des erreurs de mesure [HEB94], [CUR95].

Dans ce travail, nous utilisons un système de numérisation préalablement calibré, afin d'obtenir un modèle de bruit introduit lors de la numérisation d'une pièce. Ce modèle de bruit sera utilisé lors du contrôle des tolérances des pièces. A notre

[2]La distance de Mahalanobis est une forme quadratique positive représentant la famille des ellipses de probabilité constante.

connaissance il n'y a pas, dans la littérature, de travaux similaires.

1.3 Formulation du problème

Nous voulons développer un système d'inspection automatique de pièces manufacturées simples ou complexes. L'inspection est faite en comparant le modèle CAO de la pièce avec un nuage de points 3D issu d'un capteur télémétrique. Initialement, l'erreur du processus de numérisation doit être modélisée. Nous utilisons ce modèle d'erreur pour mettre au point une stratégie de numérisation automatique qui cherche à être optimale vis-à-vis de la précision des données mesurées. Le modèle d'erreur nous permettra aussi d'associer une valeur de dispersion aux points acquis. Après, le nuage de points est recalé avec son modèle CAO puis segmenté dans les surfaces composantes de l'objet. Finalement, l'inspection de tolérances géométriques et dimensionnelles est réalisée.

1.3.1 La méthode d'inspection proposée

Nous allons présenter le système d'inspection que nous avons développée. Il utilise une image de profondeur 3D, laquelle est comparée au modèle CAO de la pièce. Le modèle CAO des objets a été obtenu à l'aide du logiciel ProEngineer, le format du fichier CAO est IGES lequel a une description exacte des pièces par l'utilisation des surfaces NURBS. L'image 3D est obtenue en utilisant deux types de capteurs télémétriques qui ont été développés au Conseil National de Recherches du Canada, soit le capteur Biris et le capteur autosynchronisé.

Modèle du bruit

A partir de l'étude bibliographique, nous pouvons conclure qu'il y a eu beaucoup d'efforts pour modéliser et calibrer les différentes composantes du procédé de numérisation, dont : les supports mécaniques et les caméras. Le but des travaux de

calibration est de définir avec un grand degré de précision la position 3D le chaque point mesuré. Par contre, il n'y a pas eu beaucoup des travaux qui modélisent le bruit lors de la numérisation. Le but de ceux-ci est d'associer à chaque point de mesure, une densité de probabilité pour avoir une idée de la précision de la mesure.

A notre connaissance il n'y a pas de travaux orientés vers l'inspection qui utilisent la précision de chaque point mesuré en prenant en compte le modèle du bruit du système de numérisation. Dans cette partie de notre travail, nous voulons modéliser le processus de numérisation, et ainsi pouvoir définir l'erreur d'un point mesuré comme l'addition des erreurs introduites par les différents éléments du système de numérisation. Ceux-ci sont l'erreur de calibrage du système de numérisation et l'erreur résultante du recalage entre la pièce et son modèle CAO.

L'erreur de calibrage du système de numérisation est fonction du type de support mécanique utilisé (une MMT ou un bras de robot), et du type de caméra utilisée : soit une caméra Biris, dont le principe optique est basé sur une combinaison de la méthode de triangulation optique et de l'utilisation d'un double masque d'ouverture dans le plan de l'objectif, soit une caméra basée sur une technologie d'autosynchronisation.

Stratégie de numérisation

Nous avons présenté un bilan de la littérature récente dans le domaine des méthodologies de numérisation des pièces manufacturées. Les différentes stratégies varient en fonction de la tâche à réaliser (reconstruction, inspection), du degré de connaissance de l'environnement (modèles de la pièce et des capteurs, position de la pièce) et de l'environnement même (type de capteur, type de support mécanique). Mais toutes se ressemblent dans le fait qu'elles cherchent à numériser la pièce complète avec le moins de points de vue possible.

Le but final de notre travail est l'inspection, pourtant il est très important de numériser l'objet avec la plus grande précision possible. Pour pouvoir définir les

meilleures conditions de numérisation nous avons modélisé le bruit du processus de numérisation. Ce modèle nous permet aussi de connaître la précision avec laquelle une surface a été numérisée, en associant à chaque point acquis une valeur de dispersion. L'inclusion du modèle de bruit dans le processus de numérisation d'une pièce est une des contributions les plus significatives de notre travail par rapport aux travaux existants. A notre connaissance, personne n'a utilisé une stratégie de numérisation qui prend en compte le modèle du capteur pour la définition de la précision des points 3D obtenus lors de la numérisation de la pièce.

Nous avons implémenté une nouvelle stratégie de numérisation des pièces manufacturées capable de numériser toute la pièce ou seulement les surfaces d'intérêt, en cherchant toujours à être optimal vis-à-vis de la précision des données et en ayant comme objectif l'inspection. Cette stratégie marche aussi bien pour les pièces avec des surfaces simples ou complexes. Elle utilise le modèle CAO en format IGES de l'objet, et est un processus réalisé hors ligne.

Le processus d'inspection

L'objectif de cette partie du travail est de réaliser le contrôle des tolérances dimensionnelles et des tolérances géométriques des pièces simples et complexes à partir de l'image 3D obtenue à l'aide d'un capteur de profondeur. Pour sa réalisation, nous considérons trois étapes :

1. Segmentation des nuages de points pour extraire les surfaces d'intérêt.
2. Evaluation des tolérances géométriques et dimensionnelles.
3. Introduction du modèle de bruit dans le contrôle des tolérances.

Lors du processus de numérisation d'une surface, il y a toujours des points qui n'appartiennent pas à la surface d'intérêt. Pour pouvoir réaliser l'inspection en utilisant un nuage de points 3D, il faut regrouper les points qui appartiennent à la surface. Nous proposons de réaliser ce processus de segmentation en calculant

la distance entre chaque point 3D et toutes les surfaces NURBS de la pièce, et en comparant quelques propriétés géométriques entre chaque point du nuage et le point le plus proche de la surface. Le calcul de ces propriétés pour les points du nuage sera fait en utilisant un polynôme paramétrique de deuxième degré obtenu sur un voisinage de taille $N \times N$ $(N = 5)$. Pour les points de la surface, nous utilisons les surfaces NURBS du modèle CAO de la pièce sous inspection.

Nous utilisons les sous-ensembles des points 3D issus du processus de segmentation, pour évaluer les tolérances de forme et de dimension. Il faut donc définir une méthodologie pour contrôler ces tolérances, à partir des données de profondeur. Cette méthodologie doit nous permettre de contrôler aussi les tolérances des surfaces complexes.

Enfin, le modèle de bruit obtenu par la modélisation du système de numérisation est introduit dans l'évaluation des tolérances, et ainsi les résultats sont pondérés d'un facteur de probabilité.

1.3.2 Banque des pièces manufacturées

Pour tester le système d'inspection nous avons conçu et usiné une banque de pièces avec des surfaces simples et complexes. Nous avons introduit toutes les tolérances géométriques dans l'ensemble de la base de données. La classe de précision des tolérances géométriques ainsi que la valeur de la tolérance dimensionnelle ont été tirées des normes du système ISO (International Organization for Standardization). La conception des pièces a été faite à l'aide du logiciel ProEngineer. Elles ont été usinées en aluminium. Les pièces avec des surfaces régulières ont été usinées à l'aide d'un tour et d'une fraiseuse à commande numérique. Pour les pièces avec des surfaces complexes nous avons utilisé un logiciel permettant de contrôler la fraiseuse numérique, à partir du modèle CAO en format IGES. Nous présentons la banque des données dans l'annexe A.

Chapitre 2

Les systèmes de numérisation 3D

2.1 Introduction

La précision des données 3D acquises lors de la numérisation est dépendante de différents aspects physiques du système d'acquisition tels que le calibrage de la caméra, la qualité de réalisation du système mécanique permettant de déplacer le capteur, et de la numérisation elle-même. Le calibrage du capteur permet la conversion des données brutes en des données 3D, exprimées dans le repère du capteur. Le système mécanique sert à déplacer le capteur dans l'espace, et fournit la position du capteur, ce qui permet d'effectuer le recalage des données acquises depuis plusieurs vues. La modélisation du bruit permet d'avoir une estimation de celui-ci en chaque point, en fonction des conditions de numérisation. Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la modélisation du système de numérisation. Cette modélisation nous permettra de définir les meilleures conditions de numérisation (vis-à-vis de la précision), et en même temps d'avoir un modèle du bruit pour chaque point acquis.

2.2 Les capteurs de profondeur

Le principe géométrique de la triangulation optique est représenté sur la Figure 2.1. Le faisceau lumineux produit par le laser est guidé par un miroir et balayé sur l'objet. Une caméra, constituée d'une lentille et d'un détecteur photoélectrique de position comme une cible CCD (charge-coupled device), mesure la position de l'image du point lumineux sur l'objet.

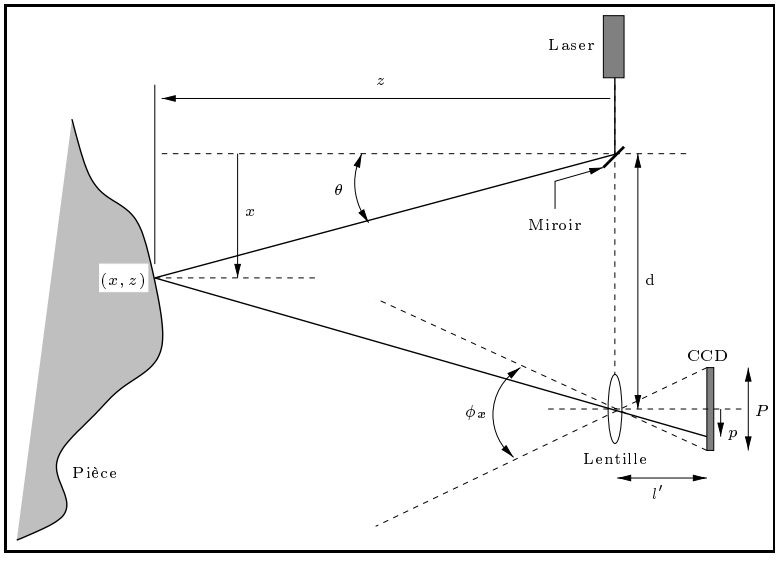


FIG. 2.1: La triangulation optique

On peut calculer les coordonnées tridimensionnelles du point lumineux sur l'objet par simple trigonométrie, de la façon suivante :

$$\begin{aligned} z &= \frac{d \cdot l'}{p + l' \cdot tan(\theta)} \\ x &= z \cdot tan(\theta) \end{aligned} \tag{2.1}$$

où p est la position du faisceau réfléchi sur le capteur CCD, θ est l'angle de déflexion du rayon laser, d la distance séparant la lentille de la source du faisceau laser, et

$$l' = \frac{l \cdot f}{l - f} \tag{2.2}$$

où f est la longueur focale de la lentille et l la distance au plan de l'objet. Supposant que $l \approx \infty$ alors $l' \simeq f$ et dans l'équation 2.1, z devient :

$$z = \frac{d \cdot f}{p + f \cdot tan(\theta)}. \tag{2.3}$$

En utilisant cette géométrie, l'erreur absolue sur la distance Δz est :

$$\Delta z = \left| \frac{z^2}{f \cdot d} \right| \cdot \Delta p + \left| \frac{z^2}{d \cdot cos^2(\theta)} \right| \cdot \Delta \theta \tag{2.4}$$

où Δp et $\Delta \theta$ sont les erreurs de mesure sur p et θ, respectivement. La précision $(1/\Delta z)$ du capteur de profondeur est donc directement proportionnelle à la distance séparant la source du laser de la position du capteur CCD, et à la longueur focale de la lentille, mais inversement proportionnelle au carré de la distance. La précision est également fortement liée à l'angle θ de mesure, qui change proportionnellement au carré de la distance z.

Connaissant z, Δx peut être obtenu indépendamment de la méthode de triangulation par :

$$\Delta x = |tan(\theta)| \cdot \Delta z + \left| \frac{z}{cos^2(\theta)} \right| \cdot \Delta \theta. \tag{2.5}$$

Le gain d'un système de triangulation est un paramètre utile, qui est défini par :

$$M_{3D} = \frac{\Delta p}{\Delta z} = \frac{f \cdot d}{z^2} \tag{2.6}$$

ce qui indique que pour une distance donnée z et une résolution du capteur CCD Δp, la précision du capteur est directement liée à la longueur focale de la lentille f et à d la distance séparant la source laser du capteur CCD. Malheureusement f et d ne peuvent pas être rendus aussi grands que voulu. d est principalement limité par la structure mécanique de l'installation optique et par l'effet d'ombre, elle doit être petite afin de réduire au minimum ces effets.

Dans la géométrie conventionnelle de triangulation, le champ visuel du capteur, quand le faisceau laser peut être balayé en entier, est donné par :

$$\phi_x = 2 \cdot tan^{-1} \cdot \left(\frac{P}{2 \cdot l'} \right) \simeq 2 \cdot tan^{-1} \cdot \left(\frac{P}{2 \cdot f} \right) \tag{2.7}$$

où P est la longueur totale du détecteur CCD. Par conséquent, dans l'installation conventionnelle, un compromis entre le champ visuel et la précision de la mesure 3D doit toujours être pris en compte.

Par la suite nous allons présenter les capteurs utilisés dans ce travail, soit le capteur Biris et le capteur autosynchronisé [BLA88], [LIV86] et [EL-89], qui ont été développés au Conseil National de Recherches du Canada.

2.2.1 Le capteur Biris

Au lieu d'utiliser la position du laser pour calculer les coordonnées 3D du point sur l'objet, deux vues ou plus peuvent être utilisées. Une possibilité est d'employer deux caméras ou plus pendant la triangulation. Une autre approxime est d'utiliser les propriétés de défocalisation d'une lentille standard. L'utilisation d'un masque à double ouverture devant une caméra CCD simple fournit un capteur de profondeur 3D très compact, robuste et léger. Comme on peut voir à la Figure 2.2, puisqu'il y a deux ouvertures dans le masque, un point P sur l'objet se reflète hors focus à P' derrière le détecteur CCD, et il créera deux points p_1 et p_2 sur le détecteur CCD. La séparation b entre ces deux points ($b = p_1 - p_2$) est liée à la distance entre la caméra et le point sur l'objet, par l'équation suivante :

$$z = \frac{1}{l^{-1} + \theta \cdot k_p \cdot p + (1 - \theta) \cdot k_b \cdot b} \tag{2.8}$$

avec $k_p = \frac{l-f}{f \cdot d \cdot l}$, $k_b = \frac{l-f}{f \cdot D \cdot l}$, l la distance de défocalisation de la caméra, d la base de triangulation, f la longueur focale de la lentille et p ($p = p_1 + p_2$) la position du pic sur le détecteur CCD.

En utilisant les principes de géométrie, il peut être montré que l'erreur sur la distance Δz est :

$$\Delta z = \frac{z^2}{f \cdot d} \cdot \Delta p. \tag{2.9}$$

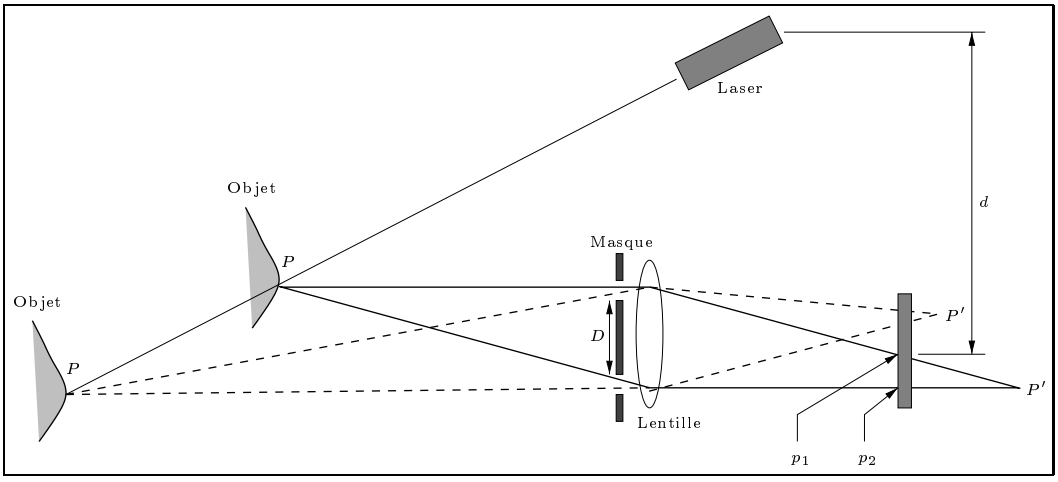


FIG. 2.2: Triangulation optique en utilisant un masque de double ouverture

Lors de la numérisation d'une surface, un ensemble de points 3D (x, y, z) et leur intensité lumineuse (I) sont produits. Le capteur explore la surface ligne par ligne à une vitesse de 256 points/ligne, et 60 lignes/seconde, donc 15360 points/seconde. Le champ visuel du capteur ϕ_x est de 23 degrés.

2.2.2 Le capteur Autosynchronisé

De grands champs visuels peuvent être obtenus en utilisant des techniques synchronisées de balayage sans sacrifier le gain M_{3D} du système de triangulation (équation 2.6). L'idée fondamentale est de synchroniser la projection de la tache lumineuse avec sa détection. Le champ visuel instantané du capteur CCD suit la tache lumineuse pendant qu'elle balaie la scène. La longueur focale de la lentille f est donc liée seulement à la profondeur de champ souhaitée.

Rioux [RIO84] et Blais *et al* [BLA88] ont développé un capteur de profondeur qui est basé sur un arrangement longitudinal de synchronisation, le champ visuel instantané étant parallèle au balayage (voir la Figure 2.3). Un côté du miroir à double face est employé pour dévier le rayon laser. L'autre côté collecte la lumière réfléchie de la scène. Même si dans la théorie deux modules de balayage séparés peuvent être

utilisés, l'autosynchronisation mécanique de la Figure 2.3 élimine toutes les erreurs de phase par rapport à l'approxime qui utilise deux modules de balayage.

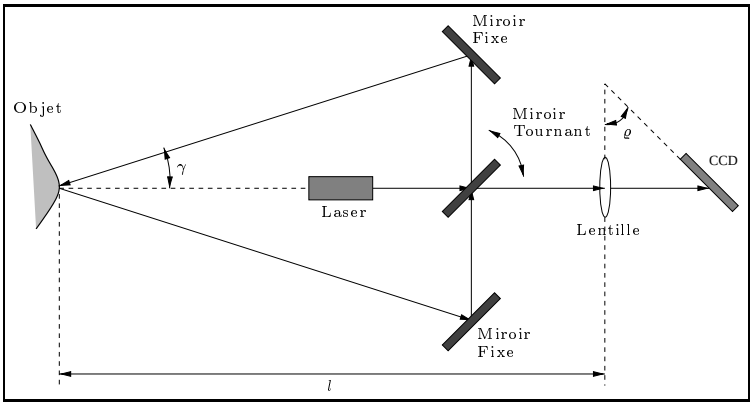


FIG. 2.3: Triangulation optique qui utilise le principe d'autosynchronisation

La distance z pour ce capteur est calculée par l'équation suivante :

$$z = \frac{l' \cdot d}{p} \cdot cos^2(\theta) + \frac{d}{2} \cdot sin(2\theta) \tag{2.10}$$

et l'erreur peut être approchée par :

$$\Delta z = \left| \frac{z^2}{l' \cdot d \cdot cos^2(\theta)} \right| \cdot \Delta p + |d \cdot cos(2\theta) - 2 \cdot x \cdot tan(\theta)| \cdot \Delta\theta. \tag{2.11}$$

Les méthodes de synchronisation ont des avantages intéressants comparés aux autres méthodes :

- Le champ visuel est indépendant de la longueur focale de la lentille et donc du gain M_{3D}. Pourtant, la profondeur de champ est améliorée.
- Les effets d'ombre sont réduits en raison de la petite séparation d entre la source et le capteur de position.
- L'erreur de profondeur (Δz) est également moins susceptible d'erreurs angulaires ($\Delta\theta$) que dans l'approxime classique de triangulation puisqu'elle est proportionnelle à z par rapport à z^2/d (équations 2.4 et 2.11).
- Les immunités à la lumière ambiante et aux réflexions sont améliorées avec la méthode de synchronisation due au champ visuel instantané réduit.

Toutefois le prix à payer par ces avantages est élevé, car le coût et la complexité du capteur deviennent importants.

La numérisation d'une surface produit un ensemble de points 3D (x, y, z) et leur intensité lumineuse (I) sur la surface. Le capteur autosynchronisé explore la surface ligne par ligne à une vitesse qui peut être fixée par l'utilisateur (habituellement 512 points/ligne). La vitesse d'acquisition de points est approximativement de 20000 points/seconde. La densité est une fonction de la longueur de cette ligne, et donc de la distance entre le capteur de l'objet.

2.3 Le support mécanique

Pour balayer une surface, le capteur doit être monté et déplacé par un support mécanique externe. Ce support définit aussi le nombre de degrés de liberté dont disposera le capteur. De manière générale, le capteur peut être monté sur une grande variété de supports mécaniques, difficiles à représenter au travers d'un modèle unique. Les principaux types de supports sont : *i.* les MMT, *ii.* les structures mécaniques du type robot cartésien, et *iii.* les bras de robot. La position et l'orientation du capteur sont obtenues en résolvant les équations cinématiques directes ou inverses.

Machine à Mesurer Tridimensionnelle

Le capteur autosynchronisé utilisé dans ce travail est monté sur une MMT pour réaliser un recalage mécanique précis entre les vues, et pour placer le capteur dans la position souhaitée. La MMT permet d'avoir 5 degrés de liberté, dont trois pour la position spatiale et deux pour l'orientation du capteur. Le support mécanique limite l'espace du travail ou espace maximal dans lequel la pièce à numériser doit être incluse. Pour la MMT cet espace est un parallélépipède où les côtés dm_x, dm_y

et dm_z représentent respectivement les déplacements maximaux du capteur dans les directions x, y et z.

Bras de robot

Le capteur Biris utilisé dans ce travail est fixé sur un bras de robot, qui permet de placer le capteur à la position souhaitée. Ce robot permet 6 degrés de liberté. Le mouvement du poignet du robot permet de balayer la surface. L'espace de travail est celui formé par un rectangle balayé en suivant une trajectoire circulaire de 90 degrés.

2.4 Calibrage des capteurs

De fait que les mesures réalisées avec des capteurs de profondeur ont leur propre système de coordonnées placé au centre de la lentille de la caméra, les images résultantes ne sont pas compatibles avec les systèmes des coordonnées employés par la plupart des algorithmes de traitement d'image. Par conséquent une procédure de calibration du capteur de profondeur est nécessaire.

Lors de la calibration d'une caméra, on s'intéresse à l'estimation d'un certain nombre de paramètres intrinsèques (paramètres propres à la caméra) et de paramètres extrinsèques (paramètres qui lient le repère de la caméra au repère associé à l'objet). Le nombre de paramètres à estimer est dépendant du type de capteur utilisé. Ainsi, pour un capteur actif, modélisé par un sténopé (modèle *pinhole* couramment utilisé en vision par ordinateur) la calibration consiste à trouver :

- Les paramètres extrinsèques, dont R la matrice de rotation et T la matrice de translation :

$$\begin{aligned} X^c &= r_{11}X^M + r_{12}Y^M + r_{13}Z^M + T_x \\ Y^c &= r_{21}X^M + r_{22}Y^M + r_{23}Z^M + T_y \\ Z^c &= r_{31}X^M + r_{32}Y^M + r_{33}Z^M + T_z \end{aligned} \tag{2.12}$$

avec C le repère du capteur et M le repère de la scène.

- Les paramètres intrinsèques, dont *i.* le facteur d'échelle vertical (pixels/mm) $f_x = f/S_x$, *ii.* Le rapport hauteur/largeur (*aspect ratio*) $\alpha = S_y/S_x$, où S_x et S_y sont la taille efficace de pixel horizontal et vertical respectivement, *iii.* les coordonnées du centre de l'image (O_x, O_y), et *iv.* le coefficient de distorsion radiale k_1.

La technique de calibrage utilisée au CNRC a été proposée par Beraldin *et al* [BER92], [BER93]. Comme le procédé de calibrage doit permettre de déterminer exactement la position du point de lumière p et l'angle de numérisation θ pour tout plan et cibles de calibration, un tableau doit être produit à partir des mesures des cibles sur une plaque de calibration. En utilisant un système où une barre de calibration est déplacée, on obtient un système de coordonnées cartésiennes oblique. Un tableau est créé par des déplacements constants de la barre dans la direction u et un autre tableau par des déplacements constants dans la direction v. Ces déplacements ne sont pas nécessairement connus exactement mais suffisamment pour trouver l'exactitude cherchée de la calibration. Ensuit, ces deux tableaux sont transformés d'une façon telle que les paramètres u et v deviennent fonctions de p et θ. Dans la pratique, il est beaucoup plus facile d'installer un système de coordonnées oblique que rectangulaire. La déformation des tables dans un système de coordonnées rectangulaire défini le long d'un certain horizon donné peut être calculée en mesurant un objet triangulaire placé en différentes positions dans le champ visuel. Le système de coordonnées rectangulaire devrait donner un angle constant pour l'objet triangulaire. La distance exacte entre les lignes horizontales et verticales est calculée en utilisant un objet de référence.

Beraldin *et al* ont utilisé une équation fractionnaire linéaire pour calibrer le capteur de profondeur. La fonction chi-carrée χ^2 a été utilisée afin d'estimer les six paramètres exigés pour chaque position angulaire : trois paramètres dans la direction

u et trois dans la direction de v. La fonction χ^2 (équation 2.13) est minimisée pour les positions de u où a est le vecteur des paramètres, σ_i est l'erreur efficace associée à chaque mesure de p_i et N est le nombre de points de repères. La même fonction χ^2 est appliquée aux positions de v.

$$\chi^2(a) = \sum_{i=1}^{N} \left[\frac{p_i - p(u_i, a)}{\sigma_i} \right]^2 . \tag{2.13}$$

Si les erreurs de mesure sur p sont distribuées selon une fonction normale, alors l'équation 2.13 donnera l'évaluation du maximum de vraisemblance de ces paramètres. Une fois que les six paramètres sont trouvés pour une position angulaire particulière du miroir de projection, alors l'inversion de l'équation fractionnaire peut être calculée.

La précision prévue pour les capteurs de profondeur est reportée dans [BER95]. Ces courbes sont calculées à partir de la propagation de l'erreur des mesures de la position du point de lumière laser sur le détecteur, le miroir de lecture et la géométrie du capteur.

2.5 Problèmes physiques lors de la numérisation

Pour les systèmes optiques de triangulation, l'exactitude des données de profondeur dépend de l'interprétation appropriée de l'image sur le capteur CCD qui est produite par la lumière réfléchie sur l'objet. L'approxime la plus commune est de ramener le problème à trouver le "centre" d'une impulsion monodimensionnelle, où le "centre" fait référence à la position sur le capteur, qui donne avec la plus grande probabilité le centre de la lumière. Typiquement, les chercheurs ont opté pour une valeur statistique telle que la moyenne, la médiane ou le pic de la lumière reflétée pour définir le centre. Les lasers émettent la lumière avec un faisceau d'intensité qui a un profil gaussien. Si l'énergie du faisceau n'est pas perturbée (dégradée ou coupée), une gaussienne produit une image gaussienne sur le capteur CCD. Si l'énergie du

faisceau est perturbée, la taille et le profil du faisceau dans l'image seront modifiés, et l'exactitude des valeurs statistiques diminue.

Les perturbations de la forme de la lumière reflétée se produisent chaque fois que :

- La réflectivité de la surface change.
- La surface est très réfléchissante.
- La géométrie de la surface a des discontinuités.
- Le faisceau lumineux est partiellement occlus.
- La lumière est cohérente, et la surface est suffisamment rugueuse pour introduire de la granularité laser, couramment appelé *speckle*.

Par la suite, nous allons présenter les perturbations potentielles d'un capteur de profondeur qui utilise un laser avec un profil gaussien comme source lumineuse ; la détermination du centre de l'image sera faite en calculant la valeur moyenne.

2.5.1 La réflectivité de la surface

Un modèle bien connu de réflectivité est le modèle *lambertien*, qui suppose que chaque point sur la surface semble également lumineux dans toutes les directions de vue. Ceci se rapproxime bien du comportement des surfaces rugueuses et non spéculaires, ainsi que de divers matériaux comme la peinture et le papier mat. Si nous représentons la direction et la quantité de lumière incidente par un vecteur $\vec{I}$, la réflectivité d'une surface lambertienne idéale, L, est simplement proportionnelle au produit scalaire entre $\vec{I}$ et la normale unitaire à la surface $\vec{n}$:

$$L = \rho \cdot \vec{I}^T \cdot \vec{n} \tag{2.14}$$

avec $\rho > 0$ une constante appelée *albedo* de la surface, qui est propre au matériel.

La Figure 2.4 montre une surface avec deux constantes d'*albedo*, ce qui produit un changement de la réflectivité de la surface. Cette variation de réflectivité produit un

changement de forme gaussienne de l'image sur le capteur CCD, et en conséquence une erreur sur la détermination de la position du point.

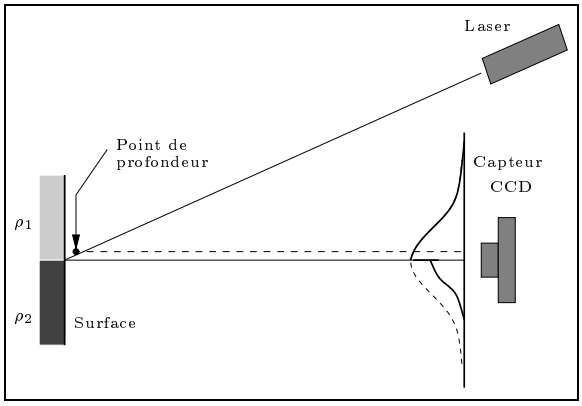


FIG. 2.4: Erreur dans le point de profondeur due à la réflectivité de la surface

2.5.2 Surface réfléchissante

Ce problème apparaît quand une pièce avec des surfaces très réfléchissantes a une géométrie comme celle de la Figure 2.5. Le faisceau laser tombe sur une surface de l'objet qui ne peut être vue par le capteur CCD. Cependant le rayon de lumière se réfléchit pour finalement tomber sur un autre point de l'objet qui est vu par le capteur. Un point qui n'est pas sur la surface est déterminé comme point de profondeur.

La Figure 2.5 permet également de comprendre pourquoi certains points ou surfaces d'un objet ne peuvent pas être mesurés : soit ils sont vus par la caméra mais ils ne sont pas touchés par le faisceau laser, soit ils sont touchés par le faisceau laser mais ne peuvent pas être vus.

2.5.3 Surface avec des discontinuités

Quand le faisceau laser tombe sur un coin d'une surface comme on peut le voir dans la Figure 2.6, la moitié droite de la gaussienne de lumière reflétée sur

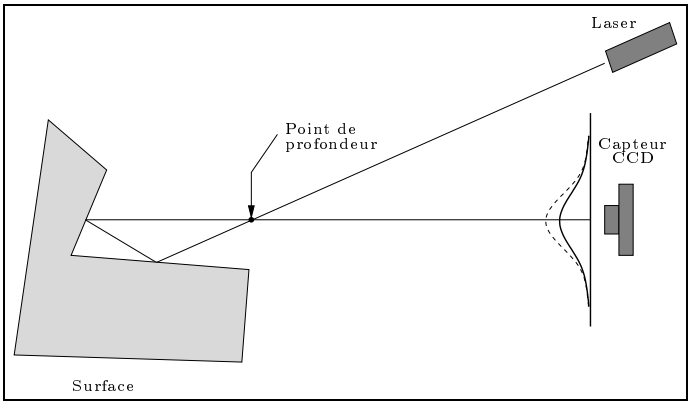


FIG. 2.5: Erreur dans le point de profondeur due à une surface réfléchissante

le capteur CCD, est beaucoup plus comprimée que la moitié gauche. Le résultat est une variation de la moyenne ce qui donne une estimation de mesure de profondeur incorrecte. Pour d'autres formes géométriques, le faisceau laser près d'un coin peut tomber en dehors de la surface, mais une certaine réflexion de lumière est acquise par le capteur, donc un point de profondeur est trouvé là où il n'y a aucune surface.

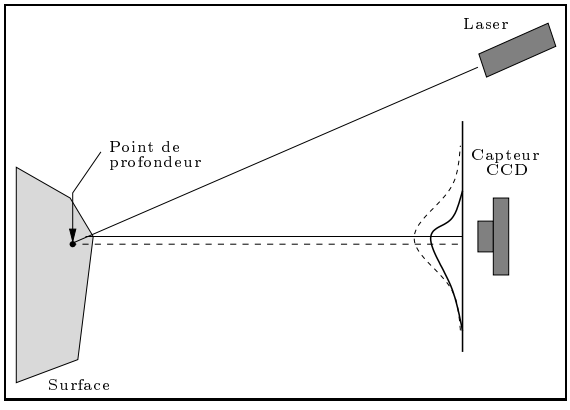


FIG. 2.6: Erreur dans le point de profondeur due à une discontinuité de la surface

2.5.4 Le faisceau est partiellement occlus

La Figure 2.7 montre l'effet d'occlusion d'une ligne de la vue entre la surface touchée par le faisceau laser et le capteur CCD. Une partie du rayon laser qui se

reflète sur l'objet est bloquée avant d'atteindre le capteur CCD. Par conséquent, la valeur moyenne de l'intensité de l'image donne un point de profondeur incorrect. Cette erreur dans la mesure du point de profondeur est semblable à l'erreur produite par les surfaces avec des discontinuités.

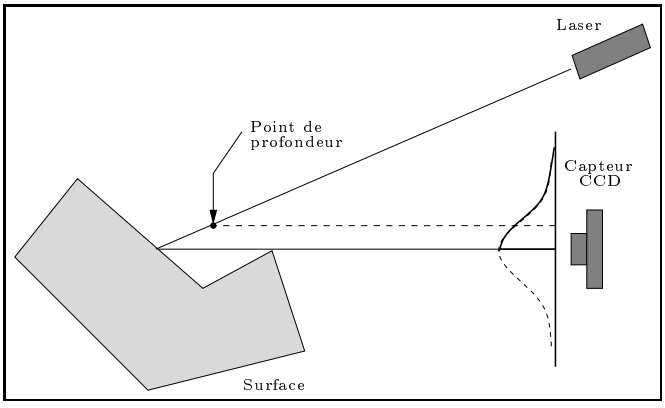


FIG. 2.7: Erreur dans le point de profondeur due à une occlusion partielle

2.5.5 La granularité laser ou *speckle*

Elle surgit quand la lumière cohérente du laser tombe sur une surface qui est rugueuse comparée à la longueur d'onde du laser. La rugosité de la surface produit des variations aléatoires des longueurs de chemin optiques, causant une configuration d'interférence aléatoire dans tout l'espace et sur le capteur. Pour des systèmes de triangulation, le résultat est une impulsion réfléchie ayant une composante de bruit qui affecte la détection moyenne de l'impulsion, causant des erreurs dans les mesures de profondeur, même pour une surface plane.

L'influence du *speckle* dans la mesure de profondeur pour la triangulation traditionnelle est présentée dans la Figure 2.8. L'image gaussienne du faisceau laser est bruitée, produisant un décalage aléatoire dans la position de la valeur moyenne c_i. L'incertitude sur la position de la moyenne σ_{c_i}, produit une incertitude sur le point de profondeur observé σ_r.

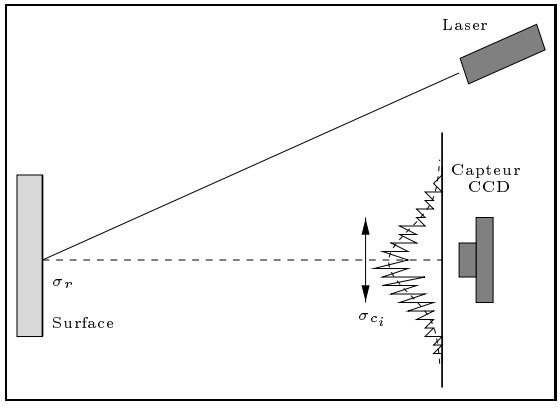


FIG. 2.8: Influence du *speckle* sur la triangulation traditionnelle

Les problèmes de la mesure de profondeur dus au changement de la réflectivité de la surface, lors de mesures sur des pièces industrielles, sont généralement réduites par l'application d'une couche de peinture sur toutes les surfaces à mesurer de l'objet.

Quant aux problèmes dus aux surfaces réfléchissantes, avec des discontinuités ou des problèmes d'occlusion, nous pouvons les diminuer en contrôlant l'emplacement du capteur lors de la numérisation de cette surface. En effet, la connaissance du modèle CAO de l'objet à numériser, et les caractéristiques de numérisation du capteur utilisé, nous permettent de déterminer le meilleur emplacement du capteur, et ainsi réduire ces problèmes. Nous avons mis au point une méthode de planification du processus de numérisation, cette méthode est présentée au chapitre 3.

Le *speckle* limite l'exactitude des mesures de profondeur dans les systèmes optiques de triangulation qui utilisent la lumière cohérente laser, même dans des conditions idéales des surfaces parfaitement planes et sans variation de réflectivité. Nous analyserons les effets du *speckle* plus en détail dans la section 2.7.

2.6 Modèle du bruit du système de numérisation

Afin de modéliser le bruit, nous nous intéressons généralement à l'obtention d'une caractérisation du bruit introduit à chaque point 3D de mesure. Cette caractérisation

sera fonction d'un certain nombre de paramètres tels que la distance du capteur à la surface et de l'angle d'incidence du rayon laser à la surface. L'effet de celui-ci affecte essentiellement les positions 3D déterminées par le capteur, et nous donne une image qui n'est pas identique à celle de la pièce réelle. Si on suppose que le bruit dans une image est additif et aléatoire, c'est-à-dire qu'un signal aléatoire $b(x, z)$ est ajouté aux vraies valeurs de l'image (x, z), telle que : $(\hat{x}, \hat{z}) = (x, z) + b(x, z)$. La quantité de bruit dans une image est estimée par la matrice de covariance $\mathbf{\Sigma}$. La plupart du temps, le bruit est modélisé comme une fonction aléatoire avec une distribution gaussienne de moyenne nulle :

$$b(\vec{r}) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}\sqrt{|\mathbf{\Sigma}|}} exp\left(-\frac{1}{2}(\vec{r}-\vec{s})^T\mathbf{\Sigma}^{-1}(\vec{r}-\vec{s})\right), \tag{2.15}$$

où $\vec{s}$ est un vecteur bidimensionnel correspondant au point le plus proche sur la surface du modèle géométrique donnée et $\mathbf{\Sigma}$ est la matrice de covariance. La matrice de covariance, présentée dans l'équation 2.16, définit pour le point $\vec{r}$, une ellipse dont la forme (longueur des axes) est fonction de la distance du capteur à la surface et de l'angle d'incidence du rayon laser à la surface.

$$\mathbf{\Sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}. \tag{2.16}$$

Les composantes de la matrice de covariance $\mathbf{\Sigma}$ sont :

- σ_{xx}, la variance en x, définie par : $\sigma_{xx} = E[(x - E[x]) \cdot (x - E[x])]$.
- σ_{xz} (σ_{zx}), la covariance entre x (z) et z (x), définie par : $\sigma_{xz} = \sigma_{zx} = E[(x - E[x]) \cdot (z - E[z])]$.
- σ_{zz}, la variance en z, définie par : $\sigma_{zz} = E[(z - E[z]) \cdot (z - E[z])]$.

Dans les relations précédentes $E[t]$ représente l'espérance mathématique (valeur moyenne) du signal t.

Par la suite, nous présentons la matrice de covariance $\mathbf{\Sigma}$ pour le capteur autosynchronisé et le capteur Biris.

Dans l'annexe B nous présentons la méthodologie utilisée pour la modélisation du bruit.

2.6.1 Modèle de bruit du capteur autosynchronisé

Afin d'évaluer l'exactitude des données 3D obtenues lors de la numérisation d'une surface ou d'une pièce avec le capteur autosynchronisé, nous avons réalisé des mesures dans différentes positions de distance et d'orientation du capteur laser par rapport à la surface. Les mesures ont été accomplies après le processus de calibration du capteur, et les emplacements du capteur (la position et l'orientation) étaient près des conditions de la calibration.

Initialement nous avons déterminé le taux de convergence de la valeur moyenne des mesures en prenant 256 mesures d'un même point. La Figure 2.9 montre que la valeur moyenne des mesures converge à une valeur constante lorsque 64 mesures du point ont été prises en compte. Nous avons donc décidé de prendre 128 mesures pour ainsi garantir la convergence des mesures réalisées dans chaque position évaluée.

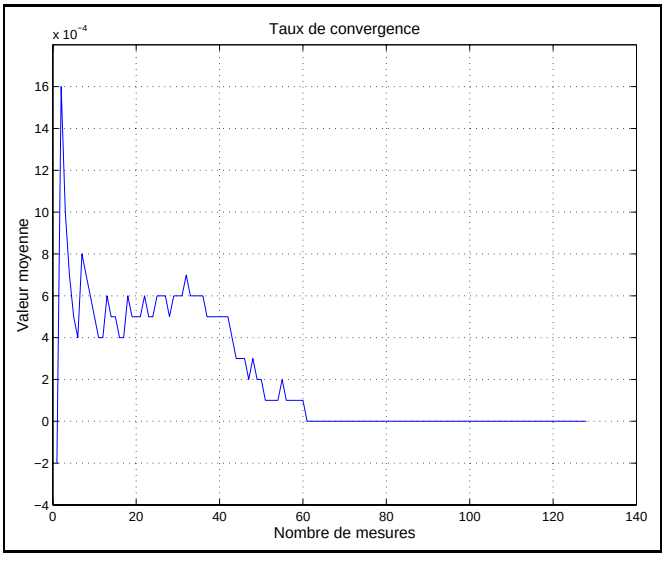


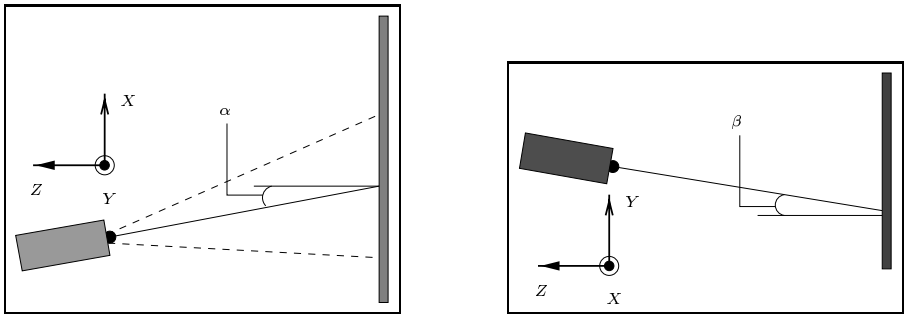
FIG. 2.9: Taux de convergence de la valeur moyenne des mesures

L'objectif des mesures est la détermination de la matrice de covariance Σ, que nous définissons par :

$$\mathbf{\Sigma} = \mathbf{\Sigma}(\alpha) + \mathbf{\Sigma}(\beta) + \mathbf{\Sigma}(d), \tag{2.17}$$

où :

- α est l'angle d'incidence du faisceau laser sur la surface dans la direction du balayage du rayon laser (rotation autour de l'axe Y dans la Figure 2.10(a)).
- β est l'angle d'incidence du faisceau laser sur la surface dans la direction perpendiculaire au balayage du rayon laser (rotation autour de l'axe X dans la Figure 2.10(b)).
- d la distance du capteur de profondeur à la surface.



(a) Paramètres α (b) Paramètres β

FIG. 2.10: Paramètres α et β

Matrice de covariance en fonction du paramètre α

Pour la détermination des composantes de la matrice de covariance en fonction de l'angle α, nous avons :

$$\mathbf{\Sigma}(\alpha) = \begin{pmatrix} \sigma_{xx}(\alpha) & \sigma_{xz}(\alpha) \\ \sigma_{zx}(\alpha) & \sigma_{zz}(\alpha) \end{pmatrix},$$

nous avons changé l'angle d'orientation du capteur de profondeur dans la direction du balayage du rayon laser.

Nous présentons dans la Figure 2.11 l'allure de la variance en x, σ_{xx}. Dans cette figure et par la suite, la courbe continue représente les mesures réelles et la courbe à trait brisés est la courbe approximée de cette courbe réelle. Bien que l'approximation paraît un peu grossière, elle est la meilleure approximation du comportement de la courbe réelle dans l'intervalle qui sera spécifié pour chaque courbe. L'échelle de l'ordonnée Y est en général de l'ordre de $10^{-6}mm^2$ pour le capteur autosynchronisé et de l'ordre de $0.1mm^2$ pour le capteur Biris.

Dans la Figure 2.11, la meilleure courbe qui approxime les valeurs réelles dans l'intervalle de 0° à 35° est définie par l'équation suivante :

$$\sigma_{xx}(\alpha) = 1.42 \times 10^{-7} \cdot e^{5.46 \times 10^{-2} \cdot |\alpha|} \tag{2.18}$$

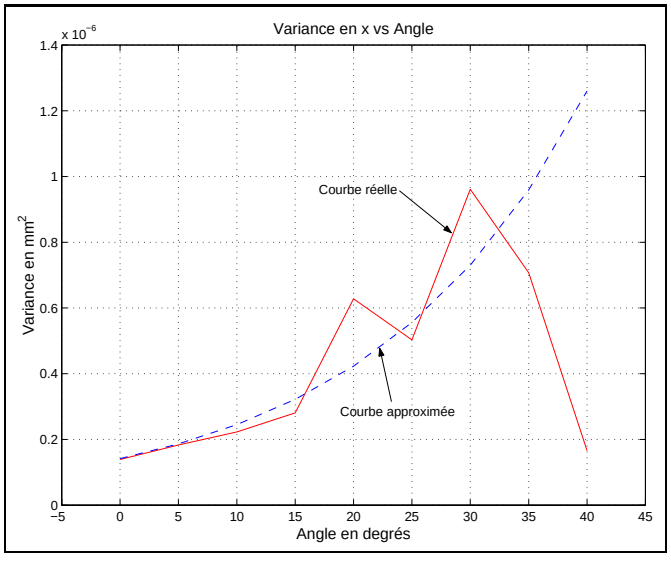


FIG. 2.11: Variance en x en fonction de l'angle d'incidence α

La Figure 2.12 montre l'allure de la covariance σ_{xz}, et la meilleure courbe qui approxime les valeurs réelles est définie par :

$$\sigma_{xz}(\alpha) = \sigma_{zx}(\alpha) = 6.47 \times 10^{-7} \cdot e^{5.91 \times 10^{-2} \cdot |\alpha|} \tag{2.19}$$

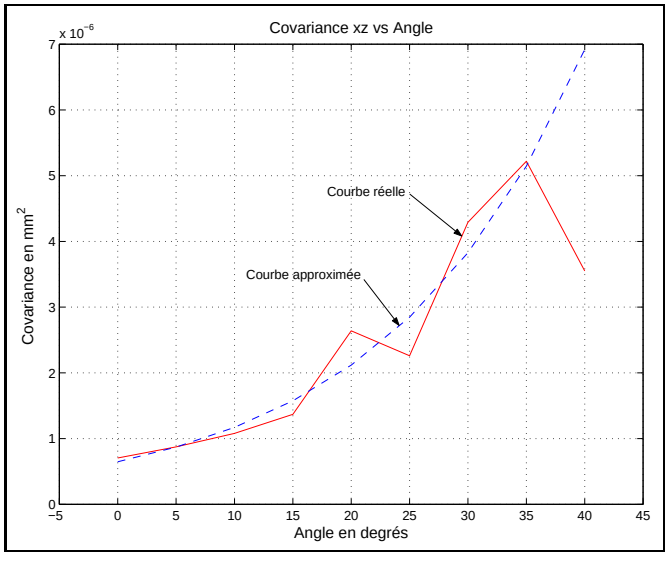


FIG. 2.12: Covariance xz en fonction de l'angle d'incidence α

Enfin, nous montrons dans la Figure 2.13 l'allure de la variance en z (σ_{zz}), et l'équation suivante définit la meilleure courbe qui approxime les valeurs réelles.

$$\sigma_{zz}(\alpha) = 3.77 \times 10^{-6} \cdot e^{6.01 \times 10^{-2} \cdot |\alpha|} \tag{2.20}$$

L'allure des trois composantes de la matrice de covariance est exponentielle, donc une valeur plus petite de la dispersion est produite pour un angle d'incidence près de zéro degré, ce qui suggère un emplacement optimal du capteur dans la direction normale à la surface. La courbe d'ajustement est valable dans l'intervalle $0° \leq \alpha \leq 35°$, donc lors de la numérisation d'une surface, l'angle d'incidence du faisceau laser sur la surface doit être compris dans l'intervalle $-35° \leq \alpha \leq 35°$. L'intervalle commence à $-35°$ et non à $0°$ parce que nous avons un résultat symétrique quand l'angle α est augmenté dans la direction opposée.

Des Figures 2.11, 2.12 et 2.13 nous observons que $\sigma_{zz} > \sigma_{xz} > \sigma_{xx}$, la variance dans la direction z est au moins 10 fois plus grande que la variance dans la direction x.

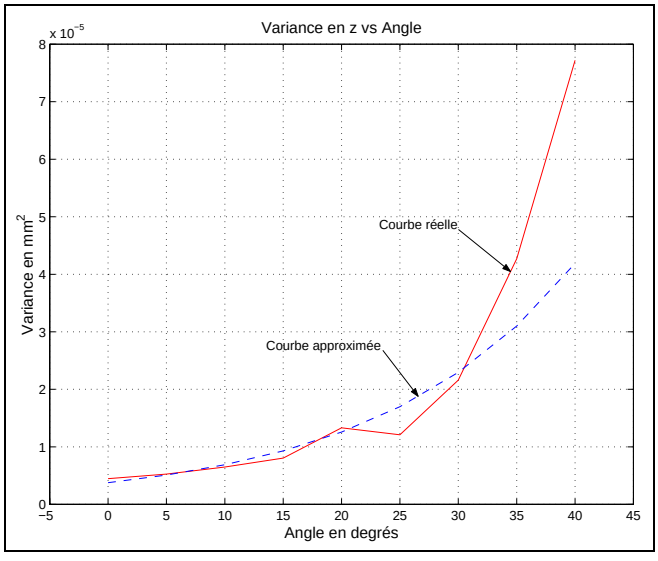


FIG. 2.13: Variance en z en fonction de l'angle d'incidence α

Matrice de covariance en fonction du paramètre β

La matrice de covariance en fonction de l'angle β :

$$\mathbf{\Sigma}(\beta) = \begin{pmatrix} \sigma_{xx}(\beta) & \sigma_{xz}(\beta) \\ \sigma_{zx}(\beta) & \sigma_{zz}(\beta) \end{pmatrix},$$

a été déterminée par la réalisation des mesures avec plusieurs orientations du capteur de profondeur, dans une direction perpendiculaire à celle du balayage du faisceau laser.

La Figure 2.14 montre l'allure de la variance en z en fonction de l'angle d'incidence β, $\sigma_{zz}(\beta)$. Nous ne présentons pas les courbes σ_{xx} et σ_{xz}, car elles ont la même allure, mais les valeurs sont plus petites. La meilleure courbe qui ajuste la courbe réelle est la courbe exponentielle définie par l'équation 2.23. Les équations 2.21 et 2.22 définissent l'allure de la variance en x et de la covariance xz, donc σ_{xx} et σ_{xz} respectivement.

$$\sigma_{xx}(\beta) = 1.59 \times 10^{-7} \cdot e^{4.59 \times 10^{-2} \cdot |\beta|} \tag{2.21}$$

$$\sigma_{xz}(\beta) = \sigma_{zx}(\beta) = 8.30 \times 10^{-7} \cdot e^{4.40 \times 10^{-2} \cdot |\beta|} \tag{2.22}$$

$$\sigma_{zz}(\beta) = 5.47 \times 10^{-6} \cdot e^{4.15 \times 10^{-2} \cdot |\beta|} \tag{2.23}$$

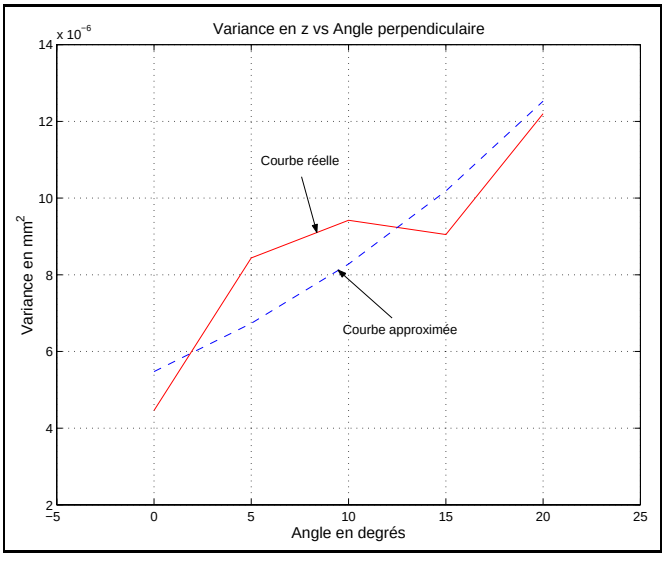


FIG. 2.14: Variance en z en fonction de l'angle d'incidence β

Comme pour le cas de la variation en fonction de l'angle α, lors de la numérisation, l'angle d'incidence du faisceau laser sur la surface dans la direction perpendiculaire au balayage du rayon laser doit être compris dans l'intervalle $-15° \leq \beta \leq 15°$.

Matrice de covariance en fonction du paramètre d

En changeant la distance du capteur par rapport à la surface, nous avons déterminé la matrice de covariance en fonction du paramètre d :

$$\mathbf{\Sigma}(d) = \begin{pmatrix} \sigma_{xx}(d) & \sigma_{xz}(d) \\ \sigma_{zx}(d) & \sigma_{zz}(d) \end{pmatrix}. \tag{2.24}$$

La Figure 2.15 montre l'allure de la variance en z en fonction de la distance de numérisation d, donc $\sigma_{zz}(d)$. Les équations 2.25, 2.26 et 2.27 sont les courbes qui ajustent au mieux l'allure de la variance en x, de la covariance xz et de la variance en z, donc σ_{xx}, σ_{xz} et σ_{zz} respectivement.

$$\sigma_{xx}(d) = 1.14 \times 10^{-11} \cdot d^2 - 4.20 \times 10^{-9} \cdot d + 5.20 \times 10^{-7} \tag{2.25}$$

$$\sigma_{xz}(d) = \sigma_{zx}(d) = 9.92 \times 10^{-11} \cdot d^2 - 3.82 \times 10^{-8} \cdot d + 4.34 \times 10^{-6} \tag{2.26}$$

$$\sigma_{zz}(d) = 8.86 \times 10^{-10} \cdot d^2 - 3.47 \times 10^{-7} \cdot d + 3.81 \times 10^{-5} \tag{2.27}$$

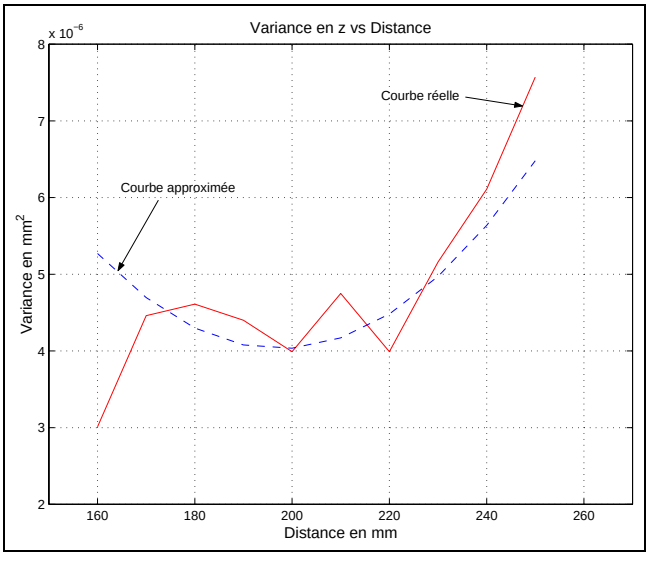


FIG. 2.15: Variance en z en fonction de la distance d

Nous concluons à partir de l'allure de la courbe de la Figure 2.15 que lors de la numérisation d'une surface, le capteur de profondeur doit être placé dans l'intervalle de distance suivant : $170mm \leq d \leq 240mm$.

L'analyse précédente confirme que nous pouvons améliorer l'exactitude des données 3D acquises par le capteur de profondeur en plaçant le capteur d'une façon telle que les paramètres α, β et d minimisent la matrice de covariance $\mathbf{\Sigma}$.

Nous remarquons aussi que le paramètre α introduit la plus grande dispersion, tandis que le paramètre d introduit la plus petite.

2.6.2 Modèle de bruit du capteur Biris

Comme pour le capteur autosynchronisé, afin d'évaluer l'exactitude des données 3D obtenues avec le capteur Biris, nous avons réalisé des mesures dans différentes positions et orientations du capteur par rapport à la surface. Le taux de convergence de la valeur moyenne des mesures a été déterminé auprès de 100 mesures, par conséquent nous avons pris 128 mesures dans chaque position évaluée.

Ces mesures nous ont permis de déterminer tous les paramètres de la matrice de covariance $\mathbf{\Sigma}$.

Matrice de covariance en fonction du paramètre α

Les composants de la matrice de covariance $\mathbf{\Sigma}(\alpha)$ ont été déterminés par la variation de l'orientation du capteur dans la direction du balayage du rayon laser.

La Figure 2.16 montre l'allure de la variance en z en fonction de l'angle α, donc $\sigma_{zz}(\alpha)$. La variance en x, σ_{xx}, la covariance en xz, σ_{xz} et la variance en z, σ_{zz}, sont ajustées par les courbes représentés par les équations 2.28, 2.29 et 2.30 respectivement.

$$\sigma_{xx}(\alpha) = 1.79 \times 10^{-6} \cdot \alpha^2 - 6.80 \times 10^{-5} \cdot |\alpha| + 7.61 \times 10^{-4} \quad (2.28)$$

$$\sigma_{xz}(\alpha) = \sigma_{zx}(\alpha) = 9.18 \times 10^{-6} \cdot \alpha^2 - 3.58 \times 10^{-4} \cdot |\alpha| + 4.35 \times 10^{-3} \quad (2.29)$$

$$\sigma_{zz}(\alpha) = 5.06 \times 10^{-5} \cdot \alpha^2 - 2.13 \times 10^{-3} \cdot |\alpha| + 3.18 \times 10^{-2} \quad (2.30)$$

Dans la Figure 2.16 nous observons que les valeurs les plus petites de la dispersion sont produites pour des angles dans l'intervalle $[15, 30]$ degrés, et non pour les angles à proximité de 0 degré comme prévu. Ce résultat est dû à l'inclinaision entre le capteur CCD et la source laser dans le capteur Biris afin de produire la triangulation

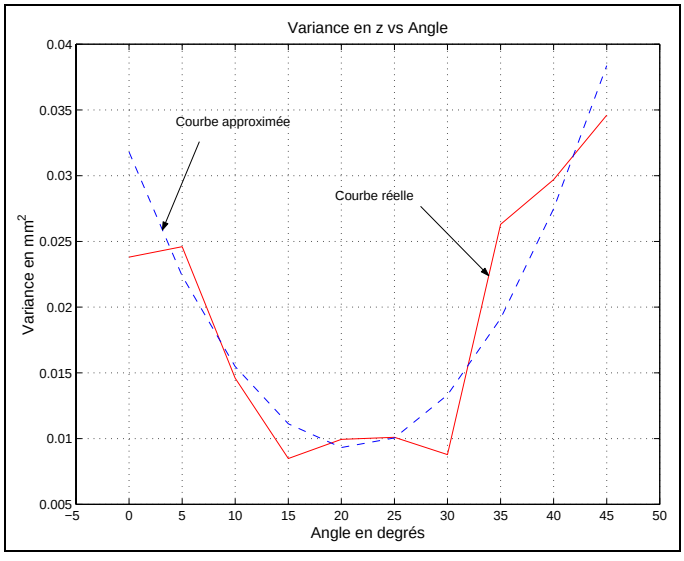


FIG. 2.16: Variance en z en fonction de l'angle d'incidence α

optique. L'angle d'incidence du faisceau laser sur la surface doit être compris dans l'intervalle $-15° \leq \alpha \leq 15°$, après la correction de l'inclinaison entre le capteur de CCD et la source laser.

Matrice de covariance en fonction du paramètre β

Les paramètres de la matrice de covariance en fonction de l'angle β, $\mathbf{\Sigma}(\beta)$, ont été déterminés par la réalisation de mesures avec plusieurs orientations du capteur de profondeur dans une direction perpendiculaire à celle du balayage du rayon laser.

La Figure 2.17 montre l'allure de la variance en z fonction de l'angle d'incidence β, $\sigma_{zz}(\beta)$.

L'allure de la courbe $\sigma_{zz}(\beta)$, est ajustée par une courbe exponentielle qui est représentée par l'équation 2.33. Les équations 2.31 et 2.32 définissent l'allure de la variance en x et de la covariance en xz, donc σ_{xx} et σ_{xz} respectivement.

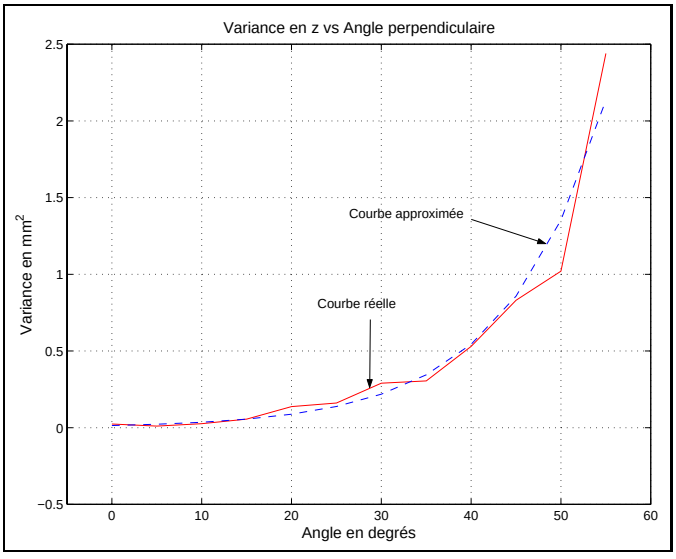


FIG. 2.17: Variance en z en fonction de l'angle d'incidence β

$$\sigma_{xx}(\beta) = 2.41 \times 10^{-4} \cdot e^{9.92 \times 10^{-2} \cdot |\beta|} \tag{2.31}$$

$$\sigma_{xz}(\beta) = \sigma_{zx}(\beta) = 1.57 \times 10^{-3} \cdot e^{9.06 \times 10^{-2} \cdot |\beta|} \tag{2.32}$$

$$\sigma_{zz}(\beta) = 1.42 \times 10^{-2} \cdot e^{9.13 \times 10^{-2} \cdot |\beta|} \tag{2.33}$$

L'angle d'incidence du faisceau laser sur la surface dans la direction perpendiculaire au balayage du rayon laser doit être compris dans l'intervalle $-40° \leq \beta \leq 40°$, mais pour les meilleures conditions d'exactitude, l'intervalle devrait être réduit à $-15° \leq \beta \leq 15°$.

Matrice de covariance en fonction du paramètre d

Enfin, en changeant la distance du capteur par rapport à la surface, nous avons déterminé la matrice de covariance en fonction du paramètre d, $\mathbf{\Sigma}(d)$.

La Figure 2.36 montre l'allure de la variance $\sigma_{zz}(d)$. Les équations 2.34, 2.35 et 2.36 sont les courbes exponentielles qui ajustent au mieux l'allure de σ_{xx}, de σ_{xz} et de σ_{zz}.

$$\sigma_{xx}(d) = 8.45 \times 10^{-5} \cdot e^{6.27 \times 10^{-3} \cdot d} \tag{2.34}$$

$$\sigma_{xz}(d) = \sigma_{zx}(d) = 5.21 \times 10^{-4} \cdot e^{6.42 \times 10^{-3} \cdot d} \tag{2.35}$$

$$\sigma_{zz}(d) = 4.51 \times 10^{-3} \cdot e^{6.52 \times 10^{-3} \cdot d} \tag{2.36}$$

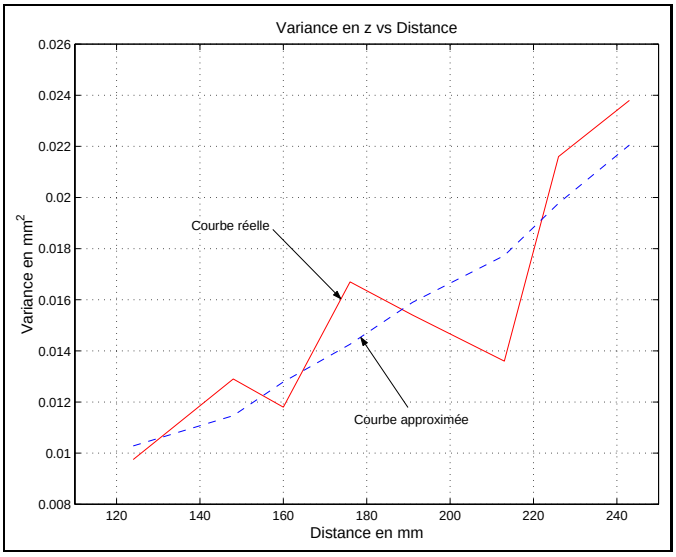


FIG. 2.18: Variance en z en fonction de la distance d

Les meilleures conditions de précision sont obtenues quand le capteur est plus proche de la pièce à numériser. En général il doit être placé dans l'intervalle de distance suivant : $160mm \leq d \leq 220mm$.

Contrairement au capteur autosynchronisé, pour le capteur Biris le paramètre β introduit la plus grande dispersion, et le paramètre d introduit la plus petite. Les valeurs de la matrice de covariance sont plus grandes pour le capteur Biris (jusqu'à $0.1mm^2$), que pour le capteur autosynchronisé (jusqu'à $3 \times 10^{-5} mm^2$). Pour la tâche d'inspection, nous avons besoin des données 3D à haute précision, par conséquent le capteur autosynchronisé est préférable au capteur Biris.

2.7 Le bruit de speckle

Même dans les circonstances idéales de numérisation d'un objet plan sans variations de réflectivité, l'exactitude des méthodes optiques de triangulation utilisant la lumière cohérente du laser est encore limitée par un phénomène inévitable d'interférence : le *speckle*.

2.7.1 Propriétés fondamentales du *speckle*

Le *speckle* est un processus aléatoire qui a les propriétés suivantes pour la distribution de l'irradiance $I(u,v)$ dans le plan (u,v) du capteur :

$$\langle I(u,v)\rangle = \bar{I}(u,v), \tag{2.37}$$

$$\langle I(u,v)I(u+\Delta u, v+\Delta v)\rangle = \bar{I}^2(u,v)[1+|\mu(\Delta u,\Delta v)|^2]. \tag{2.38}$$

La fonction $\bar{I}(u,v)$ représente l'image sans *speckle* qui pourrait être obtenue par l'utilisation d'une source de lumière qui n'est pas cohérente. On suppose que $\bar{I}(u,v)$ a la forme normalisée suivante :

$$\bar{I}(u,v) = \frac{1}{2\pi b^2 cos(\varrho)} exp\left(-\frac{(u-\bar{u})^2}{2b^2} - \frac{v^2}{2b^2 cos^2(\varrho)}\right), \tag{2.39}$$

où $\bar{u}$ est la position espérée pour le centroïde, ϱ est l'angle d'inclinaison entre le capteur CCD et la lentille, comme montré dans la Figure 2.3, et b mesure la largeur du profil gaussien d'irradiance le long de la direction de u.

Le terme $\mu(\Delta u, \Delta v)$ dans l'équation 2.38 est connu comme facteur de cohérence complexe de la corrélation spatiale du *speckle*. Il peut être calculé par la transformation de Fourier du module au carré de la fonction de transmission associée à la lentille du système de visualisation. La zone moyenne couverte par les grains du *speckle* A_c est définie par :

$$A_c = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} |\mu(\Delta u,\Delta v)|^2 d(\Delta u) d(\Delta v), \tag{2.40}$$

Il peut être démontré ([BAR91a], [BAR91b]) que A_c correspond à :

$$A_c = \frac{\lambda^2}{\Omega_u}, \tag{2.41}$$

où Ω_u est l'angle solide formé par la lentille, et λ est la longueur d'onde de la source de lumière.

La valeur médiane u_M d'une image avec du *speckle* est une quantité abstraite qui, indépendamment de la façon dont elle est mesurée, prend toujours des valeurs proches de la valeur médiane de l'image sans *speckle*. Baribeau et Rioux [BAR91a] ont montré que, en suivant quelques approximations raisonnables, u_M a une distribution gaussienne avec moyenne $\bar{u}$ et variance σ^2 donné par :

$$\sigma^2 = \frac{A_c}{8cos(\varrho)}. \tag{2.42}$$

L'effet du *speckle* peut être transféré a l'objet, et l'expression suivante est obtenue pour l'erreur de la valeur efficace des mesures de profondeur :

$$\sigma_z = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \frac{\lambda}{\phi} \frac{l}{sin(\gamma)}, \tag{2.43}$$

où ϕ est le diamètre de la lentille, l la distance entre la lentille et l'objet et γ l'angle de triangulation (voir la Figure 2.3).

2.7.2 Réduction du *speckle*

Les méthodes pour réduire le *speckle* se fondent habituellement sur la superposition de N images d'intensité avec du *speckle* non-corrélées. L'effet de calculer la moyenne spatiale peut être estimé par l'utilisation d'un modèle simple. $\bar{I}(u, v)$ dans l'équation 2.39 représente le profil normalisé d'irradiance espéré, dans le plan du capteur. Quand l'image espérée $\bar{I}(u, v)$ est multipliée par un modèle du *speckle* qui se déplace d'une distance L pendant le temps d'intégration, une partie s de l'énergie totale t est rassemblée symétriquement par rapport à $\bar{u}$. Les fluctuations efficaces des centroïdes sont espérées être réduites à :

$$\sigma(L) = \sigma_0 \left(1 - \frac{s}{t}\right), \tag{2.44}$$

où σ_0 représente les fluctuations efficaces sans faire la moyenne spatiale. La grandeur s peut être évaluée en faisant la moyenne, sur tout u, de la contribution symétrique des grains du *speckle* entre u et $u + L$ sur l'irradiance $\bar{I}(u, v)$.

Pour mesurer l'effet du *speckle* sur des mesures de profondeur, une surface plane a été balayée et les lectures de profondeur enregistrées pour un grand nombre de balayages. Des statistiques pour la fluctuation de profondeur ont alors été calculées. La figure 2.19 montre la réduction du bruit du *speckle* quand la moyenne de l'irradiance est calculée entre u et $u + L$.

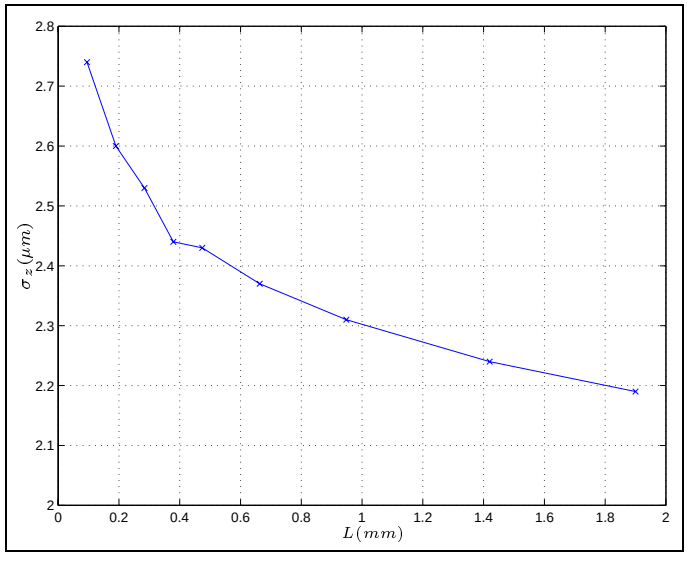


FIG. 2.19: Fluctuation de la mesure de profondeur versus la moyenne de la distance

Un inconvénient de ce type de réduction se présente lorsque la surface numérisée n'est pas plane. En effet, pour un petit déplacement du rayon laser sur une surface courbe, outre le *speckle*, les variations dans le signal d'irradiance dépendront aussi de paramètres telle que la quantité de lumière reflétée qui arrive au détecteur.

Dans les images de radar SAR (Synthetic Aperture Radar), le *speckle* est une des principales sources d'erreur. Plusieurs travaux, qui utilisent les techniques des ondelettes ([ABD97], [GAG97]) ou des réseaux neuronaux ([BLA95], [KOF97]), ont été effectués afin de réduire ce bruit. A notre connaissance aucunes de ces méthodes

ont été utilisées pour la réduction du bruit du *speckle* lors de la numérisation d'une pièce en utilisant des capteurs de profondeur. La mise au point d'une telle méthode pourrait soulever le problème de la forme de la surface et nous fournir des données 3D plus précises. Ces données seraient très utiles pour la tâche d'inspection.

Dans l'annexe B nous présenterons quelques images qui montrent les problèmes du *speckle* sur la surface utilisé pour la modélisation du bruit.

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, après une présentation rapide des capteurs de profondeur utilisés, nous avons illustré quelques problèmes qui diminuent la précision des données 3D lors de la numérisation d'une pièce. Les problèmes d'ordre géométrique (occlusion, discontinuité) peuvent être diminués par la définition d'un emplacement optimal du capteur comme celui que nous présenterons dans le chapitre 3.

Nous avons étudié l'influence de l'angle d'incidence (α et β) et de la distance de numérisation dans la précision des mesures de profondeur. Nous avons obtenu un modèle de dispersion pour les mesures de profondeur fonctions des paramètres α, β et d. Ce modèle, qui est un critère très important dans la génération de la stratégie de numérisation d'une pièce, nous permet d'estimer la précision avec laquelle une surface a été numérisée.

Enfin, nous avons présenté le problème du *speckle* dans les mesures de profondeur utilisant de la lumière cohérente.

Chapitre 3

Stratégie d'acquisition optimale de points 3D

3.1 Introduction

En inspection, la plupart du temps nous devons vérifier en détail les spécifications de certaines surfaces de la pièce, et d'une façon plus globale les spécifications de toute la pièce. La méthode standard d'inspection est l'utilisation de machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) lesquelles, malgré leur très grande précision, sont lentes et ne permettent pas d'avoir un grand nombre de points de mesure distribués sur toute la surface. Par ailleurs, les capteurs de profondeur permettent l'obtention de données 3D d'un objet très rapidement, mais sans arriver à la précision des MMTs. Afin de profiter de leur grande vitesse de numérisation et pour tenter d'approcher la précision des MMTs, il est nécessaire de définir des méthodologies de numérisation qui permettront de numériser les pièces dans les meilleures conditions de précision et en plus d'avoir une estimation de la précision des mesures.

Aujourd'hui, les stratégies de numérisation que l'on retrouve dans la littérature cherchent à être optimales par rapport au nombre de points de vue de numérisation, en négligant la précision des données. Nous avons donc mis au point une nouvelle

stratégie de numérisation de pièces ou de surfaces d'intérêt, tout en cherchant à être optimal par rapport à la précision des mesures afin de les utiliser pour la tâche d'inspection. Dans ce chapitre, nous allons présenter cette méthodologie ou stratégie de numérisation.

3.2 Définition du Problème

Nous nous intéressons à l'inspection automatisée de pièces industrielles. Cette inspection est faite en comparant le modèle CAO NURBS[1] (format IGES[2]) de la pièce et son image 3D obtenue à l'aide d'un capteur laser de haute précision. Notre problème est donc de développer et de mettre en place un algorithme qui détermine la stratégie optimale (par rapport à la précision) de numérisation des pièces industrielles ayant des surfaces aussi bien simples que complexes.

La Figure 3.1 expose de façon générale le problème. Si toutes les contraintes (les entrées du système) sont satisfaites, l'algorithme doit, en tenant compte de certains critères définis, déterminer une stratégie de numérisation. Cette stratégie devrait nous permettre d'avoir une numérisation optimale de la pièce par rapport à la tâche d'inspection.

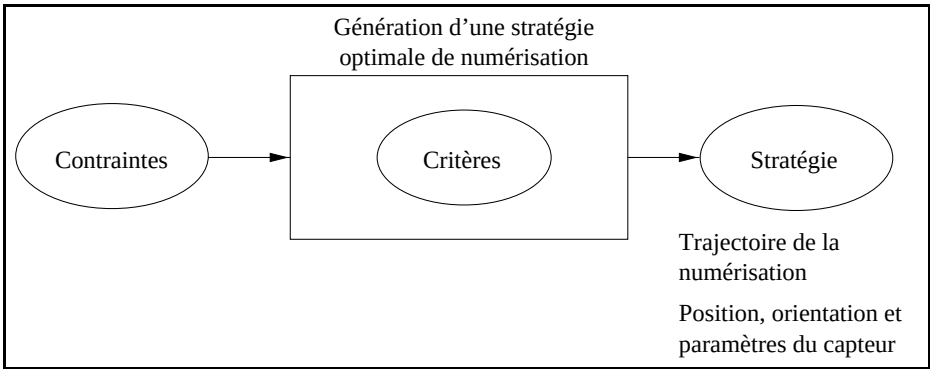


FIG. 3.1: Stratégie de numérisation pour l'inspection

[1]NURBS : Non-Uniform Rational B-Splines.
[2]IGES : Initial Graphic Exchange Standard.

3.2.1 Stratégie de numérisation

Nous définissons la stratégie de numérisation d'une pièce comme la détermination d'un ensemble de points de vue optimaux de façon à ce que l'image 3D soit optimale pour la tâche d'inspection.

Point de vue. Un point de vue est défini comme l'ensemble de sept paramètres $x^i = \{x, y, z, \phi, \theta, \psi, \gamma\}^i$ composé de trois paramètres de position, trois paramètres d'orientation et un paramètre de balayage. Le paramètre γ spécifie le champ de vue du capteur, que nous avons déjà défini dans la Section 2.2 comme étant ϕ_x. Par la suite nous utiliserons la notation (γ) à la place de ϕ_x, pour eviter toute confusion avec le paramètre d'orientation ϕ.

- *Paramètres de position.* Ces paramètres dans R^3 définissent la position spatiale du capteur par rapport au système référentiel de la pièce. Ce sont les coordonnées (x, y, z).
- *Paramètres d'orientation.* Ces paramètres dans R^3 définissent l'orientation que doit prendre le capteur lors de la numérisation. Ce sont les angles (ϕ, θ, ψ), l'angle ϕ par rapport à l'axe Z, l'angle θ par rapport au plan XY et l'angle ψ par rapport à l'axe de projection du rayon laser qui définit la direction du balayage.
- *Paramètre de balayage.* Le paramètre γ spécifie l'amplitude du balayage du rayon laser, ce paramètre est aussi appelé le "champ de vue du capteur". Un autre paramètre qui est défini quand le support mécanique de la caméra est un bras de robot est ζ. Il définit l'amplitude du balayage du capteur réalisée par le support mécanique et dans une direction perpendiculaire à la direction du balayage du rayon laser. Ces paramètres peuvent varier et d'autres peuvent être nécessaires en fonction du type du capteur et du support mécanique utilisé.

La Figure 3.2 illustre tous les paramètres qui définissent un point de vue. Nous ne considérons pas certains paramètres optiques tels que la focale et l'ouverture de

lentille car nous supposons que le système (capteur plus support mécanique) est déjà calibré.

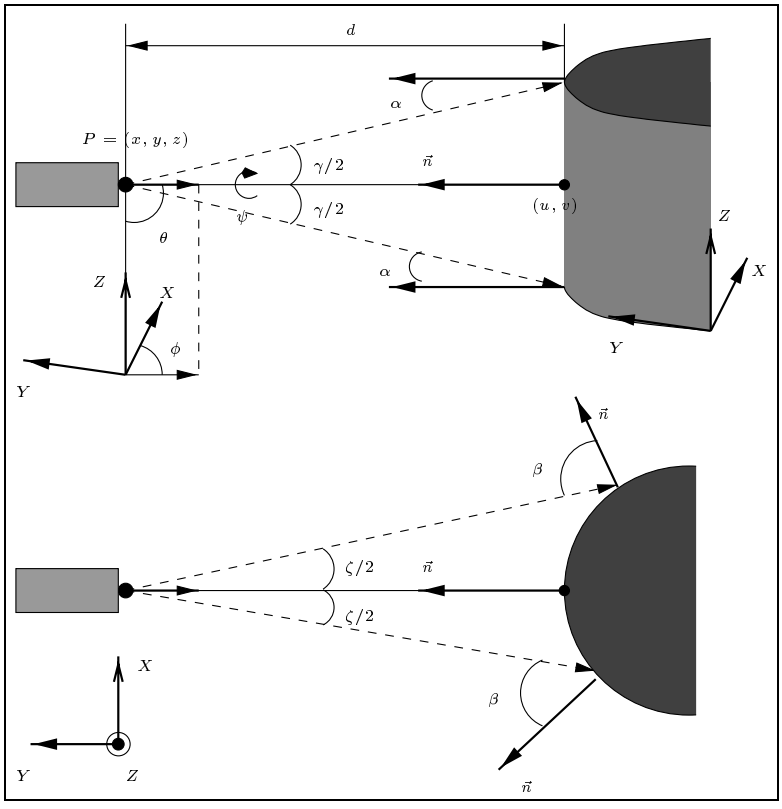


FIG. 3.2: Définition des paramètres d'un point de vue

Ensemble de points de vue. C'est l'ensemble minimal de points de vue x^i, donc $\mathbf{X} = \{x^1 x^2 ... x^n\}$, qui permettent de numériser une surface ou toute la pièce. Une image globale de profondeur est obtenue en déplaçant le capteur à tous les points de vue dans cet ensemble. Le déplacement spatial entre deux points de vue consécutifs est fait en ligne droite.

3.2.2 Contraintes

Les contraintes imposées à notre système, en sachant que notre intérêt est l'inspection de pièces industrielles, sont les suivantes : taille de la pièce, connaissance

de la position et de l'orientation initiales de la pièce, connaissance du modèle CAO (IGES) de la pièce et spécification de la densité souhaitée de numérisation.

Taille de la pièce. La seule contrainte géométrique imposée au système réside dans les dimensions de la pièce. Le capteur laser, pour balayer une surface, doit être monté et déplacé à l'aide d'un support externe. Les supports les plus courants sont : la machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) et le bras de robot. La pièce à inspecter est contrainte à être complètement à l'intérieur de l'espace de travail du support mécanique du capteur.

Position et orientation de la pièce. La connaissance de la position et de l'orientation de la pièce nous permet de superposer le référentiel de la pièce avec celui du support mécanique du capteur laser. Pour résoudre cette contrainte, nous utilisons un algorithme de recalage entre un nuage de points non ordonnés et le modèle CAO de la pièce, qui a été mis en place par Moron [MOR96a] et qui est basé sur le travail bien connu de Besl et McKay [BES92]. Nous présentons cette algorithme de recalage dans la section 4.2.

Modèle CAO (IGES). Le système se sert du modèle CAO de la pièce au format IGES non seulement dans le processus de recalage, mais aussi lors de la recherche de l'ensemble des points de vue de numérisation. Le format IGES contient la représentation exacte de la pièce en utilisant des surfaces NURBS qui seront utilisées pour le calcul des positions du capteur dans l'espace. Les surface NURBS sont utilisées aussi pour la construction d'un modèle *voxel* de la pièce qui permet de résoudre les problèmes de collision et d'occlusion.

Qualité de la numérisation souhaitée. La précision des données est liée directement au type de capteur et aux conditions de la numérisation (la position et l'orientation du capteur ainsi que l'amplitude du balayage). Cette contrainte définit

la précision minimale avec laquelle nous voulons numériser la surface. Autrement dit, elle définit la qualité de la numérisation. La précision des données joue un rôle important lors de l'inspection d'une pièce.

3.2.3 Critères pour la stratégie de numérisation

Nous allons décrire quelques critères que l'algorithme de génération de pose doit prendre en compte pour aboutir à une solution optimale.

Position et orientation du capteur lors de la numérisation. Nous avons vu dans le paragraphe 2.6 que la précision des données 3D lors de la numérisation est fonction directement du type de capteur et des conditions de numérisation telles que la position et l'orientation. Pour la tâche d'inspection, une numérisation dans les meilleures conditions de précision est souhaitable. Un premier critère à respecter est donc que les paramètres de chaque point de vue doivent positionner et orienter le capteur de façon que la numérisation soit faite dans les meilleures conditions vis-à-vis de la précision des données.

Visibilité des surfaces à numériser. L'algorithme doit garantir que la région à numériser sera complètement visible (pour la caméra CCD et pour le capteur télémétrique) depuis le point de vue de numérisation, c'est-à-dire que la région ne soit pas occultée. Certaines surfaces sont facilement visibles, tandis que d'autres le sont plus difficilement. Une étape d'évaluation de la visibilité doit donc être mise en place.

Précision des données. Pour résoudre le problème de visibilité de certaines surfaces, le capteur devra parfois être placé éloigné des conditions optimales de numérisation, donc nous obtiendrons une précision moindre. Le système doit évaluer la nouvelle précision des données et garantir qu'elle est meilleure que la précision minimale requise par le système (sinon en informer l'opérateur).

Distribution uniforme des points. Les points pris lors de la numérisation doivent être distribués de façon uniforme sur les différentes surfaces de la pièce. De plus le système doit connaître les régions de la pièce qui ont déjà été numérisées.

Présentation de l'ensemble des points de vues. Le nombre de points de vue doit être optimal et ceux-ci placés de façon telle que le déplacement du support mécanique soit minimal et qu'il n'y ait pas de collisions.

3.3 La Stratégie d'acquisition

Le but principal de cette stratégie d'acquisition est d'améliorer la précision de numérisation d'une surface ou d'une pièce et de connaître la précision avec laquelle chaque point 3D a été acquis afin d'utiliser ce nuage de points dans la tâche d'inspection. Cette stratégie consiste à déterminer un ensemble X de points de vue x^i, afin d'obtenir une image 3D complète et optimale de la pièce. Une image 3D optimale est un nuage de points 3D résultant d'un processus de numérisation dans les meilleures conditions de précision.

L'algorithme que nous avons mis au point comme solution à ce problème est présenté par la suite :

Algorithme pour déterminer une stratégie de numérisation optimale

1. *Traitement des données d'entrée.*
   - 1.1. *Extraction de l'information à partir du fichier CAO.*
   - 1.2. *Création d'un modèle voxel de la pièce.*
2. *Recherche de l'ensemble X de points de vue.*
   - 2.1. *Détermination des points de vue projetés sur la surface.*
   - 2.2. *Localisation optimale du point de vue dans l'espace.*

2.3. Vérification de l'accessibilité et des conditions de non-occlusion.

3. Estimation de la précision des données 3D.

4. Présentation optimale de l'ensemble X de points de vue.

La Figure 3.3 nous montre le schéma-bloc de cet algorithme.

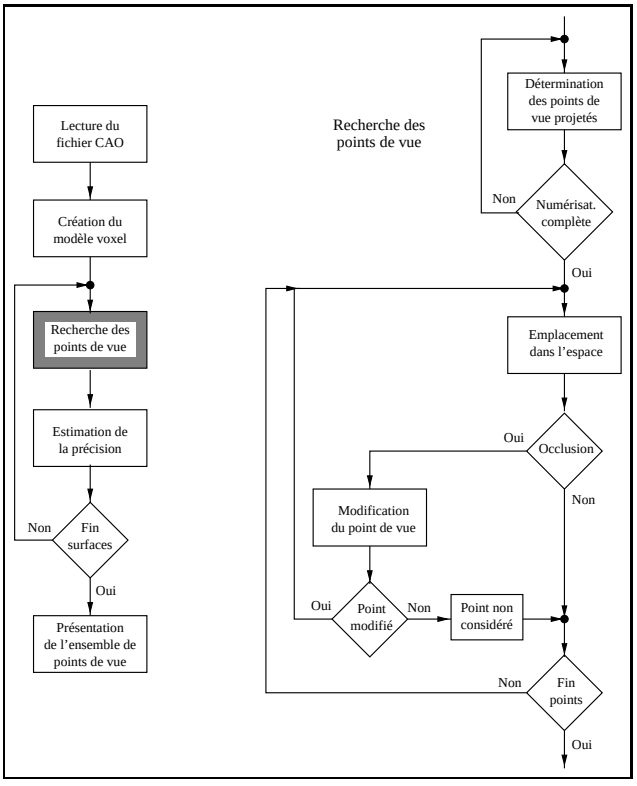


FIG. 3.3: Schéma-bloc de l'algorithme pour déterminer une stratégie de numérisation optimale

Dans les paragraphes suivants, nous détaillerons chaque étape de cet algorithme.

3.3.1 Traitement des données d'entrée

Cette étape est composée essentiellement de deux processus qui servent à extraire, à partir des données d'entrée, l'information nécessaire pour réaliser la

recherche de l'ensemble de points de vue. Dans un premier processus, le fichier CAO de la pièce (format IGES) est lu et utilisé pour déterminer les surfaces composantes de la pièce. Le deuxième processus consiste à la création d'un modèle *voxel* de la pièce.

Etape 1.1 : Extraction de l'information à partir du fichier CAO

Comme l'objectif final de ce travail est l'inspection des pièces industrielles, qui est réalisé en comparant le nuage de points de la pièce avec son modèle CAO, le modèle utilisé doit être le plus précis possible. Le format IGES a été choisi car il offre une représentation exacte de toutes les surfaces composantes de la pièce en modélisant les surfaces par des surfaces NURBS. Nous avons utilisé pour la création des modèles des pièces le logiciel de CAO *ProEngineer*. Lors de la création des modèles, l'option du logiciel qui convertit les entités (telles que : les cônes, les cylindres, les sphères et les surfaces de révolution) en surfaces NURBS a été utilisée.

Ainsi les entités traitées lors de la lecture du fichier CAO sont les suivantes :

- Entité de type 100 : Arc de cercle.
- Entité de type 102 : Courbe composée.
- Entité de type 110 : Segment de droite.
- Entité de type 126 : Courbe NURBS.
- Entité de type 128 : Surface NURBS non-découpée.
- Entité de type 142 : Courbe définie sur une surface paramétrique.
- Entité de type 144 : Surface NURBS (paramétrique) découpée.

Dans le modèle IGES, toute surface composante d'une pièce est représentée par une surface paramétrique découpée, qui est une surface NURBS pleine (non-découpée), coupée par une ou plusieurs courbes. Les courbes de découpe définissent le domaine de variation des paramètres (u, v) de la surface paramétrique. Une courbe

de découpe est l'addition d'une ou plusieurs courbes telles que : arc de cercle, segment droite, courbe NURBS, etc.

Par la suite, nous présentons la définition d'une surface NURBS non-découpée et découpée (paramétrique). Dans l'annexe C nous définissons toutes les entités utilisées dans ce travail. Pour une description plus en détail voir [SMI88].

Surface NURBS non-découpée. L'intérêt de ce type de surface est leur grande capacité descriptive et l'exactitude de leur représentation. Une surface NURBS de degré p dans la direction paramétrique u et de degré q dans la direction paramétrique v est définie par l'équation suivante (voir [FAU81], [FAR92] et [PIE97]) :

$$\vec{s}(u,v) = \frac{\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m} N_{i,p}(u)N_{j,q}(v)w_{i,j}\vec{P}_{i,j}}{\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m} N_{i,p}(u)N_{j,q}(v)w_{i,j}} \tag{3.1}$$

où :

n est le nombre de points de contrôle dans la direction paramétrique u,

m est le nombre de points de contrôle dans la direction paramétrique v,

$\vec{P}_{i,j}$ les points de contrôle,

$w_{i,j}$ le poids associé au point de contrôle $\vec{P}_{i,j}$,

$N_{i,p}$ (ou $N_{j,q}$) les fonctions de la base B-Spline définies par la formule récurrente suivante :

$$N_{i,p}(u) = \frac{u-u_{i-1}}{u_{i+p-1}-u_{i-1}}N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p}-u}{u_{i+p}-u_i}N_{i+1,p-1}(u) \text{ et}$$

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & \text{si } u_{i-1} \leq u \leq u_i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}, \text{ et}$$

u_i, v_j les nœuds appartenant aux vecteurs de nœuds de la surface NURBS, $u_i \in [u_0, u_1]$ et $v_j \in [v_0, v_1]$.

Surface NURBS (paramétrique) découpée. Une courbe fermée dans un plan divise ce dernier en deux composantes disjointes, une composante externe et illimitée (région du plan externe à la courbe) et une composante interne et limitée (région du plan interne à la courbe). Une courbe de découpe extérieure définit la limite

extérieure d'une surface découpée. Elle implique que seulement sa composante interne est utilisée. Une courbe de découpe intérieure définit une limite interne d'une surface découpée. Elle implique que seulement sa composante externe est utilisée. Le domaine d'une surface découpée est défini par l'intersection entre : la composante interne de la courbe de découpe extérieure, et la composante externe de chacune des courbes de découpe intérieure.

Soit $\vec{s}(u, v)$ une surface paramétrique non-découpée, avec un domaine D_n défini par les points (u, v) tels que $a \leq u \leq b$ et $c \leq v \leq d$, où a, b, c et d sont des constantes telles que $a \leq b$ et $c \leq d$. Soit également la surface $\vec{s}(u, v)$ soumise aux conditions de continuité suivantes :

- Le vecteur normal est continu à l'intérieur de D_n.
- La surface est linéaire dans D_n.
- Il n'y a aucun point singulier dans D_n, c'est-à-dire que les vecteurs des premières dérivées partielles de $\vec{s}(u, v)$ à un point quelconque dans D_n sont linéairement indépendants.

Deux types de courbes fermées sont utilisés pour définir le domaine d'une surface paramétrique découpée :

- Limite extérieure : il y en a seulement une. Elle est contenue dans D_n, et en particulier, elle peut être égale à D_n.
- Limite intérieure : il peut en exister aucune, une ou plusieurs. L'ensemble des limites intérieures doit satisfaire les deux critères suivants : les courbes ainsi que leurs aires intérieures ne doivent pas être communes, et toutes les courbes sont à l'intérieur de la courbe de la limite extérieure.

La Figure 3.4 illustre une surface paramétrique découpée, avec une courbe NURBS comme découpe extérieure et trois courbes de découpe intérieure. Le domaine D de variation des paramètres u et v est défini par :

$$D = \{(u, v) | u_0 \leq u \leq u_1, v_0 \leq v \leq v_1 \text{ et } (u, v) \in A \cap B\},$$

où :

A est la composante interne de la courbe de découpe extérieure et

B est l'union des composantes externes des courbes de découpe intérieure.

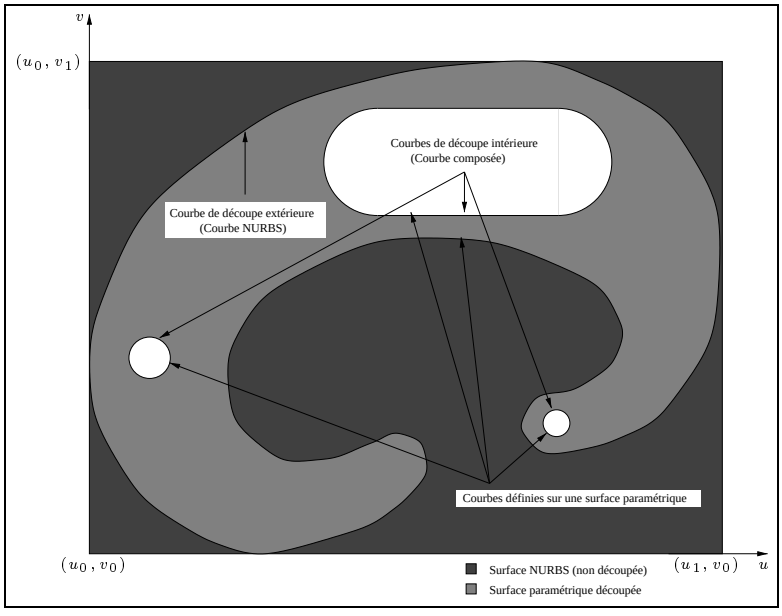


FIG. 3.4: Surface NURBS (paramétrique) découpée

Etape 1.2 : Création d'un modèle voxel de la pièce

Soit $P(u, v)$ la représentation surfacique d'une pièce définie par l'union de ses N surfaces paramétriques découpées, tel que :

$$\begin{aligned} P(u,v) &= \sum_{i=1}^{N} \vec{s}_i(u,v) \\ &= \sum_{i=1}^{N} (S_{ix}(u,v), S_{iy}(u,v), S_{iz}(u,v)) \\ &= \sum_{i=1}^{N} (X_i(u,v), Y_i(u,v), Z_i(u,v)) = P(x,y,z). \end{aligned} \tag{3.2}$$

Soit $P_D(x,y,z)$ le modèle *voxel* de la pièce défini par :

$$\begin{aligned} P_D(x,y,z) &= \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=0}^{Nu_i}\sum_{k=0}^{Nv_i}(Inf(X_i(u_i+j\Delta u_i, v_i+k\Delta v_i)), \\ &\qquad Inf(Y_i(u_i+j\Delta u_i, v_i+k\Delta v_i)), Inf(Z_i(u_i+j\Delta u_i, v_i+k\Delta v_i))) \\ &= \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=0}^{Nu_i}\sum_{k=0}^{Nv_i}(X_{ijk}, Y_{ijk}, Z_{ijk}) \\ &= \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=0}^{Nu_i}\sum_{k=0}^{Nv_i} V_{ijk} \end{aligned} \tag{3.3}$$

où :

$Inf(X(u,v))$ est le plus grand nombre entier inférieur ou égal à $X(u,v)$,

$\Delta u_i = \frac{u_{i1}-u_{i0}}{Nu_i}$ et

$\Delta v_i = \frac{v_{i1}-v_{i0}}{Nv_i}$

avec Nu_i et Nv_i deux seuils qui garantissent que tout *voxel* touché par la surface $\vec{s}_i$ est identifié. Le point (x,y,z) est défini par le *voxel* V_{ijk} comme : $x_{ijk} \leq x < x_{ijk}+1$, $y_{ijk} \leq y < y_{ijk}+1$ et $z_{ijk} \leq z < z_{ijk}+1$. Si nous faisons une extension du concept d'une image bidimensionnelle, où chaque pixel (i,j) peut prendre une des deux valeurs, dans l'espace 3D chaque voxel (i,j,k) peut prendre une des deux valeurs : 0 (inoccupé) ou 1 (occupé). Un voxel occupé contient une partie d'une des surfaces qui composent la pièce. Le modèle *voxel* de la pièce P_D est l'addition de tous les voxels occupés. Il est clair que $P(x,y,z) \subseteq P_D(x,y,z)$, autrement dit, $P_D(x,y,z)$ est une représentation complète de la pièce.

L'importance de la représentation $P_D(x,y,z)$ sera mise en évidence lors de la vérification de la visibilité de la région à numériser à partir des points de vue possibles. Nous présentons dans la Figure 3.5 le *voxel* V_{ijk} et la représentation $P_D(x,y,z)$ du profil de la surface $\vec{s}(u,v)$.

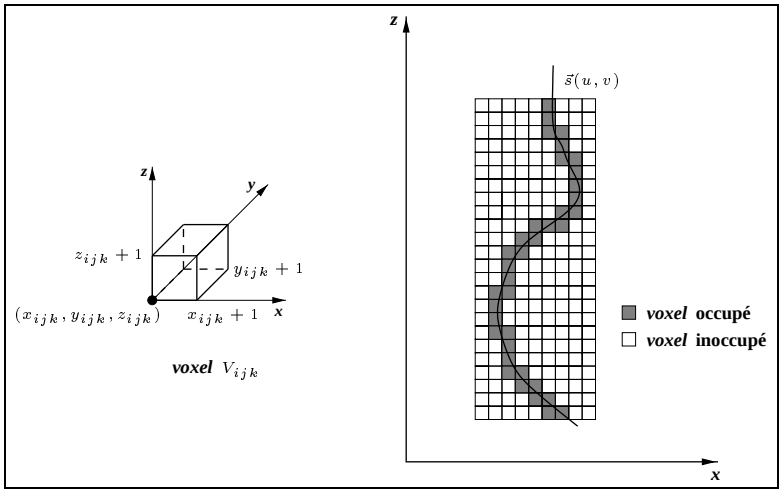


FIG. 3.5: Le *voxel* V_{ijk} et la représentation en *voxels* du profil de la surface $\vec{s}(u, v)$

3.3.2 Recherche de l'ensemble X de points de vue

Nous avons défini un point de vue x^i comme l'ensemble de sept paramètres : $x^i = \{x, y, z, \phi, \theta, \psi, \gamma\}^i$, et l'ensemble de points de vue X comme le nombre minimal de points de vue x^i qui nous permet de numériser de façon complète une surface ou toute la pièce.

Dans cette section nous allons décrire les étapes de l'algorithme pour aboutir à l'ensemble X de points de vue pour deux systèmes capteur/support mécanique différents : le premier est composé du capteur autosynchronisé monté sur une machine à mesurer tridimensionnelle, et le deuxième comprend le capteur Biris monté sur un bras de robot.

La recherche de l'ensemble de points de vue se fait de façon indépendante pour chaque surface d'intérêt et se compose de trois processus. Initialement une image 2D (binaire) qui représente la surface est créée (à partir de sa surface NURBS découpée) et traitée pour obtenir les points de vue projetés sur la surface. L'ensemble de points de vue projetés est utilisé pour obtenir le point de vue (dans l'espace) en définissant tous ses paramètres. Finalement, au besoin, le point de vue est modifié de façon à garantir l'accessibilité et la visibilité de la région de la surface à numériser.

Etape 2.1 : Détermination des points de vue projetés sur la surface

Nous définissons un point de vue projeté sur la surface comme le point central (sur la surface) lors d'un balayage. Le capteur est initialement placé de façon que le rayon laser soit normal à ce point. Désormais, nous appellerons ce point : le point de vue projeté. Nous créons d'abord une représentation 2D de chaque surface. Pour chaque ensemble capteur/support mécanique, cette image est traitée pour obtenir l'ensemble de points de vue projetés. Nous dénotons par PVP_{S_i} l'ensemble de points de vue projetés sur la surface $\vec{s}_i$.

Création de l'image 2D binaire et discrète de la surface

Soit $\vec{s}(u,v)$ l'équation d'une surface paramétrique découpée, obtenue à partir du fichier CAO. Comme il a été dit, le domaine D de variation des paramètres u et v est défini par : $D = \{(u,v) | u_0 \leq u \leq u_1, v_0 \leq v \leq v_1 \text{ et } (u,v) \in A \cap B\}$, avec A la composante interne de la courbe de découpe extérieure et B l'union des composantes externes des courbes de découpe intérieure.

Nous définissons le maillage M sur l'espace paramétrique (u,v), avec un pas d'échantillonnage Δ_{uv} tel que :

$$\overline{de}(\vec{s}(u_i,v_j), \vec{s}(u_i+\Delta_{uv}, v_j)) = \overline{de}(\vec{s}(u_i,v_j), \vec{s}(u_i, v_j+\Delta_{uv})) = 1,$$

où $\overline{de}(\vec{p_1}, \vec{p_2})$ représente la distance euclidienne dans R^3 entre les points $\vec{p_1}$ et $\vec{p_2}$ ($\|\vec{p_1} - \vec{p_2}\|$). Pour le maillage M, nous définissons l'espace discret (u^d, v^d) tel que $u^d = 0, 1, 2, ..., n$ et $v^d = 0, 1, 2, ..., m$, avec $n = Int(\frac{u_1 - u_0}{\Delta_{uv}} + 1)$ et $m = Int(\frac{v_1 - v_0}{\Delta_{uv}} + 1)$ et $Int(a)$ la partie entière de a.

L'image discrète et binaire $\vec{s}_{db}(u^d, v^d)$ de la surface $\vec{s}$ est définie par l'équation suivante :

$$\vec{s}_{db}(u^d, v^d) = \begin{cases} 1 & \text{si } (u^d, v^d) \in A \cap B \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{3.4}$$

autrement dit, $\vec{s}_{db}$ est égal à l'ensemble des points (u^d, v^d) du maillage qui sont inclus

dans $\vec{s}$.

Nous présentons dans la Figure 3.6 l'image binaire et discrète $\vec{s}_{bd}(u^d, v^d)$ de la surface $\vec{s}(u, v)$, ainsi que le maillage M avec un pas d'échantillonnage Δ_{uv}.

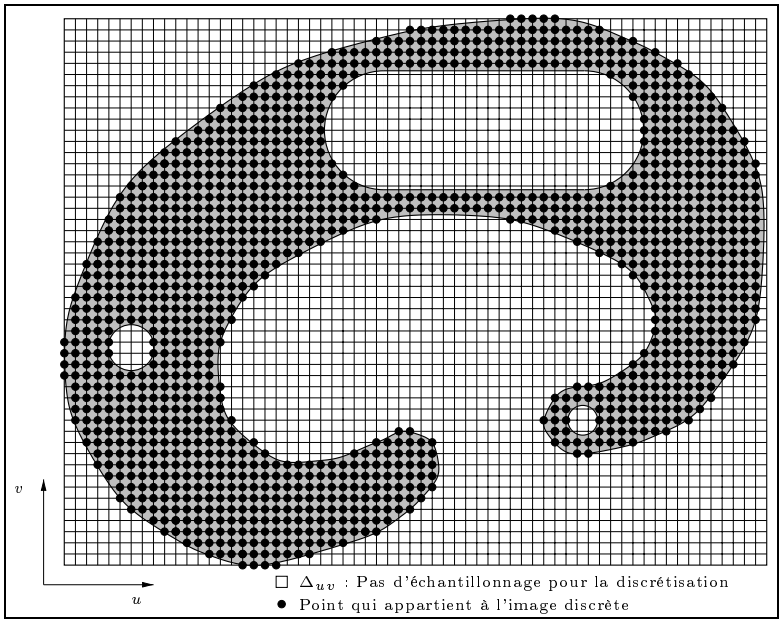


FIG. 3.6: Image binaire et discrète d'une surface

Le principal inconvénient de ce type de discrétisation, connu comme discrétisation par inclusion, est qu'une surface très mince, qui ne contient aucun élément complet du maillage M, a une discrétisation vide. Cet inconvénient est plus évident quand nous discrétisons une courbe, mais ceci n'est pas notre cas. Quant aux surfaces minces, cet inconvénient est surmonté en définissant un pas d'échantillonnage assez petit de façon qu'il y ait toujours des points (u^d, v^d) du maillage inclus dans la surface.

Traitement de l'image 2D

Dans les applications de vision, le but du traitement des images est d'extraire les caractéristiques qui permettent de décrire, d'interpréter et de comprendre la scène. Etant donné que nous voulons réaliser une tâche d'inspection, nous nous

intéressons à avoir une représentation qui décrive la forme de la surface de la façon la plus fidèle possible, mais qui en même temps nous aide à déterminer un plan de numérisation. Le traitement que nous avons developpé nous permet de trouver les points de la surface candidate. Pour définir le type de traitement à réaliser, nous devons d'abord connaître la méthode utilisée pour numériser les pièces avec le système capteur/support ; autrement dit, comment le capteur est déplacé. Ceci nous permettra de connaître les positions des points de vue, et donc des points de vue projetés.

Par la suite nous allons décrire le traitement réalisé pour obtenir l'ensemble de points de vue projetés, pour les deux systèmes de numérisation capteur/support utilisés dans ce travail :

- **Système A :** composé d'un capteur de profondeur autosynchronisé qui est monté sur une machine à mesurer tridimensionnelle.
- **Système B :** composé d'un capteur de profondeur Biris qui est monté sur un bras de robot.

La stratégie d'acquisition peut être facilement modifiée pour d'autres types de système de numérisation.

Points de vue projetés par le système A : capteur autosynchronisé/MMT

Une machine à mesurer tridimensionnelle se déplace entre deux points dans l'espace en suivant la droite qui connecte les points. L'orientation du capteur lors de ce déplacement reste constante. Si le capteur est orienté d'une façon telle que le balayage du rayon laser soit perpendiculaire au déplacement entre les points de vue projetés, et que la vitesse de ce mouvement est beaucoup plus petite que la vitesse de balayage du rayon laser, alors la portion de la surface numérisée entre les deux points est définie par le rectangle $R = a \cdot b$. Les paramètres a et b du rectangle de numérisation R dépendent de la distance d du capteur à la pièce, du champ de

vue γ du capteur et de la distance entre les deux points de vue projetées (voir la FIgure 3.7). Dans la plupart des cas le champ de vue γ du capteur est fixe. Il est de 15 degrés, pour le capteur de profondeur que nous utilisons. La distance d est un paramètre calculé par la stratégie d'acquisition et d'après le modèle du bruit du capteur, elle est contrainte à demeurer entre $160mm$ et $220mm$. Pour le rectangle de numérisation R, a est la ligne formée par la projection de rayon laser sur la surface et est égale à $a = 2 \cdot d \cdot tan(\gamma)$, et b est la distance entre les deux points de vue projetés. La précision des points mesurés par une caméra autosynchronisée est fonction de la distance d entre la caméra et la pièce à numériser, et de l'angle d'incidence du rayon laser sur la surface, donc directement reliée aux paramètres a et b. En général, la vitesse du mouvement de la MMT entre deux points est beaucoup plus petite que la vitesse de balayage du rayon laser.

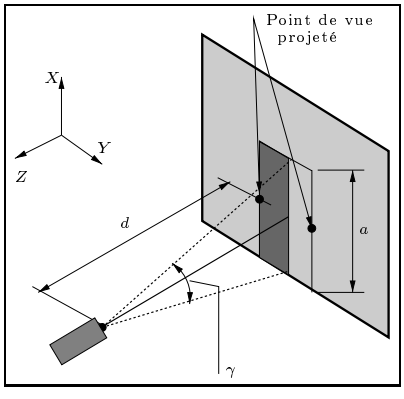


FIG. 3.7: Rectangle de numérisation pour le système A

Nous avons choisi comme représentation de la surface le squelette de l'image 2D en ajoutant quelques modifications. Le squelette est une représentation filiforme de l'objet, qui est centrée et représentative de la forme de l'objet dont il est extrait. Quelques propriétés de celui-ci sont :

- il est mince, c'est-à-dire formé d'arcs et de courbes.
- il comporte le même nombre de composantes connexes et de trous que l'objet.
- il a la même allure que l'objet.

Ces propriétés sont très intéressantes pour la numérisation, car le fait d'être mince et connexe permet d'être suivi par la MMT en réalisant des petits déplacements, et comme il a la même forme que la surface, nous pourrons numériser toute la surface. L'inconvénient de cette représentation est que la squelettisation est très sensible au bruit, inconvénient que nous n'avons pas dans notre système, car les images que nous traitons sont des images synthétiques obtenues à partir du fichier CAO. La squelettisation d'une image est une méthode bien connue de traitement d'images, que l'on trouve définie dans plusieurs livres de vision par ordinateur ([JAI89], [CHA91b]). Puisque le squelette est contenu complètement à l'intérieur de la forme, nous l'avons modifié pour qu'il arrive jusqu'aux bords de l'image (voir l'image 3.9 (a)).

L'orientation du balayage du rayon laser doit être perpendiculaire à la direction du déplacement entre les points de vue projetés afin d'avoir une distance minimale de balayage depuis ces points aux bords de la surface. En suivant les directions paramétriques de la surface $\vec{s}_{db}$, et en supposant que l'angle d'incidence du rayon laser sur le point de vue projeté est de 90°, nous déterminons la meilleure direction de balayage du rayon laser comme celle où la variation de l'angle d'incidence, lors d'un balayage complet, est la plus petite. A partir de cette direction de balayage, nous pouvons déterminer la direction du déplacement des points de vue projetés. Le squelette est toujours contraint à avoir la même direction de propagation que celle du déplacement des points de vue projetés. Comme nous allons numériser tout type de surfaces (simples ou complexes) et comme la précision dans les données 3D est liée à l'angle d'incidence rayon laser/surface, la détermination de la direction du balayage du rayon laser est un critère très important.

La Figure 3.8 illustre la trajectoire des points de vue projetés obtenue pour numériser une surface cylindrique (dans la figure, la trajectoire est mise en évidence par une flèche). L'angle d'incidence du rayon laser sur la surface, pour un balayage complet, est plus grand quand le balayage est horizontal (près de 180°) que quand il est vertical (plus petit que 45°). Puisque le balayage du rayon laser est

perpendiculaire à sa trajectoire, nous concluons que la solution trouvée est la meilleure.

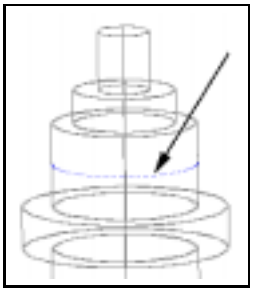
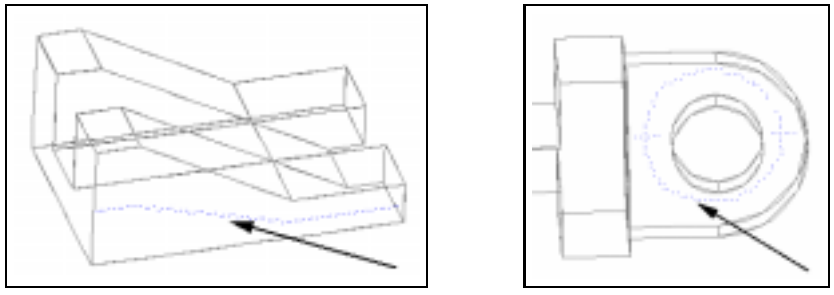


FIG. 3.8: Trajectoire de points de vue projetés pour numériser une surface cylindrique.

Dans la Figure 3.9, nous illustrons l'ensemble de points de vue projetés qui ont été trouvés pour deux surfaces planes. Nous constatons que la distance de balayage à partir de chaque point et jusqu'aux bords est symétrique et la plus petite possible. Une distance de balayage plus grande signifie : que le faisceau laser balaye la surface avec un champ de vue majeur (c'est-à-dire un angle d'incidence plus important) ou une distance d'emplacement du capteur par rapport à la pièce plus grande, ce qui change les conditions optimales de la numérisation vis-à-vis de la précision des données 3D.

Pour un point PS_i du squelette, la largeur de la surface $as(PS_i)$ est l'addition des distances du point PS_i par rapport à chacun des bords. La grandeur $as(PS_i)$ est la distance minimale qui doit être balayée par le faiceau laser (en passant par le point PS_i) afin de numériser toute la largeur de la surface. La valeur la plus petite de a (paramètre du rectangle de numérisation), que nous appellerons a_0, est obtenue dans les meilleures conditions de précision, donc $d = 170mm$ et $\gamma = 15°$ (voir la Figure 3.10). Pour le point PS_i deux cas peuvent se présenter : $as_i \leq a_0$ ou $as_i > a_0$. Dans le premier cas, sauf problèmes d'occlusion (que nous développerons plus tard), le point de vue sera défini dans les meilleures conditions de précision. Pour le deuxième cas, a doit être élargi en modifiant les paramètres d et/ou γ.



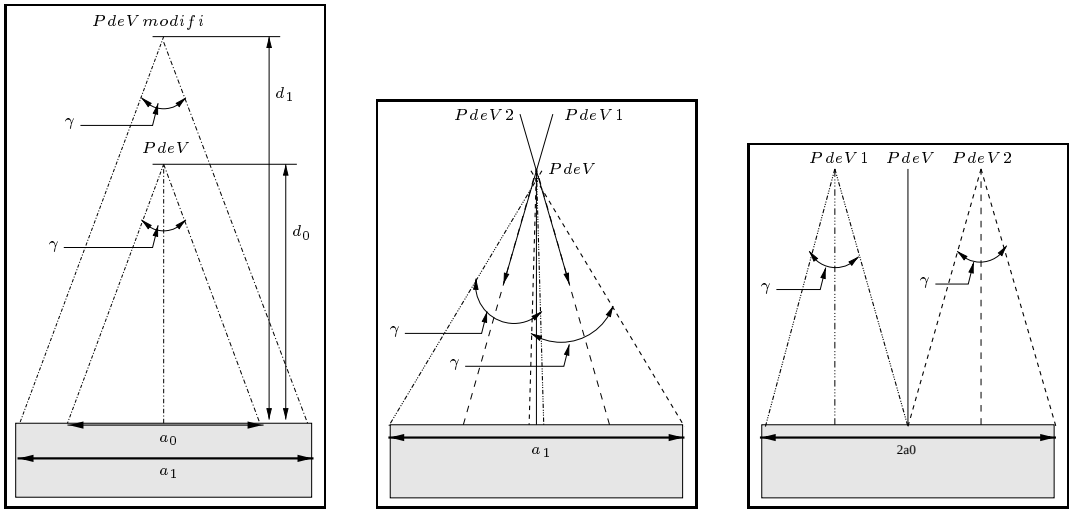
(a) Trajectoire droite (b) Trajectoire courbe

FIG. 3.9: Trajectoire de points de vue projetés avec les plus petites distances de balayage impliquant des surfaces planes.

Nous avons trois types de modification de paramètres pour élargir a. Le premier consiste à modifier le paramètre d jusqu'à sa valeur maximale, donc $d = 220mm$, et pour cette valeur nous définissons a_1, (voir la Figure 3.3.2). Les deux autres modifications consistent à définir de nouveaux points de vue ou de nouveaux points de vue projetés. Si $a_1 < as_i \leq 2a_0$, de nouveaux points de vue sont définis qui auront la même position mais changeront l'orientation (voir la Figure 3.10(b)). Si $2a_0 < as_i$, les nouveaux points de vue projetés sont définis et sont placés sur la même ligne de balayage du rayon laser, à une distance équidistante entre le point PS_i et le bord de la surface (voir la Figure 3.10(c)). Ces processus sont répétés itérativement jusqu'à ce que la largeur entière de la surface soit numérisée.

Points de vue projetés pour le système B : capteur Biris/bras de robot

Ce système, contrairement au système précédent, réalise la numérisation quand il est positionné sur un point de vue, en faisant un mouvement de rotation du poignet du robot (où le capteur est placé), et non lors du déplacement entre les points de vue. L'orientation du capteur est telle que le balayage du rayon laser soit perpendiculaire au mouvement produit par la rotation du poignet. La portion de surface qui est numérisée à partir d'un point de vue est définie par le rectangle $R = a \cdot b$, où a



(a) Modification du paramètre d

(b) Nouveaux points de vue en changeant l'orientation

(c) Nouveaux points de vue en changeant la position

FIG. 3.10: Numérisation de la largeur entière d'une surface

et b sont des paramètres qui dépendent de la distance d du capteur à la pièce, du champ de vue γ du capteur et de l'angle de rotation ζ du poignet du robot où la caméra est supportée. Pour le rectangle de numérisation R (voir la Figure 3.11), a est la ligne formée par la projection de rayon de laser sur la surface et est égale à $a = 2 \cdot d \cdot tan(\gamma)$, et b est le déplacement de la ligne laser (sur la surface) lors de la rotation en ζ degrés du poignet du robot et est égal à $b = 2 \cdot d \cdot tan(\zeta)$. La précision des points mesurés par une caméra Biris est fonction de la distance d entre la caméra et la pièce à numériser et de l'angle d'incidence du rayon laser sur la surface, donc directement reliée aux paramètres a et b. En général, la vitesse de la rotation du poignet du robot est beaucoup plus petite que la vitesse de balayage du rayon laser.

Il est clair qu'il y a une relation entre le nombre de points de vue projetés (ou rectangles de numérisation) utilisés pour numériser une surface complète et la précision de données 3D de mesure obtenue lors de cette numérisation. Nous avons

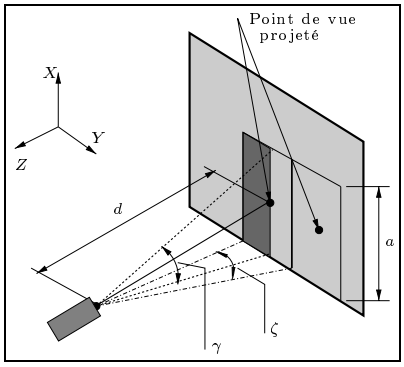
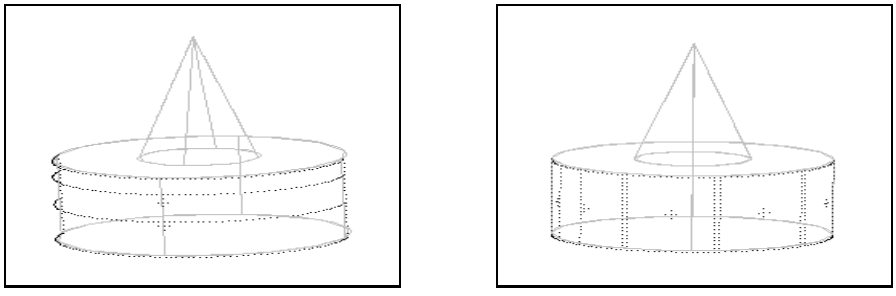


FIG. 3.11: Rectangle de numérisation pour le système B

développé un algorithme qui cherche le nombre minimal de points de vue pour numériser une surface, contraignant la distance d entre la caméra et la surface, et l'angle de rotation du poignet du robot (ζ) donc la précision des données. La variation des paramètres d et ζ est obtenue à partir du modèle du bruit du capteur (Section 2.6), et le champ de vue γ du capteur est donné par les spécifications du capteur. Pour tester notre algorithme avec notre collection de pièces manufacturées (la plupart d'entre elles étant comprises dans un volume de $100mm \times 100mm \times 100mm$), nous avons contraint les paramètres d, ζ et γ : $100mm \leq d \leq 120mm$, $10° \leq \zeta \leq 15°$ et $\gamma = 15°$. L'algorithme définit un rectangle de numérisation minimal avec $d = 100mm$, $\zeta = 10°$ et $\gamma = 10°$, et en le déplaçant sur l'image 2D de la surface tout en suivant les directions paramétriques, il trouve l'ensemble des points de vue projetés nécessaires à la numérisation de la surface.

De la même manière que pour le système capteur autosynchronisé/MMT, nous déterminons la meilleure direction de balayage du rayon laser comme étant celle où la variation de l'angle d'incidence lors d'un balayage complet, en suivant les directions paramétriques de la surface, est la plus petite. Une fois que le système a trouvé le nombre et la position des rectangles dans les deux directions paramétriques, il choisit la solution qui a la meilleure direction de balayage du rayon laser (balayage défini par le champ de vue γ de la caméra). La Figure 3.12 montre le nombre et la position des points de vue projetés et des rectangles de numérisation obtenus pour une surface

courbe. La solution (a) requiert seulement deux points de vue, par rapport aux cinq qui sont requis par la solution (b) ; mais comme la variation de l'angle d'incidence est plus grande pour (a) (d'environ 180°), que pour (b) (d'environ 45°), la solution qui est retenue est la deuxième.



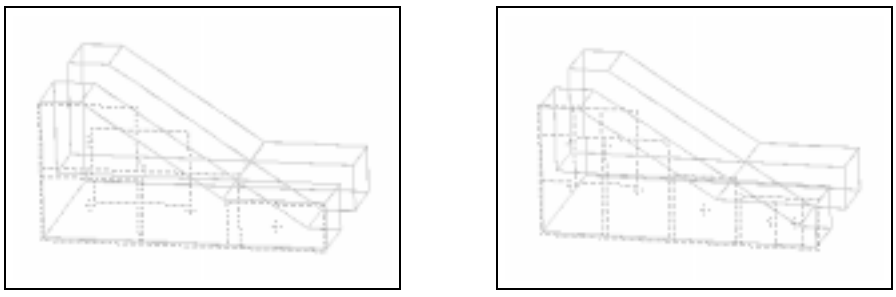
(a) Balayage du rayon laser : horizontal

(b) Balayage du rayon laser : vertical

FIG. 3.12: Variation de l'angle d'incidence sur une surface courbe

Quand il n'y a pas possibilité d'optimiser l'orientation du balayage du rayon laser, comme dans le cas de surfaces planes, le système choisit la solution qui requiert le moins de points de vue. Dans la Figure 3.13 nous pouvons voir la solution pour une surface plane, dans (a) le nombre de points de vue nécessaires est cinq, et dans (b) il est de sept. Pour cet exemple, puisque la variation de l'angle d'incidence est similaire dans les deux directions (donc similaire pour les deux solutions), la solution retenue est la première, car elle requiert moins de points de vue pour la numérisation complète de la surface.

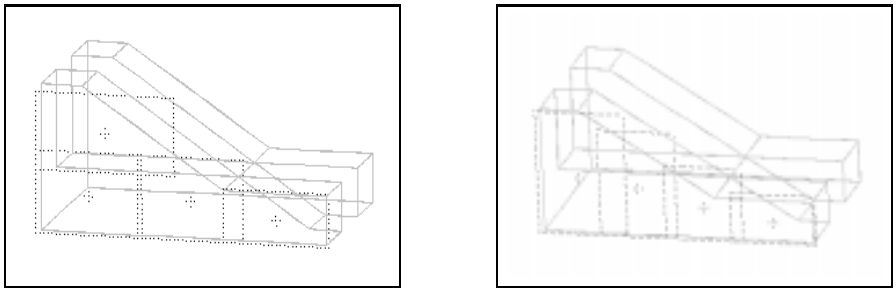
En regardant la Figure 3.13 (a) ou (b) nous concluons que la solution trouvée n'est pas optimale. En fait, il y a certains points de vue définis pour numériser juste une petite région. L'algorithme optimise le nombre de points de vue en éliminant les points de vue définis pour numériser ces petites régions (la superficie numérisée est habituellement moins que 25% de la plus grande surface). Les points de vue restants sont modifiés dans leur distance d, pour inclure ces petites régions. La Figure 3.14



(a) 5 points de vue projetés (b) 7 points de vue projetés

FIG. 3.13: Nombre minimal de points de vue

montre une solution optimisée du résultat montré à la Figure 3.13. Dans les deux solutions, le nombre de points de vue a été réduit à quatre, mais la solution (a) est retenue parce qu'elle requiert la modification d'un seul point de vue. Nous rappelons que les rectangles de numérisation ont été définis dans les meilleures conditions de précision, et par conséquent, n'importe quelle modification du paramètre d produit une diminution de la précision des mesures.



(a) 4 points de vue projetés (b) 4 points de vue projetés

FIG. 3.14: La solution optimale en changeant les paramètres d

Etape 2.2 : Localisation du point de vue dans l'espace

Pour chaque point qui appartient à l'ensemble de points de vue projeté PVP_{S_i} dans l'espace discret (u^d, v^d), nous orienterons les points de vue répondant aux

conditions optimales de distance et d'orientation choisies en fonction du modèle du capteur. De la section 2.6 nous concluons que la meilleure orientation pour localiser le point de vue est en suivant la direction normale à la surface $\vec{s}_i$. Pour trouver la direction normale au point $(u^d, v^d) \in PVP_{S_i}$, nous déterminons son point équivalent $(u, v) \in \vec{s}$, et nous utilisons les paramètres de la surface NURBS. Il y a toujours un point (u, v) équivalent au point (u^d, v^d), car lors de la discrétisation, nous avons défini $\vec{s}_{db}(u^d, v^d)$ comme une surface étant incluse dans $\vec{s}(u, v)$. La direction normale au point (u, v) est déterminée en utilisant l'équation 3.5.

$$\overrightarrow{n} = \frac{\frac{\partial}{\partial u}\vec{s}(u,v) \times \frac{\partial}{\partial v}\vec{s}(u,v)}{\| \frac{\partial}{\partial u}\vec{s}(u,v) \times \frac{\partial}{\partial v}\vec{s}(u,v) \|^2} \tag{3.5}$$

avec

$$\frac{\partial}{\partial u}\vec{s}(u,v) = \frac{AB-CD}{B^2} \qquad \text{et}$$
$$\frac{\partial}{\partial v}\vec{s}(u,v) = \frac{EB-FD}{B^2}$$

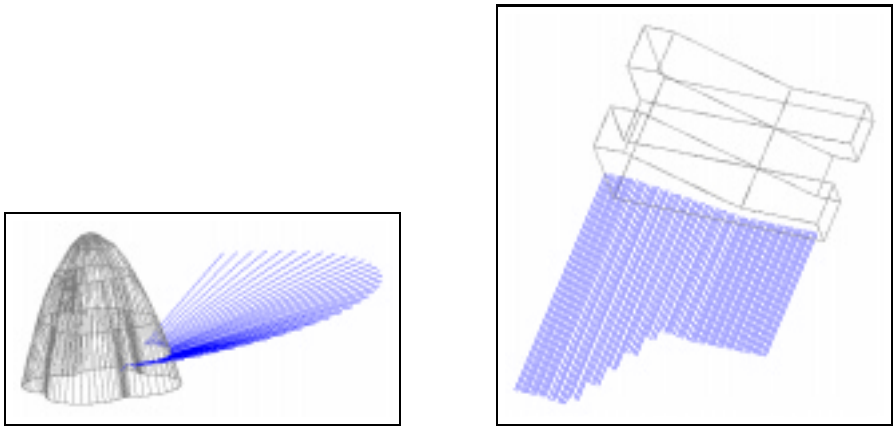
où

$$A = \sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}(\frac{\partial}{\partial u}N_{i,p}(u))N_{j,q}(v)w_{i,j}\vec{P}_{i,j},$$
$$B = \sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}N_{i,p}(u)N_{j,q}(v)w_{i,j},$$
$$C = \sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}N_{i,p}(u)N_{j,q}(v)w_{i,j}\vec{P}_{i,j},$$
$$D = \sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}(\frac{\partial}{\partial u}N_{i,p}(u))N_{j,q}(v)w_{i,j},$$
$$E = \sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}N_{i,p}(u)(\frac{\partial}{\partial v}N_{j,q}(v))w_{i,j}\vec{P}_{i,j},$$
$$F = \sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}N_{i,p}(u)(\frac{\partial}{\partial v}N_{j,q}(v))w_{i,j},$$
$$\frac{\partial}{\partial u}N_{i,p}(u) = \frac{p}{u_{i+p-1}-u_{i-1}}N_{i,p-1}(u) - \frac{p}{u_{i+p}-u_i}N_{i+1,p-1}(u) \qquad \text{et}$$
$$\frac{\partial}{\partial v}N_{j,q}(v) = \frac{q}{u_{j+q-1}-u_{j-1}}N_{j,q-1}(v) - \frac{q}{u_{j+q}-u_j}N_{j+1,q-1}(v)\ ,$$

les paramètres : $n, m, \vec{P}_{i,j}, w_{i,j}, N_{i,p}(u)$ et $N_{j,q}(v)$ ont été définis pour l'équation 3.1.

A la Figure 3.15 nous illustrons les points de vue trouvés en utilisant la stratégie pour deux surfaces différentes. Le système de numérisation est ici composé du capteur laser autosynchronisé et de la MMT. La Figure 3.15 (a) illustre le

changement de l'orientation du point de vue quand nous numérisons une surface complexe. La Figure 3.15 (b) illustre la variation de distance de point de vue pour avoir une largeur supérieure de balayage. Nous rappelons que la stratégie modifie la distance d'emplacement pour optimiser le nombre de points de vue. Dans la Figure 3.15, la ligne représente la projection du rayon laser à partir du point de vue où le capteur est placé, jusqu'au point de vue projeté.

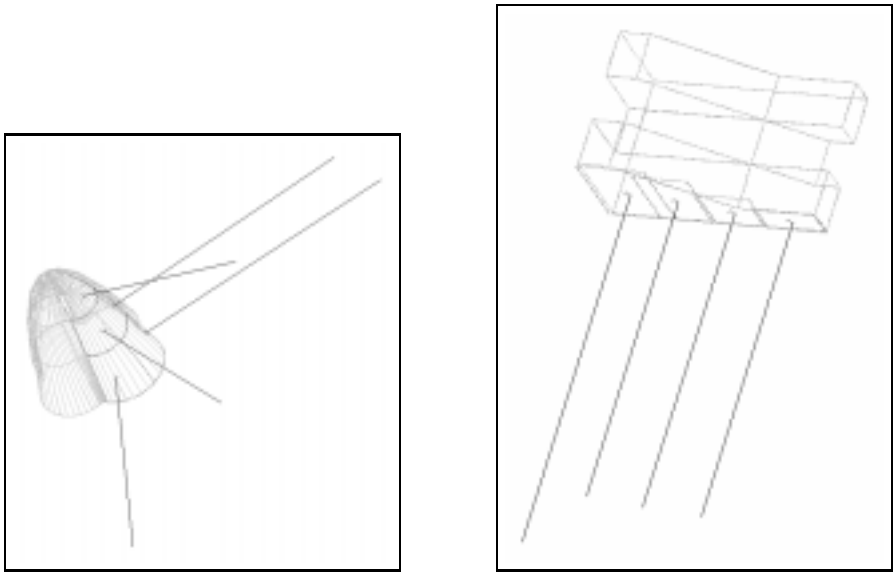


(a) Points de vue pour une surface complexe.

(b) Points de vue pour une surface plane.

FIG. 3.15: Ensemble de points de vue de numérisation pour le système capteur auto-synchronisé/MMT

A la Figure 3.16, nous illustrons les points de vue trouvés pour deux pièces différentes. Le système de numérisation est composé du capteur laser Biris et d'un bras de robot. La Figure 3.16 (a) illustre le changement de l'orientation du point de vue pour numériser une surface complexe. La Figure 3.16 (b) illustre la variation de distance de point de vue pour optimiser le nombre de rectangles de numérisation.



(a) Points de vue pour une surface complexe.

(b) Points de vue pour une surface plane.

FIG. 3.16: Ensemble de points de vue de numérisation pour le système capteur Biris/bras de robot

Etape 2.3 : Vérification de l'accessibilité et de la visibilité du point de vue

Jusqu'ici, les points de vue ont été trouvés pour les meilleures conditions de précision, c'est-à-dire placés à la distance et avec l'orientation optimale. L'étape suivante de la stratégie est de vérifier que l'emplacement du point de vue est accessible et qu'il est exempt du problème d'occlusion. Par accessibilité nous signifions que le point de vue doit pouvoir être atteint par le support mécanique, et que le déplacement réalisé pour l'atteindre est libre de collisions. Par le problème d'occlusion nous signifions que du point de vue nous devons pouvoir numériser la région de la surface pour laquelle il a été défini, c'est-à-dire que le rayon laser n'est intercepté par aucun objet et peut donc atteindre la surface souhaitée.

Pour l'accessibilité, nous supposons que la pièce est dans l'espace du travail du

système capteur/support mécanique. Cet espace définit la région dans laquelle nous pouvons déplacer le capteur, toujours orienté vers le centre de l'espace. Pour le bras de robot, cet espace est celui formé par un rectangle balayé en suivant une trajectoire circulaire de 90° et pour la MMT, il a la forme d'un parallélépipède. Le point de vue est transformé du système référentiel de la pièce au système référentiel de l'espace de travail. Si nous obtenons une position valable, nous dirons que le point de vue est accessible.

Nous avons représenté la pièce par un *modèle voxel*, de la même manière nous pouvons délimiter l'espace de travail en ajoutant au modèle d'autres objets présents dans la scène. Nous supposons que le déplacement de la caméra entre deux points de vue, exécuté par le support mécanique, est une ligne droite. Le déplacement est accompli sans collisions quand après vérification tout au long de cette droite, le modèle de la scène n'est pas touché par le modèle du capteur. Quand un problème de collision est détecté, le système tente de le résoudre en définissant des positions intermédiaires de déplacement.

Pour l'évaluation des conditions de non-occlusion, une sonde est envoyée à partir du point de vue vers la région qui doit être numérisée. La stratégie vérifie (en utilisant le modèle voxel de la scène) qu'aucune partie de la pièce intersecte la sonde, autrement dit, que la sonde est capable d'arriver à son objectif. Quand un problème d'occlusion est détecté, le système recherche un nouveau point de vue en déplaçant l'ancien dans la direction du balayage du rayon laser. Le déplacement est fait en augmentant et en diminuant l'angle d'incidence du rayon laser, dans la direction du balayage et des deux côtés du point de vue projeté. Le nouveau point de vue doit permettre de numériser les régions de la surface souhaitée, et en plus il doit rester le plus proche possible de la direction normale du point de vue projeté afin d'optimiser la précision des mesures. Ce processus est illustré par la Figure 3.17. Le point initial P_1 qui a été défini dans les meilleures conditions de précision présente un problème d'occlusion. Les points P_2 et P_3 ont toujours le problème d'occlusion. P_4 ne l'a pas,

mais la stratégie continue de chercher un point qui soit le plus proche de P_1, donc elle trouve P_5 et P_6. Le processus s'arrête quand la variation de l'angle des deux points valides est plus petit que 5 degrés.

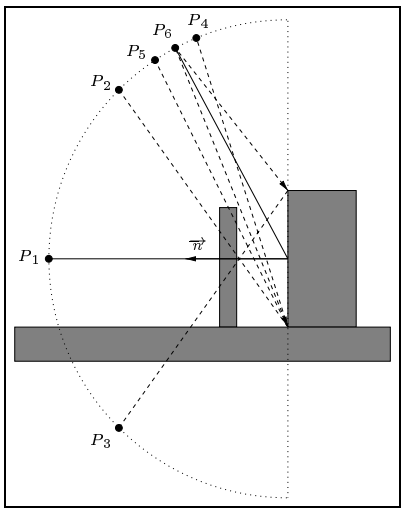


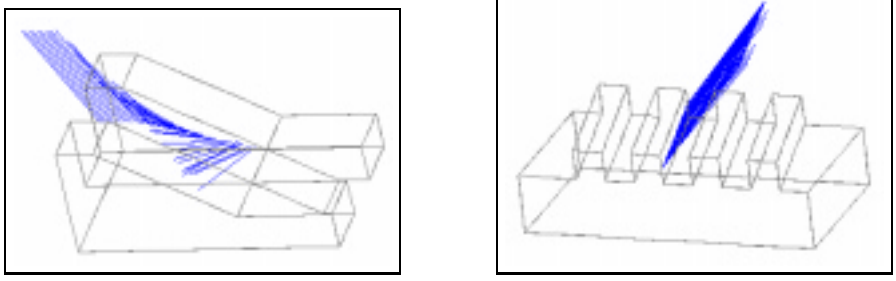
FIG. 3.17: Recherche d'un nouveau point de vue libre du problème d'occlusion

La Figure 3.18 montre les points de vue trouvés pour deux surfaces qui présentent au début un problème d'occlusion. Le système de numérisation est composé du capteur autosynchronisé et d'une MMT. Dans la Figure 3.18 nous remarquons que les nouveaux points de vue restent toujours aussi proches que possible de la direction normale.

La Figure 3.19 montre les points de vue trouvés comme solution aux problèmes d'occlusion pour la numérisation de deux surfaces quand le système de numérisation est composé d'un capteur Biris et d'un bras de robot.

3.3.3 Estimation de la précision des données 3D

Une fois que tous les points de vue ont été localisés en satisfaisant les conditions de non-occlusion, la stratégie calcule la précision des mesures à partir des caractéristiques du point de vue.



(a) Points de vue proches de la direction normale

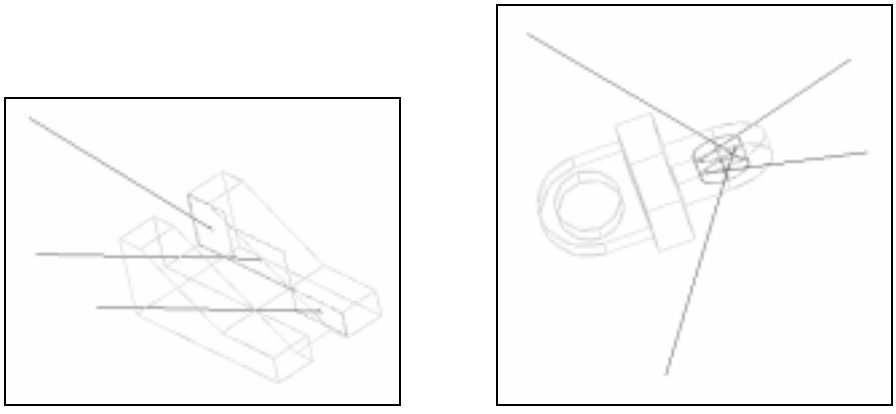
(b) Points de vue pour une surface plane

FIG. 3.18: Points de vue sans problème d'occlusion pour le système capteur autosynchronisé/MMT

Nous avons vu dans à la section 2.6 que l'exactitude des points mesurés par les capteurs de profondeur est fonction de la distance d entre le capteur et la pièce à numériser et des angles α et β d'incidence du rayon laser. Ainsi, pour estimer l'exactitude des points mesurés, nous devons calculer ces paramètres. La Figure 3.20 illustre quelques configurations spéciales pour la détermination des angles α et β (l'angle β est perpendiculaire à la feuille). Le paramètre d a été défini précédemment.

La Figure 3.20(a) illustre le cas où le champ de vue du capteur de profondeur est plus grand que la largeur de la surface à mesurer. L'amplitude du balayage du rayon laser est calculée à partir du champ de vue γ et la distance d. La largeur de la surface LS est obtenue à partir du modèle de CAO. Comme le nombre de points pris par le capteur lors d'une ligne de balayage est connu (256 points/ligne pour le capteur Biris et 512 points/ligne pour le capteur autosynchronisé), nous pouvons connaître la distance qui sépare chaque point acquis du point de vue projeté par une simple relation mathématique et ainsi l'angle d'incidence avec lequel le rayon laser frappe la surface à ce point.

La Figure 3.20(b) illustre le cas où la largeur de la surface mesurée est plus grande que le champ de vue du capteur et pourtant, la stratégie a défini deux points



(a) Points de vue proche de la direction normale

(b) Points de vue pour une surface courbe

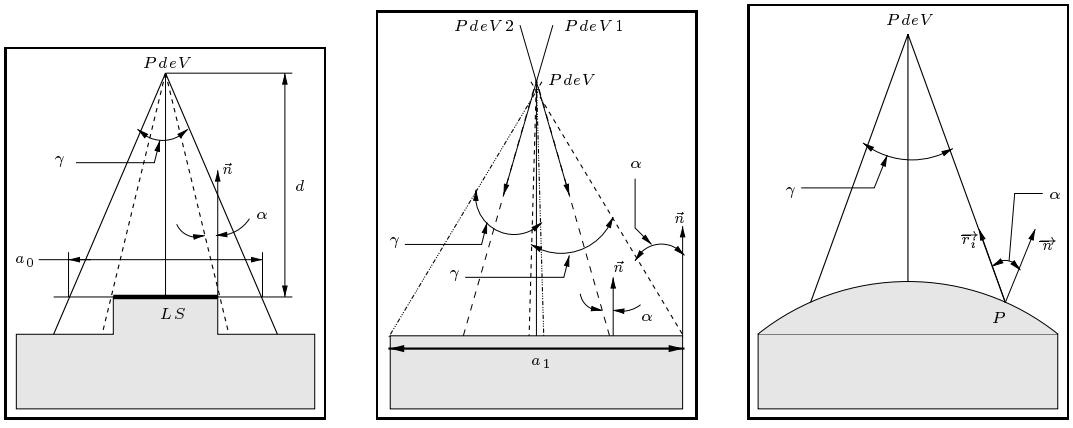
FIG. 3.19: Points de vue solution sans problèmes d'occlusion pour le système capteur Biris/bras de robot

de vue placés au même endroit mais avec une orientation différente. Le calcul de l'angle d'incidence est le même que pour le cas présenté à la Figure 3.20(a).

Dans la Figure 3.20(c) nous présentons le calcul de l'angle d'incidence α sur une surface courbe. Le point P où le rayon laser touche la surface est calculé en utilisant le modèle *voxel* de la pièce. Le vecteur normal à la surface de ce point est obtenu à partir de la surface paramétrique NURBS. Enfin l'angle α est calculé en développant le produit scalaire des vecteurs $\vec{r_i} \cdot \vec{n}$. Quand la surface est courbe dans les deux directions paramétriques (u et v), les angles d'incidence α et β sont calculés en utilisant les composantes de la normale dans la direction des variations des angles α et β.

Une fois que nous avons déterminé les paramètres de numérisation d, α et β pour le point numérisé $(x_0,\ z_0)$, nous l'associons à la matrice de dispersion suivante :

$$\mathbf{\Sigma}_{x_0 z_0} = \begin{pmatrix} \sigma_{x_0 x_0} & \sigma_{x_0 z_0} \\ \sigma_{z_0 x_0} & \sigma_{z_0 z_0} \end{pmatrix} \tag{3.6}$$



(a) Pour un champ de vue plus grand que la surface

(b) Evaluation sur une surface plane avec 2 points de vue

(c) Evaluation sur une surface complexe

FIG. 3.20: Evaluation des paramètres α et β.

Avec : $\mathbf{\Sigma}_{x_0 z_0} = \mathbf{\Sigma}_{x_0 z_0}(d) + \mathbf{\Sigma}_{x_0 z_0}(\alpha) + \mathbf{\Sigma}_{x_0 z_0}(\beta)$.

La matrice de dispersion globale est estimée en calculant la somme des dispersions introduites par chaque paramètre d, α et β, ceux-ci obtenus à partir des modèles développés à la section 2.6.

Si l'exactitude des points mesurés ne satisfait pas la spécification, un nouvel ensemble de points de vue doit être défini. Ce nouvel ensemble de points de vue est composé de deux trajectoires parallèles qui utilisent la trajectoire précédente comme bord. Ce processus est semblable à celui illustré à la Figure 3.10 (c).

Parfois la précision requise ne peut pas être obtenue, en particulier pour des surfaces ayant un problème d'occlusion. Pour de telles surfaces, le capteur de profondeur doit prendre une grande inclinaison afin de pouvoir balayer la surface. Quand cela se produit, le système indiquera les régions qui ne peuvent pas être numérisées avec la précision spécifiée.

3.3.4 Présentation optimale de l'ensemble X de points de vue

La dernière étape de la stratégie consiste à présenter l'ensemble X de points de vue de façon que le déplacement entre points de vue, réalisé par le support mécanique, soit optimal, c'est-à-dire que les changements des paramètres d'un point de vue à un autre soient minimaux pour réduire le temps de numérisation.

Nous définirons la présentation optimale à partir de l'ensemble de points de vue projetés, mais en utilisant les paramètres de chaque point de vue.

Pour le système capteur autosynchronisé/MMT, comme l'ensemble X est dérivé à partir du squelette de la surface, nous avons posé le problème comme un problème de recherche de chemin de coût minimum dans un graphe. Les composantes critiques de cette méthode sont :

1. prendre un bon point de départ,
2. comment les résultats déjà obtenus doivent-ils influencer le choix du point suivant : fonction à optimiser ?
3. critère d'arrêt.

Soit PVP_i le i-ième point de vue projeté de l'ensemble PVP, et soit $V_8(PVP_i)$ le nombre de points 8-adjacents à PVP_i (ou voisins directs dans un 8-voisinage de PVP_i). Nous définissons comme points extrêmes les points qui ont le moins de points 8-adjacents, ces points étant les points de départ ou d'arrêt du chemin de numérisation. Nous définissons comme points de bifurcation les points qui ont au moins trois points 8-adjacents. La fonction à optimiser est la différence entre les paramètres des points de vue ; les paramètres d'orientation ont un poids plus grand que les paramètres de position afin de choisir en premier lieu les points de vue qui changent seulement en position. Le point de départ est le point extrême qui est le plus proche de l'origine de la surface. La recherche avance en minimisant la fonction de distance jusqu'à ce qu'elle trouve un autre point extrême. A la rencontre d'un point de bifurcation, le chemin choisi est celui qui minimise la fonction différence, et

dès qu'il arrive à un point extrême, le point de bifurcation est repris pour optimiser les bifurcations restantes. Le processus est répété jusqu'à ce que tous les points en PVP aient été pris en compte.

Pour le système capteur Biris/bras de robot, nous utilisons la même fonction d'optimisation, donc la différence entre les paramètres des points de vue. Le point de départ est le point de vue projeté qui est le plus proche de l'origine de la surface. L'optimisation est faite en comparant tous les points en PVP qui n'ont pas été pris. Le processus s'arrête quand tous les points en PVP ont été pris en compte.

3.4 Résultats synthétiques de la stratégie

A la section précédente, nous avons décrit la stratégie qui nous permet d'obtenir automatiquement une planification de la trajectoire du capteur pour numériser complètement et avec précision une surface ou une pièce. Dans cette section nous présentons des résultats de planification pour quelques pièces. Pour faciliter le test des résultats (solution aux problèmes d'occlusion et numérisation complète) nous avons mis au point un algorithme pour produire des images de profondeur synthétiques des pièces à partir des points de vue.

Dans la Figure 3.21 nous présentons la planification pour la numérisation d'une pièce complète qui est composée de surfaces planes. La stratégie décrite sur la Figure 3.21(a) a été produite par le système de numérisation composée d'un capteur Biris monté sur un bras de robot (système de numérisation B). Cette planification a trouvé 42 points de vue pour la numérisation complète de la pièce. La stratégie montrée à la Figure 3.21(b) a été produite par le système de numérisation composée d'un capteur autosynchronisé monté sur une MMT (système de numérisation A). Nous remarquons que tous les problèmes d'occlusion ont été résolus. Dans la Figure 3.21(c), nous montrons le nuage de points synthétique produit en utilisant la stratégie pour le capteur Biris. Nous constatons que toutes les régions de la pièce

ont été numérisées.

Nous présentons dans la Figure 3.22 la planification pour la numérisation d'une pièce complète qui est composée de surfaces complexes. Pour la numérisation effectuée avec le système B (Figure 3.22(a)), la stratégie a trouvé 44 points de vue. La Figure 3.21(b) illustre la stratégie produite pour le système A. Nous remarquons que la variation des points de vue demeure toujours près à la direction normale des surfaces. La Figure 3.22(c) illustre le nuage de points synthétique qui est obtenu en utilisant la stratégie pour le capteur Biris.

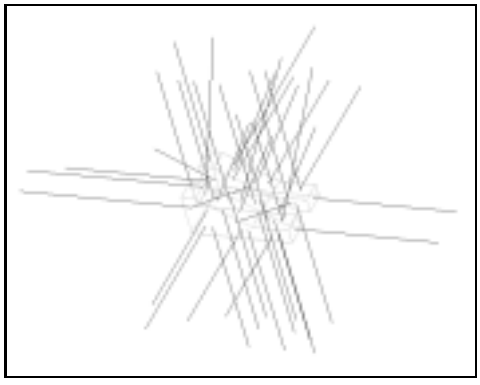
Dans le chapitre 5 nous présenterons des résultats réels de planification pour la numérisation de quelques pièces.

3.5 Conclusion

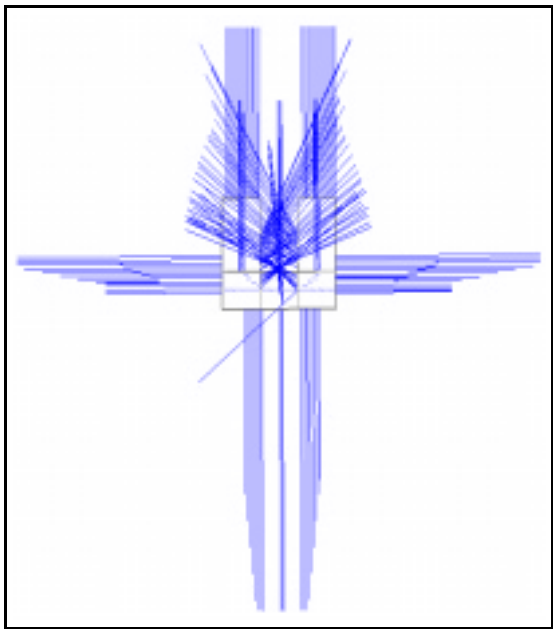
Nous avons présenté une stratégie d'acquisition automatique pour la numérisation des pièces manufacturées qui cherche à améliorer la précision des points 3D mesurés. La stratégie calcule un ensemble de points de vue afin d'obtenir une image 3D complète et précise (autant que possible) de la pièce ou des surfaces choisies. Les points de vue sont contraints à avoir les meilleures conditions de précision dans le processus de numérisation. L'ensemble de points de vue est présenté de façon que le déplacement réalisé par le support mécanique soit minimal pour réduire le temps de numérisation.

Le système n'a aucune limitation dans la géométrie des pièces à numériser, ce qui signifie qu'elle fonctionne aussi bien avec des pièces simples ou complexes. Les seules contraintes imposées pour la stratégie sont la connaissance exacte de la position et de l'orientation de la pièce et de son modèle CAO.

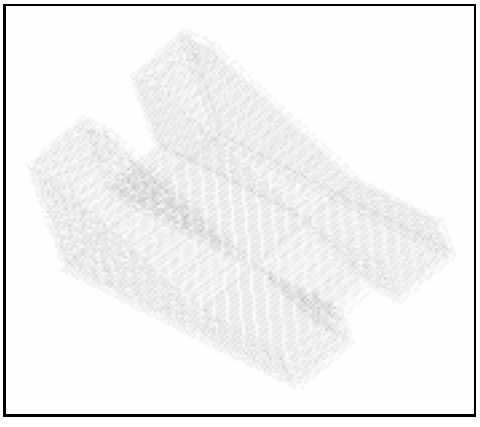
La stratégie peut être facilement adaptée pour utiliser un autre genre de capteur de profondeur et/ou de support mécanique. En général, la précision des points mesurés par un capteur de profondeur est fonction de la distance du capteur à



(a) Stratégie utilisant le système B : capteur Biris/bras de robot

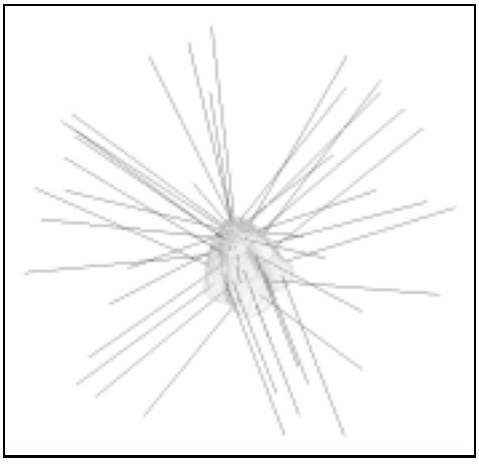


(b) Stratégie utilisant le système A : capteur autosynchronisé/MMT

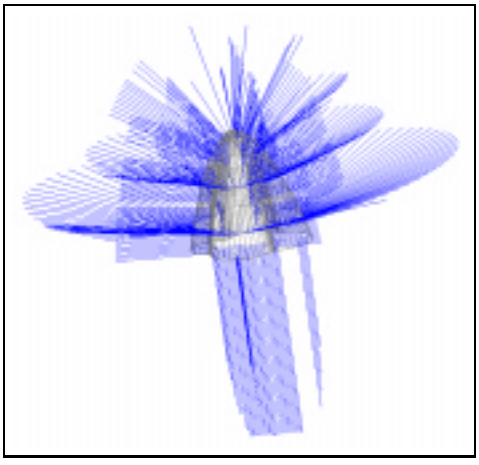


(c) Image de profondeur synthétique pour le système composé par le capteur Biris et le bras de robot

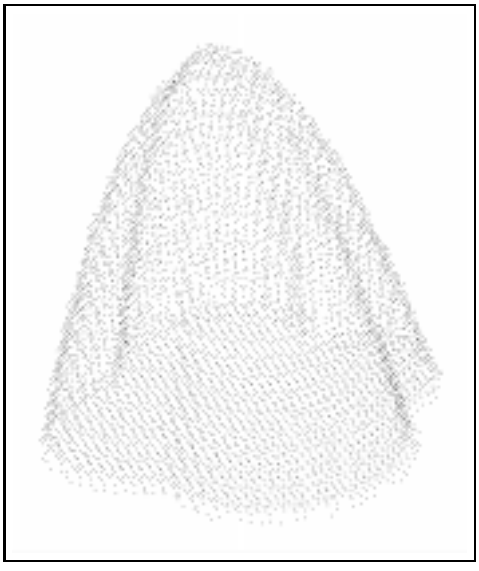
FIG. 3.21: Stratégie de numérisation pour une pièce simple



(a) Stratégie utilisant le système B : capteur Biris/bras de robot



(b) Stratégie utilisant le système A : capteur autosynchronisé/MMT



(c) Image de profondeur synthétique pour le système composé par le capteur Biris et le bras de robot

FIG. 3.22: Stratégie de numérisation pour une pièce complexe

la pièce et de l'angle d'incidence avec lequel le rayon laser atteint la surface. Donc, pour l'utilisation d'un nouveau système de numérisation, la précision du capteur doit être modelisée.

La stratégie de planification nous permet de numériser la pièce complète ou les surfaces d'intérêt avec une précision donnée. Cette propriété est importante pour la tâche d'inspection, où la plupart du temps nous devons vérifier les spécifications de quelques surfaces. Cette méthode nous permet d'obtenir un nuage de points précis de la surface d'intérêt.

Bien que quelques éléments de l'algorithme puissent être coûteux en temps de calcul, comme la génération du *modèle voxel* ou la résolution du problème d'occlusion, tous les processus de la planification de numérisation sont exécutés hors ligne. Dans la partie en ligne, le système utilise un processus de recalage pour placer le modèle CAO et l'ensemble de points de vue de numérisation dans le même système cartésien de la pièce.

Chapitre 4

Vérification de tolérances

4.1 Introduction

Dans la conception des pièces mécaniques, les valeurs des tolérances sont données. Ces tolérances ont pour but de préciser quelles variations de forme des pièces sont acceptables afin de garantir qu'elles pourront s'assembler correctement. L'inspection est le processus qui détermine si une pièce respecte les tolérances spécifiées. Les machines à mesurer tridimensionnelles (MMT), malgré leur grande précision, ont des limitations importantes telles que : le taux peu élevé de points mesurés, la nécessité d'être programmées chaque fois qu'une nouvelle pièce est examinée et la difficulté à mesurer les surfaces complexes. Par ailleurs les capteurs de profondeur permettent de numériser des pièces à une très grande vitesse ($\sim$ 20000 $points/s$), quel que soit le type de surface. Mais ils n'égalent pas la précision obtenue avec les MMT. Afin de pouvoir profiter des avantages des capteurs de profondeur dans la tâche d'inspection, mais sans oublier leur faiblesse en précision (par rapport aux MMTs), il faut quantifier les résultats obtenus par un facteur de probabilité, fonction de la précision avec laquelle les données de profondeur ont été prises.

Lors du tolérancement d'une pièce, seules quelques surfaces sont affectées de tolérances géométriques. Le problème qui se pose est donc : définir une méthodologie

pour contrôler ces tolérances avec les données 3D obtenues à l'aide d'un capteur télémétrique. Nous savons qu'un tel capteur nous fournit un nuage de points 3D dans lequel il y a toujours des points appartenant à plusieurs surfaces, par conséquent une étape de segmentation s'avère nécessaire. Nous remarquons que la méthode d'inspection doit nous permettre de vérifier la mise en forme correcte de pièces avec des surfaces simples ou complexes.

D'autre part, puisque l'inspection consiste à vérifier la précision de fabrication d'une pièce par rapport à ses spécifications, il faut que la méthode qui permet de réaliser cette inspection soit elle-même très précise. Lors de la numérisation d'une pièce par un capteur de profondeur, plusieurs sources d'erreur peuvent modifier les valeurs mesurées. Un deuxième problème est donc : définir la certitude avec laquelle nous pouvons affirmer qu'une pièce respecte ou non ses tolérances lorsque nous utilisons les mesures réalisées par des capteurs de profondeur.

4.2 Recalage entre l'image 3D d'une pièce et son modèle CAO

Après la numérisation de la pièce, nous avons deux ensembles de données, le premier est le fichier CAO issu de la conception et le second, le nuage de points 3D. Ces données sont exprimées chacune dans leur propre repère. L'opération qui consiste à superposer ces deux ensembles en calculant la transformation rigide (rotation + translation) est celle que l'on appelle le recalage ou la mise en registre. Le problème du recalage a été abordé par plusieurs chercheurs : [BIT93], [GOD94], [ZHA94], [DOR94], [GOD95], [BER96], [DOR97]. Moron *et al* [MOR96a], [MOR96b], [MOR95] ont développé une méthode de recalage que nous avons utilisée dans ce travail. Celle-ci repose sur le travail bien connu de Besl et McKay [BES92], qui ont développé une méthode générale, précise et facilement implémentable de mise en registre de formes 3D, prenant en compte même les surfaces gauches. La méthode est basée sur

l'algorithme ICP (Iterative Closest Point) qui ne nécessite qu'un calcul de distance pour trouver le point le plus proche d'une forme géométrique à un point donné. La transformation rigide est calculée en utilisant les quaternions. Mais comme l'estimation de la transformation est donnée par une distance aux moindres carré, la méthode n'est pas suffisamment robuste par rapport aux points n'appartenant pas à la forme (points dus au bruit ou à la présence d'autres formes dans la scène). Comme solution à ce problème, Masuda et Yokoha [MAS95b] estiment la transformation entre deux images de profondeur de façon robuste en intégrant l'algorithme ICP avec un échantillonnage aléatoire et une estimation de la médiane au moindre carré (Least Median Square - LMS). Ils ont montré que la mise en registre entre deux images se fait avec une très grande robustesse (jusqu'à 50% de points aberrants). Moron a implémenté un algorithme pour la mise en registre d'un nuage de points 3D non-ordonnés, avec un modèle CAO de format STL ou NURBS reposant sur cette méthode.

Celle-ci peut se décomposer en trois étapes principales :

1. L'algorithme sélectionne de façon aléatoire N_s points 3D dans l'ensemble des données et calcule une transformation rigide avec l'algorithme ICP à partir de ce sous-ensemble. Cette procédure est répétée N_t fois. Le problème est non-linéaire et l'estimateur LMS donne une solution qui n'est pas forcément la meilleure, mais celle-ci est obtenue très rapidement. La probabilité de trouver une solution augmente quand N_s décroît ou N_t croît. Après chaque exécution, la transformation rigide est évaluée en calculant l'erreur médiane au moindre carré.

2. La meilleure estimation de la transformation rigide, correspondant à la plus faible erreur médiane, est appliquée à l'ensemble des points 3D ; puis l'ensemble des points est segmenté en deux sous-ensembles, le premier correspondant aux points appartenant à la pièce (points non-aberrants) et le second aux points aberrants.

3. Un algorithme standard ICP des moindres carré est ré-appliqué au sous-ensemble de points appartenant à la pièce (étape précédente) afin de trouver la transformation rigide, solution à notre problème.

Pour obtenir une solution globale, il est nécessaire d'appliquer la méthode plusieurs fois, avec des conditions initiales différentes. Nous choisissons alors la solution correspondant à la meilleure estimation.

4.2.1 L'algorithme LMS

L'estimateur au moindre carré (mean square - MS) fournit une évaluation de la matrice de transformation qui réduit au minimum la somme des distances au carré entre le sous-ensemble de points N_s et le modèle. Malheureusement, tout point aberrant dans le sous-ensemble peut biaiser la solution. D'autre part, l'estimateur de la médiane de moindre carré T_{LMS} trouve une solution qui réduit au minimum la médiane des distances au carré entre le sous-ensemble de points et le modèle CAO. Cette catégorie d'estimateur a été présentée initialement par Rousseuw et Leroy [ROU87] et est théoriquement robuste jusqu'à une proportion de 50% de points aberrants.

L'algorithme LMS peut être décrit ainsi :

1. Un sous-ensemble P^I_{RS} de N_s points est aléatoirement extrait (RS : Random Sampling) à partir du nuage de points 3D R^I :

$$P^I_{RS} \leftarrow RS(R^I, N_S).$$

2. Le sous-ensemble est employé par l'algorithme ICP avec le modèle de la pièce R^{II} pour calculer les paramètres de transformation :

$$T_{ICP} \leftarrow ICP(P^I_{RS}, T_{LMS}, R^{II}).$$

3. La qualité de la transformation est alors évaluée par un estimateur médian : $LMS(R^I, T_{ICP}, R^{II})$ avec

$$LMS(R^I, T, R^{II}) = \sqrt{med_{r^I \in R^I}(d(T(r^I), R^{II})^2)},$$

d étant la distance Point 3D/Modèle géométrique et med représente l'estimateur médian.

4. Si $LMS(R^I, T_{ICP}, R^{II}) < LMS(R^I, T_{LMS}, R^{II})$ alors $T_{LMS} \leftarrow T_{ICP,n}$.

4.2.2 L'algorithme ICP

L'algorithme ICP peut efficacement estimer la transformation rigide entre le sous-ensemble P^I_{RS} et le modèle géométrique R^{II}. L'algorithme peut être divisé en deux parties : La première phase consiste à trouver pour chaque point de P^I_{RS}, son point le plus proche en R^{II}. Ces points de R^{II} constituent alors un nouvel ensemble de points P^{II}. La seconde phase sera alors de déterminer la transformation rigide entre les deux sous-ensembles de points en utilisant la représentation par quaternions. Un quaternion est un vecteur à 4 dimensions : $q = (q_0, q_1, q_2, q_3)$ où $q_0 \geq 0$ et $q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1$. Ces deux opérations sont répétées jusqu'à ce que P et R^{II} soient suffisamment proches. Ce procédé itératif s'arrêtera lorsque :

$$d_{k-1} - d_k < \tau \cdot \sigma,$$

où $d_k = d(P^I, P^{II})$ est la somme des carrés des distances entre les points de P^I et P^{II}. La valeur de seuil τ représente la tolérance de la convergence. Le facteur d'échelle σ est employé pour rendre la condition de convergence sans dimension. Il représente la taille approximative de P et est défini comme la racine carrée de la trace de la matrice de covariance de P. Pour l'algorithme ICP, il a été prouvé que la séquence des d_k décroît d'une façon monotone [BES92].

L'algorithme ICP est comme suit :

1. $k \leftarrow 1$; $P^I \leftarrow T_{LMS}(P^I_{RS})$; $d_0 \leftarrow \infty$.

2. La correspondance de points est établie :

$$P^{II} \leftarrow C(P^I, R^{II}).$$

3. La transformation rigide entre P^I et P^{II} est estimée en utilisant la représentation des quaternions :

$$T_{ICP} \leftarrow Q(P^I_{RS}, P^{II}).$$

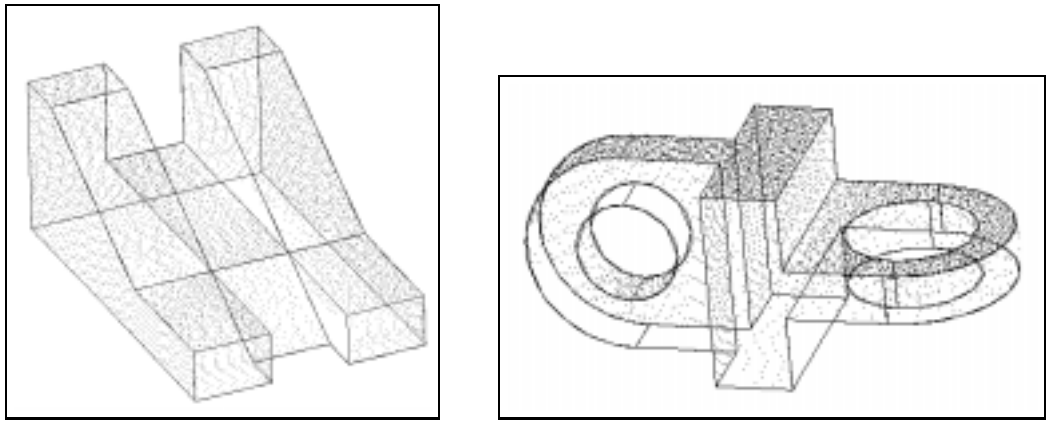
4. La transformation estimée est appliquée sur P^I_{RS} :

$$P^I \leftarrow T_{ICP}(P^I_{RS}).$$

5. $d_k = d(P^I, P^{II})$

6. Les étapes 2 à 5 sont répétées jusqu'à ce que $d_{k-1} - d_k < \tau \cdot \sigma$ avec $k \leftarrow k + 1$.

La Figure 4.1 illustre quelques résultats du recalage entre un nuage de points d'une pièce et son modèle CAO en format IGES, en utilisant la méthode ICP robuste.



(a) Pièce un de la banque de pièces

(b) Pièce deux de la banque de pièces

FIG. 4.1: Recalage entre un nuage de points et le modèle CAO d'une pièce

4.2.3 Précision de la Méthode de recalage

Moron [MOR96a] a étudié l'erreur de la méthode de recalage en fonction du paramètre de convergence de l'algorithme ICP, c'est-à-dire fonction de la valeur de $\varepsilon = \tau \cdot \sigma$. La valeur de celle-ci a été fixée à $\varepsilon = 10^{-8}$.

Les paramètres internes N_s et N_t interviennent directement dans la précision du résultat fourni par la méthode de recalage. L'influence de ceux-ci sur la qualité du recalage a été évaluée. D'une manière générale, il a été constaté que l'erreur de position diminue lorsque N_t augmente et lorsque N_s diminue. Par ailleurs, le temps de calcul augmente lorsque N_t et N_s augmentent, ce qui se comprend aisément puisque le nombre d'opérations à réaliser augmente proportionnellement à N_t et N_s. Par conséquent, après une évaluation de ces paramètres, Moron a trouvé qu'un bon choix était : N_t égal à 10 et N_s égal à 30.

Avec ces paramètres, l'erreur de la méthode de recalage a été estimée à une valeur moyenne par point de $\mu = 0.7\mu m$ avec une variance $\sigma^2 = 0.01$. Donc, l'erreur introduite par la méthode de recalage est petite par rapport à l'application d'inspection envisagée. Par conséquent, nous ne tiendrons pas compte de cette erreur.

4.3 Segmentation de données 3D

Dans le procédé de recalage, nous superposons le modèle CAO avec les données 3D de la pièce. Mais puisqu'en inspection, la plupart du temps nous sommes intéressés au seul contrôle des surfaces qui ont des spécifications de tolérances, alors pour réaliser celui-ci, nous devons segmenter la pièce selon ses différentes surfaces. Donc, pour avoir des sous-ensembles de points 3D liés aux surfaces d'intérêt, nous avons mis au point un algorithme de segmentation qui est composé des étapes suivantes :

1. Calcul de la distance point 3D/surface NURBS.
2. Calcul et comparaison des propriétés géométriques.

Dans la première étape, la distance entre chaque point 3D et toutes les surfaces NURBS du modèle CAO de la pièce est calculée. Ce problème est résolu comme un problème de minimisation. Un point 3D proche d'une arête ou d'un coin peut avoir plusieurs surfaces proches, donc toutes ces surfaces sont associées au point 3D

comme surfaces d'appartenance possibles.

Dans la deuxième étape, la segmentation est complétée par le calcul et la comparaison de propriétés géométriques du point 3D et des points des surfaces les plus proches. Les propriétés géométriques locales que nous estimons sont : la normale à la surface et les courbures moyenne et gaussienne. Pour le point sur la surface, ces propriétés sont estimées en utilisant les paramètres de la surface NURBS. Pour le point 3D, nous utilisons un polynôme paramétrique du second ordre calculé sur un voisinage de points autour du point d'intérêt.

4.3.1 Calcul de la distance point 3D/surface NURBS

Le problème pour calculer la distance d'un point 3D à une surface NURBS peut être formulé de la façon suivante : trouver un point dans l'espace paramétrique de la surface (u_0, v_0) tel que la distance entre le point sur la surface $\vec{s}(u_0, v_0)$ et le point 3D $\vec{r}$ est minimum dans la direction perpendiculaire au plan tangent au point (u_0, v_0) (voir la figure 4.2).

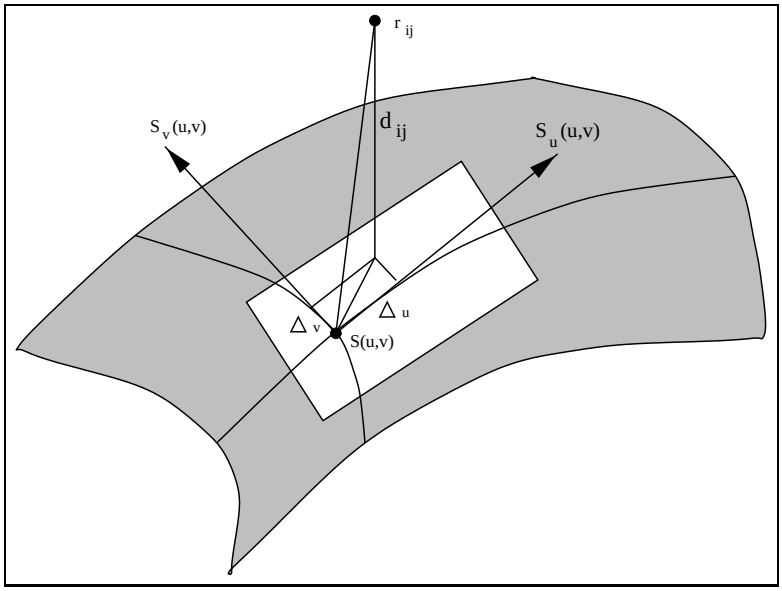


FIG. 4.2: Distance entre un point 3D et une surface NURBS

La fonction à minimiser est :

$$min_{(u_0,v_0)}\|\vec{r}-\vec{s}(u,v)\|^2. \tag{4.1}$$

Un développement en série de Taylor de la surface paramétrique $\vec{s}(u,v)$ donne :

$$\vec{s}(u,v)=\vec{s}(u_0,v_0)+\frac{\partial\vec{s}}{\partial u}(u_0-u)+\frac{\partial\vec{s}}{\partial v}(v_0-v), \tag{4.2}$$

avec :

$\frac{\partial}{\partial u}\vec{s}(u,v)=\frac{AB-CD}{B^2}$ et

$\frac{\partial}{\partial v}\vec{s}(u,v)=\frac{EB-FD}{B^2}$

où

$A=\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}(\frac{\partial}{\partial u}N_{i,p}(u))N_{j,q}(v)w_{i,j}\vec{P}_{i,j}$,

$B=\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}N_{i,p}(u)N_{j,q}(v)w_{i,j}$,

$C=\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}N_{i,p}(u)N_{j,q}(v)w_{i,j}\vec{P}_{i,j}$,

$D=\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}(\frac{\partial}{\partial u}N_{i,p}(u))N_{j,q}(v)w_{i,j}$,

$E=\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}N_{i,p}(u)(\frac{\partial}{\partial v}N_{j,q}(v))w_{i,j}\vec{P}_{i,j}$,

$F=\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}N_{i,p}(u)(\frac{\partial}{\partial v}N_{j,q}(v))w_{i,j}$,

$\frac{\partial}{\partial u}N_{i,p}(u)=\frac{p}{u_{i+p-1}-u_{i-1}}N_{i,p-1}(u)-\frac{p}{u_{i+p}-u_i}N_{i+1,p-1}(u)$ et

$\frac{\partial}{\partial v}N_{j,q}(v)=\frac{q}{u_{j+q-1}-u_{j-1}}N_{j,q-1}(v)-\frac{q}{u_{j+q}-u_j}N_{j+1,q-1}(v)$,

et :

n est le nombre de points de contrôle dans la direction paramétrique u,

m est le nombre de points de contrôle dans la direction paramétrique v,

$\vec{P}_{i,j}$ les points de contrôle,

$w_{i,j}$ les poids associés au point de contrôle $\vec{P}_{i,j}$,

$N_{i,p}$ (ou $N_{j,q}$) les fonctions de la base B-Spline.

Le problème de minimisation devient donc :

$$min_{u_0,v_0}\|\vec{r}-\vec{s}(u_0,v_0)-\frac{\partial\vec{s}}{\partial u}(u_0-u)-\frac{\partial\vec{s}}{\partial v}(v_0-v)\|^2 \tag{4.3}$$

qui peut être exprimé sous forme matricielle par :

$$min_{(u_0,v_0)}\|J\vec{w} - \vec{d}\|^2 \tag{4.4}$$

où J est le jacobien de $\vec{s}(u,v)$ et est égal à :

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial s_x}{\partial u} & \frac{\partial s_x}{\partial v} \\ \frac{\partial s_y}{\partial u} & \frac{\partial s_y}{\partial v} \\ \frac{\partial s_z}{\partial u} & \frac{\partial s_z}{\partial v} \end{bmatrix}, \tag{4.5}$$

et

$$\vec{w} = \begin{pmatrix} u_0 - u \\ v_0 - v \end{pmatrix}, \tag{4.6}$$

est un vecteur qui correspond à la variation de la position précédente.

Si $\vec{d}(u,v)$ est l'erreur entre le point $\vec{r}$ et le modèle paramétrique :

$$\vec{d}(u,v) = \vec{r} - \vec{s}(u,v), \tag{4.7}$$

alors la solution au problème de minimisation correspond à la condition d'Euler, c'est-à-dire :

$$\frac{\partial}{\partial \vec{w}}\|J\vec{w} - \vec{d}\|^2 = 0 = 2J^T J\vec{w} - 2J^T\vec{d}. \tag{4.8}$$

D'où :

$$J^T J\vec{w} = J^T\vec{d},$$

$J^T\vec{d}$ correspond à la projection du vecteur d'erreur dans le plan tangent. La nouvelle position paramétrique est égale à :

$$\vec{w} = (J^T J)^{-1}J^T\vec{d}. \tag{4.9}$$

En utilisant un procédé itératif, on peut calculer la distance du point 3D à la surface en moins de quatre ou cinq itérations. Les paramètres d'initialisation de

cette procédure itérative sont trouvés en découpant la surface en N carreaux et en prenant le centre (u, v) du carreau le plus proche du point $\vec{r}$. Le critère d'arrêt, correspond à la condition d'orthogonalité du vecteur d'erreur et du plan tangent à la surface en ce point, mesurée par les deux conditions suivantes :

$$\gamma = \left| \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{\vec{d} \cdot \frac{\partial \vec{s}}{\partial u}}{|\vec{d}| \cdot |\frac{\partial \vec{s}}{\partial u}|} \right| \leq \varepsilon,$$
$$\xi = \left| \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{\vec{d} \cdot \frac{\partial \vec{s}}{\partial v}}{|\vec{d}| \cdot |\frac{\partial \vec{s}}{\partial v}|} \right| \leq \varepsilon. \tag{4.10}$$

Le paramètre ε correspond à la précision avec laquelle on veut que cette condition d'orthogonalité soit respectée et a été fixé à $\varepsilon = 0.1$ degré.

L'algorithme pour calculer la distance point 3D/surface NURBS peut être résumé comme suit :

1. Calcul de la matrice Jacobienne J (équation 4.5),
2. Calcul de $\vec{d}$ (équation 4.7),
3. Calcul du vecteur $\vec{w}$ (équation 4.6),
4. $(u_0, v_0) = (u_0, v_0) + \vec{w}$,
5. Calcul de γ et ξ (équation 4.10),
6. Si $\gamma \leq \varepsilon$ et $\xi \leq \varepsilon$, alors on arrête, sinon on retourne à l'étape 1.

Une fois que la distance du point 3D à toutes les surfaces a été calculée, les surfaces les plus proches du point sont déterminées. Soit $\vec{d_i}$ la distance minimale du point 3D à la *i-ième* surface $\vec{s}_i$. Soit $\vec{s}_j$ la surface la plus proche du point 3D, avec une distance $\vec{d_j}$. Dans cette étape de la segmentation, toutes les surfaces à une distance telle que :

$$\vec{d_i} \leq 1.5\vec{d_j}, \tag{4.11}$$

avec $i = 1, 2, \ldots m$; $i \neq j$ et m le nombre de surfaces de la pièce, sont associées au point 3D comme surfaces possibles d'appartenance. Généralement un point a deux ou plus surfaces d'appartenance possibles lorsqu'il est près d'une arête ou d'un coin.

4.3.2 Calcul et comparaison des propriétés géométriques

Soit $\vec{r}$ un point du nuage de points 3D, et $\vec{p}_{s_k}$ le point le plus proche sur chacune des surfaces d'appartenance possibles identifiées à l'étape précédente. Pour sélectionner la surface d'appartenance correcte du point $\vec{r}$, nous estimons et comparons quelques propriétés géométriques de $\vec{r}$ et de $\vec{p}_{s_k}$. Nous utilisons la normale $\vec{n}$, la courbure gaussienne K et la courbure moyenne H comme propriétés géométriques. Ces courbures sont deux invariants algébriques naturels, qui présentent des propriétés intéressantes telles que :

- invariance par rapport au point de vue,
- invariance par rapport au type de paramétrisation,
- détermination unique de la forme d'une surface échantillonnée.

La normale $\vec{n}(u,v)$, la courbure gaussienne $K(u,v)$ et la courbure moyenne $H(u,v)$ pour le point (u,v) sur la surface paramétrique sont estimées par les équations suivantes [BOU94b] :

$$\vec{n}(u,v) = \frac{\vec{r}_u(u,v) \times \vec{r}_v(u,v)}{\|\vec{r}_u(u,v) \times \vec{r}_v(u,v)\|}, \tag{4.12}$$

$$K(u,v) = \frac{[\vec{r}_{uu}\vec{r}_u\vec{r}_v][\vec{r}_{vv}\vec{r}_u\vec{r}_v] - [\vec{r}_{uv}\vec{r}_u\vec{r}_v]^2}{|\vec{r}_u \times \vec{r}_v|^4}, \tag{4.13}$$

$$H(u,v) = \frac{(\vec{r}_u \cdot \vec{r}_v)[\vec{r}_{uu}\vec{r}_u\vec{r}_v] + (\vec{r}_u \cdot \vec{r}_v)[\vec{r}_{vv}\vec{r}_u\vec{r}_v] - 2(\vec{r}_u \cdot \vec{r}_v)[\vec{r}_{uv}\vec{r}_u\vec{r}_v]}{2|\vec{r}_u \times \vec{r}_v|^3}, \tag{4.14}$$

où :

$$
\begin{aligned}
[\vec{a}\,\vec{b}\,\vec{c}] &= \vec{a} \cdot (\vec{b} \times \vec{c}) \\
\vec{r}_u &= \frac{\partial \vec{r}}{\partial u} \\
\vec{r}_v &= \frac{\partial \vec{r}}{\partial v} \\
\vec{r}_{uu} &= \frac{\partial^2 \vec{r}}{\partial u^2} \\
\vec{r}_{vv} &= \frac{\partial^2 \vec{r}}{\partial v^2} \\
\vec{r}_{uv} &= \frac{\partial^2 \vec{r}}{\partial u \partial v}
\end{aligned}
$$

Pour estimer les dérivées partielles premières et secondes au point $\vec{p}_{s_k}$, nous utilisons les paramètres de la surface NURBS. Pour estimer ces dérivées au point $\vec{r}$ nous utilisons une méthode proposée par Boulanger [BOU94a], qui utilise un polynôme paramétrique du second ordre obtenu en utilisant un voisinage $N \times N$ (5×5) autour du point $\vec{r}(u,v) = (x(u,v), y(u,v), z(u,v))^T$. Le polynôme paramétrique est défini par l'équation suivante :

$$
\vec{\eta}(u,v) = \sum_{i=0}^{2} \sum_{j=0}^{2} \vec{a}_{ij} u^i v^j = (h_x(u,v), h_y(u,v), h_z(u,v))^T \tag{4.15}
$$

où $\vec{a}_{ij}$ est le coefficient de chaque composante de $\vec{\eta}(u,v)$; $\vec{a}_{ij}$ est égal à zéro si $i+j > 2$.

En utilisant ce polynôme, les dérivées partielles au point P sont obtenues :

$$
\begin{aligned}
\vec{\eta}_u &= \vec{a}_{10} + \vec{a}_{11} v_0 + 2\vec{a}_{20} u_0 \\
\vec{\eta}_v &= \vec{a}_{01} + \vec{a}_{11} u_0 + 2\vec{a}_{02} v_0 \\
\vec{\eta}_{uu} &= 2\vec{a}_{20} \\
\vec{\eta}_{vv} &= 2\vec{a}_{02} \\
\vec{\eta}_{uv} &= \vec{a}_{11}
\end{aligned} \tag{4.16}
$$

où (u_0, v_0) sont les coordonnées paramétriques du centre du voisinage. Nous trouvons ces paramètres par une méthode de moindres carrés.

Finalement nous comparons les propriétés géométriques locales de $\vec{p}_{s_k}$ estimées à partir de la surface NURBS avec celles de $\vec{r}$ des données 3D issues du capteur. Soit α_{tol} l'angle permis entre la normale en $\vec{p}_{s_k}$ $(\vec{n}_s)$ et en $\vec{r}$ $(\vec{n}_r)$, et soit K_{tol} et H_{tol} les variations acceptables pour la courbure gaussienne et la courbure moyenne respectivement, alors le point $\vec{r}$ est lié à la surface s_k si les conditions suivantes sont respectées :

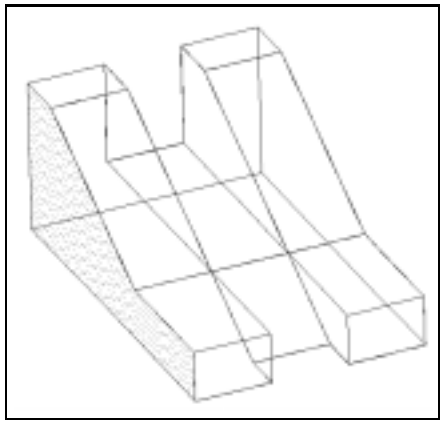
$$\begin{aligned} |Angle(\vec{N}_s, \vec{N}_r)| &\leq \alpha_{tol}, \\ |K_s - K_r| &\leq K_{tol}, \\ |H_s - H_r| &\leq H_{tol}. \end{aligned} \tag{4.17}$$

Etiquetage du point $\vec{r}$. Le point $\vec{r}$ est étiqueté avec le nom (numéro) k de la surface NURBS $\vec{s}_k$, si ses propriétés géométriques sont semblables à celles du point $\vec{p}_{s_k}$ sur la surface paramétrique (équation 4.17) et si la surface $\vec{s}_k$ est une des surfaces proches du point (équation 4.11).

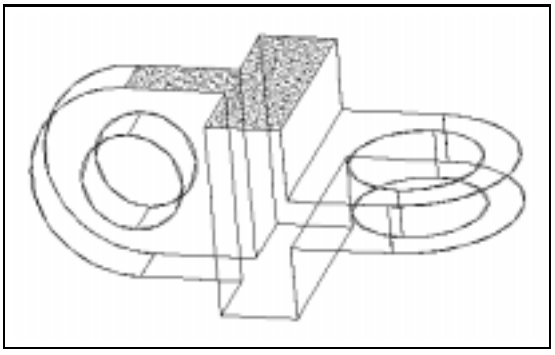
La Figure 4.3 montre quelques résultats obtenus avec la méthode de segmentation présentée dans cette section.

4.4 Définition et contrôle des tolérances

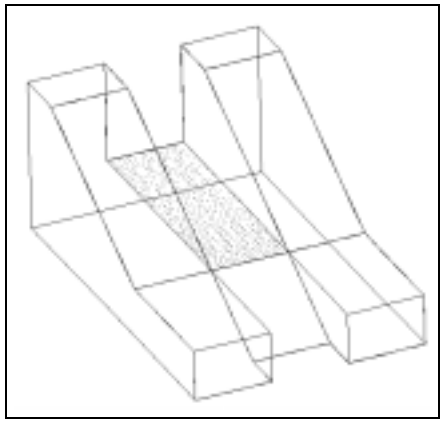
De nombreux chercheurs ([REQ86], [TUR87], [FLE88], [CAR93]) se sont penchés sur les problèmes de création et d'analyse des tolérances en CAO en représentation solide ou surfacique, car il n'existe pas une méthode robuste pour la définition des tolérances. Mathieu *et al* [MAT97b], [MAT97a], [MAT97c] développent des méthodes pour la linéarisation des problèmes de métrologie tridimensionnelle avec des MMTs. Un état de l'art sur les développements dans le domaine de la modélisation et de la représentation des tolérances se retrouve dans [JUS92]. Nous nous sommes inspirés de ces travaux pour la définition des tolérances, mais nous les appliquons dans le cas du contrôle de tolérances en utilisant des données de profondeur (images 3D).



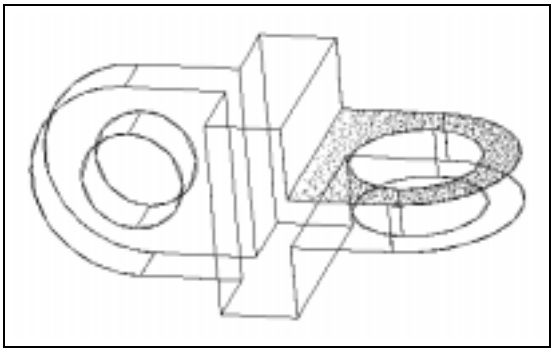
(a) Surface deux de la pièce un



(b) Surface un de la pièce deux



(c) Surface onze de la pièce un



(d) Surface douze de la pièce deux

FIG. 4.3: Segmentation de quelques surfaces à partir d'un nuage de points recalés avec le modèle CAO de la pièce

Pour le contrôle de tolérances, Modayur *et al* [MOD92] présentent un travail pour l'inspection des tolérances géométriques en utilisant des images d'intensité (images 2D). Roy [ROY95] a développé une méthodologie pour les contrôles des tolérances géométriques assistés par ordinateur, incorporée dans un système de FAO. Kurfess *et al* [KUR95], [KUR96] réalisent le contrôle de la tolérance de cylindricité de pièces à partir de données fournies par une MMT. Le contrôle est réalisé statistiquement à partir des points qui ont une matrice de covariance associée.

Une tolérance est une spécification qui définit la variation admissible de dimension ou de géométrie d'un élément. Suivant le domaine considéré, deux types de tolérances sont couramment utilisées :

- Les tolérances dimensionnelles et angulaires.
- Les tolérances géométriques.

Dans cette section, après quelques définitions, nous exposerons la méthodologie utilisée pour le contrôle de ces deux types de tolérances.

Référence Une référence (datum) est un point, une ligne, un plan, ou toute autre surface géométrique à partir de laquelle des dimensions sont mesurées où à laquelle des tolérances géométriques sont mises en référence. Les références ont une forme exacte et représentent un emplacement précis ou fixe aux fins de la fabrication ou de la mesure.

Nous utiliserons comme références les surfaces ou éléments obtenus à partir du modèle CAO (en format Iges) de la pièce. Dans ce modèle CAO, toutes les surfaces sont définies de façon exacte par l'utilisation des surfaces paramétriques NURBS.

Référence réelle Une référence réelle est une caractéristique d'une pièce, telle qu'un bord ou une surface, qui forme la base pour des références, ou est utilisée pour établir son emplacement.

Comme référence réelle, nous utilisons l'ensemble de points 3D mesurés, lié à la surface de référence. Cet ensemble de points est obtenu après le processus de recalage et de segmentation. Le recalage réalisé entre le nuage de points issus du capteur de profondeur et le modèle CAO de la pièce a été présenté à la section 4.2. Le procédé de segmentation du nuage de points en des sous-ensembles de points, reliés aux surfaces du modèle CAO a été détaillé à la section 4.3.

Elément Afin de spécifier des tolérances géométriques, la pièce est considérée comme étant constituée d'éléments géométriques, quelle qu'en soit la nature, tels que des points, des lignes, des surfaces ou des volumes. Outre l'aspect purement géométrique, un élément peut aussi correspondre à un détail fonctionnel de la pièce (trou, gorge, alésage, etc.).

Du fait de la nature des données 3D, nous utilisons comme éléments de base les surfaces des pièces. Celles-ci sont représentées par des surfaces paramétriques à deux dimensions dans le modèle CAO. Les points 3D sont regroupés, après le processus de segmentation, en des ensembles qui représentent des surfaces.

Zone de tolérance C'est la portion d'espace à l'intérieur de laquelle doit se situer l'élément considéré. Une zone de tolérance est un domaine à l'intérieur duquel peuvent varier les caractéristiques dimensionnelles ou géométriques d'un élément. Elle est circonscrite par des lignes ou des surfaces frontières, elles-mêmes définies par des dimensions limites ou par une valeur spécifiée de tolérance.

Puisque le procédé de recalage réduit au minimum la somme au carré des distances entre les points du nuage et le modèle CAO, l'ensemble des distances de points 3D à la surface NURBS aura, après le recalage, une distribution gaussienne comme celle de la Figure 4.4. Celle-ci montre la distribution de la distance entre les points 3D et la surface NURBS pour le sous-ensemble de points lié à une des surfaces de la pièce présentée à la Figure 4.5 (surface avec la spécification de tolérance de planéité de la Figure 4.9).

Nous définissons une zone de tolérance en plaçant deux plans parallèles à la surface NURBS à une distance de $\pm 2\sigma$ de la distance moyenne. Rigoureusement, pour définir la zone de tolérance, nous devrions placer les plans parallèles aux distances les plus éloignées de la valeur moyenne et ainsi prendre en compte tous les points mesurés. Mais nous les plaçons à une distance de $\pm 2\sigma$, garantissant ainsi que 95% des points mesurés sont compris entre les deux plans parallèles. Nous considérons que le 5% des points restants sont des points bruités.

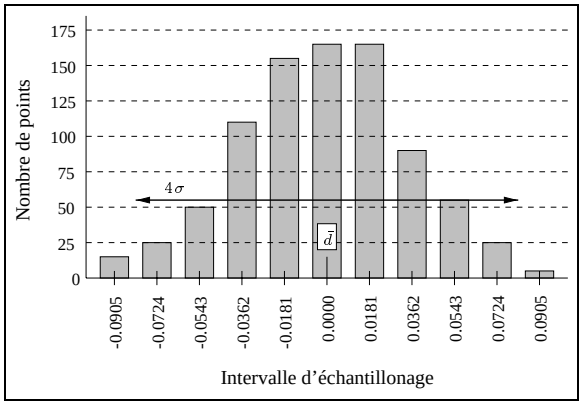


FIG. 4.4: Distribution de la distance entre chaque point 3D et la surface de référence

4.4.1 Tolérances dimensionnelles

Les tolérances dimensionnelles sont exprimées par la différence entre la dimension maximale et la dimension minimale d'une dimension tolérancée. Une tolérance dimensionnelle est une grandeur dépourvue de signe. Elle représente l'intervalle dans lequel peut varier la dimension effective d'un élément. Elle peut être exprimée par deux écarts définissant les limites supérieure et inférieure de tolérance. La Figure 4.5 montre quelques tolérances dimensionnelles et angulaires qui ont été spécifiées pour une pièce de la banque de pièces.

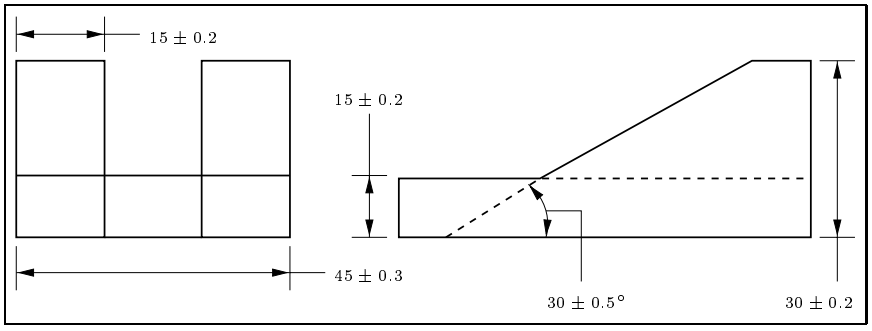


FIG. 4.5: Spécification des tolérances dimensionnelles et angulaires sur une pièce

4.4.2 Contrôle de tolérances dimensionnelles

Nous pouvons contrôler les tolérances dimensionnelles correspondant à des dimensions comprises entre deux surfaces parallèles, comme celle présentée à la Figure 4.6.

La Figure 4.6 illustre le processus utilisé pour le contrôle de tolérances dimensionnelles. Pour les sous-ensembles de points liés aux surfaces parallèles qui définissent la dimension à contrôler, nous calculons la distance entre chaque point et sa surface d'attache pour déterminer les valeurs $\bar{d}$ et σ. La dimension mesurée est donc $d_0 \pm 2(\sigma_1 + \sigma_2)$, où d_0 est la distance entre $\bar{d_1}$ et $\bar{d_2}$.

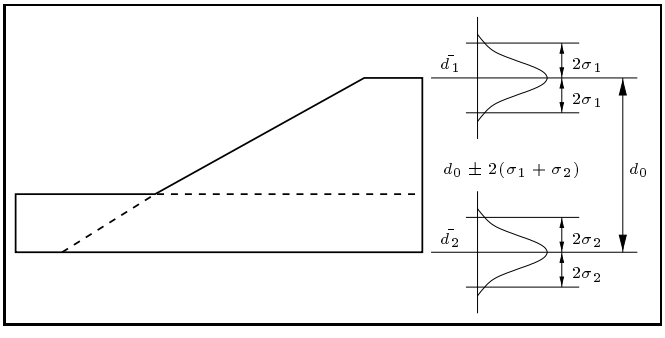


FIG. 4.6: Contrôle de tolérances dimensionnelles

Soit $d_s \pm \Delta d_s$ la dimension spécifiée pour la surface sous contrôle, nous dirons

que la surface respecte ses spécifications si les conditions suivantes sont satisfaites :

$$\begin{aligned} d_s - \Delta d_s &\leq d_0 - 2(\sigma_1 + \sigma_2) \\ d_0 + 2(\sigma_1 + \sigma_2) &\leq d_s + \Delta d_s. \end{aligned} \tag{4.18}$$

4.4.3 Tolérances angulaires

Ce sont la différence entre l'ouverture maximale et l'ouverture minimale d'un angle tolérancé. Une tolérance angulaire est une grandeur dépourvue de signe. Elle représente l'intervalle à l'intérieur duquel peut varier l'ouverture d'un angle. Elle peut être exprimée : par deux écarts définis dans le système d'unité choisi, généralement le degré décimal ou sexagésimal, par les limites de tolérance angulaire ou par une indication unique supérieure ou inférieure. La Figure 4.5 illustre une tolérance angulaire.

4.4.4 Contrôle des tolérances angulaires

Nous illustrons à la Figure 4.7 la méthode utilisée pour contrôler les tolérances angulaires. Nous déterminons les valeurs $\bar{d}$ et σ pour les sous-ensembles de points liés aux surfaces qui définissent l'angle à contrôler. Soit $P_1(P_2)$ le plan qui passe par la ligne O (ligne définie par l'intersection des plans qui forment l'angle sous contrôle) et par un point situé à une distance perpendiculaire de $2\sigma(-2\sigma)$ du centre de la surface. L'angle α_1 est l'angle formé par le plan $P_1(P_2)$ et la surface NURBS. L'angle α_2 est estimé par une procédure similaire. L'angle mesuré est donc, $\alpha_0 \pm (\alpha_1 + \alpha_2)$, où α_0 est l'angle formé par les deux surfaces.

Soit $\alpha_s \pm \Delta\alpha_s$ l'angle spécifié. Nous dirons que la spécification est respectée si les conditions suivantes sont satisfaites :

$$\begin{aligned} \alpha_s - \Delta\alpha_s &\leq \alpha_0 - (\alpha_1 + \alpha_2) \\ \alpha_0 + (\alpha_1 + \alpha_2) &\leq \alpha_s + \Delta\alpha_s. \end{aligned} \tag{4.19}$$

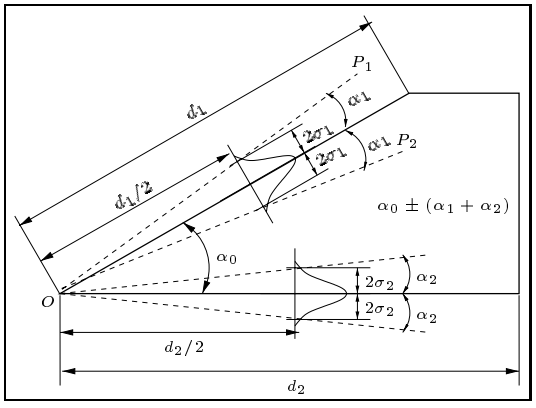


FIG. 4.7: Contrôle de tolérances angulaires

4.4.5 Tolérances géométriques

Les tolérances géométriques sont l'intervalle maximal admissible dans lequel peuvent varier les caractéristiques géométriques de forme, d'orientation, de position ou de battement d'un élément. Une tolérance géométrique est exprimée sur un dessin par un cadre contenant les caractéristiques du tolérancement relié à l'élément tolérancé et éventuellement à l'élément de référence par une ligne de repère. Dans l'annexe D nous présentons la définition de toutes les tolérances géométriques.

Tolérance de forme

C'est la valeur maximum autorisée de la déviation de forme d'un élément. Suivant la géométrie de l'élément, la zone de tolérance est limitée par deux lignes ou par deux surfaces, de forme adéquate, distantes de t entre lesquelles doit se situer la ligne ou la surface considérée. Une tolérance de forme s'applique uniquement à la forme de l'élément tolérancé indépendamment de son environnement, de sa position ou de son orientation. Par exemple, un plan reste un plan qu'il soit horizontal, vertical ou quelconque. L'ensemble des tolérances de forme qui s'appliquent aux surfaces comprend des tolérancements tels que : planéité, cylindricité, surface quelconque. La Figure 4.8 illustre les plans qui bornent une surface sous contrôle (ligne accentuée),

celles-ci ne sont pas rattachées à la surface de référence A.

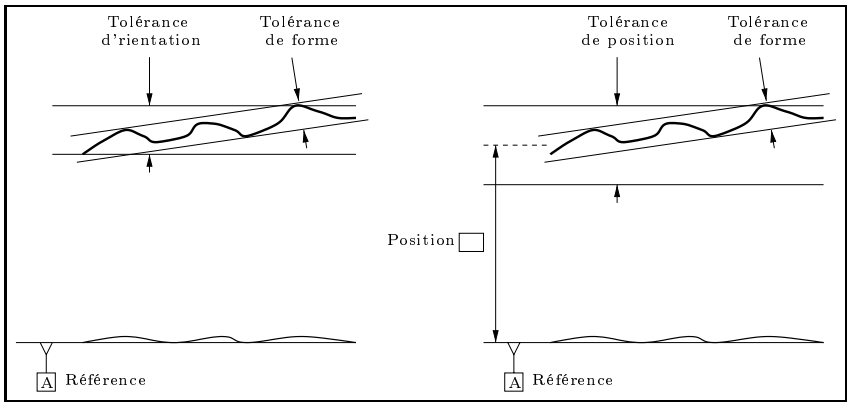


FIG. 4.8: Tolérances géométriques de forme, d'orientation et de position

Tolérance d'orientation

C'est la valeur maximum autorisée de la déviation de l'orientation d'un élément. Suivant la géométrie de l'élément, la zone de tolérance est limitée par deux droites, deux plans, un parallélépipède ou un cylindre à l'intérieur desquels doit se situer la ligne ou la surface considérée. Un tolérancement d'orientation limite uniquement la dispersion d'orientation de l'élément tolérancé, indépendamment de sa position, et en conséquence, une zone d'orientation est mobile en translation et ne détermine ni contrôle la position de l'élément. Seule son inclinaison par rapport à un élément de référence est imposée. Les tolérancements géométriques d'orientation forment un groupe qui comprend : la tolérance de parallélisme, la tolérance de perpendicularité et la tolérance d'inclinaison. La Figure 4.8 illustre les plans qui bornent une surface sous contrôle, celles-ci ont la même orientation que la surface de référence A, mais ne sont pas limitées quant à la distance référence/surface.

Tolérance de position

C'est la valeur maximum autorisée de la déviation de la position d'un élément. Suivant la spécification et la géométrie de l'élément, la zone de tolérance est limitée par deux droites, deux plans, un cercle, un parallélépipède ou un cylindre à l'intérieur desquels doit se situer la ligne ou la surface considérée. Un tolérancement de position limite à la fois les erreurs de position, d'orientation et de forme d'un élément. La zone de tolérance doit être orientée et mise en position par rapport à un ou plusieurs éléments de référence. Les tolérancements géométriques de position forment un groupe qui comprend : la tolérance de localisation, la tolérance de coaxialité et de concentricité. La Figure 4.8 illustre les plans qui bornent une surface sous contrôle, l'orientation et la position de celles-ci sont rattachées à la surface de référence A.

La Figure 4.9 illustre quelques tolérances géométriques qui ont été spécifiées pour une pièce de la banque de pièces.

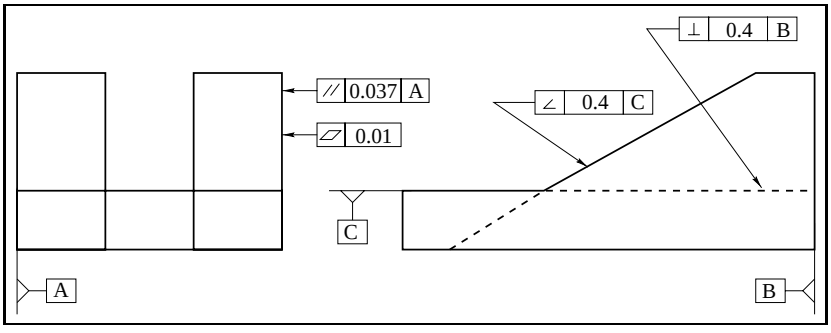


FIG. 4.9: Spécification des tolérances géométriques sur une pièce

4.4.6 Contrôle des tolérances géométriques

Contrôle des tolérances de forme

D'après la définition des tolérances de forme, nous savons qu'elles ne limitent ni l'orientation ni la position de la surface, et qu'elles sont appliquées directement sur la surface sous contrôle sans considérer une surface de référence. Ainsi, nous

vérifions les tolérances de forme d'une surface en utilisant seulement les points 3D associés à cette surface et obtenus à partir du procédé de segmentation. Ce sous-ensemble de points 3D est de nouveau recalé avec le modèle CAO, et la distance entre chaque point 3D et la surface NURBS est calculée. La distribution de ces distances est utilisée pour définir la zone de tolérance mesurée. En effet, nous ajustons la valeur moyenne de la distribution avec la surface NURBS (du modèle CAO). En faisant passer deux surfaces parallèles à la surface NURBS à une distance de $\pm 2\sigma$, la tolérance mesurée est donc égale à : $t_m = 4\sigma$. Pour la tolérance de planéité, ces surfaces sont des plans tandis que pour la tolérance de cylindricité, ces sont des cylindres de différents rayons.

Dans la Figure 4.10, nous présentons schématiquement le contrôle d'une tolérance de planéité. Dans cette figure (et les suivantes), la ligne accentuée représente le nuage de points après le recalage.

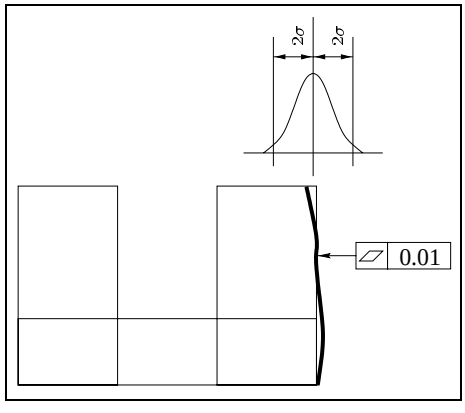


FIG. 4.10: Contrôle des tolérances de forme : planéité

Les pièces de forme complexe comprennent des surfaces gauches et relativement peu de surfaces planes. Les seules tolérances géométriques spécifiées sur ce type de surface sont des tolérances de forme quelconque, qui sont des tolérances difficilement contrôlables par les techniques traditionnelles de métrologie (réglet, comparateur, MMT). Par contre, en utilisant une méthodologie comme celle présentée dans ce travail, nous pouvons contrôler ces types de tolérances.

La zone de tolérance d'une forme quelconque est limitée par deux surfaces bornant des sphères de diamètre t dont les centres sont situés sur une surface ayant la forme géométrique spécifiée (voir la Figure 4.11). Pour le contrôle de ces tolérances, nous utilisons la surface NURBS comme surface spécifiée et le diamètre des sphères t_m, qui définit la zone de tolérance est égale à : $t_m = 4\sigma$.

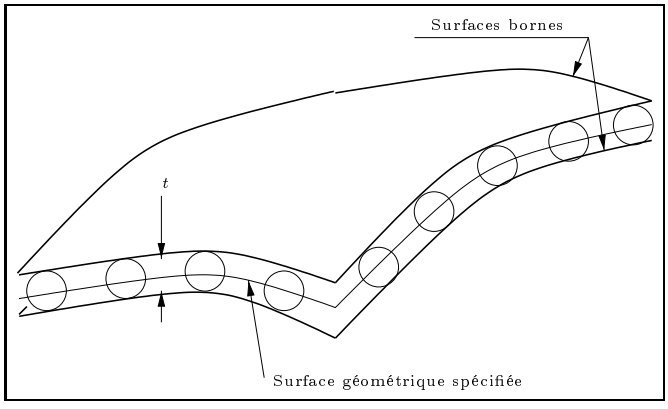


FIG. 4.11: Contrôle des tolérances de forme quelconque

Pour toutes les tolérances de forme, nous dirons que la surface est conforme aux spécifications si la relation suivante est satisfaite :

$$t_m \leq t_s, \tag{4.20}$$

où : t_m est la distance entre les plans parallèles mesurés et t_s est la distance spécifiée entre les plans parallèles.

Contrôle des tolérances d'orientation

Les tolérances d'orientation limitent la forme et l'orientation de la surface mais ne limitent pas la position. Pour définir l'orientation, ces tolérances sont toujours rapportées à une surface de référence. Par conséquent, nous devons utiliser deux sous-ensembles de points : S_i associé à la surface à inspecter et S_r associé à la surface de référence et qui sera la référence réelle. Le sous-ensemble S_r est recalé avec le modèle CAO et la transformation rigide trouvée est aussi appliquée à S_i.

La distance entre chaque point 3D de S_i et la surface NURBS est calculée. La distribution de ces distances n'a pas forcément une forme gaussienne, et donc deux points sont définis afin d'évaluer la zone de tolérance mesurée :

- Le point p_1 à une distance d_1 de la surface NURBS tel que 2.5% des points en S_i ont une distance $d_i \leq d_1$.
- Le point p_2 à une distance d_2 de la surface NURBS tel que 2.5% des points en S_i ont une distance $d_i \geq d_2$.

La zone de tolérance mesurée est alors définie comme celle comprise entre deux plans parallèles et orientés par rapport à une surface de référence. Les deux plans passent par les points p_1 et p_2, pour garantir que 95% des points en S_i sont compris. Pour la tolérance de parallélisme, les plans sont orientés parallèlement à la référence ; pour la tolérance de perpendicularité, ils sont perpendiculaires ; et pour la tolérance d'inclinaison, ils forment l'angle spécifié avec la surface de référence.

Pour les tolérances d'orientation, la surface inspectée est conforme à la spécification t_s si la relation suivante est satisfaite :

$$t_m = |d_2 - d_1| \leq t_s \,. \tag{4.21}$$

La Figure 4.12 illustre le contrôle de quelques tolérances d'orientation.

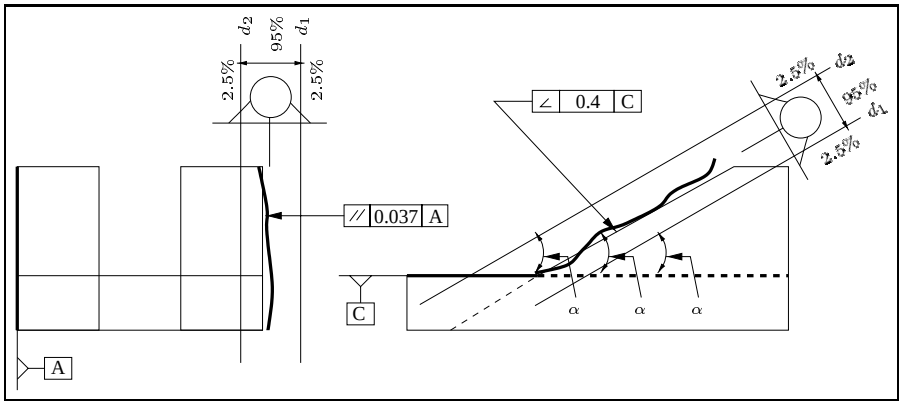


FIG. 4.12: Contrôle des tolérances d'orientation

Contrôle des tolérances de position

Les tolérances de position sont contrôlées de façon similaire aux tolérances d'orientation. Pour assurer la conformité de la surface sous inspection, la relation suivante doit être satisfaite :

$$t_{1_s} \leq t_{1_m} < t_{2_m} \leq t_{2_s}, \tag{4.22}$$

où : t_{1_s} et t_{2_s} sont les distances au plan qui définissent la zone de tolérance spécifiée jusqu'à la référence, et t_{1_m} et t_{2_m} sont les distances de plan qui définissent la zone de tolérance mesurée jusqu'à la référence réelle (S_r).

4.5 Système d'inspection visuelle

Le terme *inspection visuelle* est utilisé pour désigner une inspection qui permet de contrôler les tolérances d'une pièce sans la manipuler, ce qui présente l'avantage de ne pas les détériorer et de ne pas nécessiter le ralentissement ou l'arrêt de la chaîne de fabrication. L'inspection non-visuelle telle que par l'utilisation d'une machine à mesurer 3D est lente, mais possède le grand avantage de procurer des informations 3D de grande précision ($1\mu m$). L'inspection visuelle, en utilisant par exemple les capteurs de profondeur, n'est pas capable jusqu'à présent d'égaler cette précision.

Nous savons que la précision des données 3D acquises par les capteurs de profondeur est fonction des paramètres physiques de l'acquisition. Dans la section 2.6 nous avons modélisé le bruit des points 3D acquis en fonction de ces paramètres. Dans cette section nous introduisons ce modèle de bruit dans l'inspection visuelle. Les résultats du contrôle de tolérances seront donc non-déterministes.

4.5.1 Inspection déterministe

Nous définissons l'inspection déterministe comme celle qui ne prend pas en compte la valeur de dispersion statistique associée à chaque point 3D lors du

traitement des données. Autrement dit, ce type d'inspection considère les images 3D comme des images sans bruit. Dans la section 4.4, le contrôle de tolérances a été réalisé en considérant les données 3D comme des données déterministes.

Pour une visualisation rapide des défauts de la pièce, nous avons implémenté un interface graphique pour l'inspection déterministe des tolérances. Une fois la segmentation effectuée, nous pouvons donc choisir la surface d'intérêt et effectuer son contrôle de tolérances.

Nous décrivons ci-dessous les différentes actions qui peuvent être exécutées à partir de cette interface graphique :

- **Intervalle de tolérance.** Permet de fixer les tolérances minimales et maximales entre lesquelles les points de la surface doivent se trouver afin de décider si la surface est conforme au cahier de charges. Après avoir fixé ces valeurs, le logiciel recherche les points dans et hors tolérance et termine par l'affichage à l'écran du nuage de points où ceux-ci sont représentés avec des couleurs différentes. Cette opération peut se faire soit sur la pièce au complet, soit uniquement sur une ou plusieurs surfaces.
- **Valeur du seuil.** Permet de choisir une valeur de seuil soit positive (maximum de matière), soit négative (minimum de matière), et de visualiser, après calcul et affichage des points avec des couleurs différentes, les zones où il y a trop de matière ou pas assez.
- **Affichage des segments de droite.** Permet, pour une meilleure visibilité des deux actions précédentes, d'afficher non pas un point mais le segment de droite reliant le point à la surface. La longueur de ce segment dépendra de la distance séparant le point 3D de la surface NURBS.
- **Rapport statistique sur la surface.** Permet d'éditer un fichier où, pour chaque surface de l'objet, sont compilés certains paramètres statistiques tels que : le nombre de points composant la surface, le nombre de points hors tolérance, la valeur moyenne, la variance, l'écart-type, la valeur minimale et la

valeur maximale.

- **Rapport des propriétés géométriques.** Permet d'éditer un fichier où, pour chaque point, sont consignées la direction de sa normale, les courbures gaussienne et moyenne, ainsi que sa position dans l'espace.

4.5.2 Inspection non-déterministe

Une image réelle est rarement exempte de bruit. L'utilisation d'images bruitées mène aux incertitudes dans les attributs des entités issues des algorithmes de traitement de l'image. Dans le cas des images 3D, ces entités sont les sous-ensembles de points 3D (après le processus de segmentation) et les points 3D eux-mêmes. L'incertitude dans les entités de l'image conduit à l'incertitude sur les tâches de contrôle de tolérances. Dans cette section nous discutons l'effet de cette incertitude dans les résultats de l'inspection. Nous supposons que les données de profondeur ont été acquises en utilisant une stratégie comme celle présentée au chapitre 3.

Modèle du bruit

Nous avons présenté à la section 2.6 le modèle du bruit du système de numérisation. Soit la vraie valeur d'un point $\vec{r}_{ij}$ sur la surface à numériser dénoté par (x_i, z_j), et soit la valeur du point acquis par le capteur de profondeur dénoté par $(\hat{x}_i, \hat{z}_j)$. Notre modèle pour le point bruité, mesuré par le capteur est :

$$(\hat{x}_i, \hat{z}_j) = (x_i, z_j) + b(x_i, z_j). \tag{4.23}$$

Nous avons supposé que le bruit dans une image de profondeur est additif et aléatoire, par conséquent nous pouvons ajouter le signal aléatoire du bruit $b(x_i, z_j)$ aux vraies valeurs du point $\vec{r}_{ij}$. Le bruit est modélisé comme une fonction de densité de probabilité avec une distribution gaussienne de moyenne nulle et d'écart type $\mathbf{\Sigma}$,

comme le montre l'équation 2.15, reproduite ci-dessous :

$$b(\vec{r}) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}\sqrt{|\mathbf{\Sigma}|}} exp\left(-\frac{1}{2}(\vec{r}-\vec{s})^T\mathbf{\Sigma}^{-1}(\vec{r}-\vec{s})\right), \tag{4.24}$$

où $\vec{s}$ est un vecteur bidimensionnel correspondant au point sur la surface NURBS le plus proche de $\vec{r}$.

Les propriétés de la fonction de bruit $b(\vec{r})$ peuvent être interprétées géométriquement en faisant l'intersection de la fonction $b(\vec{r})$ avec des plans horizontaux d'une valeur de probabilité constante. Dans la Figure 4.13, nous observons que les intersections forment une famille d'ellipses de probabilité constante. Quand le centre de l'ellipse coïncide avec l'origine du référentiel, la forme et l'orientation sont déterminées complètement par la matrice de covariance. En effet, les longueurs du petit axe et du grand axe peuvent être calculées aisément comme la racine carrée des valeurs propres de la matrice de covariance $\mathbf{\Sigma}$.

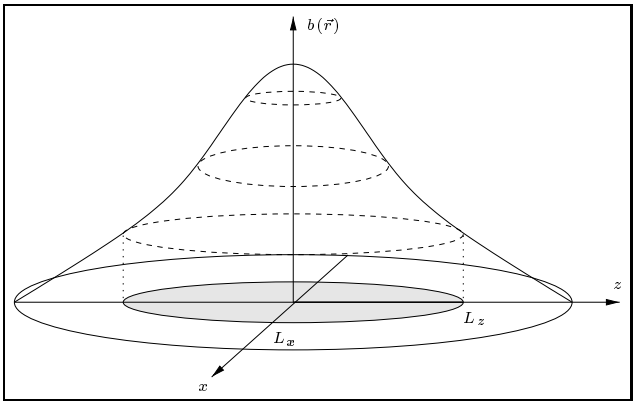


FIG. 4.13: Famille d'ellipses résultant de l'intersection du $b(\vec{r})$ avec des plans de probabilité constante

Dans la section 2.6 nous avons modélisé le processus de numérisation d'une pièce, ce qui nous a permis d'associer à chaque point acquis $\vec{r}$ une matrice de covariance $\mathbf{\Sigma}(\vec{r})$:

$$\mathbf{\Sigma}(\vec{r}) = \begin{pmatrix} \sigma_{xx}(\vec{r}) & \sigma_{xz}(\vec{r}) \\ \sigma_{zx}(\vec{r}) & \sigma_{zz}(\vec{r}) \end{pmatrix}. \tag{4.25}$$

La longueur des axes de l'ellipse de dispersion pour le point $\vec{r}$ peut alors être calculée :

$$L_x(\vec{r}) = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_{xx}(\vec{r}) + \sigma_{xz}(\vec{r}))},$$
$$L_z(\vec{r}) = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_{xz}(\vec{r}) + \sigma_{zz}(\vec{r}))}, \tag{4.26}$$

où $L_x(\vec{r})$ est la longueur du petit axe et $L_z(\vec{r})$ est la longueur du grand axe, car pour le point $\vec{r}$ nous avons observé dans la section 2.6 que $\sigma_{zz}(\vec{r}) > \sigma_{xx}(\vec{r})$.

Interprétation des résultats de l'inspection en considérant le bruit

Nous avons présenté à l'équation 2.17 la matrice de covariance $\mathbf{\Sigma}$ comme une fonction des paramètres du processus de numérisation tels que : l'angle d'incidence α dans la direction du balayage du rayon laser, l'angle d'incidence β dans la direction perpendiculaire au balayage du rayon laser et la distance d du capteur à la surface.

La forme de la variance au point $(\vec{r})$ étant elliptique, nous allons utiliser seulement le grand axe puisqu'il représente la dispersion la plus grande du point $(\vec{r})$. Pour calculer la longueur du grand axe $L_z(\vec{r})$ (équation 4.26), nous devons connaître $\sigma_{xz}(\vec{r})$ et $\sigma_{zz}(\vec{r})$ qui ont été modélisés dans la section 2.6.

Pour le capteur autosynchronisé, les variances sont :

$$\sigma_{xz}(\alpha) = 6.47 \times 10^{-7} \cdot e^{5.91 \times 10^{-2} \cdot |\alpha|},$$
$$\sigma_{xz}(\beta) = 8.30 \times 10^{-7} \cdot e^{4.40 \times 10^{-2} \cdot |\beta|}, \tag{4.27}$$
$$\sigma_{xz}(d) = 9.92 \times 10^{-11} \cdot d^2 - 3.82 \times 10^{-8} \cdot d + 4.34 \times 10^{-6},$$

pour $\sigma_{xz}(\vec{r}) = \sigma_{xz}(\alpha) + \sigma_{xz}(\beta) + \sigma_{xz}(d)$, et :

$$\sigma_{zz}(\alpha) = 3.77 \times 10^{-6} \cdot e^{6.01 \times 10^{-2} \cdot |\alpha|},$$
$$\sigma_{zz}(\beta) = 5.47 \times 10^{-6} \cdot e^{4.15 \times 10^{-2} \cdot |\beta|}, \tag{4.28}$$
$$\sigma_{zz}(d) = 8.86 \times 10^{-10} \cdot d^2 - 3.47 \times 10^{-7} \cdot d + 3.81 \times 10^{-5},$$

pour $\sigma_{zz}(\vec{r}) = \sigma_{zz}(\alpha) + \sigma_{zz}(\beta) + \sigma_{zz}(d)$. L'intervalle de variation alloué à chacun de ces trois paramètres est : $-35° \leq \alpha \leq 35°$, $-15° \leq \beta \leq 15°$ et $170mm \leq d \leq 240mm$.

Des équations 4.27 et 4.28, nous remarquons que la valeur de la longueur L_z change en fonction des paramètres α, β et d. La Figure 4.14 illustre la variation de la forme de l'ellipse de dispersion en fonction des paramètres d et α (le paramètre β est perpendiculaire à la feuille).

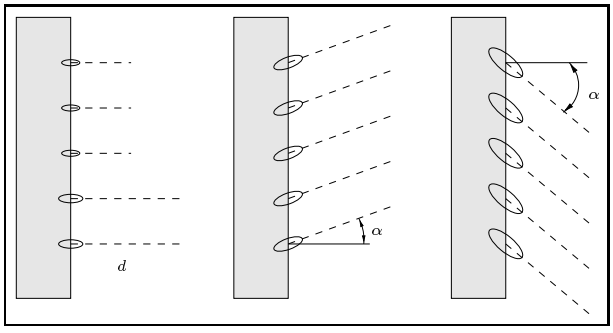


FIG. 4.14: Ellipses de dispersion fonction des paramètres α, β et d

La valeur minimum de L_z, notée par $L_{z\ min}$, est obtenue dans les meilleures conditions de numérisation donc pour $\alpha = 0°$, $\beta = 0°$ et $d = 170mm$. De façon similaire, la valeur maximum de L_z, notée par $L_{z\ ,max}$ est obtenue dans les conditions de numérisation les plus extrêmes, donc pour $|\alpha| = 35°$, $|\beta| = 15°$ et $d = 240mm$.

Pour le capteur autosynchronisé $L_{z\ min}$ et $L_{z\ max}$ ont été calculées en utilisant les équations 4.27 et 4.28. Celles-ci sont les suivantes :

$$L_{z\ min} = 2.84\mu m,$$
$$L_{z\ max} = 5.22\mu m. \tag{4.29}$$

Pour le capteur Biris $L_{z\ min}$ et $L_{z\ max}$ ont été calculées en utilisant le modèle du bruit propre au capteur Biris (voir la section 2.6). Celles-ci sont les suivantes :

$$L_{z\ min} = 117.35\mu m,$$
$$L_{z\ max} = 236.24\mu m. \tag{4.30}$$

L'orientation de cette ellipse de dispersion n'est pas en général la même que celle de la tolérance à contrôler. Cependant, nous considérons que L_z a toujours la même orientation que celle de la tolérance, ce qui correspond au cas le plus critique.

Pour une pièce numérisée dans les conditions optimales de α, β et d, la valeur minimale des tolérances spécifiées t_s qui peuvent être contrôlées sont définies par : $t_s \geq L_{z\ min}$. Autrement dit, une tolérance dont $t_s < L_{z\ min}$ ne peut pas être contrôlée en utilisant ce système d'inspection visuelle (L_z est la longueur du grand axe de l'ellipse de dispersion).

Lors de la numérisation d'une pièce, il est impossible d'acquérir tous les points dans les meilleures conditions. Le faisceau laser, par exemple, lors du balayage de la surface change l'angle d'incidence α qui n'est donc pas toujours optimal. Pour garantir les résultats de l'inspection, nous contrôlerons seulement les tolérances dont $t_s \geq L_{z\ max}$.

Nous définissons la valeur moyenne de dispersion d'un nuage de points comme :

$$\bar{L}_z = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} L_z(\vec{r}_i), \tag{4.31}$$

où n est le nombre total de points dans le nuage et $\vec{r}_i$ est un point du nuage.

Soit t_s une tolérance spécifiée et t_m la tolérance mesurée pour une pièce sous inspection. L'inspection visuelle déterministe dicte que la pièce est conforme à la spécification si $t_m \leq t_s$. Pour l'inspection visuelle non-déterministe par contre, le résultat de l'inspection doit tenir compte de la dispersion des points utilisés pour réaliser le contrôle. Nous illustrons dans la Figure 4.15 les régions possibles que peut prendre t_m par rapport à t_s.

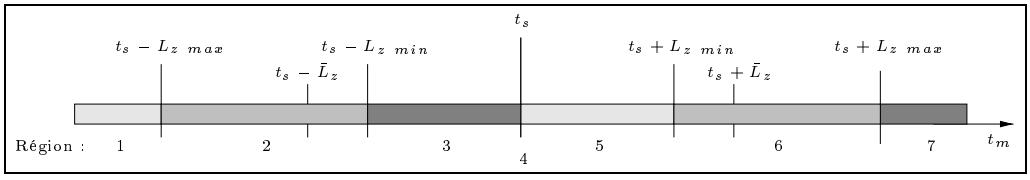


FIG. 4.15: Position de t_m par rapport à t_s

Nous allons par la suite quantifier le résultat du contrôle de tolérance par un facteur qualitatif de probabilité P_F. Cette mesure de probabilité définira la fiabilité de la réponse de conformité fournie par l'inspection visuelle.

Région 1 : $t_m < t_s - L_{z\ max}$.

La réponse de l'inspection est que la pièce est conforme à la spécification car $t_m < t_s$. Parce que la position de t_m est inférieure à t_s d'au moins $L_{z\ max}$ (dispersion dans les plus mauvaises conditions de numérisation), nous pondérons la réponse de l'inspection par une valeur *très fiable*, c'est-à-dire qu'il existe une grande probabilité que la réponse d'inspection soit correcte.

Région 2 : $t_s - L_{z\ max} \leq t_m < t_s - L_{z\ min}$.

La réponse de l'inspection est que la pièce est conforme à la spécification car $t_m < t_s$. Dans cette région, puisque la position de t_m est inférieure à t_s d'une valeur comprise dans l'intervalle $[L_{z\ max}, L_{z\ min}[$, la fiabilité de la réponse de l'inspection est alors fonction de la position de t_m par rapport à $\bar{L}_z$. Soit P_F la probabilité de fiabilité de la réponse de l'inspection définie par :

$$P_F = \begin{cases} 0.5 + 0.5\frac{t_m - \bar{L}_z}{L_{z\ max} - \bar{L}_z} & si \quad t_m \in [L_{z\ max}, \bar{L}_z[\\ 0.5 & si \quad t_m = \bar{L}_z \\ 0.5\frac{t_m - L_{z\ min}}{\bar{L}_z - L_{z\ min}} & si \quad t_m \in]\bar{L}_z, L_{z\ min}[\end{cases} \tag{4.32}$$

Alors : $P_F = 1$ définit une réponse *très fiable*. $P_F \in]1, 0.5[$ définit une réponse *plutôt fiable*. $P_F = 0.5$ définit une réponse *fiable*. $P_F \in]0.5, 0[$ définit une réponse *assez fiable*. $P_F = 0$ définit une réponse *non fiable*.

Région 3 : $t_s - L_{z\ min} \leq t_m < t_s$.

La réponse de l'inspection est que la pièce est conforme à la spécification car $t_m < t_s$. Parce que la position de t_m est inférieure à t_s d'au moins $L_{z\ min}$ (dispersion dans les meilleures conditions de numérisation), nous pondérons la réponse de l'inspection par la valeur *non fiable*, c'est-à-dire qu'il existe une grande probabilité que la réponse de l'inspection ne soit pas correcte.

Région 4 : $t_m = t_s$.

Le système ne donne pas de réponse car il existe la même probabilité que la pièce soit conforme ou non à ses spécifications. A ce point, la pièce peut être conforme ou non conforme aux spécifications, mais le système visuel d'inspection n'a pas la précision nécessaire pour contrôler cette tolérance, donc il donne une quantification *non mesurable*, ce qui veut dire qu'une autre méthode d'inspection devrait être utilisée.

Région 5 : $t_s < t_m \leq t_s + L_{z\ min}$.

La réponse de l'inspection est que la pièce n'est pas conforme à la spécification car $t_m > t_s$. La réponse de l'inspection est pondérée par une quantification *non fiable*, pour des raisons similaires à la région 3.

Région 6 : $t_s + L_{z\ min} < t_m \leq t_s + L_{z\ max}$.

La réponse de l'inspection est que la pièce n'est pas conforme à la spécification car $t_m > t_s$. Dans cette région la fiabilité de la réponse de l'inspection est quantifiée en fonction de la position de t_m par rapport à $\bar{L}_z$, comme pour la région 2.

Région 7 : $t_m > t_s + L_{z\ max}$.

La réponse de l'inspection est que la pièce n'est pas conforme à la spécification car $t_m > t_s$. Par des raisons similaires à la région 1, la réponse de l'inspection est pondérée par une quantification *très fiable*.

Dans le Tableau 4.1, nous résumons la quantification de la réponse d'inspection, en fonction des régions possibles de t_m par rapport à t_s.

Rég.	Position de t_m par rapport à t_s	Réponse d'inspection	Quantification
1	$t_m < t_s - L_{z\ max}$	Pièce conforme	Très fiable
2	$t_s - L_{z\ max} \leq t_m < t_s - L_{z\ min}$	Pièce conforme	Fonction de $\bar{L}_z$
3	$t_s - L_{z\ min} \leq t_m < t_s$	Pièce conforme	Non fiable
4	$t_m = t_s$	Pas de réponse	Non mesurable
5	$t_s < t_m \leq t_s + L_{z\ min}$	Pièce non conforme	Non fiable
6	$t_s + L_{z\ min} < t_m \leq t_s + L_{z\ max}$	Pièce non conforme	Fonction de $\bar{L}_z$
7	$t_m > t_s + L_{z\ max}$	Pièce non conforme	Très fiable

TAB. 4.1: Quantification de la réponse d'inspection non-déterministe

Les quantifications *assez fiable, Non fiable* et *non mesurable* indiquent que le système visuel d'inspection n'est pas suffisamment précis pour contrôler la tolérance spécifiée. Donc il faudrait : soit améliorer la précision des données 3D (réduire $\bar{L}_z$ autant que possible), soit utiliser une autre méthode d'inspection.

Les quantifications *fiable, plutôt fiable* et *très fiable* indiquent que le système visuel d'inspection est suffisamment précis pour contrôler la tolérance spécifiée.

Contrôle non-déterministe de tolérances

Par la suite nous définissons le contrôle des tolérances dimensionnelles, angulaires et géométriques de façon non-déterministe.

Tolérances dimensionnelles. Nous vérifions la conformité des tolérances dimensionnelles en utilisant les relations de l'équation 4.18.

Pour la première relation, nous définissons $t_s = d_s - \Delta d_s$, et $t_m = d_0 - 2(\sigma_1 + \sigma_2)$ et nous vérifions si $t_m \geq t_s$. Nous quantifions ce résultat par un facteur qualitatif de probabilité qui est obtenu en réalisant une analyse similaire (mais inverse) à celle pour $t_m \leq t_s$ (voir la Figure 4.15).

Pour la deuxième relation, nous définissons $t_m = d_0 + 2(\sigma_1 + \sigma_2)$ et $t_s = d_s + \Delta d_s$ et,

pour obtenir le facteur qualitatif de probabilité, nous vérifions $t_m \leq t_s$ similairement à l'analyse de la Figure 4.15.

La réponse finale est celle qui a le facteur qualitatif de probabilité le plus négatif.

Tolérances angulaires. La conformité des tolérances angulaires est vérifiée en utilisant les relations de l'équation 4.19. Pour la première relation, nous examinons $t_m \geq t_s$ avec $t_m = sin(\alpha_0 - (\alpha_1 + \alpha_2))$ et $t_s = sin(\alpha_s - \Delta\alpha_s)$. Pour la deuxième relation nous évaluons $t_m \leq t_s$ avec $t_m = sin(\alpha_0 + (\alpha_1 + \alpha_2))$ et $t_s = sin(\alpha_s + \Delta\alpha_s)$. La réponse finale, comme précédemment, est celle qui a le facteur qualitatif de probabilité le plus négatif.

Tolérances géométriques de forme. Pour les tolérances géométriques de forme, nous utilisons l'équation 4.20. Puisque cette tolérance définit une zone, nous multiplions, dans l'analyse de la Figure 4.15, les valeurs de $L_{z\ min}$, $\bar{L}_z$ et $t_s + L_{z\ max}$ par 2 pour ainsi considérer les deux côtés de la zone.

Tolérances géométriques d'orientation. Le contrôle de tolérances géométriques d'orientation est similaire à celui de tolérances géométriques de forme, mais en utilisant l'équation 4.21.

Tolérances géométriques de position. La vérification est similaire à celle des tolérances dimensionnelles. En utilisant l'équation 4.22, les relations suivantes sont examinées : $t_m \geq t_s$ avec $t_m = t_{1_m}$ et $t_s = t_{1_s}$, et $t_m \leq t_s$ avec $t_m = t_{2_m}$ et $t_s = t_{2_s}$.

Dans le chapitre 5, nous présenterons quelques résultats du contrôle des tolérances obtenus en utilisant les systèmes d'inspection visuelle déterministe et non-déterministe présentés dans ce chapitre.

4.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une méthodologie de contrôle de pièces manufacturées avec des formes simples ou complexes.

En premier lieu, le système effectue le recalage entre le nuage de points 3D (image d'un objet) et son modèle CAO au format NURBS. Puis une segmentation de ce nuage en surfaces disjointes est réalisée. Cette segmentation est composée de deux étapes : la première consiste à calculer la distance point 3D/surface NURBS, et la deuxième consiste â calculer pour chaque point 3D quelques propriétés géométriques et les comparer avec celles du point le plus proche sur le modèle CAO. La méthode de segmentation est indépendante de la géométrie de l'objet.

A partir de cette segmentation, nous réalisons le contrôle déterministe des tolérances dimensionnelles, angulaires et géométriques de forme, position et orientation.

En introduisant la dispersion des points mesurés, nous réalisons un contrôle de tolérances non-déterministe qui nous donne une quantification de la fiabilité de la réponse trouvée. La précision de l'inspection ne dépend que de la précision du capteur 3D qui numérise la pièce.

Lors de l'inspection non-déterministe, nous avons considéré la valeur moyenne de la dispersion des points 3D reliés (par la méthode de segmentation) à la surface sous contrôle. Une analyse pour vérifier la conformité d'une tolérance qui tient compte de la valeur de la dispersion de chaque point 3D de façon indépendante pourrait être réalisée, par exemple, en considérant la valeur de dispersion des points en tolérance et hors tolérance lors de l'analyse de conformité.

Chapitre 5

Résultats

5.1 Introduction

Nous avons présenté au chapitre 3 une stratégie d'acquisition pour la numérisation complète et précise d'une surface ou de toute une pièce. Celle-ci consiste à déterminer un ensemble de points de vue, sous contrainte, qui définissent la position et l'orientation exacte du capteur par rapport à la pièce.

Dans le chapitre 4 nous avons exposé une méthode d'inspection qui utilise le nuage de points issu de la numérisation d'une pièce et son modèle CAO. En utilisant le modèle du bruit des capteurs, obtenu dans le chapitre 2, nous introduisons une valeur de dispersion sur chacun des points 3D acquis selon la stratégie proposée. Cette valeur de dispersion est présentée comme un facteur de pondération dans les résultats de l'inspection.

Nous allons présenter dans ce chapitre les résultats expérimentaux de l'amélioration de la précision des données lorsque nous utilisons la stratégie d'acquisition et les résultats obtenus lors du contrôle des tolérances sur une pièce.

5.2 Numérisation des pièces 3D

Dans ce travail nous avons utilisé deux types de capteurs qui ont été développés au CNRC ; ceux-ci sont : le capteur Biris et le capteur autosynchronisé.

Le capteur autosynchronisé (voir la Figure 5.1[1]), qui est commercialisé par la société *Hymarc*, est monté sur une MMT. Il a été utilisé pour numériser les pièces : *un, deux, huit* et *complexe un* (voir l'annexe **??**) de deux façons différentes : pour une numérisation standard (expliquée ci-dessous) et pour une numérisation en utilisant la stratégie d'acquisition proposée dans ce travail.

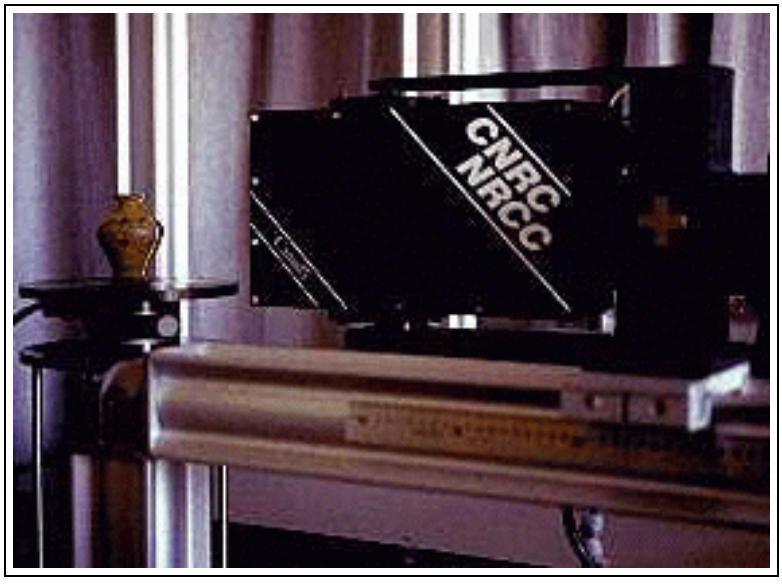


FIG. 5.1: Capteur autosynchronisé développé au CNRC

Le capteur Biris (voir la Figure 5.2[1]), qui est commercialisé par la société *Vitana Corporation*, est monté sur une structure mécanique à deux degrés de liberté. Il a été utilisé pour numériser quelques pièces uniquement pour une numérisation standard. Nous ne l'avons pas utilisé pour numériser les pièces avec la stratégie d'acquisition, car les limitations du support mécanique disponible au CNRC ne nous le permettent pas.

[1]Cette image a été prise de la page WEB du CNRC : *http ://www.vit.iit.nrc.ca/*

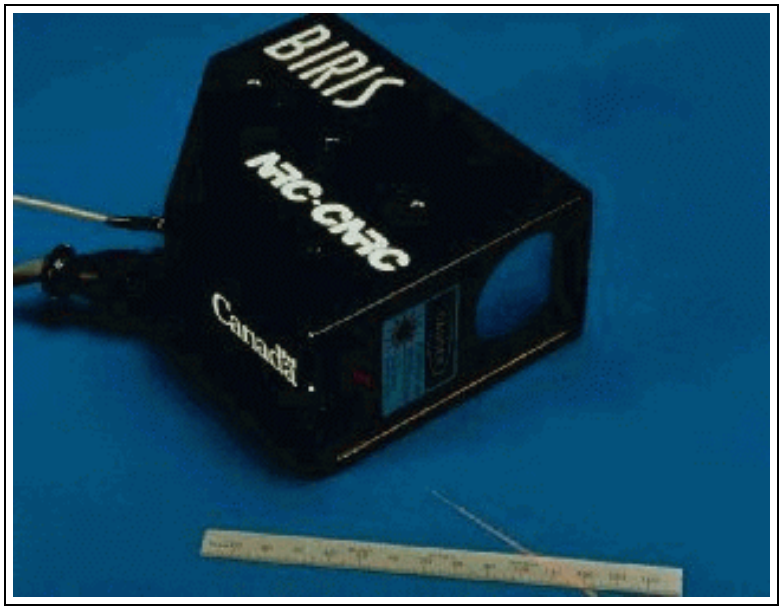


FIG. 5.2: Capteur Biris développé au CNRC

5.2.1 Processus de numérisation standard

La numérisation standard d'une pièce avec un capteur de profondeur est un processus dans lequel la pièce est balayée par le faisceau laser du capteur à partir de quelques orientations prédéfinies, mais qui ne sont pas optimisées par rapport à l'orientation de la surface.

Pour la numérisation de chacune des pièces *un, deux, huit* et *complexe un*, nous avons réalisé 4 balayages à partir de 4 positions différentes du capteur, comme nous l'illustrons dans la Figure 5.3. Lors de cette numérisation, la caméra a toujours une inclinaison de 45° et la direction du mouvement de la caméra à partir des positions P_1, P_2, P_3 et P_4 est perpendiculaire à la feuille. Nous illustrons sur la Figure 5.3 la région de la pièce qui a été numérisée lors de mouvement du capteur.

Les nuages de points 3D obtenus après cette numérisation sont présentés dans les Figures : 5.4(a), 5.4(b), 5.4(c) et 5.4(d). Nous avons évalué l'exactitude de ces mesures de profondeur en calculant la moyenne de la distance entre chaque point mesuré et le point le plus proche sur la surface NURBS (modèle CAO). Les résultats

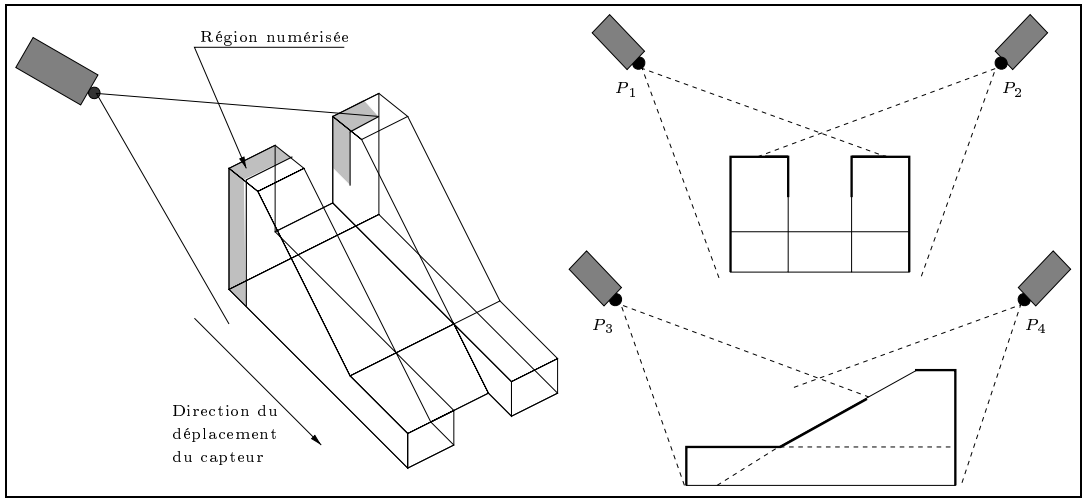


FIG. 5.3: Processus de numérisation standard d'une pièce

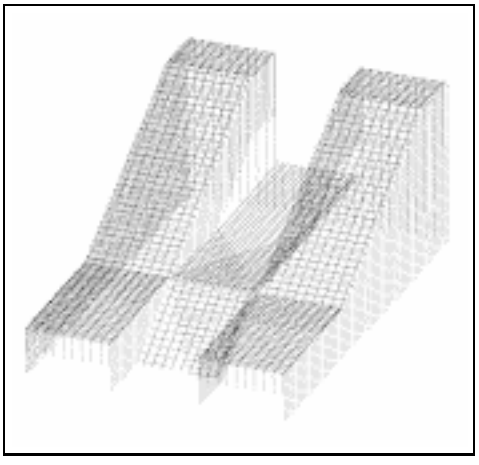
sont les suivants :

- pour la pièce *un* la distance moyenne est de $73\mu m$,
- pour la pièce *deux* la distance moyenne est de $106\mu m$,
- pour la pièce *huit* la distance moyenne est de $99\mu m$,
- pour la pièce *complexe un* la distance moyenne est de $153\mu m$.

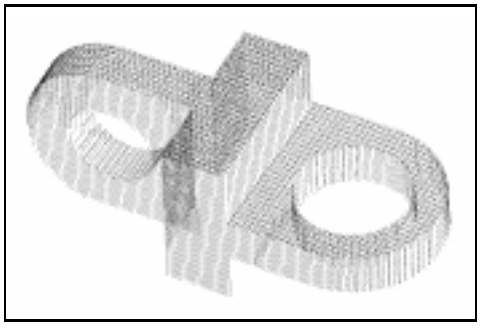
La durée de la numérisation d'une pièce est en général fonction du nombre de balayages. Soit t_b le temps nécessaire pour placer le capteur dans la position et l'orientation souhaitée et pour réaliser le balayage. Par conséquent la numérisation standard est un processus qui requiert un temps de $4t_b$. Généralement t_b est de l'ordre d'une minute.

5.2.2 Données 3D en utilisant une stratégie d'acquisition

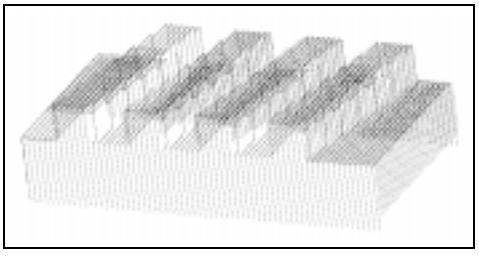
Dans le chapitre 3, nous avons décrit la stratégie de recherche automatique du meilleur emplacement du capteur de profondeur, nécessaire à l'obtention d'une acquisition complète et précise de la géométrie d'une surface ou d'une pièce. Dans cette section, nous présentons des résultats de la stratégie d'acquisition pour la



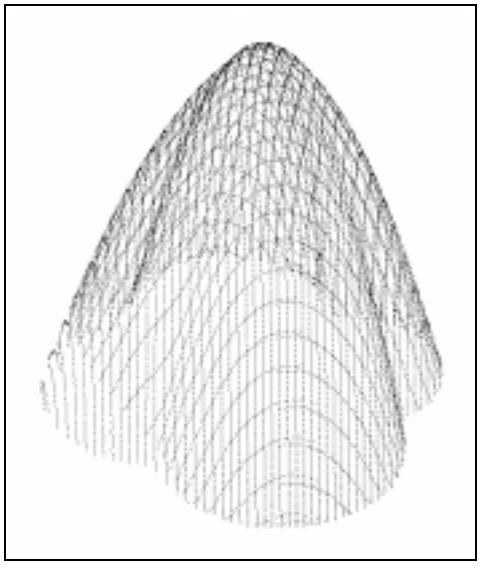
(a) Nuage de points de la pièce un



(b) Nuage de points de la pièce deux



(c) Nuage de points de la pièce huit



(d) Nuage de points de la pièce complexe un

FIG. 5.4: Nuages de points obtenus par la numérisation standard

numérisation complète des pièces : *un, deux, huit* et *complexe un*. Nous rappelons que la numérisation a été réalisée en utilisant le capteur de profondeur autosynchronisé monté sur une MMT.

Nous illustrons dans les Figures : 5.5(a), 5.5(c), 5.6(a) et 5.6(c) le plan de numérisation issu de la stratégie d'acquisition. Sur ces figures, chaque ligne représente la projection du rayon laser à partir du point de vue du capteur jusqu'au point où le faisceau laser intersecte la surface en suivant la direction de l'axe optique.

Nous présentons dans les Figures : 5.5(b), 5.5(d), 5.6(b) et 5.6(d), les nuages de points 3D obtenus après cette numérisation. Comme pour les données 3D obtenues par numérisation standard, nous avons évalué l'exactitude de ces images en calculant la moyenne de la distance entre chaque point du nuage et le point le plus proche sur la surface NURBS. Les résultats obtenus sont :

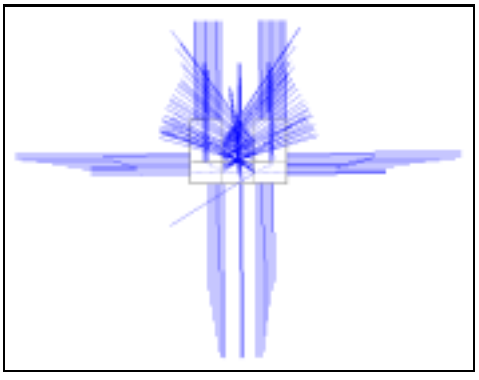
- pour la pièce *un* la distance moyenne est de $48\mu m$,
- pour la pièce *deux* la distance moyenne est de $92\mu m$,
- pour la pièce *huit* la distance moyenne est de $66\mu m$,
- pour la pièce *complexe un* la distance moyenne est de $100\mu m$.

Nous remarquons que l'exactitude des données 3D a été améliorée par rapport à celle obtenue avec la numérisation standard. Nous présenterons cette amélioration dans la section 5.2.3.

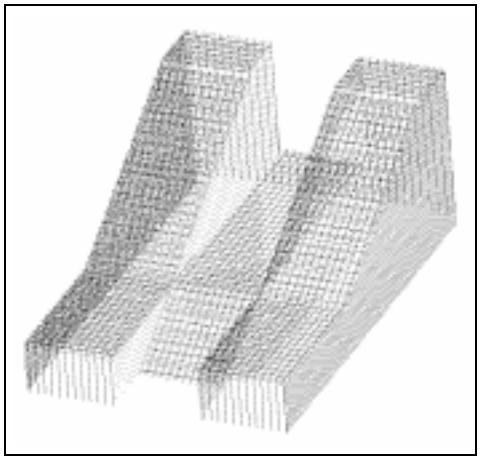
La durée de la numérisation d'une pièce utilisant la stratégie d'acquisition peut être définie comme étant égale à $n_s t_b$, n_s étant le nombre de surfaces à numériser (nombre de surfaces de la pièce) et t_b le temps nécessaire pour placer le capteur dans la position et l'orientation souhaitées et réaliser le balayage.

5.2.3 Apport de la stratégie

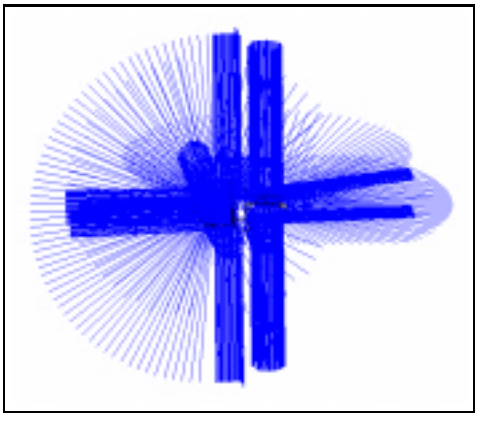
Nous résumons dans le Tableau 5.1 les résultats de la mesure de la distance moyenne entre chaque point du nuage et le point le plus proche sur la surface



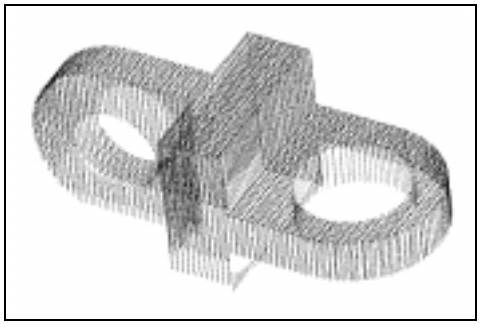
(a) Pièce un : stratégie d'acquisition



(b) Pièce un : nuage de points

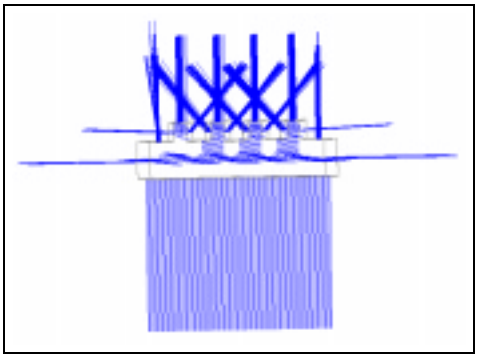


(c) Pièce deux : stratégie d'acquisition

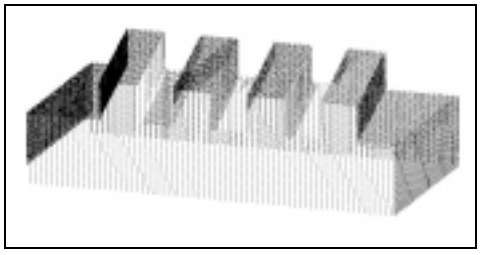


(d) Pièce deux : nuage de points

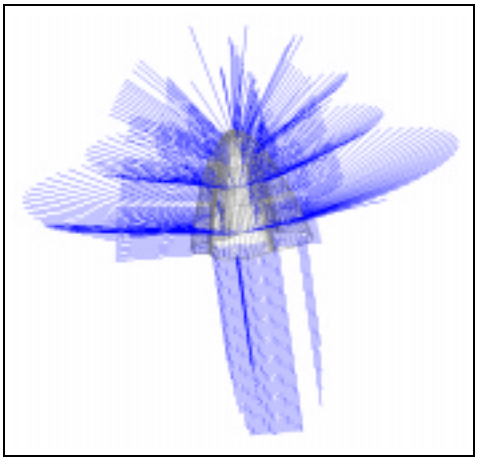
FIG. 5.5: Stratégie de numérisation et nuage de points pour les pièces un et deux



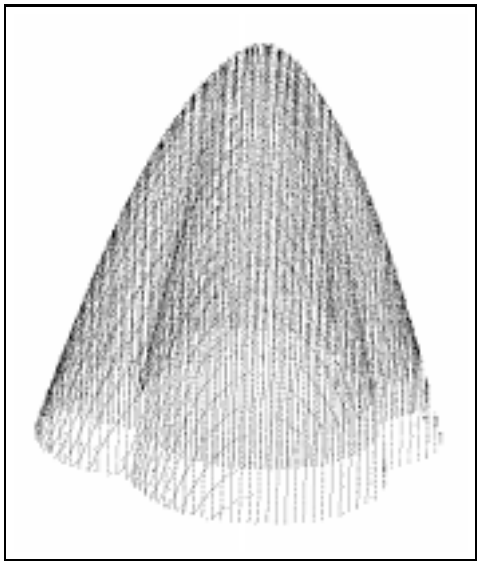
(a) Pièce huit : stratégie d'acquisition



(b) Pièce huit : nuage de points



(c) Pièce complexe un : stratégie d'acquisition



(d) Pièce complexe un : nuage de points

FIG. 5.6: Stratégie de numérisation et nuage de points pour les pièces huit et complexe un

NURBS. La moyenne de la distance pour la numérisation standard est présentée dans la colonne *Dist Num Stand* et la distance pour la numérisation utilisant la stratégie d'acquisition est présentée dans la colonne *Dist Num Strat*. Nous présentons dans la dernière colonne l'amélioration obtenue quand la stratégie est utilisée. Pour calculer le pourcentage de l'amélioration nous avons utilisé la relation suivante :

$$\%\, Amélioration = \frac{DistNumStand - DistNumStrat}{DistNumStand} \times 100. \qquad (5.1)$$

Pièce	Dist Num Stand	Dist Num Strat	Amélioration
Pièce un	$73\mu m$	$48\mu m$	$25\mu m$ (34%)
Pièce deux	$106\mu m$	$92\mu m$	$14\mu m$ (13%)
Pièce huit	$99\mu m$	$66\mu m$	$33\mu m$ (33%)
Pièce complexe	$153\mu m$	$100\mu m$	$53\mu m$ (35%)

TAB. 5.1: Mesure de la distance entre chaque point 3D et le point le plus proche sur la surface NURBS

La plus petite distance moyenne obtenue est celle de la pièce *un* suivie de celle de la pièce *huit*, qui sont deux pièces composées seulement par des surfaces planes. Pour ces deux pièces nous obtenons une amélioration d'environ 33%. Pour la pièce *complexe un* l'amélioration obtenue est de 35% mais la distance moyenne est de $100\mu m$: elle représente la distance la plus grande. Ce résultat est dû au fait que cette pièce est composée de surfaces avec des courbes complexes, et donc l'angle d'incidence du faisceau laser est éloigné de l'angle d'incidence optimal. Finalement, pour la pièce *deux* l'amélioration est seulement de 13% avec une distance moyenne de $92\mu m$. Ceci est dû à la forme de la pièce qui, en plus d'être composée de quelques surfaces courbes, a des problèmes d'occlusion, et c'est pourquoi la numérisation se fait dans des conditions non-optimales.

5.2.4 Discussion

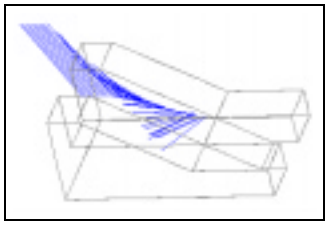
Lors de la numérisation d'une surface, il est inévitable que l'on acquiert des points appartenant aux autres surfaces. Ces points, provenant de surfaces différentes de celle visée en général, sont pris dans des conditions de précision non-optimales et par conséquent ils introduisent une grande quantité d'erreur de mesure. Un des avantages de l'utilisation de la stratégie de numérisation est qu'à partir de la connaissance des conditions de numérisation, nous pouvons sélectionner les points 3D qui appartiennent à la surface, et ainsi avoir un nuage de points sans superposition et dans de meilleures conditions de précision. Dans la Figure 5.7 nous illustrons : le plan de numérisation d'une surface (Figures 5.7(a) et 5.7(d)), la numérisation avec des points qui appartiennent aux autres surfaces (Figures 5.7(b) et 5.7(e)) et la sélection des points appartenant à la surface visée (Figures 5.7(c) et 5.7(d)).

Nous avons présenté dans la section 2.5 le problème de la numérisation sur les discontinuités des surfaces (par exemple les bords). Bien que nous ne résolvions pas ce problème, la stratégie de numérisation nous aide à identifier ces points, et donc, à ne pas en tenir compte lors de l'analyse des données.

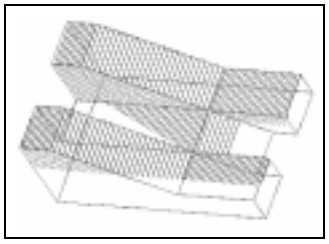
Le temps de numérisation d'une pièce complète, en utilisant la stratégie de numérisation, est en général plus long que pour la numérisation standard. Néanmoins, dans les tâches d'inspection, nous nous intéressons seulement au contrôle des tolérances de quelques surfaces, et par conséquent, ce temps de numérisation peut être réduit en ne numérisant que les surfaces d'intérêt.

En ce qui concerne le temps de génération de la stratégie, et bien que certaines routines de l'algorithme soient coûteuses en temps, celle-ci est réalisée hors ligne et donc, ne dégrade pas les temps d'acquisition.

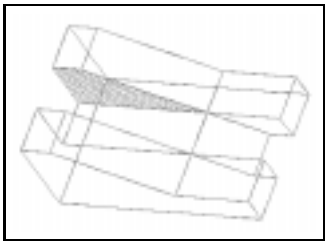
La précision du positionnement du capteur par rapport à la pièce (ou surface) est un facteur déterminant pour l'obtention de nuages de points très précis. La relation entre le référentiel de la pièce et celui de la caméra est obtenue soit par la connaissance *a priori* de la position initiale de la pièce, soit par un procédé de



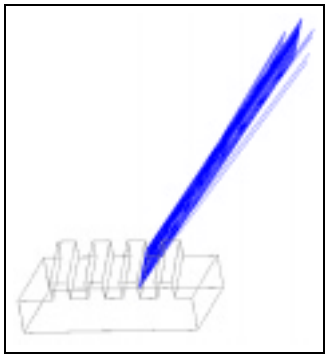
(a) Plan d'acquisition pour une surface de la pièce un



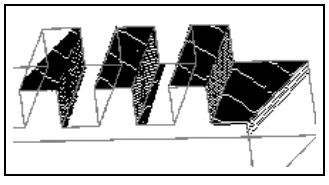
(b) Nuage de points acquis



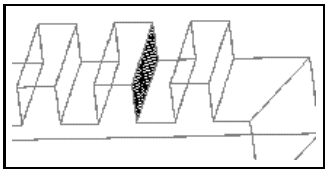
(c) Nuage de points sans problème de superposition



(d) Plan d'acquisition pour une surface de la pièce huit



(e) Nuage de points acquis



(f) Nuage de points sans problème de superposition

FIG. 5.7: Numérisation des surfaces sans superposition des données

recalage. Dans cette optique, une vérification en ligne (lors de la numérisation) de la position de la caméra s'avère très utile. Une telle vérification pourrait être réalisée en utilisant les points déjà acquis pour calculer des paramètres comme la normale à la surface, et ainsi vérifier ou redéfinir l'emplacement du capteur.

5.3 Inspection de tolérances

5.3.1 Inspection supervisée

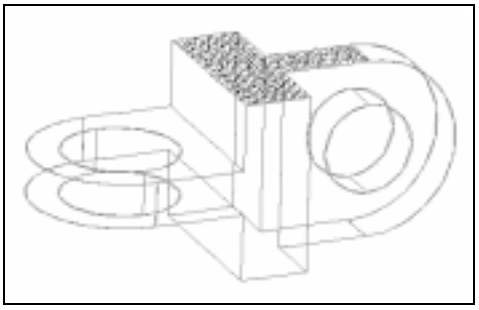
Après la numérisation d'une pièce, le nuage de points résultant est recalé avec son modèle CAO puis segmenté selon ses différentes surfaces. Ces sous-ensembles de points 3D sont donc utilisés pour le contrôle des tolérances de la pièce.

Pour une visualisation rapide des divers défauts dans la pièce, nous avons developpé un interface graphique, présenté à la section 4.5.1. Après le procédé de segmentation, on choisit la surface d'intérêt en indiquant son étiquette.

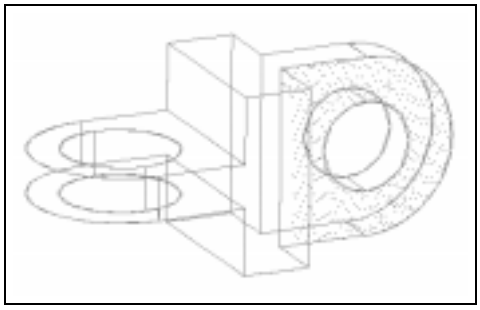
Nous présentons quelques résultats obtenus avec l'interface graphique dans la Figure 5.8. La Figure 5.8(a) illustre le résultat obtenu quand l'option *Intervalle de tolérance* est choisie. Les valeurs de tolérance peuvent être modifiées et le système affiche les points dans le nouvel intervalle de tolérance avec une couleur différente par rapport à ceux situés hors de l'intervalle. Dans l'exemple dans la Figure 5.8(a), l'intervalle de tolérance est $(-0.6214mm, 0.4128mm)$.

Choisissant l'option *valeur du seuil*, nous pouvons indiquer une valeur de seuil et le système affiche les points ayant une distance supérieure au seuil avec une couleur différente de ceux situés en dessous. Par exemple, dans la figure 5.8(b) le seuil est $0.3mm$. Cette option est très utile pour l'identification de zones où il y a trop de matière ou pas assez.

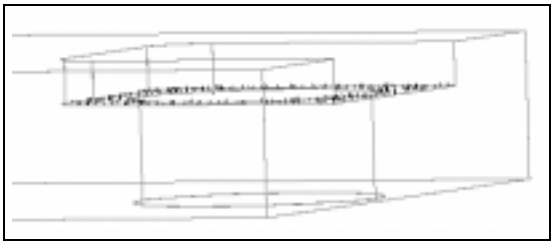
Les résultats des options précédentes peuvent être affichés comme des segments linéaires entre chaque point 3D et leur point le plus proche sur la surface, lorsque l'option *Affichage des segments de droite* est sélectionnée. En utilisant cette option nous pouvons mieux visualiser certains défauts sur la pièce, comme ceux illustrés sur les Figures 5.8(c) et 5.8(d).



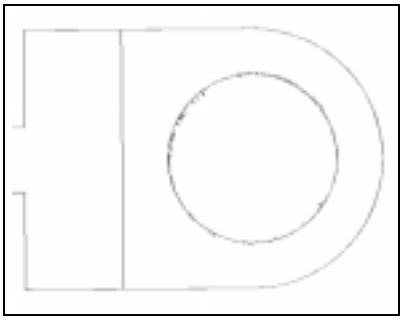
(a) Sélection de l'option : intervalle de tolérance



(b) Sélection de l'option : valeur du seuil



(c) Sélection de l'option : affichage des segments de droite



(d) Sélection de l'option : affichage des segments de droite

FIG. 5.8: Visualisation rapide des défauts en utilisant l'interface graphique

5.3.2 Inspection déterministe

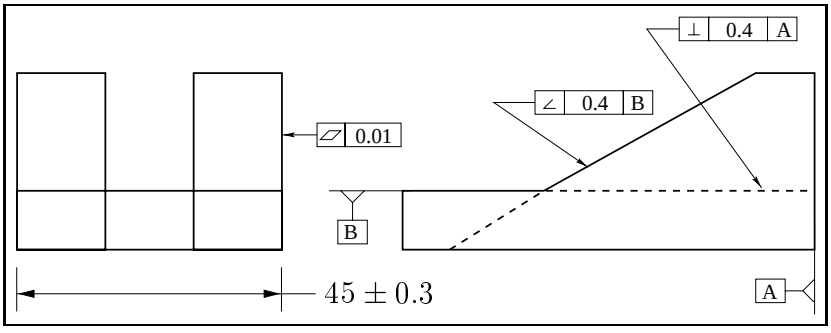
Nous présentons ici les résultats du contrôle déterministe de tolérances. Les tolérances spécifiées que nous allons contrôler sont illustrées dans la Figure 5.9(a) pour la pièce *un* et dans la Figure 5.10(a) pour la pièce *deux*. Celles-ci sont les suivantes :

- Tolérance dimensionnelle entre deux surfaces parallèles dont la spécification est de $45 \pm 0.3\ mm$.
- Tolérance de planéité sur une surface de la pièce *un* dont la spécification est de $0.01\ mm$.
- Tolérance de perpendicularité sur une surface par rapport à la surface de référence A dont la valeur spécifiée est de $0.4\ mm$.
- Tolérance d'inclinaison sur une surface reliée à la surface de référence B dont la valeur spécifiée est de $0.4\ mm$.
- Tolérance de forme quelconque sur une surface de la pièce *deux* dont la spécification est de $0.04\ mm$.

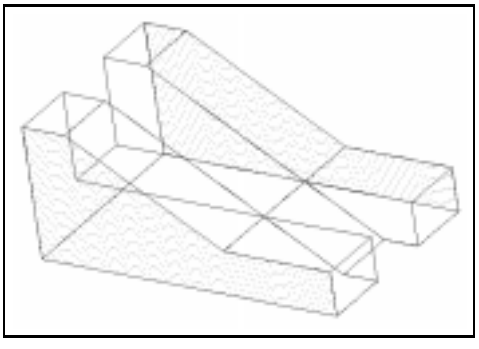
Pour l'inspection de ces tolérances, les pièces ont été numérisées avec le capteur Biris par la méthode de numérisation standard, et avec le capteur autosynchronisé par les deux méthodes (numérisation standard et numérisation utilisant la stratégie d'acquisition).

Les nuages de points 3D utilisés pour l'inspection de chacune des tolérances sont présentés dans les Figures 5.9 et 5.10. Pour la tolérance dimensionnelle le nuage de points est présenté dans la Figure 5.9(b), pour la planéité il est présenté dans la Figure 5.9(c), pour la perpendicularité dans la Figure 5.9(d), pour l'inclinaison dans la Figure 5.9(e) et pour la tolérance de forme quelconque le nuage de points est présenté dans la Figure 5.10(b).

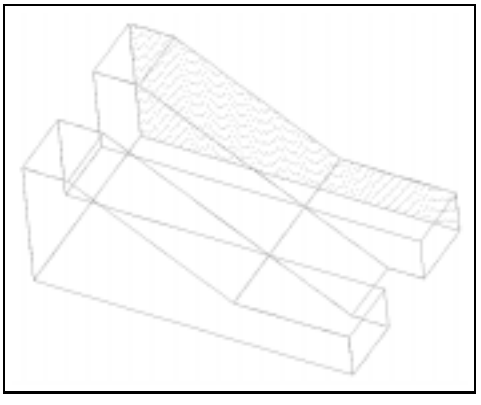
Le contrôle des tolérances à été réalisé comme présenté à la section 4.4.



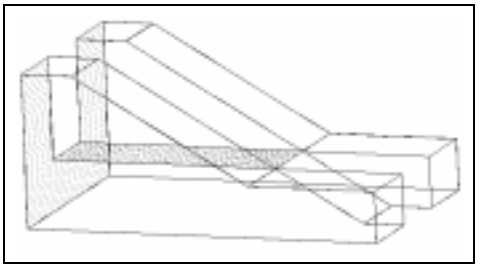
(a) Spécification des tolérances dimensionnelles et géométriques sur la pièce un



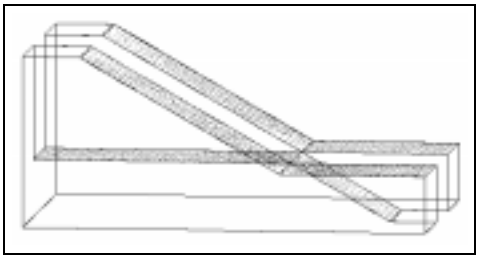
(b) Sous-ensembles de points 3D pour contrôler la tolérance dimensionnelle



(c) Sous-ensemble de points 3D pour contrôler la tolérance géométrique de planéité

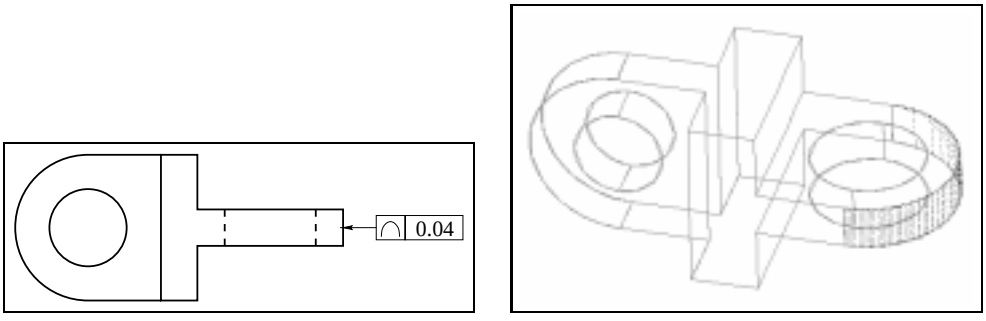


(d) Sous-ensembles de points 3D pour contrôler la tolérance géométrique de perpendicularité



(e) Sous-ensembles de points 3D pour contrôler la tolérance géométrique d'inclinaison

FIG. 5.9: Spécification des tolérances sur la pièce un et sous-ensembles de points 3D utilisés pour leur contrôle



(a) Spécification de la tolérance géométrique de forme quelconque

(b) Sous ensemble de points 3D pour contrôler la tolérance géométrique de forme quelconque

FIG. 5.10: Spécification des tolérances géométriques sur la pièce deux et sous ensemble de points 3D utilisés pour leur contrôle

Données provenant de la MMT

Afin de connaître les déviations exactes des caractéristiques géométriques que nous allons inspecter, nous avons réalisé le contrôle de celles-ci en utilisant une machine à mesurer tridimensionnelle de marque *Mitutoyo* qui a une précision de $5\mu m$. Nous présentons les résultats dans le Tableau 5.2. Dans le tableau, nous présentons la tolérance sous contrôle, la valeur de tolérance spécifiée (t_s), la valeur de tolérance mesurée (t_m), le nombre de points ou mesures utilisés pour le contrôle (*Nb. pts*) et le résultat de l'inspection.

Les résultats montrent que sauf la tolérance géométrique de planéité, toutes les tolérances contrôlées sont conformes à leurs spécifications. La colonne de *Tolérance mesurée* montre que les valeurs de tolérance mesurées sont comprises entre $1\mu m$ et $39\mu m$ avec une valeur moyenne de $18\mu m$.

Tolérance	Val spécifiée	Tolérance mesurée	Nb pts	Résultat
Dimensionnelle	$45 \pm 0.3\ mm$	$45.016 \pm 0.001\ mm$	25	Conforme
Planéité	$10\mu m$	$10.8\mu m$	20	Non-conforme
Perpendicularité	$400\mu m$	$39\mu m$	29	Conforme
Inclinaison	$400\mu m$	$26\mu m$	32	Conforme
Forme quelconque	$40\mu m$	$10.3\mu m$	16	Conforme

TAB. 5.2: Contrôle de tolérances en utilisant la MMT

Données provenant du capteur Biris

Nous illustrons au Tableau 5.3 les résultats du contrôle en utilisant le nuage de points 3D issu du processus de numérisation standard avec le capteur Biris.

Les résultats montrent que la tolérance dimensionnelle et les tolérances de perpendicularité et d'inclinaison sont conformes à la valeur spécifiée, tandis que les tolérances de planéité et de forme quelconque ne sont pas conformes à leurs spécifications.

D'après la valeur de tolérance spécifiée, nous constatons que les tolérances trouvées conformes sont celles qui ont une spécification supérieure ou égale à $300\mu m$. La colonne de *Tolérance mesurée* montre que les valeurs de tolérance mesurées sont comprises entre $146\mu m$ et $299\mu m$ avec une valeur moyenne de $216\mu m$. Pour cet ensemble de tolérances, la valeur moyenne obtenue avec la MMT est de $18\mu m$. Par conséquent, une estimation de la grandeur des tolérances que l'on peut contrôler avec le capteur Biris est celle de toutes les tolérances dont les spécifications sont supérieures ou égales à $200\mu m$.

Tolérance	Val spécifiée	Tolérance mesurée	Nb pts	Résultat
Dimensionnelle	$45 \pm 0.3\ mm$	$45.006 \pm 0.140\ mm$	1774	Conforme
Planéité	$10\mu m$	$146\mu m$	888	Non-conforme
Perpendicularité	$400\mu m$	$267\mu m$	1680	Conforme
Inclinaison	$400\mu m$	$299\mu m$	2625	Conforme
Forme quelconque	$40\mu m$	$230\mu m$	146	Non-conforme

TAB. 5.3: Contrôle déterministe de tolérances en utilisant le nuage de points issu du processus de numérisation standard avec le capteur Biris

Données provenant de la numérisation standard avec le capteur autosynchronisé

Les résultats du contrôle de tolérances en utilisant le nuage de points 3D issu du processus de numérisation standard avec le capteur autosynchronisé sont rassemblés au Tableau 5.4. Quant au contrôle des tolérances, nous obtenons des résultats similaires à ceux obtenus pour la numérisation avec le capteur Biris. Par contre, la colonne des valeurs de tolérances mesurées montre que ces valeurs sont comprises entre $41\mu m$ et $174\mu m$ avec une valeur moyenne de $92\mu m$. Lors d'une numérisation standard avec le capteur autosynchronisé nous estimons donc que des tolérances dont les spécifications sont supérieures ou égales à $75\mu m$ peuvent être contrôlées.

Données provenant de la numérisation avec la stratégie et le capteur auto-synchronisé

Le Tableau 5.5 rassemble les résultats du contrôle de tolérances en utilisant le nuage de points issu du processus de numérisation avec la stratégie d'acquisition pour le système A, donc le capteur autosynchronisé monté sur la MMT. Les résultats de l'inspection de tolérances obtenus sont identiques aux cas précédents, mais les valeurs de tolérances mesurées sont plus petites. Ces tolérances sont comprises entre $13\mu m$

Tolérance	Val spécifiée	Tolérance mesurée	Nb pts	Résultat
Dimensionnelle	$45 \pm 0.3\ mm$	$44.993 \pm 0.038\ mm$	2321	Conforme
Planéité	$10\mu m$	$72\mu m$	1467	Non-conforme
Perpendicularité	$400\mu m$	$134\mu m$	2166	Conforme
Inclinaison	$400\mu m$	$41\mu m$	1745	Conforme
Forme quelconque	$40\mu m$	$174\mu m$	638	Non-conforme

TAB. 5.4: Contrôle déterministe de tolérances en utilisant le nuage de points issu du processus de numérisation standard avec le capteur autosynchronisé

et $180\mu m$ avec une valeur moyenne de $66\mu m$. La numérisation de pièces en utilisant la stratégie d'acquisition pour le système A nous permettra donc de contrôler les tolérances dont les spécifications sont plus grandes ou égales à $50\mu m$.

Tolérance	Val spécifiée	Tolérance mesurée	Nb pts	Résultat
Dimensionnelle	$45 \pm 0.3\ mm$	$44.999 \pm 0.012\ mm$	2043	Conforme
Planéité	$10\mu m$	$13\mu m$	1215	Non-conforme
Perpendicularité	$400\mu m$	$93\mu m$	2768	Conforme
Inclinaison	$400\mu m$	$34\mu m$	1912	Conforme
Forme quelconque	$40\mu m$	$180\mu m$	734	Non-conforme

TAB. 5.5: Contrôle déterministe de tolérances en utilisant le nuage de points issu du processus de numérisation avec la stratégie d'acquisition (capteur auto-synchronisé)

5.3.3 Inspection non-déterministe

Grâce à la connaissance des conditions de numérisation, lorsque nous utilisons la stratégie d'acquisition, nous pouvons réaliser le contrôle non-déterministe de tolérances comme présenté à la section 4.5.2.

Le Tableau 5.6 contient les valeurs moyennes de la dispersion $\bar{L}_z$ des nuages de

points 3D, associées à chaque surface d'intérêt. La surface 1 est celle où une tolérance de planéité à été définie (voir la Figure 5.9(a)), la surface 2 est la surface parallèle à la surface 1 (Figure 5.9(b)), la surface 3 est la surface de référence A, la surface 4 est la surface de référence B, la surface 5 est la surface inclinée et la surface 6 est la surface où une tolérance de forme quelconque a été définie (Figure 5.10).

Les valeurs de $\bar{L}_z$ ont été calculées en utilisant l'équation 4.31. Nous remarquons que pour les cinq premières surfaces, ces valeurs sont proches de la valeur de dispersion minimale $L_{z\ min} = 2.84\mu m$ (voir l'équation 4.29) et que pour la surface 6 cette valeur est proche de la valeur de dispersion maximale $L_{z\ max} = 5.22\mu m$. Ces résultats sont dus aux conditions de numérisation.

Surface	Dispersion moyenne ($\bar{L}_z$)
Surface 1	$2.96\mu m$
Surface 2	$2.95\mu m$
Surface 3	$2.97\mu m$
Surface 4	$2.89\mu m$
Surface 5	$2.90\mu m$
Surface 6	$5.08\mu m$

TAB. 5.6: Valeur de la dispersion pour le sous ensemble de points lié à chaque surface

En utilisant les valeurs de dispersion des surfaces du tableau 5.6, nous avons réalisé le contrôle non-déterministe de tolérances dont les résultats sont présentés au Tableau 5.7.

La tolérance dimensionnelle ainsi que les tolérances géométriques de perpendicularité et d'inclinaison ont été trouvées conforme aux spécifications, avec l'évaluation d'une réponse correcte *très fiable*. La tolérance géométrique de planéité a été trouvée non-conforme à la spécification, avec une évaluation d'obtenir une réponse correcte *non fiable*. La quantification *non fiable* est due à la petite valeur de la spécification ($10\mu m$), et par conséquent une autre méthode de contrôle de

tolérances devrait être utilisée. Enfin, la tolérance géométrique de forme quelconque a été trouvée non-conforme à la spécification, avec une évaluation d'obtenir une réponse correcte *très fiable*.

Tolérance	Résultat	Quantification
Dimensionnelle	Conforme	Très fiable
Planéité	Non-conforme	Non fiable
Perpendicularité	Conforme	Très fiable
Inclinaison	Conforme	Très fiable
Forme quelconque	Non-conforme	Très fiable

TAB. 5.7: Contrôle non-déterministe de tolérances

5.3.4 Discussion

Le Tableau 5.8 regroupe les grandeurs des tolérances qui peuvent être contrôlées pour les trois types de nuage de points utilisés dans l'analyse précédente. Nous concluons que la capacité à contrôler des tolérances plus fines ne dépend pas exclusivement du type du capteur utilisé, mais aussi de la façon dont la numérisation de la pièce a été réalisée. Le choix du type de nuage de points 3D à utiliser dépend des valeurs des tolérances que nous souhaitons contrôler.

Le nuage de points obtenu avec la stratégie de numérisation pour le capteur autosynchronisé monté sur la MMT possède l'avantage supplémentaire, en plus de permettre le contrôle de tolérances plus fines, de pondérer le résultat par un facteur de fiabilité de la réponse. Celui-ci aidera l'inspecteur humain à accepter ou rejeter une pièce, ou à la faire mesurer par une autre méthode plus précise.

Nous remarquons dans le Tableau 5.6 que la dispersion obtenue pour la surface 6 est la plus élevée, bien que la surface ne présente pas de problème d'occlusion. Ce

Capteur	Type de numérisation	Grandeur de la spécification
Biris	Standard	$200\mu m$
Autosynchronisé	Standard	$75\mu m$
Autosynchronisé	Stratégie d'acquisition	$50\mu m$

TAB. 5.8: Grandeur des tolérances qui peuvent être contrôlées

résultat est dû au fait que la stratégie proposée (voir la Figure 5.11) n'a pas été complètement utilisée lors de la numérisation. En effet, du fait de la complexité du placement du capteur dans tous les points de vue, seuls quelques uns ont été utilisés ; il s'ensuit que certains points acquis ne respectent pas les meilleures conditions de numérisation, ils ont donc été numérisés avec une plus grande erreur. Si l'on voulait effectuer la numérisation pour tous ces points de vue il serait nécessaire d'automatiser cette phase, c'est-à-dire que le logiciel de calcul de trajectoire puisse piloter directement la MMT.

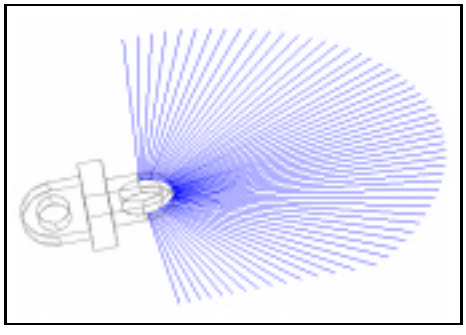


FIG. 5.11: Stratégie d'acquisition pour le contrôle de la tolérance de forme quelconque

Nous avons présenté dans la colonne *Nb. pts* des tableaux de contrôle de tolérances le nombre de points 3D ou mesures utilisés pour chaque contrôle. En général ce nombre est supérieur à 1000 points par surface, distribués uniformément sur

toute la surface. Cette caractéristique de la méthode d'inspection visuelle est très intéressante. Car avec un capteur à contact monté sur une MMT, il est impossible au point de vue pratique d'acquérir autant de points car cela nécessiterait plusieurs heures de travail par surface.

5.4 Conclusion

Les résultats présentés dans ce chapitre, montrent que la précision des données 3D obtenues avec des capteurs de profondeur peut être améliorée par l'utilisation d'une stratégie d'acquisition. Ces données 3D à haute précision sont particulièrement intéressantes pour le contrôle de tolérances très fines.

Lors de l'inspection, la stratégie nous a permis d'introduire une pondération de la fiabilité du résultat, et de réaliser ainsi une inspection non-déterministe. Cette pondération constitue un critère d'aide à la décision d'acceptation ou de rejet de la pièce sous contrôle.

Conclusion

Remarques

Ce travail est une première approche, vue pour un automaticien, de la Métrologie Assistée par Ordinateur ; notre conclusion est qu'à l'heure actuelle la seule limitation à ce problème de contrôle, tel que nous l'avons résolu, est surtout un problème de capteurs. Si l'on peut trouver un capteur très précis (même précision que celle obtenue avec une MMT, soit le μm), sans contact et permettant des vitesses d'acquisition de l'ordre de 20000 *points par seconde*, alors il sera possible de faire prendre des décisions sur la conformité d'une pièce par un ordinateur.

Afin d'effectuer le contrôle de tolérances dimensionnelles et géométriques, il a été nécessaire de développer un outil de segmentation du nuage des points en surfaces, qui nous permettront de vérifier ces tolérances. Initialement, le nuage de points 3D est recalé avec le modèle CAO de la pièce. La méthode de recalage que nous avons utilisée est très robuste et peut supporter jusqu'à 50% de points aberrants. La méthode repose sur le tirage aléatoire d'échantillons pour calculer la transformation rigide permettant de superposer les deux entités. Suite au recalage, pour chaque point 3D du nuage, le point le plus proche de la surface est calculé et utilisé pour la comparaison de caractéristiques géométriques locales, et ainsi on peut décider du label (surface) à associer au point 3D. Cet outil de segmentation est gourmand en temps calcul, mais très robuste. Une fois la segmentation effectuée, le contrôle des tolérances n'est que du calcul peu complexe à effectuer. Ce n'est donc qu'un problème

de temps pour implanter l'ensemble des tolérances spécifiées par les normes, dans notre logiciel.

Contributions

Les contributions les plus importantes de notre travail de thèse sont les suivantes :

Pour approcher la précision des capteurs 3D, qui comme nous l'avons dit reste à l'heure actuelle limitée (environ $25\mu m$ pour le capteur le plus précis que nous avons utilisé) par rapport à celle obtenue par les capteurs à contact, nous avons mis au point une stratégie de numérisation qui optimise la position du capteur de profondeur afin d'avoir en permanence les meilleures conditions de précision lors de l'acquisition des données 3D. Nous avons démontré (au chapitre 5) que nous pouvons améliorer la précision des données obtenues en utilisant cette stratégie par rapport à celle des données acquises par la méthode de numérisation standard. La stratégie garantit que la numérisation est réalisée sans les problèmes d'occlusion et de collision. Lors de la conception d'une pièce, seules quelques surfaces sont spécifiées par des tolérances géométriques. Par conséquent, un point d'intérêt de la stratégie est qu'elle permet de numériser seulement les surfaces d'intérêt.

En ce qui concerne l'inspection, nous avons défini une méthodologie pour le contrôle de tolérances dimensionnelles et géométriques qui utilise le nuage de points 3D et le modèle CAO de la pièce sous contrôle. Lors de l'inspection, seuls les sous-ensembles de points reliés à la surface sous contrôle et (éventuellement) à la surface de référence sont utilisés. Ceux-ci sont obtenus par un processus de segmentation du nuage de points 3D.

Lors de la numérisation d'une pièce avec la stratégie d'acquisition, nous utilisons le modèle de bruit du capteur pour associer à chaque point acquis une valeur de dispersion, qui dépend des conditions de l'acquisition. Cette dispersion est utilisée

lors de l'inspection pour associer un facteur de fiabilité au résultat du contrôle de tolérances, ce que nous appelons l'inspection non-déterministe.

Perspectives

Ce travail nous a amené à envisager plusieurs pistes à explorer par la suite, si l'on veut arriver à un produit industriel.

La première serait de travailler sur les logiciels de CAO afin que ceux-ci puissent fournir automatiquement, avec les données géométriques, les informations de cotation et de tolérancement.

La deuxième piste serait de travailler sur la précision des capteurs, soit sur la partie matérielle, soit sur la partie acquisition (logiciel) pour améliorer la précision des données. Un modèle fin de cette précision nous permettrait d'associer un facteur de position et d'orientation au faisceau laser afin d'appliquer des facteurs correctifs sur les points acquis.

La dernière voie fournit un challenge intéressant qui consiste à convaincre les *métrologistes* de remettre en cause les méthodes traditionnelles de contrôle afin de les remplacer par notre approche, car l'utilisation de ces outils (capteur sans contact, modèle de l'objet) remet en cause les approches traditionnelles de la mesure.

Bibliographie

[ABD97] **ABDEL-MALEK, A., DENTINGER, M.**. Enhanced method for reducing ultrasound speckle noise using wavelet transform. In : *SPIE Proceedings : Wavelet applications in signal and image processing V*, Vol. 3169, San Diego, California, USA, 30 July-1 August 1997. p. 92–103.

[ABR97] **ABRAMS, S., ALLEN, P., TARABANIS, K.**. *Computing camera viewpoints in an active robot work-cell.* New York, USA : Columbia University, Department of Computer Science, 1997. 40 p.

[BAN95] **BANTA, J.E., ZHIEN, Y., WANG, X.Z., ZHANG, G., SMITH, M. T., ABIDI, M. A.**. A "best-next-view" algorithm for three-dimensional scene reconstruction using range images. In : *Casasent [SPIE2588]*, 1995. p. 418–429, ftp ://vision1.engr.utk.edu/outgoing/banta/spie.ps.gz.

[BAR91a] **BARIBEAU, R., RIOUX, M.**. Centroid fluctuations of speckled targets. *Applied Optics*, September 1991, Vol. 30, N° 26, p. 3752–3755.

[BAR91b] **BARIBEAU, R., RIOUX, M.**. Influence of speckle on laser range finders. *Applied Optics*, July 1991, Vol. 30, N° 20, p. 2873–2878.

[BAS95] **BASU, A.**. Active calibration of cameras : theory and implementation. *IEEE Transactions on Systems, man, and cybernetics*, February 1995, Vol. 25, N° 2, p. 256–265.

[BAS97] **BASU, A., RAVI, K.**. Active camera calibration using pan, tilt, and roll. *IEEE Transactions on Systems, man, and cybernetics*, June 1997, Vol. 27, N° 3, p. 559–566.

[BEN94] **BEN AMAR, C.**. *Modélisation et placement automatique de capteurs de vision. Intégration d'un module-vision dans un système de CAO-robotique.* Thèse : Automatique Industrielle : Institut National des Sciences Appliquees de Lyon (INSA), France, 1994. 173 p.

[BER92] **BERALDIN, J.A., RIOUX, M., BLAIS. F., GODIN, G., BARIBEAU, R.**. calibration of a range camera. In : *Proceedings of the 11th International Conference on Pattern Recognition*, The Hague, The Netherlands, August 30-September 3 1992. p. 163–167.

[BER93] **BERALDIN, J.A, EL-HAKIM, S.F., COURNOYER, L.**. Practical range camera calibration. In : *SPIE Proceedings, Videometrics II.*, Vol. 2067, 7-10 September 1993. p. 21–31.

[BER95] **BERALDIN, J.A., EL-HAKIM, S.F., BLAIS. F.**. Performance evaluation of three active vision systems built at the national research council of canada. In : *Proceedings of the Conference on Optical 3-D Measurement Techniques*, Vienna, Austria, 2-4 October 1995. p. 352–361.

[BER96] **BERGEVIN, R., SOUCY, M., GAGNON, H., LAURENDEAU, D.**. Towards a general multi-view registration technique. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, May 1996, Vol. 18, N° 5, p. 540–547.

[BES92] **BESL, P.J., McKAY, N.D.**. A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, February 1992, Vol. 14, N° 2, p. 239–256.

[BEZ87] **BEZIER, P.**. *Courbes et surfaces.* 2e édition. Paris, Hermès, 1987. 327 p.

[BIS94] **BISPO, E.M., FISHER, R.B.**. Inspection of free-form surfaces using dense range data. In : *SPIE Automated 3D and 2D Vision*, Vol. 2249, Frankfurt, June 1994. p. 211–220.

[BIT93] **BITTAR, E., LAVALLEE, S. SZELISKI, R.**. A Method for registering range images of arbitrarily shaped surfaces for 3D Object Reconstruction. In : *SPIE Proceedings, Sensor fusion VI*, Vol. 2059, 1993. p. 384–395.

[BLA88] **BLAIS, F., RIOUX, M., BERALDIN, J.A.**. Practical considerations for a design of a high precision 3-D laser scanner system. In : *SPIE Proceedings, Optomechanical and Electro-Optical Design of Industrial Systems*, Vol. 959, 1988. p. 225–246.

[BLA95] **BLACKNELL, D., OLIVER, C.J., WARNER, M.**. Speckle reduction of SAR images using neural networks. In : *SPIE Proceedings : Synthetic aperture radar and passive microwave sensing*, Vol. 2584, Paris, France, 25-28 September 1995. p. 179–187.

[BOL91] **BOLLE, R.M., VEMURI, B.C.**. On 3-D surface reconstruction methods. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, January 1991, Vol. 13, N° 1, p. 1–13.

[BOU94a] **BOULANGER, P.**. *Extraction multiéchelle d'éléments géométriques.* Ph.D. Dissertation : Génie Electrique : Université de Montreal, Canada, 1994. 226 p.

[BOU94b] **BOULANGER, P., COHEN, P.**. Viewpoint invariant computation of surface curvatures in range images. In : *Proceedings of Vision Interface '94*, Banff, May 16-20 1994. p. 145–154.

[BRO81] **BROWN, C.M.**. Some mathematical and representational aspects of modeling. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1981, Vol. 3, N° 4, p. 444–453.

[CAR93] **CARDEW-HALL, M.J., LABANS, T., WEST, G., DENCH, P.**. A method of representing dimensions and tolerances on solid based freeform surfaces. *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, 1993, Vol. 10, N° 3, p. 223–234.

[CHA91a] **CHANG, C., CHATTERJEE, S., KUBE, P.R.**. On an analysis of static occlusion in stereo vision. In : *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Maui, HI., June 3-6 1991. p. 722–723.

[CHA91b] **CHASSERY, J.M., MONTANVERT, A.**. *Géométrie discrète en analyse d'images*. Paris : Hermès, 1991. 358 p.

[CHE91] **CHEN, S.W., JAIN, A.K.**. Object extraction from laser radar imagery. *Pattern Recognition*, April 1991, Vol. 24, N° 6, p. 587–600.

[CHE93] **CHEN, Y.D., NI, J.**. Dynamic calibration and compensation of a 3-D laser radar scanning system. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1993, Vol. 9, N° 3, p. 318–323.

[CHE95] **CHENG, W., MENQ, C.**. Integrated laser/CMM system for the dimensional inspection of objects made of soft material. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1995, Vol. 10, N° 1, p. 36–45.

[CHE96] **CHEN, F.L., SU, C.T.**. Vision-based automated inspection system in computer integrated manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1996, Vol. 11, N° 3, p. 206–213.

[CHI89] **CHIEN, C.H., AGGARWAL, J.K.**. Model construction and shape recognition from occluding contours. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, April 1989, Vol. 11, N° 4, p. 372–389.

[CUR95] **CURLESS, B., LEVOY, M.**. Better optical triangulation through spacetime nalysis. In : *Fifth International Conference on Computer Vision, Cambridge, Massachusetts*, June 20-23 1995. p. 987–994.

[CUR97] **CURLESS, B.L.**. *New methods for surface reconstruction from range images*. Ph.D. Dissertation : Department of Electrical Engineering : Stanford University, Stanford, USA, 1997. 189 p.

[DOR94] **DORAI, C., WENG, J., JAIN, A.K.**. *Optimal registration of multiple range views*. East Lansing, Michigan, USA : Michigan State University, Department of Computer Science, July 1994. 25 p.

[DOR97] **DORAI, C., WENG, J., JAIN, A.K.**. Optimal registration of object views using range data. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, October 1997, Vol. 19, N° 10, p. 1131–1138.

[EDI95] **EDINBAROUGH, R. A., NAINAR, R. A., RADHAKRISHNAN, P.**. Automated visual inspection of geometric tolerance in circular components. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1995, Vol. 10, N° 6, p. 367–373.

[EL-89] **EL-HAKIM, S.F., BARAKAT, M.K.**. A vision-based coordinate measuring machine (VCMM). In : *Proceedings of 3-D Measurement Techniques III*, Vienna, Austria, 18-20 September 1989. p. 216–228.

[FAR92] **FARIN, G.**. *Courbes et surfaces pour la CGAO*. Paris : Masson, 1992. 401 p.

[FAU81] **FAUX, I.D., PRATT, M.J.**. *Computational geometry for design and manufacture*. ChiChester : Ellis Harwood Series in Mathematics and its applications, 1981. 329 p.

[FAU86] **FAUGERAS, O.D., HEBERT, M.**. The representation, recognition and locating of 3D objects. *International Journal of Robotics Research*, 1986, Vol. 5, N° 3, p. 27–52.

[FLE88] **FLEMING, A.**. Geometric relationships between toleranced features. *Artificial Intelligence*, 1988, Vol. 37, N° , p. 403–412.

[FLY90] **FLYNN, P.J.**. *CAD-Based computer vision : modeling and recognition strategies*. Ph.D. Dissertation : Computer Science : Michigan State University, USA, 1990. 190 p.

[GAG97] **GAGNON, L., JOUAN, A.**. Speckle filtering of SAR images : a comparative study between complex-wavelet-based and standard filters. In : *SPIE Proceedings : Wavelet applications in signal and image processing V*, Vol. 3169, San Diego, California, USA, 30 July-1 August 1997. p. 80–91.

[GIG90] **GIGUS, Z., MALIK, J.**. Computing the aspect graph for line drawings of polyhedral objects. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, February 1990, Vol. 12, N° 2, p. 113–122.

[GIV88] **GIVERT, D.**. *Modélisation géométrique d'objets en environnement robotique*. Thèse de docteur en sciences : Université de Paris Sud Centre d'Orsay, 1988. 324 p.

[GOD94] **GODIN, G., RIOUX, M., BIRIBEAU, R.**. Three dimensional registration using range and intensity information. In : *Proceedings of SPIE, Videometrics III*, Vol. 2350, Boston, November 1994. p. 279–290.

[GOD95] **GODIN, G., BOULANGER, P.**. Range image registration through viewpoint invariant computation curvature. In : *ISPRS Intercommission Workshop From Pixels to Sequences*, Vol. 30. Part 5W1 , Zurich, 22-24 March 1995. , . p. 170–175.

[HAR90] **HARRISON, D.D. and WEIR, M.P.**. High-speed triangulation-based 3-D imaging with orthonormal data projections and error detection. *IEEE*

Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, April 1990, Vol. 12, N° 4, p. 409–416.

[HEB94] **HEBERT, P.**. *From points to shape recovery : reliable geometric primitive extraction*. Ph.D. Dissertation : Département de Génie Électrique : Faculté des sciences et de génie, Université LAVAL, Québec, Canada, 1994. 143 p.

[HOR93] **HORN, B.K., SCHUNCK, B.G.**. Determining optical flow : A retrospective. *Artificial Intelligence*, 1993, Vol. 59, p. 81–87.

[JAI89] **JAIN, A.K.**. *Fundamentals of digital image processing*. New Jersey : Prentice-Hall, Inc., 569 p, 1989. 569 p.

[JUS92] **JUSTER, N.P.**. Modeling and representation of dimensions and tolerances : a survey. *Computer-Aided Design*, 1992, Vol. 24, N° 1, p. 3–17.

[KOF97] **KOFIDIS, E., THEODORIDIS, S., KOTROPOULOS, C., PITAS, I.**. Application of neural networks and order statistics filters to speckle noise reduction in remote sensing imaging. In : *Neurocomputation in remote sensing data analysis : proceedings of concerted action COMPARES (connectionist methods for pre-processing and analysis of remote sensing data)*, New York, USA, 1997. p. 47–56.

[KOV98] **KOVAČIČ, S., LEONARDIS, A., PERNUŠ, F.**. Planning sequences of views for 3-D object recognition and pose determination. *Pattern Recognition*, October 1998, Vol. 31, N° 10, p. 1407–1417.

[KUG95] **KUGIUMTZIS D., LILLEKJENDLIE, B.**. *Estimation model for kinematic calibration of manipulators with a parallel structure*. Oslo, Norway : University of Oslo, Department of Informatics, March 1995. 18 p.

[KUR95] **KURFESS, T.R., BANKS, D.L.**. Statistical verification of conformance to geometric tolerance. *Computer-Aided Design*, May 1995, Vol. 27, N° 5, p. 353–361.

[KUR96] **KURFESS, T.R., BANKS, D.L., WOLFSON, L.J.**. A multivariate statistical approach to metrology. *Transactions of the ASME*, November 1996, Vol. 118, N° , p. 652–657.

[LIV86] **LIVINGSTONE, F.R., RIOUX, M.**. Development of a large field of view 3-D vision system. In : *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Vol. 665 *Optical Techniques for Industrial Inspection*, 4-6 June 1986. p. 188–194.

[MAR91] **MARSHALL, A.D., MARTIN, R.R., HUTBER, D.**. Automatic inspection of mechanical parts using geometric models and laser range finder data. *Image and Vision Computing*, December 1991, Vol. 9, N° 6, p. 385–405.

[MAS95a] **MASON, S.O., GRUN, A.**. Automatic Sensor Placement for Accurate dimensional inspection. *Computer Vision and Image Understanding*, May 1995, Vol. 61, N° 3, p. 454–467.

[MAS95b] **MASUDA, T., YOKOYA, N.**. A robust method for registration and segmentation of multiple range images. *Computer Vision and Image Understanding*, May 1995, Vol. 61, N° 3, p. 295–307.

[MAT97a] **MATHIEU, L.**. New algorithms for CMM softwares in accordance with standardized geometrical tolerances. In : *Proccedings of the 8th international Metrology Congress*, Besançon 20-23, Octobre 1997. p. 33–38.

[MAT97b] **MATHIEU, L., BALLU, A.**. Virtual gage with internal mobilities for the verification of functional specifications. In : *Proceeding of the 5th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing*, Toronto 27-29, Avril 1997.

[MAT97c] **MATHIEU, L., LARTIGUE, C., BOURDET, P.**. *An approximation methode for the linearization of tridimensional metrologie problems.* , Vol. 45. Advaced Mathematical Tools in Metroiogy III, Series on Advances in Mathematics for applied Sciences, février 1997.

[MAV93] **MAVER, J., BAJCSY, R.**. Occlusions as a guide for planning the next view. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, May 1993, Vol. 15, N° 5, p. 417–433.

[MAV95] **MAVER, J.**. *Collecting visual information using an active sensor system.* Ph.D. Dissertation : Department of Computer and Information Science : University of Ljubljana, Ljubljana, Slovenia, 1995. 115 p.

[McL96] **McLAUCHLAN, P.F., MURRAY, D.W.**. Active camera calibration for a head-eye platform using the variable state-dimension filter. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, January 1996, Vol. 18, N° 1, p. 15–22.

[MEN92] **MENQ, C.H., YAU, H.Y., LAI, G.Y.**. Automated precision measurement of surface profile in CAD-directed inspection. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, April 1992, Vol. 8, N° 2, p.268–278.

[MOD92] **MODAYUR, B.R., SHAPIRO, L.G., HARALICK, R.M.**. Visual inspection of machined parts. In : *Proceedings of 1992 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Los Alamitos, CA, USA, 1992. IEEE Computer Society Press. p. 393–398.

[MOG96] **MOGANTI, M., ERCAL, F., DAGLI, C.H., TSUNEKAWA, S.**. Automatic PCB inspection algorithms : A survey. *Computer Vision and Image Understanding*, 1996, Vol. 63, N° 2, p. 287–313.

[MOR95] **MORON, V., BOULANGER, P., MASUDA, P., REDARCE, H.T.**. Automatic inspection of industrial parts using 3-D optical range sensor. In : *SPIE Proceedings, Videometrics IV*, Vol. 2598, 1995. p. 315–325.

[MOR96a] **MORON, V.**. *Mise en correspondance de données 3D avec un modèle CAO : Application à l'inpection automatique.* Thèse : Automatique Industrielle : Institut National des Sciences Appliquees de Lyon (INSA), France, 1996. 212 p.

[MOR96b] **MORON, V., BOULANGER, P., REDARCE, H.T., JUTARD, A.**. Mise en correspondance du modèle CAO d'un objet avec son image 3D : Application à l'inspection. In : *RIFIA'96, Congrès de Reconnaissances de Formes et Intelligence Artificielle*, Rennes, France, 16-18 Janvier 1996. p. 913–922.

[NEW94] **NEWMAN, T.S., JAIN, A.K.**. CAD-Based inspection of 3D objects using range images. In : *Proceedings of the 1994 Second CAD-Based Vision Workshop*, Los Alamitos, CA, USA, 1994. IEEE Computer Society Press. p. 236–243.

[NEW95a] **NEWMAN, T.S., JAIN, A.K.**. A survey of automated visual inspection. *Computer Vision and Image Understanding*, March 1995, Vol. 61, N° 2, p. 231–262.

[NEW95b] **NEWMAN, T.S., JAIN, A.K.**. A system for 3D CAD-based inspection using range images. *Pattern Recognition*, 1995, Vol. 28, N° 10, p. 1555–1574.

[NIT88] **NITZAN, D.**. 3-D vision structure for robot applications. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, March 1988, Vol. 10, N° 3, p. 291–309.

[NOB95] **NOBLE, J.A.**. From inspection to process understanding and monitoring : a view on computer vision in manufacturing. *Image and Vision Computing*, April 1995, Vol. 13, N° 3, p. 197–214.

[PAH95] **PAHK, H.J., JUNG, M.Y., HWANG, S.W., KIM, Y.H., HONG, Y.S., KIM, S.G.**. Integrated precision inspection system for manufacturing of moulds having CAD defined features. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1995, Vol. 10, N° 3, p. 198–207.

[PAH96] **PAHK, H.J., AHN, W.J.**. Precision inspection system for aircraft parts having features based on CAD/CAI integration. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, December 1996, Vol. 12, N° 6, p. 442–449.

[PAP97a] **PAPADOPOULOS-ORFANOS D.**. *Numérisation géométrique automatique à l'aide d'un capteur de présicion à profondeur de champ réduite.* : Ecole Nationale Supérieure des Télécomunications (ENTS), 1997. 135 p.

[PAP97b] **PAPADOPOULOS-ORFANOS, D., SCHMITT, F.**. Automatic 3-D digitization using a laser rangefinder with a small fiel of view. In : IEEE Computer Society Press, , *Proceedings of the International Conference on*

Recent Advanced in 3-D Digital Imaging and Modeling, Ottawa, Canada, May 12-15 1997. p. 60–67.

[PER90] **PEROCHE, B., ARGENCE, J., GHAZANFARPOUR, D., MICHELUCCI, D.**. *la synthèse d'images.* Paris, Edition Hermès, 1990. 295 p.

[PIE97] **PIEGL, L. TILLER, W.**. *The NURBS book.* 2nd édition. New York : Springer-Verlag, 1997. 646 p.

[PIT95] **PITO, R.**. *Characterization, calibration, and use of the perceptron laser range finder in a controlled environment.* Philadelphia, USA : University of Pennsylvania, Department of Computer and Information Science, GRASP Laboratory, January 1995. 58 p.

[PIT96] **PITO, R.**. A Sensor based solution to the next best view problem. In : IEEE Computer Society Press, , 13th *International Conference on Pattern Recognition, Vienna, Austria*, August 25-30 1996. p. A941–945.

[PIT97] **PITO, R.**. *Automated surface acquisition using range cameras.* Ph.D. Dissertation : Computer and Information Science : University of Pennsylvania, GRASP Laboratory, Philadelphia, USA, 143 p, 1997. 143 p.

[REQ83] **REQUICHA, A., VOELCKER, H.B.**. Solid Modeling : Current Status and Research Directions. *IEEE Computer Graphics and Application*, 1983, Vol. 3, N° 7, p. 25–37.

[REQ86] **REQUICHA, A.A., CHAN, S.C.**. Representation of geometric features, tolerances, and attributes in solid modelers based on constructive geometry. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, September 1986, Vol. RA-2, N° 3, p. 156–166.

[RIO84] **RIOUX, M.**. Laser range finder based on synchronized scanners. *Applied Optics*, November 1984, Vol. 23, N° 21, p. 3837–3844.

[ROU87] **ROUSSEUW, P.J., LEROY. A.M.**. *Robust Regression & Outlier Detedtion.* New York, John Wiley & Sons, Wiley Series in probability and statistics, 1987. 329 p.

[ROY95] **ROY, U.**. Computational methodologies for evaluating form and positional tolerances in a computer integrated manufacturing system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1995, p. 110–117.

[SMI88] **SMITH, B., RINAUDOT, G. REED, K. WRIGHT, T.**. *Initial Graphics Exchange Specification (IGES), Version 4.0.* Warrendale : Society of Automotive Engineers, Inc., 1988. 515 p.

[STE97] **STEWART, A.J., LANGER, M.S.**. Toward accurate recovery of shape from shading under diffuse lighting. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, September 1997, Vol. 19, N° 9, p. 1020–1025.

[SUP95] **SUPER, B.J., BOVIK, A.C.**. Shape from texture using local spectral moments. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, April 1995, Vol. 17, N° 4, p. 333–343.

[TAN95] **TANG, X.Q., DAVIES, B.J.**. Integration of inspection planning system and CMM via DMIS. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1995, Vol. 10, N° 6, p. 422–426.

[TAR95a] **TARABANIS, K.A., ALLEN, P.K., TSAI, R.Y.**. A survey of sensor planning in computer vision. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, February 1995, Vol. 11, N° 1, p. 86–104.

[TAR95b] **TARABANIS, K.A., TSAI, R.Y., ALLEN, P.K.**. The MVP sensor planning system for robotic vision tasks. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, February 1995, Vol. 11, N° 1, p. 72–85.

[TAR95c] **TARBOX, G.H., GOTTSCHLICH, S.N.**. IVIS : An integrated volumetric inspection system. *Computer Vision and Image Understanding*, May 1995, Vol. 61, N° 3, p. 430–444.

[TAR95d] **TARBOX, G.H., GOTTSCHLICH, S.N.**. Planning for complete sensor coverage in inspection. *Computer Vision and Image Understanding*, January 1995, Vol. 61, N° 1, p. 84–111.

[TAR96] **TARABANIS, K.A., TSAI, R.Y., ANIL, K.**. Computing occlusion-free viewpoints. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, March 1996, Vol. 18, N° 3, p. 279–292.

[TIR92] **TIRUMALAI, A.P., SCHUNCK, B.G., JAIN, R.C.**. Dynamic stereo with self-calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, December 1992, Vol. 14, N° 12, p. 1184–1189.

[TRU97] **TRUCCO, E., UMASUTHAN, M., WALLACE, A.M., ROBERTO, V.**. Model-based planning of optimal sensor placements for inspection. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, April 1997, Vol. 13, N° 2, p. 182–194.

[TRU98] **TRUCCO, E., FISHER, R.B., FITZGIBBON, A.W., NAIDU, D. K.**. Calibration, data consistency and model acquisition with laser stripers. *International Journal of Computer-Integrated Manufacturing*, 1998, Vol. 11, N° 4, p. 293–310.

[TSA87] **TSAI, R.Y.**. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, August 1987, Vol. RA-3, N° 4, p. 323–344.

[TSA89] **TSAI, R.Y., LENZ, R.K.**. A new technique for fully autonomous and efficient 3D robotics hand/eye calibration. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, june 1989, Vol. 5, N° 5, p. 345–358.

[TUR87] **TURNER, J.U., WOZNY, M.J.**. Tolerances in computer-aided geometric design. *The Visual Computer*, 1987, Vol. 3, N° , p. 214–226.

[WHA91] **WHAITE, P., FERRIE, F.**. From uncertainty to visual exploration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, October 1991, Vol. 13, N° 10, p. 1038–1049.

[WHA97] **WHAITE, P., FERRIE, F.**. Autonomous exploration : driven by uncertainty. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, March 1997, Vol. 19, N° 3, p. 193–205.

[YE 95] **YE , Y., TSOTSOS, J.K.**. Where to look next in 3D object search. In : *IEEE International Symposium for Computer Vision*, Florida, USA, November 1995. p. 539–544.

[YE 99] **YE , Y.**. Sensor planning for 3D object search. *Computer Vision and Image Understanding*, February 1999, Vol. 73, N° 2, p. 145–168.

[ZHA94] **ZHANG, Z.**. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. *International Journal of Computer Vision*, 1994, Vol. 13, N° 2, p. 119–152.

[ZHA97] **ZHA, H., MOROOKA, K., HASEGAWA, T., NAGATA, T.**. Active modeling of 3-D objects : planning on the next best pose (NBP) for acquiring range images. In : IEEE Computer Society Press, , *Proceedings of the International Conference on Recent Advanced in 3-D Digital Imaging and Modeling, Ottawa, Canada*, May 12-15 1997. p. 68–75.

Annexe A

La banque de pièces

Afin de tester le système d'inspection nous avons conçu et usiné une banque de pièces avec des surfaces simples et complexes. Nous avons conçu 13 pièces mécaniques, dont 10 pièces régulières (avec des surfaces simples) et 3 pièces complexes (avec des surfaces gauches). Nous avons introduit des cotes (tolérances dimensionnelles) et des tolérances géométriques sur l'ensemble des pièces. Après le tolérancement des pièces elles ont été dessinées à l'aide du logiciel *ProEngineer*. Différents formats CAO de chaque pièce ont été obtenus en utilisant ce logiciel. Finalement les pièces ont été usinées. En générale, toutes les pièces ont des dimmensions comprises dans un volume de $100mm \times 100mm \times 100mm$.

Conception des pièces

Pour chaque pièce de la banque de pièces nous avons obtenu (en utilisant le logiciel de CAO *ProEngineer*) deux modèles CAO différents : le modèle triangulé (format STL) et le modèle exact (format NURBS).

Le format IGES représente les surfaces d'une pièce de façon exacte car il utilise pour la représentation de la pièce des surfaces NURBS (Non Uniform Rational B-Spline). Il est souvent utilisé grâce à sa grande capacité descriptive et à l'exactitude

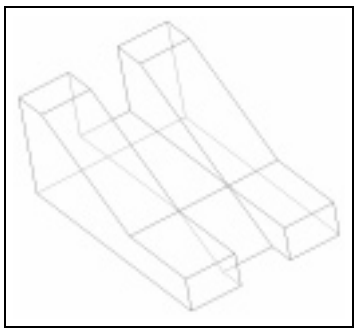
de représentation. Ce modèle CAO est de grand intérêt pour la tâche de contrôle de tolérances. La Figure A.1 montre le modèle CAO en format IGES des 10 pièces régulières de la banque de pièces, la Figure A.2 montre le modèle CAO pour les 3 pièces complexes.

Le format STL représente la pièce par un ensemble de triangles approchant les surfaces. La précision de représentation de la pièce est fonction du nombre des triangles utilisés. Le modèle est un ensemble de triangles définis par leurs trois sommets et leurs normales orientées vers l'extérieur de l'objet. Nous utilisons ce modèle CAO pour réaliser le recalage avec les données 3D obtenues avec le capteur de profondeur. Dans la Figure A.3 nous présentons le modèle CAO en format STL de quelques pièces.

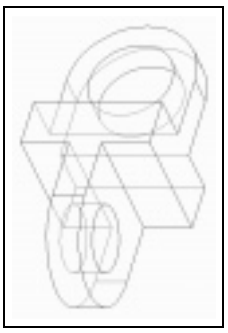
Usinage des pièces

Après la conception des pièces elles ont été usinées. Le matériau utilisé a été l'aluminium car il est facile à usiner.

Les pièces avec des surfaces régulières ont été usinées à l'aide d'un tour et d'une fraiseuse à commande numérique. Pour les pièces avec des surfaces complexes nous avons utilisé un logiciel permettant de contrôler la fraiseuse numérique à partir du modèle CAO en format IGES.



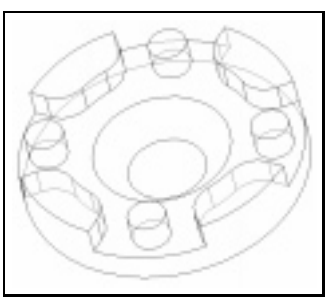
(a) Pièce un



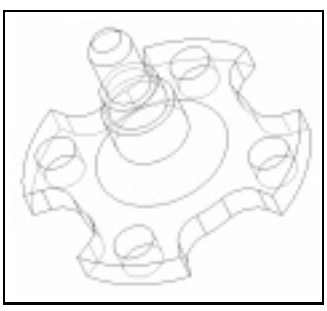
(b) Pièce deux

(c) Pièce trois

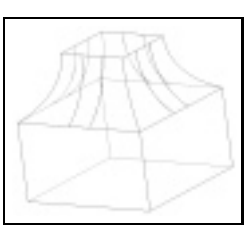
(d) Pièce quatre



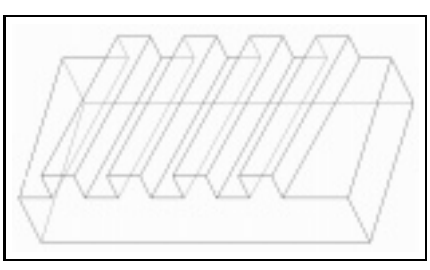
(e) Pièce cinq



(f) Pièce six



(g) Pièce sept

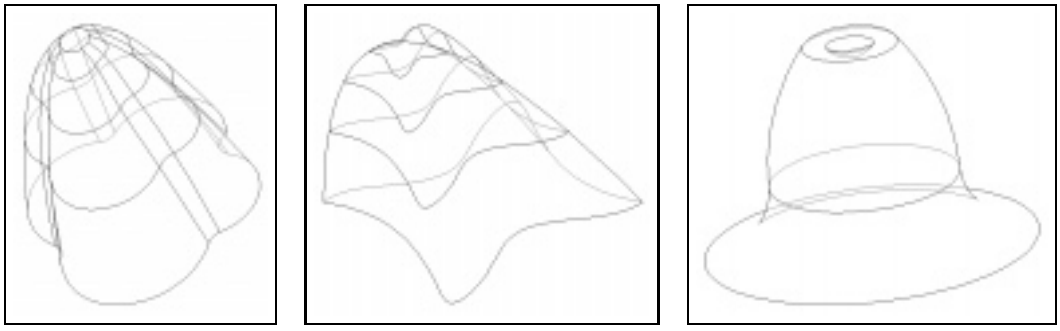


(h) Pièce huit

(i) Pièce neuf

(j) Pièce dix

FIG. A.1: Pièces de la banque de données avec des surfaces simples

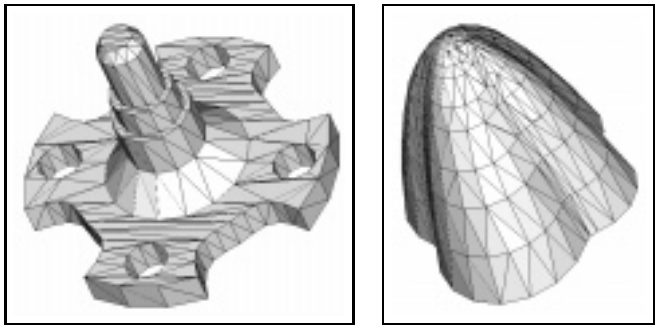


(a) Pièce complexe un

(b) Pièce complexe deux

(c) Pièce complexe trois

FIG. A.2: Pièces de la banque de données avec des surfaces complexes



(a) Pièce six

(b) Pièce complexe un

FIG. A.3: Modèle CAO en format STL de quelques pièces de la banque de données

Annexe B

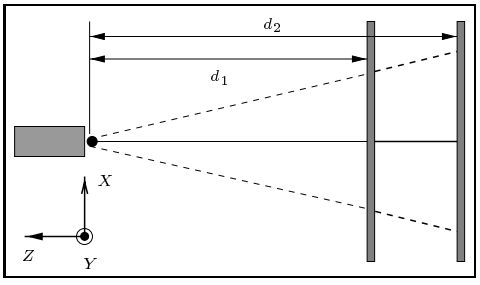
Processus de modélisation et bruit de *speckle*

Modélisation du bruit

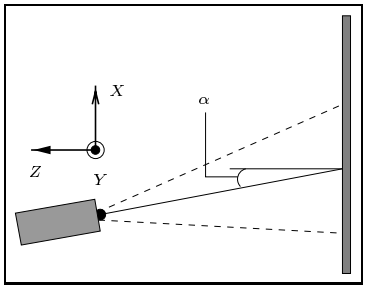
Afin d'obtenir un modèle du bruit introduit par le système de vision lors de la numérisation d'une pièce, nous avons réalisé des mesures dans différentes positions de distance et d'orientation du capteur laser par rapport à la surface. Ces mesures ont été réalisées en utilisant une surface, sur laquelle l'état de fini de surface n'a pas été malheureusement mesuré par des méthodes mécaniques. Dans la Figure B.1 nous illustrons la façon dont la la distance d et les angles α et β sont variés.

La Figure B.1(a) illustre la variation de la distance en déplaçant le capteur le long de l'axe Z. La Figure B.1(b) présente la variation de l'angle α, dans la direction du balayage du faisceau laser, en tournant le capteur autour de l'axe Y. La Figure B.1(c) illustre la variation de l'angle α, dans la direction perpendiculaire au balayage du faisceau laser, en tournant le capteur autour de l'axe X.

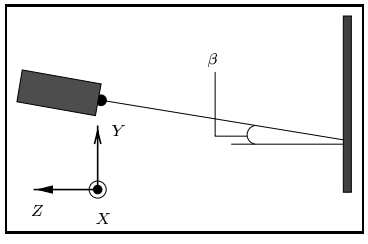
Dans chaque position 128 mesures ont été réalisées. Ces mesures nous ont permis de calculer la variance en X (σ_{xx}), la variance en z (σ_{zz}) et la covariance entre x et z (σ_{xz}) ; et par conséquent d'obtenir un modèle du bruit du système de numérisation.



(a) Variation de la distance



(b) Variation de l'angle α



(c) Variation de l'angle β

FIG. B.1: Variation de la position et de l'orientation du capteur

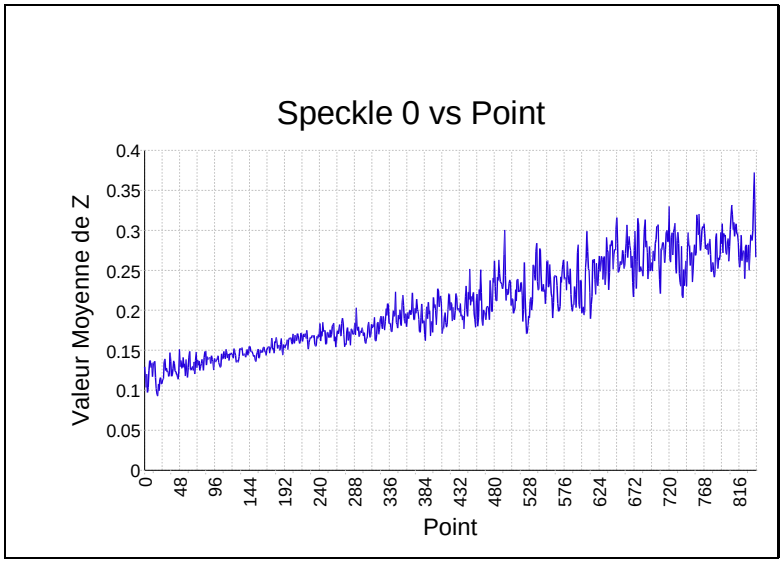
Nous suggérons de réaliser un modèle du bruit plus détaillé, en utilisant plusieurs pièces avec des finis de surfaces différents et connus.

Bruit de *speckle*

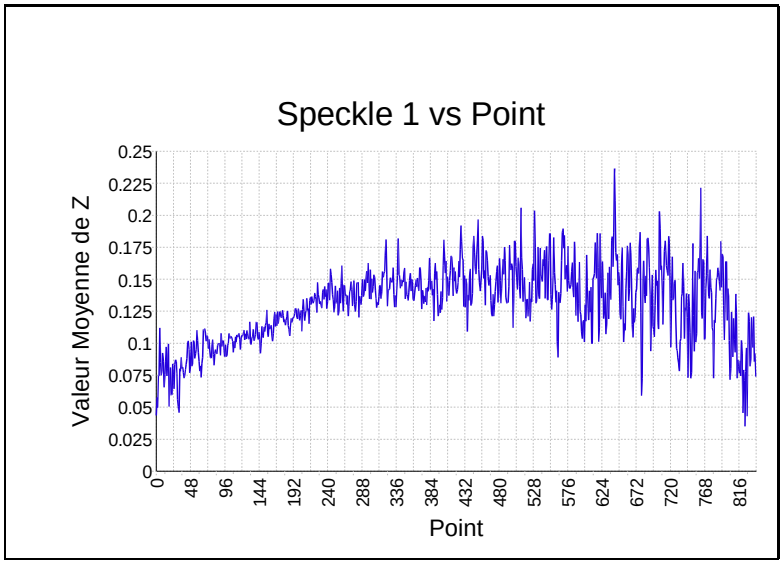
Le problème de *speckle* a été mis en évidence en numérisant la même surface en deux positions proches, comme cela est illustré dans la Figure B.2.

En effet, dans les Figures B.3(a) et B.3(b) nous observons que pour des mesures faites sur la même surface et dans des positions proches, le résultat de profondeur de la surface est différent (la valeur moyenne de Z est donnée en μm). Cette allure différente est produite par une rugosité différente lors du balayage du faisceau laser.

Une méthode possible pour réduire le bruit de *speckle* est l'utilisation d'un système mécanique faisant vibrer la fibre optique afin de déplacer le faisceau laser.

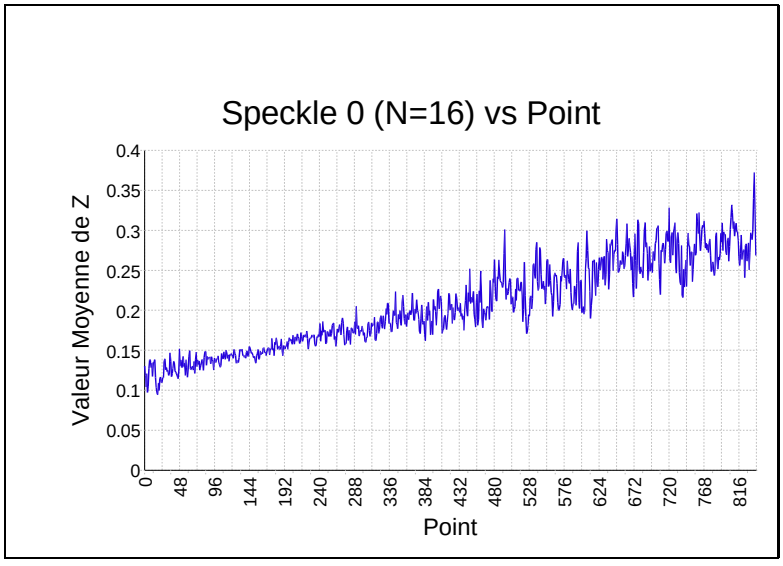


(a) Bruit de *speckle* à la position 0 sur la surface

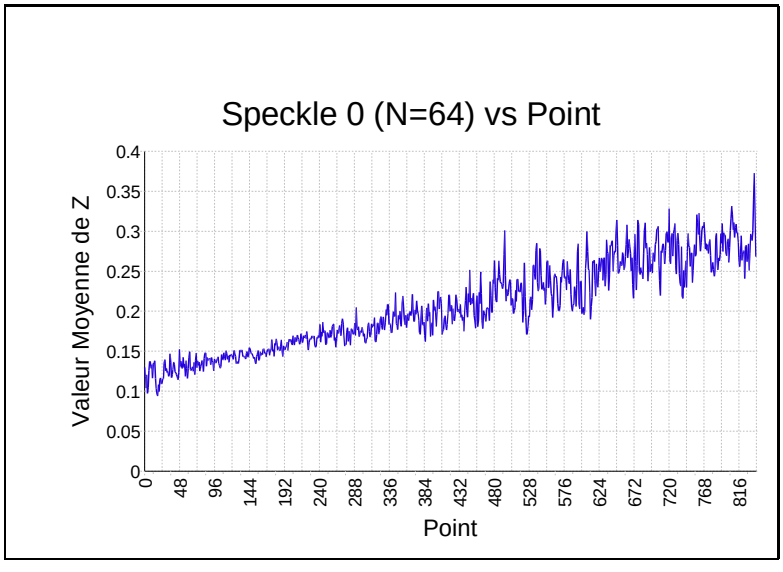


(b) Bruit de *speckle* à la position 1 sur la surface

FIG. B.2: Bruit de *speckle* en deux positions différentes



(a) Bruit de *speckle* en réalisant 16 mesures



(b) Bruit de *speckle* en réalisant 64 mesures

FIG. B.3: Bruit de *speckle* en réalisant un nombre différent de mesures

Annexe C

Entités du fichier CAO en format IGES

L'*Initial Graphics Exchange Specification (IGES)* établit les structures de l'information à utiliser pour la représentation et la transmission numérique des données de produits conçus. L'utilisation de cette spécification permet l'échange compatible de données entre divers systèmes de conception et fabrication assistées par ordinateur (CFAO). Cette spécification définit un format de structure de fichier, un format de langage, et la représentation des données géométriques, topologiques, et non-géométriques.

Les données de géométrie se composent d'éléments tels que des points, des courbes, des surfaces et des solides qui modélisent l'objet. Ces éléments sont définis par des entités. Une entité peut définir un élément simple ou peut être le regroupement de plusieurs éléments simples pour former un élément plus complexe. Dans cette annexe nous présentons les entités utilisées dans ce travail.

Entités traitées du fichier IGES

Lors de la lecture du fichier CAO en format IGES, les entités qui ont été traitées afin d'avoir la représentation exacte de la pièce, sont les suivantes :

- Entité de type 100 : Arc de cercle.
- Entité de type 102 : Courbe composée.
- Entité de type 110 : Segment de droite.
- Entité de type 126 : Courbe NURBS.
- Entité de type 128 : Surface NURBS non-découpée.
- Entité de type 142 : Courbe définie sur une surface paramétrique.
- Entité de type 144 : Surface NURBS (paramétrique) découpée.

Par la suite nous présentons les éléments géométriques qui définissent ces entités.

Entité de type 100 : Arc de cercle

Un arc de cercle est une partie reliée d'un cercle qui se compose de plus d'un point. Un arc de cercle est déterminé par les points finaux de l'arc et un point central (le centre du cercle). L'arc de cercle est défini de façon paramétrique par :

$$C(u) = (X_1 + R * \cos u, Y_1 + R * \sin u, Z)$$

pour $u_2 \leq u \leq u_3$,

où,

pour $i = 2$ et 3,

$R = \sqrt{(X_i - X_1)^2 + (Y_i - Y_1)^2}$

u_i est tel que $(R * \cos(u_i), R * \sin(u_i)) = (X_i - X_1, Y_i - Y_1)$

et

$0 \leq u_2 \leq 2 * \pi$

$0 \leq u_3 - u_2 \leq 2 * \pi$

La définition du système de coordonnées est toujours choisie de telle façon que l'arc de cercle soit dans un plan parallèle au plan X, Y.

Entité de type 102 : Courbe composée

Une courbe composée C est une courbe continue qui résulte du groupement de plusieurs courbes simples tels que : arc de cercle, segment de droite, courbe NURBS, etc. La liste des courbes (entités) est définie dans les paramètres de l'entité de type 102. L'ordre dans la liste définit l'ordre des courbes composantes.

Soit :

C une courbe composée,

N le nombre de courbes composantes ($N \geq 1$),

$CC(i)$ est la i_{ieme} courbe composante et i est tel que $1 \leq i \leq N$,

$PS(i)$ la valeur paramétrique du point de départ de $CC(i)$,

$PE(i)$ la valeur paramétrique du point d'arrêt de $CC(i)$,

$T(0)$ égale 0

$T(i)$ égale à $\sum_{j=1}^{i}(PE(j) - PS(j))$ pour i tel que $1 \leq i \leq N$,

Alors :

$$C(u) = CC(i)(u - T(i-1) + PS(i))$$

où :

u est la variable paramétrique tel que $T(i-1) \leq u \leq T(i)$ et
les valeurs paramétriques de C varient entre $T(0)$ et $T(N)$.

Entité de type 110 : Segment de droite

Un segment de droite est une partie bornée et reliée d'une ligne droite qui se compose de plus d'un point. Un segment de droite est défini par ses points finaux. La définition paramétrique d'un segment de droite est :

$$C(u) = P_0 + u * (P_1 - P_0)$$

pour $0 \leq u \leq 1$

et P_i un point dans R^3.

Entité de type 126 : Courbe NURBS

L'intérêt principal de ce type de courbe est que toute courbe analytique peut être définie comme étant une courbe NURBS.

Une courbe NURBS de degré p est définie par l'équation suivante :

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^{n} N_{i,p}(u) w_i P_i}{\sum_{i=0}^{n} N_{i,p}(u) w_i}$$

où :

u est la variable paramétrique de la courbe C,

n est le nombre de points de contrôle dans la direction paramétrique u,

P_i les points de contrôle (points dans R^3),

w_i les poids associés aux points de contrôle, et

$N_{i,p}$ les fonctions de la base B-Spline.

Les fonctions $N_{i,p}$ sont définies par la formule récurrente suivante :

$N_{i,p}(u) = \frac{u-u_{i-1}}{u_{i+p-1}-u_{i-1}} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p}-u}{u_{i+p}-u_i} N_{i+1,p-1}(u)$ et

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & \text{si } u_{i-1} \leq u \leq u_i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$u_i \in [u_0, u_1]$ le nœud appartenant au vecteur de nœuds de la courbe NURBS.

Entité de type 128 : Surface NURBS non-découpée

Ce type d'entité a été présenté dans la section 3.3.1.

Entité de type 142 : Courbe définie sur une surface paramètrique

La courbe sur une surface paramétrique associe une courbe à une surface et identifie la courbe comme se trouvant sur la surface.

Soit :

$$S = S(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v))$$

une surface paramétrique, dont le domaine de (u, v) est un rectangle définie par :

$$D = \{(u, v) | u_1 \leq u \leq u_2 \text{ et } v_1 \leq v \leq v_2\}.$$

Soit $B = B(t)$ une courbe définie par :

$$B(t) = (u(t), v(t)) \text{ avec } a \leq t \leq b$$

qui prend ses valeurs dans D.

La courbe $C(t)$ sur la surface $S(u, v)$ est la composition de S et B définie de la façon suivante :

$$\begin{aligned} C(t) &\triangleq S \circ B(t) \\ &\triangleq S(B(t)) \\ &\triangleq S(u(t), v(t)) \\ &\triangleq (x(u(t), v(t)), y(u(t), v(t)), z(u(t), v(t))) \text{ avec } a \leq t \leq b. \end{aligned}$$

La courbe B se situe dans l'espace bidimensionnel qui est le domaine de la surface S. Par conséquent, la représentation utilisée pour B qui a été dérivée d'une courbe doit être bidimensionnelle.

Entité de type 144 : Surface NURBS (paramètrique) découpée

Ce type d'entité a été présenté dans la section 3.3.1.

Annexe D

Tolérances géométriques

Comme il est maintenant reconnu, la nécessité d'avoir dans l'industrie des pièces mécaniques facilement interchangeables, et l'impossibilité humaine et technologique de produire des pièces mécaniques identiques (car une pièce ne peut pas être usinée de façon parfaite) ont abouti à l'introduction du concept de tolérance.

Les tolérances dimensionnelles nous donnent les valeurs limites des déviations des cotes de la pièce que l'on peut accepter de façon à ce qu'elle reste encore fonctionnelle. La mise en place d'une tolérance dimensionnelle pour une pièce introduit certains avantages, car le fait de permettre d'accepter des pièces avec des défauts dans leurs dimensions nous permet de réduire les temps de fabrication et les coûts de production.

Malgré ces avantages obtenus par la mise en place des tolérances de dimension, celles-ci ne suffisent pas à garantir sa fonctionnalité. D'autres caractéristiques, comme l'orientation, la localisation, la forme et le battement, doivent être contrôlées en fonction de l'usage de la pièce. Le contrôle de ces caractéristiques est connu comme le contrôle des tolérances géométriques. Par la suite nous présentons les définitions des différentes tolérances géométriques.

Tolérances géométriques de forme

Rectitude La rectitude est une condition où un élément d'une surface ou d'un axe est une ligne droite. La tolérance de rectitude définit une zone de tolérance dans laquelle l'axe où l'élément considéré doit se trouver. La tolérance de rectitude n'est associée à aucun élément de référence.

Planéité La planéité est l'état d'une surface ayant tous ses éléments sur un plan. La tolérance de planéité indique une zone de tolérance définie par deux plans parallèles dans laquelle la surface doit se trouver. La tolérance de planéité n'est associée à aucun élément de référence. La tolérance de planéité est normalement appliquée aux surfaces non interrompues.

Circularité La circularité est l'état d'une surface de révolution où :

- Par rapport à un cylindre ou à un cône, tous les points de la surface intersectés par un plan perpendiculaire à un axe commun sont équidistants de cet axe.
- Par rapport à une sphère, tous les points de la surface intersectés par un plan passant par un centre commun sont équidistants de ce centre.

La tolérance de circularité définit une zone de tolérance bornée par deux cercles concentriques dans laquelle chaque élément de la surface doit se trouver. La tolérance de circularité n'est associée à aucun élément de référence. La tolérance de circularité peut être appliquée à tout élément (surfaces externes ou internes) qui est circulaire dans la section transversale.

Cylindricité La cylindricité est un état d'une surface de révolution dans laquelle tous les points de la surface sont équidistants d'un axe commun. La tolérance de cylindricité indique une zone de tolérance bornée par deux cylindres concentriques dans laquelle la surface doit se trouver. La tolérance de cylindricité n'est associée

à aucun élément de référence. La tolérance de cylindricité est applicable seulement aux dispositifs cylindriques : cylindres intérieurs ou extérieurs.

Forme d'une ligne ou d'une surface quelconque La tolérance de forme quelconque est une méthode employée pour indiquer une déviation permise de la forme (ligne ou surface) souhaitée ; il s'agit habituellement une forme irrégulière où d'autres tolérances géométriques sont inadéquates. La tolérance de forme quelconque indique une borne uniforme le long du profil réel souhaité dans lequel les éléments de dispositif (surface ou ligne) doivent se trouver. La tolérance de forme quelconque peut être appliquée à des formes composées par des arcs, des lignes, des surfaces planes ou incurvées, etc.

Tolérances géométriques d'orientation

Parallélisme Le parallélisme est l'état d'une surface équidistante à tous les points d'un plan ou un axe équidistant sur sa longueur à un axe de référence. La tolérance de parallélisme indique :

- Une zone de tolérance définie par deux plans ou lignes parallèles à un plan ou un axe de référence et dans laquelle les éléments de la surface ou de l'axe du dispositif considéré doit se trouver.
- Une zone cylindrique dont l'axe est parallèle à un axe de référence dans laquelle l'axe du dispositif considéré doit se trouver.

La tolérance de parallélisme exige toujours un élément de référence qui est la référence pour le contrôle du dispositif dans son orientation.

Perpendicularité La perpendicularité est l'état d'une surface, d'un plan médian ou d'un axe à un angle droit (90°) avec un plan ou un axe de référence. Une tolérance de perpendicularité indique :

- Une zone de tolérance définie par deux plans parallèles, perpendiculaires à un plan ou à un axe de référence dans laquelle la surface ou le plan médian de l'élément considéré doit se trouver.
- Une zone de tolérance définie par deux plans parallèles, perpendiculaires à un axe de référence dans laquelle l'axe de l'élément considéré doit se trouver.
- Une zone de tolérance cylindrique perpendiculaire à un plan de référence dans laquelle l'axe de l'élément considéré doit se trouver.
- Une zone de tolérance définie par deux lignes parallèles, perpendiculaires à un plan ou à un axe de référence dans laquelle un élément de la surface doit se trouver.

La tolérance de perpendicularité exige toujours un élément de référence.

Inclinaison L'inclinaison est la condition d'une surface ou d'un axe à un angle spécifié (autre que 90°) par rapport à un plan ou axe de référence. La tolérance d'inclinaison indique une zone de tolérance définie par deux plans parallèles à un angle spécifié d'un plan ou axe de référence, dans laquelle :

- La surface de l'élément considéré doit se trouver.
- L'axe de l'élément considéré doit se trouver.

La tolérance d'inclinaison exige toujours un élément de référence.

Tolérances géométriques de position

Localisation La localisation est la position théorique exacte d'un élément réel. La tolérance de localisation indique une zone de tolérance définie par deux droites, deux plans, un cercle, un parallélépipède ou un cylindre à l'intérieur desquels doit se situer l'élément considéré. Pour la tolérance de localisation il faut obligatoirement définir la position et l'orientation de l'élément spécifié.

Coaxialité La coaxialité est la condition où les axes de la section transversale de tous les éléments de révolution (telle que des cylindres, des cônes, des sphères, etc.) soient communs à l'axe de l'élément de référence. La tolérance de coaxialité est le diamètre de la zone cylindrique de tolérance dans laquelle l'axe de l'élément ou des éléments doit se trouver ; l'axe de la zone de tolérance doit coïncider avec l'axe de l'élément de référence.

Symétrie La symétrie est une condition dans laquelle un ou plusieurs éléments sont symétriquement disposés par rapport à un plan central ou médian d'un élément de référence. La tolérance de symétrie est la distance entre deux plans parallèles également disposés par rapport au plan central ou médian de l'élément de référence.

Tolérances géométriques de battement

Battement simple et battement total Le battement est un élément de contrôle qui limite la valeur de la déviation de la forme de l'élément réel par rapport à l'élément de référence lors d'une rotation complète de l'élément autour de son axe. Le battement simple établit la tolérance pour une section de mesure transversale d'une surface, tandis que le battement total est appliqué à la surface totale.

Nous regroupons dans le Tableau D.1 les tolérances géométriques utilisées, ainsi que leurs symboles et la classe de précision que nous avons choisie pour fixer les valeurs de tolérance.

La classe de précision dans les tolérances géométriques ainsi que la valeur de la tolérance dimensionnelle ont été tirées des normes du système ISO (International Organization for Standardization).

Nous avons introduit toutes les tolérances géométriques dans l'ensemble de pièces de la banque de pièces. INSALe Tableau D.2 montre la distribution des tolérances géométriques à travers l'ensemble de pièces avec des surfaces régulières.

	Type de tolérance	Caractéristique	Symbole	Classe de précision
Pour éléments isolés	Forme	Rectitude	—	Moyen (K)
		Planéité	▱	Moyen (K)
		Circularité	○	IT 8
		Cylindricité	⌭	Large (L)
Pour éléments isolés ou associés	Forme	Forme d'une ligne quelconque	⌒	$0.04(mm/m)$
		Forme d'une surface quelconque	⌓	$0.03(mm/m)$
Pour éléments Associés	Orientation	Parallélisme	//	IT 9
		Perpendicularité	⊥	Moyen (K)
		Inclinaison	∠	$0.04(mm/m)$
	Position	Localisation	⌖	Fin (H)
		Coaxialité	◎	Large (L)
		Symétrie	⌯	Fin (H)
	Battement	Battement simple	↗	Fin (H)
		Battement total	⌰	Fin (H)

TAB. D.1: Tolérances géométriques

Tolérance géométrique	*Pièces avec des surfaces simples*									
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}
Rectitude	x								x	
Planéité	x			x			x			
Circularité		x		x	x					
Cylindricité						x			x	x
Forme d'une ligne quelconque		x	x	x						
Forme d'une surface quelconque		x		x	x					
Parallélisme	x						x	x		
Perpendicularité	x						x	x		
Inclinaison	x		x						x	
Localisation		x	x		x	x				
Coaxialité			x		x	x				x
Symétrie		x	x							
Battement simple					x	x			x	x
Battement total						x				x

TAB. D.2: Distribution des tolérances géométriques dans la banque de pièces