

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOD MAMMARI
FACULTE DE GENIE DE CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de
MASTER PROFESSIONNEL EN GENIE MECANIQUE
OPTION : FABRICATION MECANIQUE ET PRODUCTIQUE

DETERMINATION DES ERREURS DE FABRICATION
SUR UNE SURFACE GAUCHE EN UTILISANT LES
OUTILS D'ACQUISITION 3D

Réalisé Par

MEKOUDECHE Riadh
HADDADOU Youcef

Président du jury : Mr M.MOUHALEBI
Encadreur : Mr H.BOUCHEKITFA
Examineur : Mme F.MOUHALEBI
Examineur : Mr SEDJAL

Promotion : 2011/2012

Remerciements

Nous tenons en premier lieu de remercier dieu tout puissant, de nous avoir aidés et donnés courage pour arriver au terme de ce travail, et notamment nos familles qui nous ont soutenus avec tous les moyens pour notre réussite.

Nos remerciements les plus sincères vont à notre promoteur M^r BOUCHENITFA pour ces conseils et orientations qui nous ont été d'un apport précieux durant l'élaboration de notre projet de fin d'étude, ainsi que tous nos enseignants au long de notre cursus, comme nous tenons également à remercier le personnel de la bibliothèque et nos amis et nos camarades de la promotion, ainsi que tous ce qui nous ont aidé de loin ou de près.

Nous remercions chaleureusement les membres du jury qui nous ferons l'honneur d'examiner notre travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

- ♣ *Mes chers parents, que dieu les protège.*
- ♣ *Mes sœurs*
- ♣ *Mes frères*
- ♣ *Toute ma famille*
- ♣ *A mes très chers amis*
- ♣ *A mon collègue Youcef et sa famille*
- ♣ *A toute la promotion 2011 /2012.*

Riadh

Je dédie ce modeste travail à :

- ♣ *Mes chers parents, que dieu les protège.*
- ♣ *Mes frères*
- ♣ *Ma sœur*
- ♣ *Toute ma famille*
- ♣ *A mes très chers amis*
- ♣ *A mon collègue Riadh et sa famille*
- ♣ *A toute la promotion 2011 /2012.*

Youcef

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Outils et techniques d'acquisition 3D	4
I.1. Introduction.....	4
I.2. Avec contact (Palpeur).....	5
I.3. Sans contact	6
I. 3.1 .Triangulation Laser	6
I.3.1.1. Principe de calcul de la profondeur	8
I.3.1.2. Qualité de la numérisation	9
I.3.2. Triangulation laser dans l'infrarouge.....	9
I.3.3. Projection de lumière structuré	10
I.3.3.1. Précision de la méthode	12
I.3.3.2.Limitation.....	12
I.3.4.Mesure de formes 3D par stéréovision ou strioscopie.....	13
I.3.4.1. Principe de la Stéréovision.....	13
I.3.4.2. Calibrage d'un capteur de vision stéréoscopique.....	13
I.3.4.3. Variantes de la méthode.....	14
I.3.4.4. Domaines d'application et performance.....	14
I.4.la Photogrammétrie	15
I.4.1. Le principe de la photogrammétrie	15
I.4.2.Matérialisation des points de mesure	16
I.4.2.1.Cibles rétro-réfléchissantes	16
I.4.2.2.Cibles optiques projetées	16
I.4.3. Applications et précision.....	17
I.5. Machine à mesurer tridimensionnelle (MMT).....	17
I.5.1. Bras robotisé	18
I.5.2. Bras polyarticulé	19
I.6. CONCLUSION.....	20
I.7. Références bibliographique	20
Chapitre II : Méthodes d'association	22
II.1.Introduction	22
II.2. Recalage local et recalage global.....	22
II.3.Méthodes de recalage	22
II.3.1.Mise en correspondance d'éléments géométriques caractéristiques	23
II.3.2.Méthodes par optimisation	23
II.3.3.Méthodes itératives.....	24
II.3.3.1. Méthode mathématique d'association par le torseur des petits déplacements	25
II.3.3.1.1 Calcul des écarts optimisés par le TPD	25
II.3.3.1.2 Optimisation d'un plan	27
II.3.3.1.3 Optimisation d'un cercle	28
II.3.3.1.4. Étude d'un cylindre.....	29
II.3.3.2. Le principe de la méthode ICP (Itérative Closest Point).....	30
II.3.3.2.1 Variantes de l'algorithme ICP original.....	31

II.3.3.2.1.1. la sélection des points à apparier	31
II.3.3.2.1.2. la technique d'appariement	32
II.3.3.2.1.3. la pondération des paires de points appariés.....	33
II.3.3.2.1.4. le rejet des mauvais appariements	33
II.3.3.2.1.5. le type de critère à minimiser et l'algorithme de minimisation.....	34
II.4.Conclusion	35
II.5. Références bibliographiques.....	35
Chapitre III : Techniques et méthode appliquées	37
III.1.Introduction	37
III.2. La création du modèle théorique	38
III.2.Fabrication et acquisition du modèle réel	39
III.3.Association du modèle théorique et nuage de points (par algorithme ICP).....	40
III.4.Algorithme utilisé.....	41
III.4.1. Calcul de la projection de points sur une surface au format STL41	
III.4.1. 1.Calcul de la projection d'un point sur un plan (triangle)	42
III.4.1.2. Vérification de l'appartenance de la projection d'un point à l'intérieur d'un triangle.....	42
III.4.2. Calculer la transformation rigide optimale avec la méthode SVD.....	43
III.5. Programmation et test de performances	43
III.6.exemples d'application.....	44
III.6.1.application sur une pale d'une turbine	44
III.6.2.application sur un cône cintré.....	45
III.6.3.application sur un cône dôme.....	46
III.7.CONCLUSION	47
III.8.Références bibliographiques	47
CONCLUSION GENERALE	48
Références bibliographiques générale	50

Liste des figures

Chapitre I : Outils et techniques d'acquisition 3D

Figure I.1 : Techniques d'acquisition 3D.....	5
Figure I.2 : Détail d'un palpeur.....	6
Figure I.3 : Principe du système de mesure.....	7
Figure I.4 : Principe de calcul des distances de mesure.....	8
Figure I.5 : Système mis en place pour l'acquisition 3D dans l'infrarouge	9
Figure I.6 : Numérisation laser dans l'infrarouge.....	9
Figure I.7 : Principe de base.....	10
Figure I.8 : Différents motifs lumineux en triangulation : (a) point, (b) ligne, (c) motif.....	11
Figure I.9 : Exemple de motifs : grille (a), cercles (b), couleur (c).....	11
Figure I.10 : Principe géométrique	12
Figure I.11 : Intersection des lignes de vues.....	14
Figure I.12 : (a)Calcul en bloc, (b) Calcul de la position et de l'orientation de la caméra	15
Figure I.13 : A gauche, cible rétro-réfléchissante non éclairée A droite, cible rétro-réfléchissante éclairée	15
Figure I.14 : Exemple de cibles projetées par le Prospot (1).....	16
Figure I.15 : MMT de différentes dimensions	17
Figure I.16 : Système d'acquisition sur bras robotisé.....	17
Figure I.17 : Bras polyarticulé	18

Chapitre II : Méthodes d'association

Figure II.1 : Petit déplacement du point M _{thi}	24
Figure II.2 : Optimisation d'un plan	26
Figure II.3 : Optimisation d'un cercle	27
Figure II.3 : Optimisation d'un cercle	28
Figure II.5 : Principales étapes de l'algorithme ICP.....	29
Figure II.6 : Exemple de minimum local lors du recalage, la courbe rouge représente l'erreur de recalage en fonction de la translation initiale sur l'axe de profondeur (Z) des données par rapport au modèle.....	30

Chapitre III : Techniques et méthode appliquées

Figure III.1 : Extrait d'un fichier STL.....	38
Figure III.2 : Extrait d'un fichier ASC	39
Figure III.3 : Le nuage de points associé au modèle de la surface théorique au format STL.....	40

Figure III.4 : Calcul de la projection d'un point P sur Surface au format STL (triangulée) ..	41
Figure III.5 : Projection d'un point sur le plan défini par un triangle	41
Figure III.6 : Calcul des coordonnées du point P' par rapport au repère lié à un triangle	42
Figure III.7 : Le nuage de points associé au modèle de la surface théorique au format STL	43
Figure III.8 : Superposition du nuage de points et du modèle théorique pour une pale	44
Figure III.9: Superposition du nuage de points et du modèle théorique pour un cône cintré	45
Figure III.10: Superposition du nuage de points et du modèle théorique pour un cône dôme	46

Introduction générale

L'amélioration de la performance d'un système de production ne peut se limiter à réduire les dysfonctionnements organisationnels et à la gestion de production, elle doit aussi concerner la fonction conception et inclure la maîtrise de la fonction métrologie, ainsi le contrôle n'est pas exclu par ce développement.

Alors il est besoin de souligner l'importance que revêt la métrologie dans l'industrie moderne, en effet elle a une influence directe les composantes du triangle «qualité, prix et délai» impératifs de l'industrie moderne. Une métrologie précise participe de façon importante à une production industrielle de qualité, ainsi qu'à la protection de la vie humaine ou de l'environnement. Elle joue un rôle important dans les coûts de production, en participant notamment à la recherche d'un équilibre entre le coût des mesures (croissant en fonction de la précision requise), et le coût des dysfonctionnements, des pertes et des rebuts (dont l'augmentation est fonction de l'imprécision des mesures aux différentes étapes de la production).

Dans les laboratoires ou sur les sites industriels, les mesures effectuées requièrent une précision qui dépend de différents paramètres. Des mesures précises sont indispensables pour garantir le bon fonctionnement des assemblages et l'interchangeabilité des pièces mécaniques.

En fabrication mécanique le contrôle des surfaces élémentaires (plan, cylindre, cône, etc...) n'est plus un grand problème sur l'état actuel des moyens de mesure, en revanche le contrôle des surfaces gauches reste à maîtriser. Les contrôles actuels sont essentiellement basés sur l'emploi des Machines à Mesurer Tridimensionnelles. Ces techniques continuent de se développer et leur emploi est de plus en plus industriel.

Ce travail consiste à analyser ces différentes techniques de contrôle et de proposer une méthodologie permettant une mesure exhaustive des défauts géométriques en vue de les associer à la réalisation de la fonction souhaitée.

Nous proposons une solution qui utilise une superposition ou une comparaison numérique entre un modèle CAO représentant la forme idéale théorique recherchée et un modèle obtenu par acquisition représentant la forme réelle réalisée. Cette superposition est obtenue en utilisant un programme informatique réalisé sur la base d'une méthode d'association 3D (figure 1).

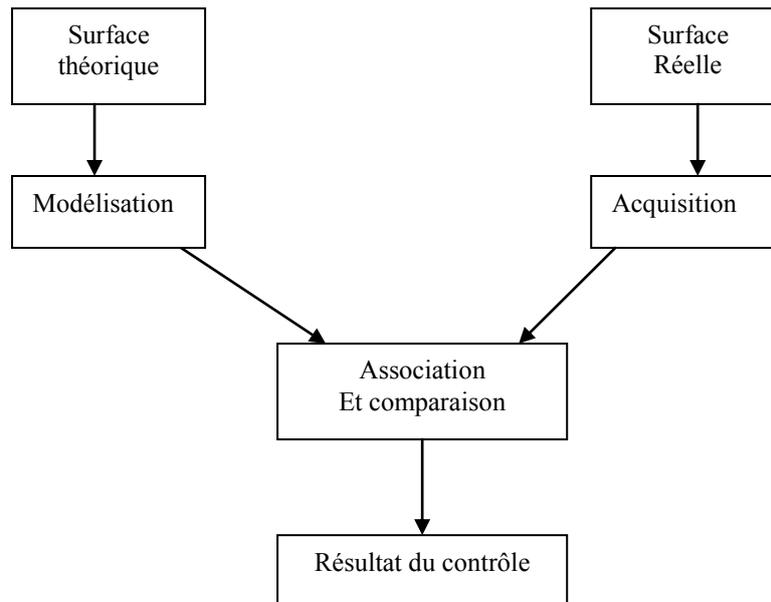


Figure 1. Principe de la solution

Une telle solution doit répondre aux contraintes suivantes :

- Fonctionner avec un maximum d'autonomie.
- Assurer une bonne précision dans un milieu de fabrication.
- Capable de contrôler diverses formes de pièces avec un maximum de précision.
- Suffisamment rapide pour suivre la cadence de la production.
- Capable d'échanger les données et les résultats avec les autres phases du processus.

Le but de la phase d'acquisition est de saisir les données nécessaires pour définir une surface ou une forme 3D, et la reconstruire en cas de besoin. Face à la diversité des applications de l'acquisition 3D il existe actuellement un nombre important de technologie.

Pour faire le bon choix de la technologie à utiliser, les principaux critères sont : la précision, la vitesse d'acquisition, la vitesse de calcul, le poids et l'encombrement, la facilité de mise en place et d'utilisation et bien entendu le coût de l'équipement.

De nombreux travaux ont été réalisés pour le contrôle des surfaces gauches, parmi ces travaux il y a :

BENKAHOUL, K [1] propose le contrôle par MMT au quelle on monte des capteurs avec contact, l'intérêt de ce type de machine est que l'on obtient une grande précision (de l'ordre du μm), mais avec le compromis d'une très grande lenteur.

AZZAM, N [2] propose 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.

PRIETO, L [3] propose un contrôle à l'aide des capteurs sans contacts, car fournissent une rapidité de numérisation de l'objet (de 20000 *point par seconde* avec des précisions de l'ordre de $25\mu m$). Le point faible est la précision largement inférieure des capteurs sans contact par rapport au capteur avec contact.

BOUCHENITFA, H [4] traite l'automatisation de la fonction contrôle, non seulement dans sa phase de détermination des erreurs, mais aussi dans sa phase d'analyse et de traitement de ces erreurs par compensation.

KHEMMAR, R [5] sa contribution porte sur le développement d'un système de vision reposant sur une gestion automatique des traitements permettant une analyse dimensionnelle complète d'une pièce manufacturée incluant des surfaces gauches, et autorisant le contrôle de tête de mesure variées.

DOUADI, L [6] a proposé des solutions pour réaliser le recalage automatique de nuages de points denses et non structurés acquis par un scanner 3D/couleur à haute résolution, en vue de la construction de modèles 3D texturés d'objets complexes, en utilisant l'algorithme ICP (Iterative Closest Point) initialement conçu pour le traitement de données géométriques pures.

Nous avons décomposé notre travail en trois chapitres distincts et complémentaires qui sont :

- Chapitre I : Outils et techniques d'acquisition 3D.
- Chapitre II : Méthodes d'association.
- Chapitre III : Techniques et méthodes appliquées.

Nous terminerons enfin par une conclusion générale.

Chapitre I

Outils et techniques d'acquisition 3D

I.1. Introduction

Le but de la phase d'acquisition est de saisir les données nécessaires pour définir une surface ou une forme 3D, et la reconstruire en cas de besoin. En réponse à la diversité des applications de l'acquisition 3D, il existe actuellement un nombre important de technologies: machine à mesurer, triangulation laser, stéréoscopie ...etc. Parmi ces technologies nous devons choisir la mieux adaptée à notre besoin.

Pour faire le bon choix de la technologie à utiliser, les principaux critères sont : la précision, la vitesse d'acquisition, la vitesse de calcul, le poids et l'encombrement, la facilité de mise en place et d'utilisation et bien entendu le coût de l'équipement [1, 2, 6].

Dans ce chapitre, nous allons présenter les outils les plus généralement utilisés pour l'acquisition de la topologie des surfaces avec systèmes tridimensionnels.

Il est important de noter que la précision globale du système d'acquisition est liée à la précision du capteur, ainsi qu'à la précision du dispositif sur lequel il est monté. La nuance qui existe entre la rapidité de mesure et la rapidité d'acquisition provient du temps nécessaire au traitement des informations, en particulier dans le cas d'une acquisition en plusieurs prises.

On distingue deux grandes familles dans les procédés de numérisation (Figure I.1) [2].

- **Avec contact :**

Le capteur est un palpeur mécanique généralement monté sur une machine à mesurer tridimensionnelle ou un bras articulé. La précision de ce type d'outils peut aller jusqu'au micromètre toutefois les temps de prise de mesure peuvent être relativement longs (1,5 point par seconde pour les palpeurs point par point). Il est à noter que la mise en contact du capteur avec l'objet peut détériorer l'état de surface de l'objet.

• **Sans contact :**

Le capteur n'est jamais en contact avec l'objet à mesurer. Diverses technologies sont disponibles sur le marché : point laser, plan laser, photogrammétrie, Le principal avantage de ces technologies réside dans le temps de prise de mesure (jusqu'à 430000 points par seconde), mais au détriment de la précision (de l'ordre du centième de millimètre).

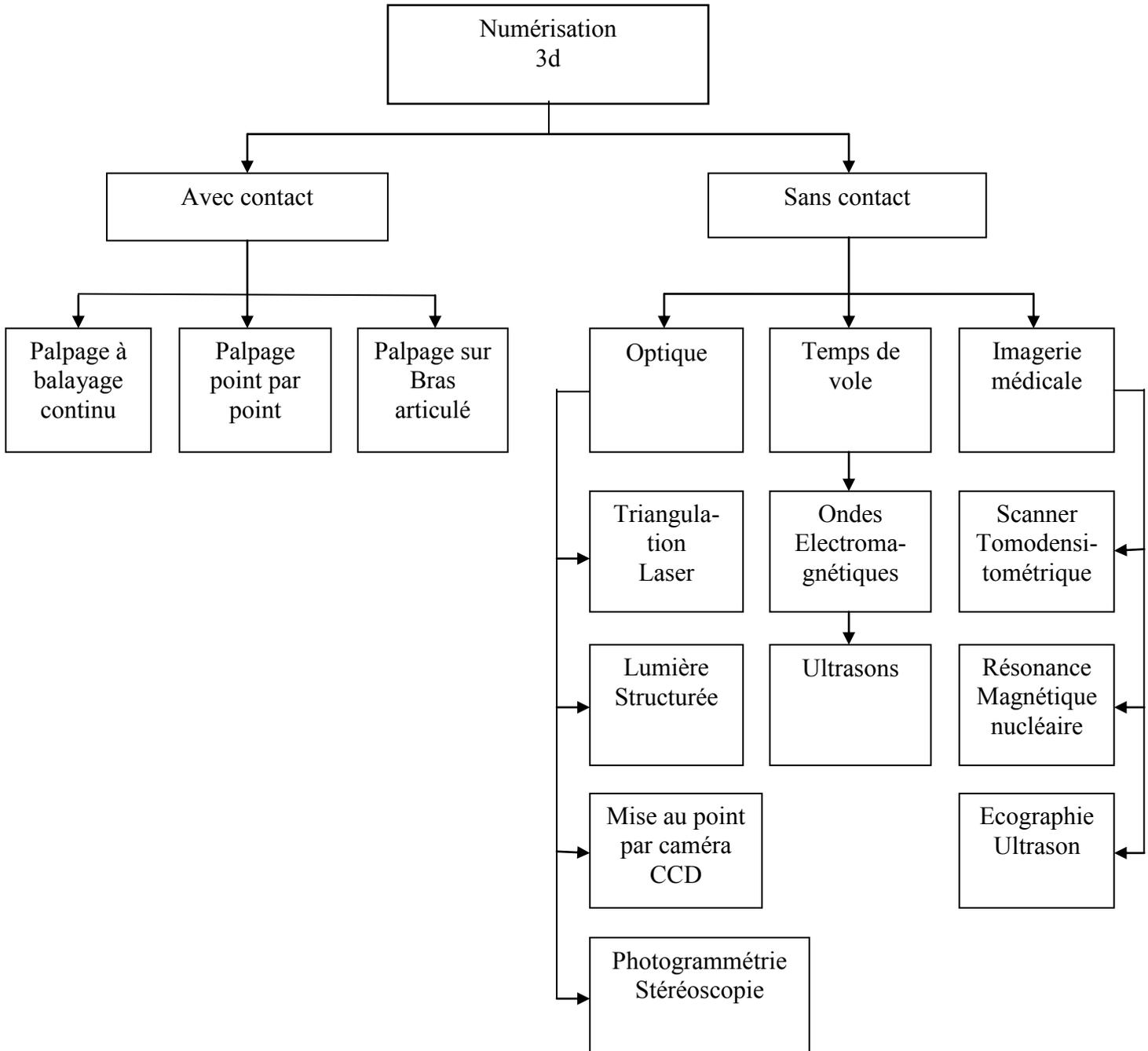


Figure I.1 : Techniques d'acquisition 3D [1,2].

I.2. Procédés de numérisation avec contact (Palpeur)

La technique de mesure 3D la plus précise est l'acquisition au moyen d'un palpeur (Figure I.2). Il existe plusieurs types de palpeurs (palpeur à déclenchement, palpeur résistif, ...) mais la procédure d'utilisation générale reste la même : un signal de déclenchement est généré lors du contact de la bille du palpeur avec l'objet et ce signal provoque la mémorisation de la position de la machine. Cette technique permet d'atteindre une précision de l'ordre du micron, mais celle-ci dépend fortement des performances du système de positionnement utilisé. L'inconvénient majeur est la vitesse d'acquisition, qui est de l'ordre de quelques points par seconde. La mesure par palpeur est utilisée dans l'industrie principalement, pour le contrôle et la rétroconception de pièces mécaniques [3].



Figure I.2 : Détail d'un palpeur

I.3. Procédés de numérisation sans contact

I. 3.1 .Triangulation Laser

L'objectif de la triangulation laser est de reproduire une image tridimensionnelle dans l'ordinateur à travers la localisation dans l'espace d'un point ou d'une droite projetée successivement sur la surface de cet objet.

Les technologies Laser autorisent une acquisition rapide de quelques centaines à quelques milliers de points par seconde avec une précision du dixième au centième de millimètre. Elle fait l'objet de recherches particulières notamment dans le domaine du traitement de l'information. La connaissance d'obstacles, le guidage de robots dans un espace donné. D'une façon plus générale, les différents modes de triangulation Laser peuvent être associés aux différentes machines d'outillage et de fabrication automatisées. Les objets ayant une surface absorbante ou réfléchissante nécessitent un traitement préalable [4].

Un système de mesure par triangulation laser se compose d'un capteur laser qui mesure la position de la projection du laser sur l'objet, si ce dernier et le capteur sont tous les deux fixes. On ne pourra mesurer qu'une seule projection, pour cela nous utilisons un système ou une structure mécanique pour mettre, soit l'objet ou le capteur, en mouvement pour couvrir toute la surface de l'objet. Un logiciel est utilisé à la fin pour calculer les positions réelles des points par rapport à un repère de mesure et ce connaissant la position et l'orientation de la source laser et de la camera CCD. La Figure I.3 montre le principe d'un capteur de profondeur simple. Le faisceau laser passe par un miroir qui l'oriente vers la surface de l'objet. Le capteur photoélectrique ou camera CCD capture et mesure la position de l'image du point lumineux projeté sur l'objet.

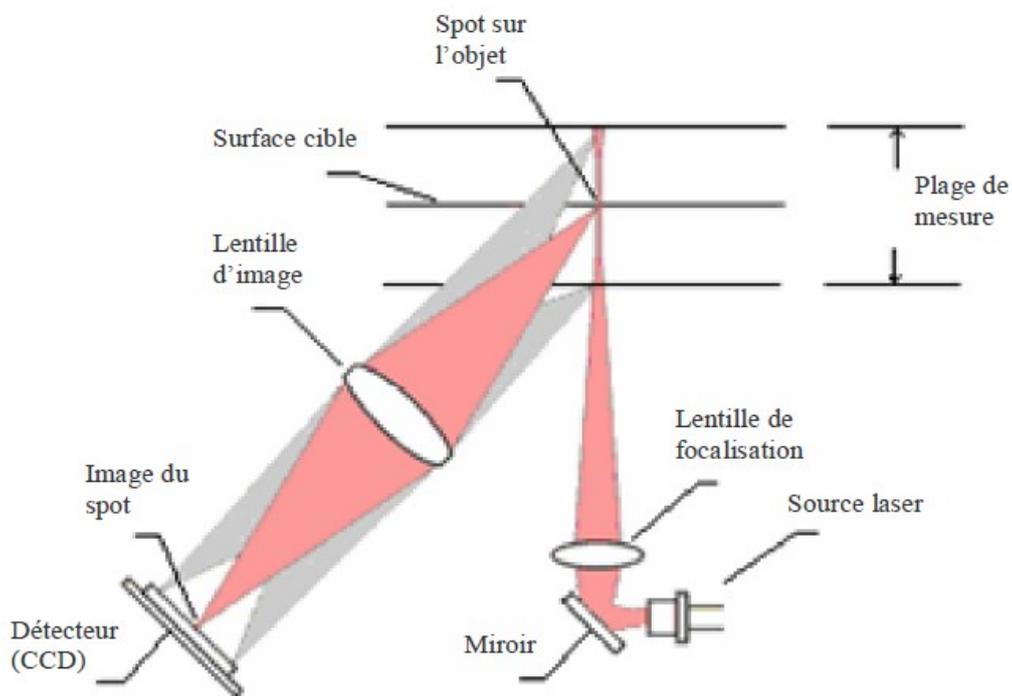


Figure I.3 : Principe du système de mesure [5]

I.3.1.1. Principe de calcul de la profondeur

Selon la Figure I.4 la position de l'image sur le capteur est utilisée pour déterminer sa position réelle sur l'objet avec la Relation suivante :

$$Z = \frac{d \cdot l}{p + l \cdot \tan(\theta)} \quad I.1$$

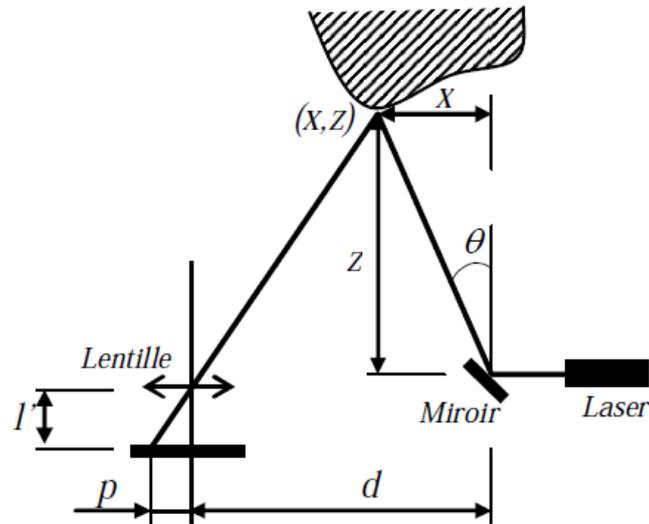


Figure I.4 : Principe de calcul des distances de mesure [1].

Si on suppose que $l' \cong f$ avec f la longueur focale de la lentille z devient :

$$Z = \frac{d \cdot f}{p + f \cdot \tan(\theta)} \quad I.2$$

Et l'erreur absolue sera donnée par :

$$\Delta Z = \left| \frac{z^2}{f \cdot d} \right| \cdot \Delta p \left| \frac{z^2}{d \cdot \cos^2(\theta)} \right| \quad I.3$$

Donc la précision du capteur $1/\Delta z$ est proportionnelle à la distance d est inversement proportionnelle au carré de la distance z [4].

I.3.1.2. Qualité de la numérisation

Pour un système 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 et le problème revient à déterminer le centre de cette lumière. Les lasers émettent une lumière avec un profil gaussien.

Si l'énergie du faisceau est perturbée, la taille et le profil du faisceau sur le capteur seront modifiés [4]. Les sources possibles de perturbation sont :

- La réflectivité de la surface.
- La surface est très réfléchissante.
- La géométrie a des discontinuités.
- Le faisceau lumineux est partiellement occlus.

- La surface est trop rugueuse pour perturber la lumière réfléchie cette perturbation est appelée speckle.

I.3.2. Triangulation laser dans l'infrarouge

Certaines études en cours utilisent la triangulation laser ligne dans l'infrarouge. Le système utilisé est illustré à la (Figure I.5). La pièce est chauffée par une impulsion laser haute puissance et une caméra infrarouge observe la ligne de chaleur sur l'objet (Figure I.6). Cette méthode est particulièrement intéressante pour les objets transparents, où la triangulation laser classique est impossible. Toutefois, plusieurs problèmes sont encore à étudier (temps de refroidissement entre chaque impulsion, diffusion de la chaleur dans certains matériaux ...).

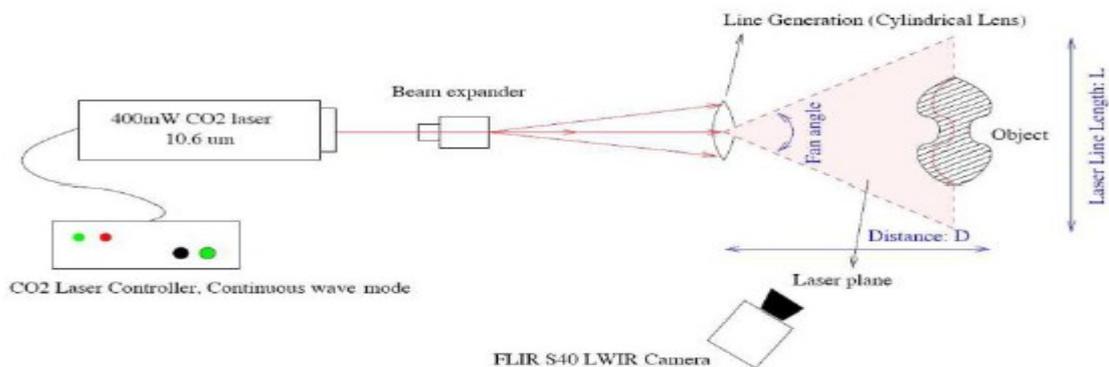
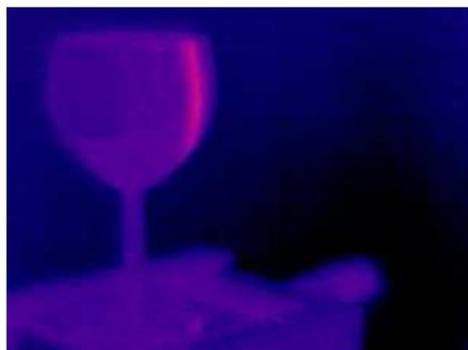


Figure I.5 : Système mis en place pour l'acquisition 3D dans l'infrarouge [3]



Verre à pied



Ligne de chaleur



Reconstruction 3D

Figure I.6 : Numérisation laser dans l'infrarouge.

I.3.3. Projection de lumière structurée

L'acquisition 3D par lumière structurée consiste à projeter un motif lumineux sur le sujet et on observe la déformation. Le motif peut être à une ou deux dimensions. Prenons l'exemple d'une ligne comme motif unidimensionnel.

Elle est projetée sur le sujet à l'aide d'un vidéoprojecteur LCD ou laser. Une caméra légèrement décalée du projecteur, enregistre son éventuelle déformation

(Figure I.7). Un programme informatique complexe sert à calculer les distances des points composant ce motif avec une technique similaire à la triangulation.

Ceci autorise à la fin une mesure d'épaisseur avec un outil de vision 2D [7].

La complexité de cette méthode est due à l'ambiguïté. Prenons un groupe de bandes verticales balayant horizontalement un sujet. Dans le cas le plus simple, l'analyse repose sur la présomption que la séquence des bandes visibles de gauche à droite corresponde à celle de l'image laser projetée, de telle sorte que l'image de la bande la plus à gauche est bien la première de la projection du laser, la suivante est la seconde et ainsi de suite. Dans le cas de cibles non-triviales comportant des trous, des occlusions, des changements de profondeur rapide, cependant, l'ordre n'est plus forcément vérifié du fait que des bandes sont souvent masquées et peuvent même apparaître dans un ordre différent, donnant lieu à une ambiguïté des bandes lasers [8].

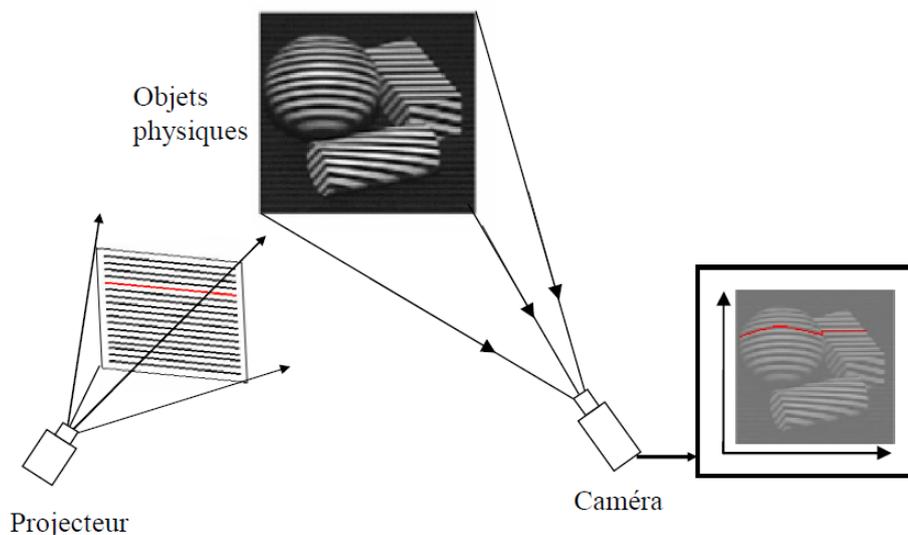


Figure I.7 : Principe de base [1].

Les diverses méthodes de triangulation (décrites dans [9]) peuvent être classées suivant le type du motif lumineux projeté : point, ligne ou motif (Figure I.8).

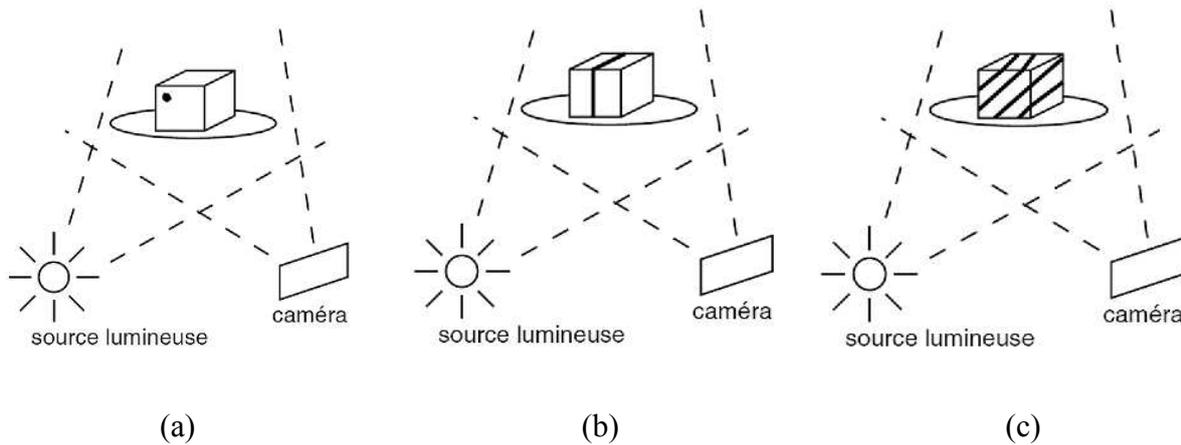


Figure I.8 : Différents motifs lumineux en triangulation : (a) point, (b) ligne, (c) motif

Ces différentes techniques sont décrites et comparées par Salvi [10]. A la différence de la triangulation laser ligne, le motif projeté recouvre entièrement une face de l'objet, ce qui permet l'acquisition immédiate d'une surface.

Il en résulte une plus grande rapidité d'acquisition. Afin d'appliquer la triangulation sur chacun des motifs, la première étape consiste en l'identification de chacune des raies projetées. Cette étape peut entraîner des difficultés lorsque les motifs projetés présentent des discontinuités [11].

Dans le cas de la projection d'un motif couleur, la texture de l'objet peut être acquise en étudiant la différence de teintes entre la couleur émise et la couleur observée [12].

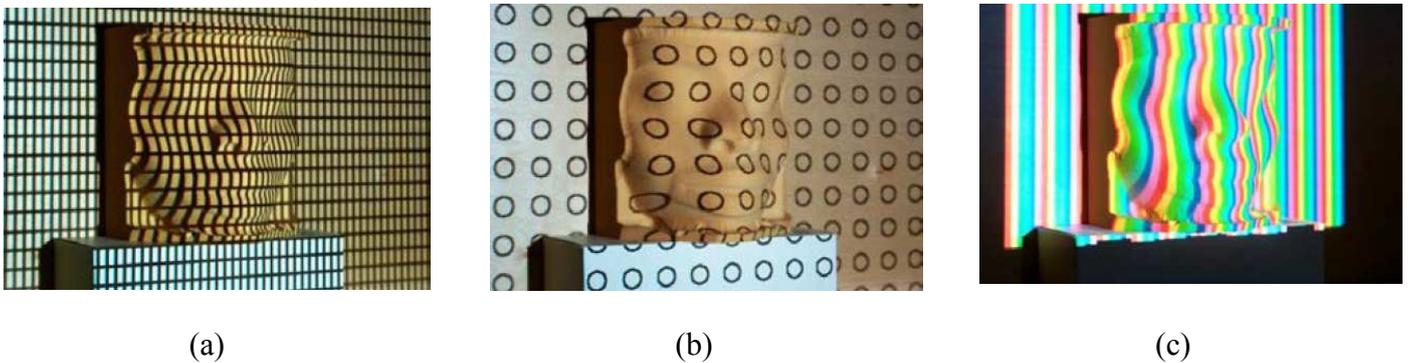


Figure I.9 : Exemple de motifs : grille (a), cercles (b), couleur (c) [13].

I.3.3.1. Précision de la méthode

La résolution de la méthode dépend de l'épaisseur des bandes qui forment le motif projeté et leurs qualités. Cette épaisseur ne peut pas être trop réduite à cause de la profondeur du champ de mesure et la résolution de la caméra. Cette résolution peut être de l'ordre de 11 en utilisant les méthodes basées sur la projection de bandes déphasées.

Les exemples typiques de la précision sont les suivants :

- Planéité de $10\ \mu\text{m}$ pour une surface large de $60\ \text{cm}$.
- La forme d'une chambre de combustion de $2\ \mu\text{m}$.
- Le rayon d'une arête tranchante de $10\ \mu\text{m}$ à $\pm 0.4\ \mu\text{m}$.

I.3.3.2. Limitations

Comme toute autre méthode optique, les surfaces transparentes ou réfléchissantes soulèvent des difficultés qui provoquent des réflexions de lumière pour se projeter loin de son optique.

Les réflexions double peuvent provoquer la superposition de bande indésirable ce qui élimine la possibilité de faire une détection correcte. Les surfaces transparentes et semi-transparentes provoquent des problèmes comparables. Dans ces cas, le revêtement des surfaces avec une laque opaque mince est une pratique courante [1].

I.3.4. Mesure de formes 3D par stéréovision ou strioscopie

L'utilisation d'une seule caméra ne permet d'accéder qu'à une information bidimensionnelle. L'utilisation de deux caméras (technique de stéréovision) permet quant à elle d'accéder à l'information tridimensionnelle.

I.3.4.1. Principe de la Stéréovision

La stéréovision est basée sur le principe que l'information de profondeur peut être obtenue par triangulation à partir de deux caméras (technique de stéréovision) ayant une partie commune dans leur champ de vue, permet quant à elle d'accéder à l'information tridimensionnelle (Figure I.10).

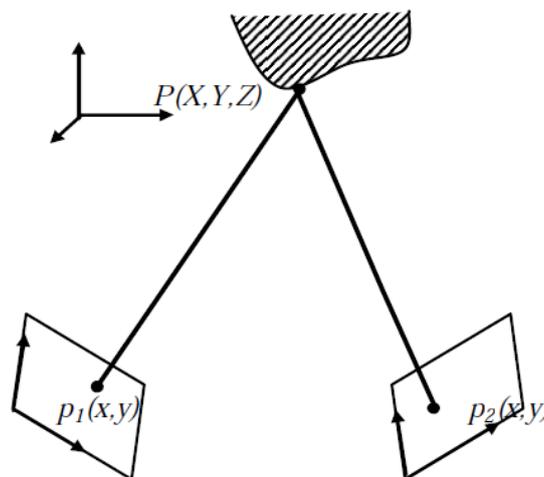


Figure I.10: Principe géométrique [1].

I.3.4.2. Calibrage d'un capteur de vision stéréoscopique

Pour déterminer l'échelle (les dimensions de la pièce), il est nécessaire d'étalonner le système de mesure. Les positions relatives des systèmes de prise de vue sont fixes.

Le calibrage (étalonnage) d'une caméra est une étape importante pour la métrologie dimensionnelle par vision artificielle. Calibrer une caméra consiste à déterminer ses paramètres intrinsèques. Calibrer un capteur de stéréovision, constitué de deux caméras liées de façon rigide, consiste à déterminer les paramètres intrinsèques de chacune des caméras, et la position et orientation relative de ces deux caméras. Ces paramètres de calibrage sont nécessaires pour calculer, par triangulation, les coordonnées tridimensionnelles d'un point correspondant à des pixels appariés dans les deux images. [14] [15].

I.3.4.3. Variantes de la méthode

Un système de mesure par stéréovision plus simple à exploiter peut être constitué en alignant les axes des caméras avec la ligne qui joint leurs centres optiques pour constituer une géométrie épipolaire : l'analyse des concordances peut se faire alors ligne par ligne. Cela conduit à simplifier l'analyse des concordances et réduit considérablement les temps de calcul.

La plupart des systèmes de reconstruction 3D basés sur la lumière structurée utilisent une seule caméra comme capteur, et un projecteur qui émet un ou plusieurs motifs sur la surface observée. Nous utilisons l'analogie suivante avec un système stéréoscopique classique à deux caméras : le projecteur peut être vu comme une caméra pour laquelle l'image de la scène 3D est connue (c'est le motif projeté), et l'autre caméra voit la même scène depuis une autre position.

Ainsi, on peut utiliser toute la famille d'algorithmes disponibles pour la stéréoscopie dense, avec un avantage important : puisqu'on peut choisir le contenu d'une des deux images, on peut facilement obtenir une solution unique au problème de mise en correspondance.

Nous utilisons cette analogie pour calibrer un système à lumière structurée, capable d'acquérir des scènes dynamiques, et pour reconstruire la géométrie 3D et la texture à partir d'une seule image, en utilisant la stéréoscopie par corrélation. Le projecteur éclaire la pièce à mesurer par un réseau de franges qui sont observées par les deux caméras [1].

I.3.4.4. Domaines d'application et performance

De nombreux domaines concernant le comportement mécanique des matériaux posent le problème de la mesure des déplacements ou des déformations. Pour ce type de mesure, les méthodes optiques se sont largement imposées car elles présentent de grands avantages tels que l'absence de contact, une résolution spatiale élevée, et l'obtention d'une information de champ (par opposition à une information ponctuelle).

- Le contrôle dimensionnel
- Analyse de la courbe limite de formage (CLF) lors de l'emboutissage de tôles minces, par exemple dans le domaine de l'automobile.
- Analyse et validation des procédés.
- Validation du design et de la simulation par éléments finis.
- Détermination des caractéristiques de "formabilité".
- Précision sur la mesure de déformation : 1.5%.

I.4.1a Photogrammétrie

I.4.1. Le principe de la photogrammétrie

La photogrammétrie est une technique utilisée en métrologie permettant de réaliser des mesures de coordonnées en trois dimensions à partir de photographies. Le principe de base de la photogrammétrie est la triangulation. Considérons un point sur l'objet, photographié depuis deux positions différentes. Le rayon reliant ce point à l'appareil photo est appelé "ligne de vue". L'intersection des "lignes de vue" (ou triangulation) permet de déterminer la position dans l'espace (en 3 dimensions) du point photographié [16].

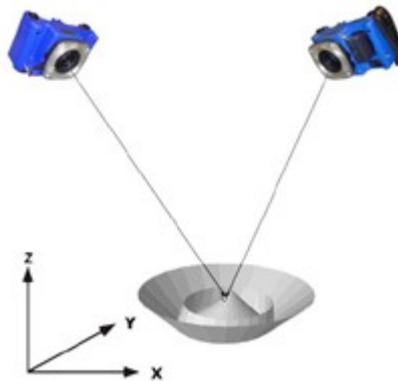


Figure I.11 : Intersection des lignes de vues

En pratique, on prendra plus de deux photographies du point sur l'objet, ce qui améliorera la précision de la mesure. Le calcul de photogrammétrie est appelé calcul de compensation par la méthode des faisceaux (bundle bloc adjustment en anglais). C'est un calcul global qui permet de déterminer simultanément les positions et orientations de la caméra(1) lors des prises de vues, les paramètres de la caméra ainsi que la position des points mesurés.

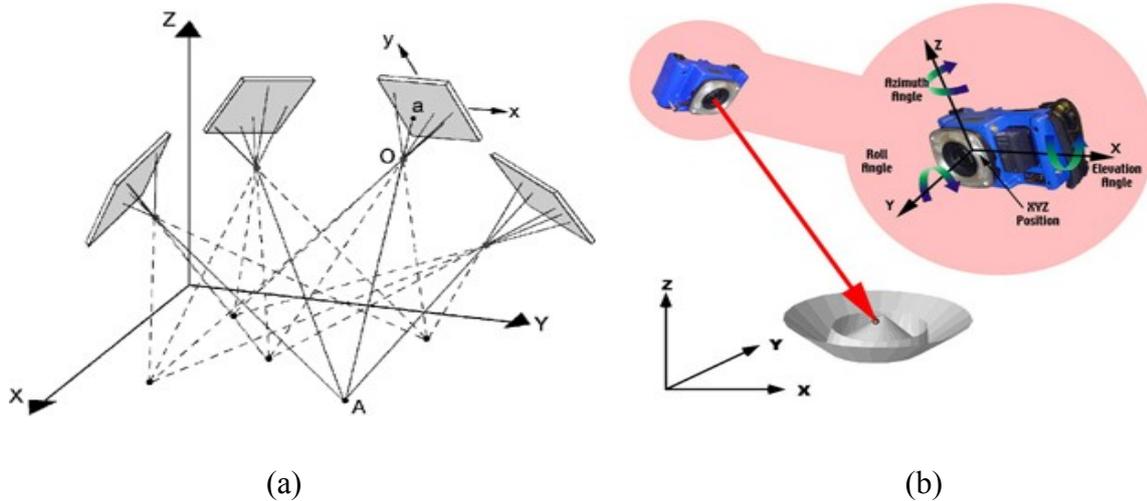


Figure I.12 : (a) Calcul en bloc, (b) Calcul de la position et de l'orientation de la caméra

I.4.2. Matérialisation des points de mesure

Différentes techniques sont utilisées pour matérialiser les points de mesure sur l'objet: cibles rétro-réfléchissantes, cibles optiques projetées, palpeurs et points naturels.

I.4.2.1. Cibles rétro-réfléchissantes

La caractéristique du papier rétro-réfléchissant est qu'il renvoie la lumière vers sa source avec un rendement important. Par exemple, une cible rétro-réfléchissante est 100 à 1000 fois plus efficace qu'une cible traditionnelle noir et blanc pour retourner la lumière. Un flash intégré à la caméra permet d'illuminer les cibles rétro-réfléchissantes pendant les prises de vue. Les images des cibles sur les photographies seront alors plus facilement détectées et mesurées plus précisément. Un autre avantage très important des cibles rétro-réfléchissantes est que l'exposition des cibles devient complètement indépendante de la lumière ambiante. En effet, les photos peuvent être prises dans un environnement très lumineux ou en pleine obscurité sans que l'exposition des cibles soit modifiée.

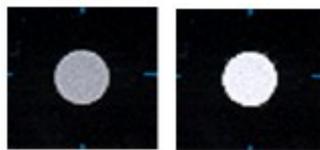


Figure I.13 : A gauche, cible rétro-réfléchissante non éclairée
A droite, cible rétro-réfléchissante éclairée

I.4.2.2. Cibles optiques projetées

Pour projeter des cibles optiques, on utilise le projecteur de lumière. Cet appareil de permet de projeter jusqu'à 40000 cibles optiques de très grande résolution.



Figure I.14 : Exemple de cibles projetées par le Prospot1

Les points non visibles ou cachés aux champs de vision des appareils peuvent être mesurés par des palpeurs de plusieurs formes adaptables à la configuration de l'objet [16].

I.4.3. Applications et précision

La flexibilité du système de mesure par photogrammétrie, sa rapidité d'intervention et son faible coût le rendent extrêmement compétitif par rapport aux machines à mesurer tridimensionnelles classiques et aux lasers de poursuite.

Grâce à ses avantages, la photogrammétrie est utilisée pour contrôler des pièces de moyennes et de grandes dimensions dans les ateliers de production, notamment dans le domaine de l'automobile, de l'aéronautique, ou dans les applications navales et nucléaires. Elle est par exemple utilisée pour :

- Contrôler la géométrie d'un objet
- Comparer le modèle mesuré à la définition numérique
- Mesurer les déformations subies par un objet
- Créer une maquette numérique

Quant au volume de mesure, il n'y a pas de limite théorique, du moment bien sûr que les différentes cibles sont toujours visibles. En revanche, la précision se dégrade avec l'augmentation de la distance. Avec un seul appareil photo, nous pouvons obtenir une précision de 5 μm , auxquels il faut ajouter 5 μm par mètre [1].

II.5. Machine à mesurer tridimensionnelle (MMT)

Les systèmes de positionnement les plus utilisés ces dernières années sont les MMT (Figure I.15). Ces systèmes possèdent trois axes de translations ainsi qu'un poignet pour orienter le capteur. Ils permettent un positionnement très précis avec une excellente répétabilité (de quelques dixièmes de micron). Les capteurs utilisés sur ces systèmes sont soit des palpeurs, soit des têtes d'acquisition laser. Le volume de travail peut varier de 0,5 à 120 mètres cube environ. Afin de garantir la précision de ces systèmes, ils doivent être utilisés en environnement contrôlé (variation de température, humidité, ...) [3].



Figure I.15 : MMT de différentes dimensions [2,3].

Certaines MMT sont également capable de faire de la mesure continue : le palpeur reste en contact avec l'objet et se déplace le long de la surface. Dans ce cas, la précision du système est moindre mais la vitesse d'acquisition est plus élevée. Malgré tout, les palpeurs sur MMT sont utilisés pour du contrôle dimensionnel local (prise de cotes) ou la rétroconception, et non pour une numérisation complète de la pièce.

I.5.1. Bras robotisé

En milieu industriel, ce sont des bras robotisés (Figure I.16) qui permettent le positionnement de systèmes d'acquisition par vue. Leur portée varie de quelques centimètres à quelques mètres. La répétabilité de ces systèmes est de l'ordre d'une centaine de microns.

Depuis quelques années, ces bras peuvent porter des capteurs à triangulation laser. Les données acquises sont tout d'abord recalées grâce aux informations de position du robot, puis un second recalage est effectué en fonction du type de scanner [2,3].

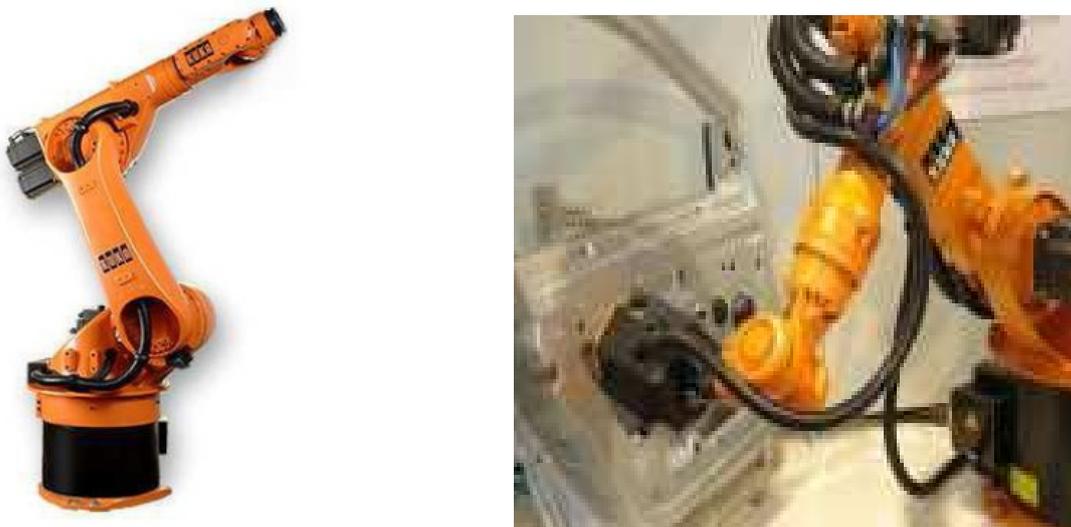


Figure I.16 : Système d'acquisition sur bras robotisé [2,3].

I.5.2. Bras polyarticulé

Les bras polyarticulés sont utilisés pour des applications très variées : contrôle de pièces industrielles, numérisation d'objets archéologique, ... Il s'agit de bras mécanique à six ou sept axes équipés de codeurs permettant de remonter à la position du capteur dans l'espace. Ces bras ont une grande ergonomie, sont assez simple d'utilisation et sont transportables. Leur portée varie de un à cinq mètres. La précision est de l'ordre de quelques centaines voire dizaines de microns. Ils sont utilisés avec un palpeur ou une tête Laser (Figure I.17), ce qui permet de réaliser simultanément l'acquisition complète de la forme et la prise de référence (plans, cylindres, ...). Lors du palpement, l'opérateur vient positionner la bille du palpeur sur la surface de l'objet et déclenche manuellement la prise de mesure. Ces systèmes sont de plus en plus couramment utilisés de nos jours. La précision reste toutefois inférieure à celle d'une MMT [2,3].



Figure I.17 : Bras polyarticulé

I.6. CONCLUSION

Différentes techniques ont été présentées dans ce chapitre chacune ayant ses avantages et ses inconvénients. Le choix d'une technique dépend du domaine d'application et des performances recherchées. Pour les grandes précisions l'utilisation d'une MMT équipée de palpeurs à contact s'impose, mais pour une grande vitesse d'acquisition pour des pièces déformables, l'idéal c'est d'utiliser les techniques optiques par scanning ou par vision. Pour tirer profits des différentes techniques certains fabricants proposent actuellement des machines multicateurs capables d'effectuer deux ou trois types de mesures.

I.7. Références bibliographiques

[1] **BOUCHENITFA, H.** Contribution à la détermination et à l'analyse des sources d'erreurs en vue d'une maîtrise des procédés de fabrication, thèse de doctorat, Université MENTOURI Constantine, juin 2010.

[2] **AZZAM, N.** Mise en place d'un modèle d'inspection des surfaces à géométries complexes en vue d'une correction process : application à l'usinage des prothèses par prototypage rapide, Mémoire de magister, Université MENTOURI Constantine, mai 2010.

[3] **LORIOT, B.** Automatisation de l'acquisition et des post-traitements en numérisation 3D. Le Creusot, France. 2009.

[4] **PRIETO, L.** Métrologie assistée par ordinateur : Apport des capteurs 3D sans contact, thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1999.

[5] <http://www.laser-ndt.com/profilometry.html>

[6] **Moron, V.** Mise en correspondance de données 3D avec un modèle C.A.O : application à l'inspection automatique, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, décembre 1996.

[7] <http://www.evasion.inrialpes.fr/people/Lionel.Reveret/M2R07/M2Rscanner.html>

[8] http://fr.wikipedia.org/wiki/Scanner_3D

[9] **Forest, J.** New Methods For Triangulation-Based Shape Acquisition Using Laser Scanners. PhD thesis, Universitat de Girona, Girona, Espagne, 2004.

[10] **Salvi, J., Pages, J., and Batlle, J.** A review of recent range image registration methods with accuracy evaluation. *Image and Vision Computing*, 25(5):578–596, 2007.

[11] **Robinson, A., Alboul, L., and Rodrigues, M.** Methods for indexing stripes in uncoded structured light scanning systems. *Journal of Winter School of Computer Graphics*, 12(1-3), 2004.

[12] **Lathuiliere, A.** Génération de mires colorées pour la reconstruction 3D couleur par système stéréoscopique de vision active. Thèses de PhD, Université de Bourgogne, Le Creusot, France, 2007.

[13] **Beraldin, J.-A., Blais, F., Cournoyer, L., Godin, G., and Rioux, M.** Active 3d sensing. In *Modelli E Metodi Per Lo Studio E La Conservazione Dell'Architettura Storica*, volume 10, pages 22–46, Pisa, Italie, 2000.

[14] **GARCIA, D.** Mesure de formes et de champs de déplacements tridimensionnels par stéréocorrélation d'images. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 21 déc. 2001

[15] **GARCIA, D., ORTEU J.J., DEVY M.** Accurate Calibration of a Stereovision Sensor for 3D Metrology Applications. *Image and Vision Computing*, Elsevier Science (à paraître).

[16] <http://www.geodesie-maintenance.com/fr/photogrammetrie.php>

Chapitre II

Méthodes d'association

II.1.Introduction

La construction d'un modèle 3D comporte trois étapes : l'acquisition d'un ensemble d'images 3D sous différents points de vue, leur recalage dans un repère unique, la simplification des données obtenues pour éliminer les redondances résultant du recouvrement des images et le calcul d'une représentation surfacique de l'objet.

Pour numériser complètement un objet ou une scène 3D il faut acquérir, sous des points de vue différents, un ensemble d'images qui se recouvrent partiellement. Le nombre de vues nécessaires dépend de la complexité et de la taille de l'objet, mais également de la résolution du capteur. On obtient donc un ensemble d'images qu'il faut recaler. Ainsi, un scanner 3D fournit des nuages de points non structurés qu'il faut ramener dans un repère unique. Lorsque ces images sont recalées deux par deux on parle de recalage local, lorsqu'elles sont recalées toutes ensemble, il s'agit d'un recalage global

II.2. Recalage local et recalage global

La construction du modèle 3-D d'un objet nécessite le recalage de plusieurs vues. Pour recalcr l'ensemble de ces vues dans un référentiel unique, on peut utiliser soit une approche locale soit une approche globale [1].

- **Le recalage local**

Consiste à recalcr les différentes vues deux par deux. Ainsi, pour un modèle composé de N vues, il faut recalcr successivement $N-1$ paires d'images. Cette approche a l'inconvénient de ne pas prendre en compte toutes les interactions entre les divers recouvrements mutuels des différentes surfaces ; en effet chaque vue chevauche généralement plusieurs autres vues. Un autre inconvénient de cette approche est que les erreurs de recalage par paires se propagent de surface en surface.

- **Le recalage global**

Contrairement au recalage local, prend en considération toutes les vues disponibles à la fois. Il prend en compte tous les recouvrements possibles entre les différentes vues. Il permet une meilleure distribution des erreurs résiduelles entre les différents recouvrements.

II.3.Méthodes de recalage

Ces méthodes sont classées en trois catégories : méthodes basées sur la mise en correspondance de caractéristiques, méthodes par optimisation et méthodes itératives. Cette classification, inspirée par celle proposée par Chen et al, n'est pas unique et ne répertorie pas la totalité des méthodes de recalage existantes.

II.3.1.Mise en correspondance d'éléments géométriques caractéristiques

Cette catégorie de méthodes de recalage est basée sur l'extraction de points d'intérêt ou d'éléments géométriques remarquables dans la surface ou le modèle à recaler. Pour ces points ou ces éléments 3D on calcule ensuite un ensemble de caractéristiques géométriques qui permettront de les identifier et de les comparer. Nous avons vu que de telles caractéristiques 3D pouvaient être utilisées dans certaines variantes d'ICP et qu'elles étaient alors calculées pour tous les points examinés pendant la phase de mise en correspondance [5,6]. Ici, ces caractéristiques sont calculées pour des éléments particuliers de l'image 3D (points d'intérêt). La mise en correspondance est donc basée sur une mesure de ressemblance entre ces caractéristiques. Pour que la mise en correspondance soit robuste, celles-ci doivent rester invariantes au déplacement du capteur pendant l'acquisition des différentes vues à recaler. On parle alors d'"invariants" géométriques [7,8].

Les méthodes basées sur la mise en correspondance d'éléments géométriques remarquables ont l'avantage de ne nécessiter aucune connaissance a priori d'une approximation de la transformation à estimer. Mais elles présentent deux inconvénients majeurs:

- elles ne permettent pas de recaler des images 3D qui ne contiennent pas d'éléments remarquables,
- Le calcul des vecteurs d'invariants 3D pénalise souvent le temps d'exécution.

II.3.2.Méthodes par optimisation

Les méthodes par optimisation fournissent un recalage (ou une estimation de la transformation de repère) "optimal" en minimisant une fonction d'erreur par des techniques de minimisation telles que les moindres carrés. Nous pouvons citer, comme méthode classique d'optimisation, l'algorithme de Levenberg-Marquardt (LM), utilisée par Fitzgibbon dans [19].

Blais et Levine [20] utilisent une méthode par optimisation pour le recalage de deux nuages de points 3D. La fonction d'erreur utilisée est la distance euclidienne entre les points dits de contrôle d'une image avec ceux de la deuxième. Les points de contrôle sont des points sélectionnés de façon aléatoire dans chaque nuage de points à recaler. L'algorithme d'optimisation utilisé pour trouver le minimum global de la fonction d'erreur est le recuit simulé VFSR (Very Fast Simulated Reannealing), algorithme connu pour sa robustesse aux minimums locaux. Parmi ces méthodes d'optimisation nous pouvons, également, citer les méthodes du simplexe.

Les méthodes d'optimisation non linéaire classiques nécessitent, en général, la connaissance d'une transformation initiale proche de la transformation réelle. Elles ne convergent pas de manière certaine vers un minimum global.

Il existe des méthodes d'optimisation non linéaires plus appropriées au problème de mise en correspondance telles que la décomposition en valeurs singulières, la méthode des quaternions, la méthode des quaternions doubles ou encore les réseaux de neurones artificiels (réseaux de Kohonen). Ces derniers présentent l'avantage de garantir une solution, et d'être très adaptatifs; leur inconvénient réside dans la longue phase d'apprentissage.

La méthode RANSAC (random sample consensus) développée par **Fischler et Bolles [21]** a été utilisée pour recalibrer un modèle sur des données expérimentales bruitées. Elle peut être utilisée pour mettre en correspondance deux nuages de points 3-D, afin d'estimer ensuite la transformation rigide entre ces deux ensembles. Sa particularité est qu'elle ne traite pas toutes les données disponibles en même temps mais plutôt des échantillons sélectionnés de manière aléatoire sur l'ensemble des données.

Chu-Song Chen et al [22] proposent une extension de cette méthode pour effectuer une mise en correspondance efficace et rapide. Cette méthode est appelée RANSAC-based DARCES. Son avantage par rapport aux autres méthodes d'optimisation est qu'elle ne nécessite ni extraction de primitives ni pré-modélisation. Un autre avantage très important est que cette méthode n'utilise aucune estimation initiale de la transformation.

II.3.3.Méthodes itératives

Ces méthodes sont les plus utilisées pour résoudre le problème du recalage de données 3D. Nous pouvons citer l'algorithme ICP (Iterative Closest Point) proposé par Besl et McKay [2] qui reste l'une des méthodes les plus utilisées pour recalibrer des données 3D sur un modèle 3D. Cet algorithme fonctionne avec des ensembles de points 3D, mais aussi avec des données 3D plus complexes : segments de droites, courbes, surfaces ... Basé sur la recherche du point le plus proche, il calcule, de façon itérative, la matrice de transformation à six degrés de liberté permettant d'effectuer le recalage.

II.3.3.1. Méthode mathématique d'association par le torseur des petits déplacements

Pour résoudre le problème d'association sous contrainte d'une surface quelconque à un nuage de points, on utilise le concept de torseur de petits déplacements, ce dernier a été développé à l'ENS de Cachan (France) au début des années 1970. Ce concept général a été ensuite utilisé dans de nombreuses applications et plus particulièrement dans de nombreux logiciels de machines à mesurer à coordonnées (PROMESUR, PERCEVAL, MESTRID, Logiciel de référence du BNM, MARLEN, PRELUDE, METROLOG II,...etc.) et dans des logiciels de simulation cinématique des mécanismes avec prise en compte des défauts (Chaînes de cotes 3D, Mecamaster ...etc.)[23].

Le petit accroissement de position d'un solide est caractérisé en un point O par un

vecteur translation $\vec{D}_0(u,v,w)$ et un matrice de rotation $R(\alpha,\beta,\gamma)$ liés par la relation :

$$\vec{D}_M = \vec{D}_0 + \vec{OMAR} \tag{II.1}$$

Le couple de vecteurs : $\{\vec{D}_0, \vec{R}\}$ (vecteur de déplacement en un point O , et matrice de rotation), et la formule fondamentale $\vec{DM} = \vec{D}_0 + \vec{OMAR}$ (permettant de calculer le vecteur translation d'un point M quelconque du solide) constituent un torseur que l'on appellera dans ce cas TPD.

II.3.3.1.1 Calcul des écarts optimisés par le TPD

Pour mieux placer l'élément géométrique au milieu de l'ensemble des points mesurés il suffit de lui faire subir un petit déplacement à partir de sa position initiale, ce déplacement

peut être exprimé en un point O par un TPD $[T_0]$ $\left\{ \begin{array}{l} \vec{R} \\ \vec{D}_0 \end{array} \right.$ ou \vec{R} représente la petite rotation

et \vec{D}_0 la petite translation du point O . Les écarts suivant les normales \vec{n}_i entre les points mesurés M_i et les points théoriques M_{thi} correspondants sont :

$$\xi_i = \vec{M}_{thi} \vec{M}_i \vec{n}_i \tag{II.2}$$

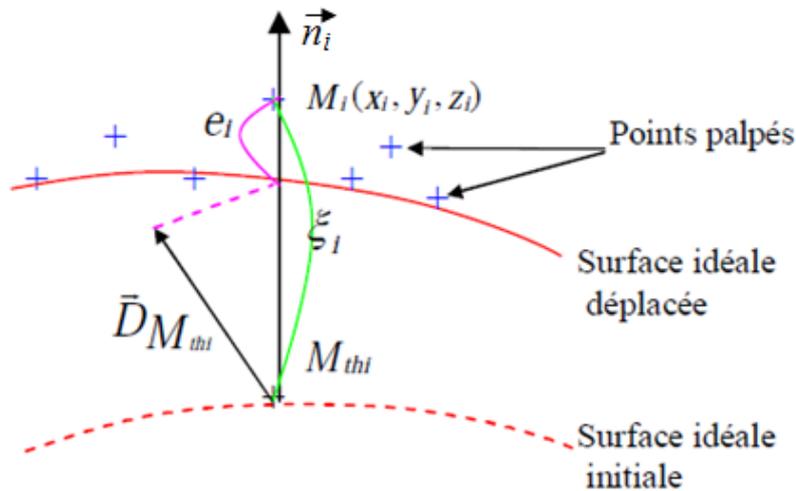


Figure II.1 : Petit déplacement du point M_{thi}

En faisant l'hypothèse d'un petit déplacement, l'écart optimisé e_i sera égal à l'écart ξ_i diminué du déplacement $\vec{D}_{M_{thi}}$ du point théorique M_{thi} projeté sur la normale théorique \vec{n}_i

L'écart ξ_i étant défini pour une taille donnée de l'élément géométrique initial, une variation δt de la taille donne au point M_i mesuré un écart de la forme $\xi_i - \delta t$, par suite l'écart optimisé est de la forme (Figure II.1) :

$$e_i = \xi_i - \delta t - \vec{D}_{M_{thi}} \cdot \vec{n}_i$$

En remplaçant $\vec{D}_{M_{thi}}$ par son expression en terme de torseur de petit déplacement, on trouve :

$$e_i = \xi_i - (\vec{D}_o \cdot \vec{n}_i + (\vec{OM}_{thi} \wedge \vec{n}_i) \cdot \vec{R})$$

En posant $[P_i]_o$ le torseur des coordonnées Plückeriennes de la normale \vec{n}_i au point O on obtient :

$$e_i = \xi_i - ([P_i]_o \cdot [T_o]) \quad \text{avec : } [P_o] = \begin{cases} \vec{n}_i \\ \vec{OM}_{thi} \wedge \vec{n}_i \end{cases} \quad \text{et } [P_o] = \begin{cases} \vec{R} \\ \vec{D}_o \end{cases}$$

Il est alors possible de rechercher le petit déplacement significatif $[T]_o$ permettant de satisfaire au mieux un critère d'optimisation.

Pour un critère des moindres carrés, nous formons la fonction $W = \sum e_i^2$ et l'on résout le système d'équations linéaires formé par les dérivées partielles de W par rapport aux composantes du TPD et des paramètres intrinsèques de la surface ou de la ligne [24].

$$W = \sum_{i=1}^n (\xi_i - ([P_i]_o \cdot [T_o])) \quad \text{II.3}$$

$$\frac{\partial W}{\partial \alpha} = 0, \frac{\partial W}{\partial \beta} = 0, \frac{\partial W}{\partial \gamma} = 0, \frac{\partial W}{\partial u} = 0, \frac{\partial W}{\partial v} = 0, \frac{\partial W}{\partial w} = 0$$

II.3.3.1.2 Optimisation d'un plan

$$\xi_i = M_i - M_{thi} \tag{II.4}$$

$$[T] \begin{cases} \alpha \\ \beta \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ w \end{cases} \begin{matrix} \rightarrow R \\ \\ \rightarrow D \\ \end{matrix}, [p] \begin{cases} 0 \\ 0 \\ 1 \\ Y_i \\ -X_i \\ 0 \end{cases} \begin{matrix} \rightarrow n_i \\ \\ \\ \end{matrix} \text{ avec } \vec{OM}_i \begin{cases} X_i \\ Y_i \\ 0 \end{cases} \text{ et } \vec{n}_i \begin{cases} 0 \\ 0 \\ 1 \end{cases}$$

$$e_i = \xi_i - (\alpha Y_i - \beta X_i + w) \tag{II.5}$$

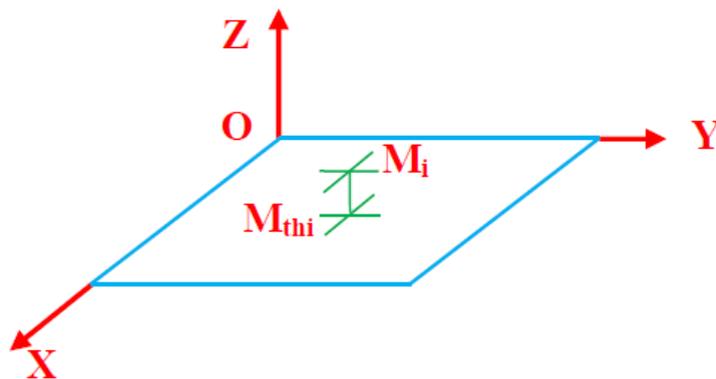


Figure II.2 : Optimisation d'un plan

II.3.3.1.3 Optimisation d'un cercle

$$\xi_i = M_i - M_{thi} \quad II.6$$

$$[T] \begin{cases} 0 \\ 0 \\ 0 \\ u \\ v \\ 0 \end{cases} \begin{matrix} \vec{R} \\ \\ \\ \vec{D} \end{matrix}, [p] \begin{cases} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{cases} \begin{matrix} \vec{n}_i \\ \\ \\ \vec{OM}_i \wedge \vec{n} \end{matrix}, \vec{OM}_i \wedge \vec{n}_i \text{ et } \vec{n}_i \text{ sont colinéaires}$$

$$E_i = \xi_i - (u \cos \theta_i + v \sin \theta_i) \quad II.7$$

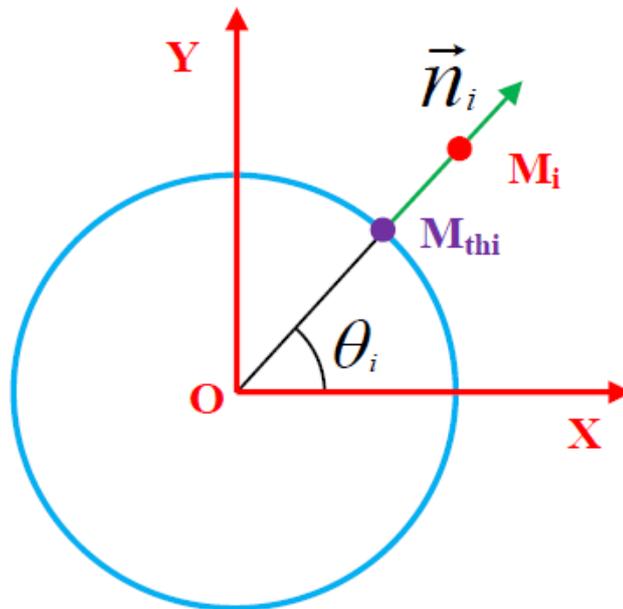


Figure II.3 : Optimisation d'un cercle

II.3.3.1.4. Étude d'un cylindre

$$\xi_i = M_i - M_{thi} \tag{II.8}$$

Recherche de la fonction à minimiser e_i

$$[T] \begin{cases} 0 \\ 0 \\ 0 \\ u \\ v \\ 0 \end{cases} \begin{matrix} \vec{R} \\ \\ \\ \vec{D} \end{matrix}, \quad [p] \begin{cases} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \\ 0 \\ -Z_i \sin \theta_i \\ Z_i \cos \theta_i \\ 0 \end{cases} \begin{matrix} \vec{n}_i \\ \\ \\ \vec{OM}_i \wedge \vec{n}_i \end{matrix}$$

avec $\vec{OM}_i \begin{cases} R \cos \theta_i \\ R \sin \theta_i \\ Z_i \end{cases}$ et $\vec{n}_i \begin{cases} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \\ 0 \end{cases}$

$$e_i = \xi_i - (u \cos \theta_i + v \sin \theta_i - \alpha Z_i \sin \theta_i + \beta Z_i \cos \theta_i) \tag{II.9}$$

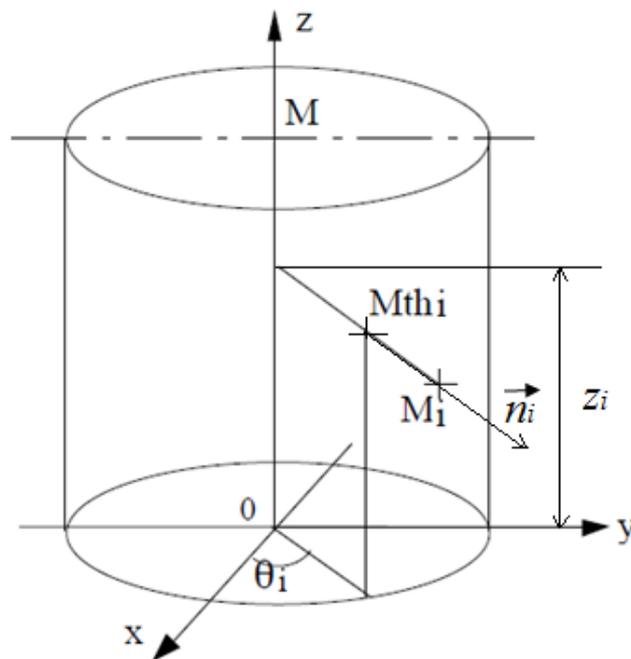


Figure II.4 : Optimisation d'un cylindre

II.3.3.2. Le principe de la méthode ICP (Itérative Closest Point)

L'ICP est une méthode précise et fiable pour la mise en correspondance de surfaces gauches. Le but de l'ICP est de trouver la transformation rigide qui va correspondre au mieux un nuage de points P et un modèle géométrique M . Le processus d'alignement tente de minimiser la somme des carrés des distances entre les points du nuage et leurs correspondants appartenant au modèle (Figure II.5). L'ICP est efficace, elle converge d'une façon monotone vers un minimum local (figure II.6). Pour chaque itération l'algorithme calcule la correspondance en cherchant les points les plus proches, puis il minimise l'erreur des moindres carrés entre les points correspondant [3].

L'algorithme ICP de base :

1. Choisir ou déterminer une transformation initiale T .
2. Appliquer la transformation sur l'ensemble des points P .
3. Calculer la projection des points sur la surface du modèle M .
4. Calculer la transformation rigide T optimale au sens des moindres carrés [4], amenant les points vers leurs projection ou l'inverse
5. Répéter les étapes de 2 à 4 jusqu'à atteindre la convergence.

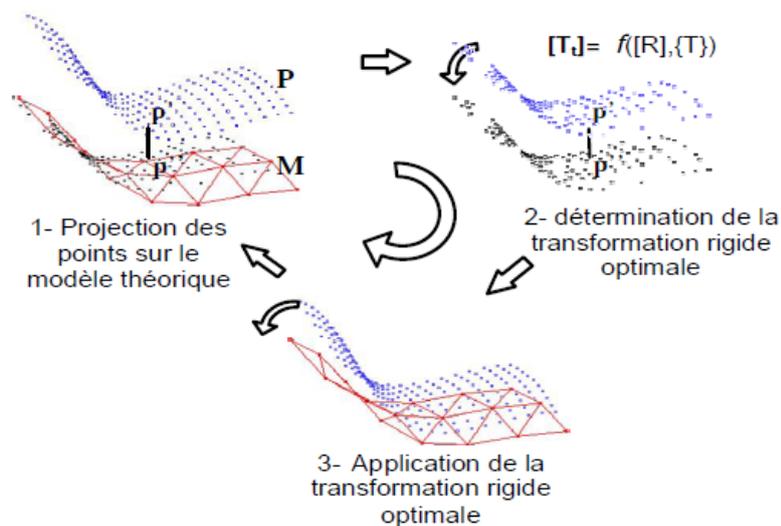


Figure II.5: Principales étapes de l'algorithme ICP.

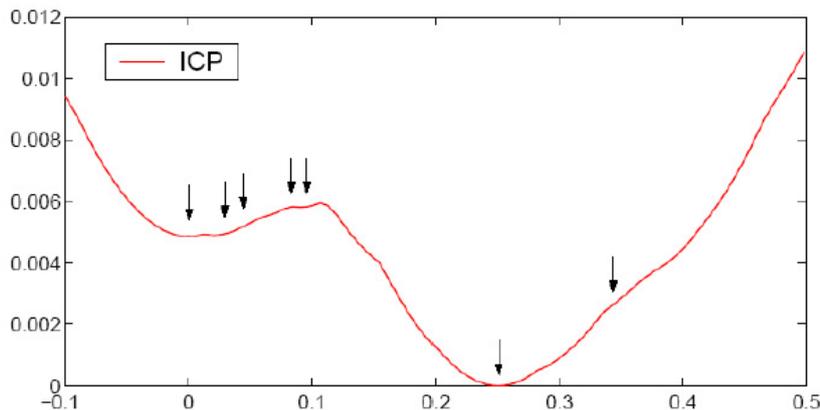


Figure II.6 : Exemple de minimum local lors du recalage, la courbe rouge représente l'erreur de recalage en fonction de la translation initiale sur l'axe de profondeur (Z) des données par rapport au modèle [25].

II.3.3.2.1 Variantes de l'algorithme ICP original

Il existe plusieurs variantes de cet algorithme. En effet, de nombreuses améliorations ont été apportées pour chaque étape de celui-ci.

Rusinkewitz & Levoy [9], proposent une étude comparative de plusieurs variantes de ICP. Ces dernières concernent des améliorations apportées à chaque étape de cet algorithme. A partir de cette étude, les auteurs ont pu proposer une variante optimisée de ICP dans le but d'améliorer la vitesse de convergence de l'algorithme.

Les variantes de ICP diffèrent au niveau des points suivant :

1. la sélection des points à appairer (échantillonnage des données, sélection des points de contrôle)
2. la technique d'appariement utilisée
3. la pondération des paires de points appariés
4. le rejet des mauvais appariements
5. le type de critère à minimiser et l'algorithme de minimisation utilisés pour l'estimation de la transformation.

II.3.3.2.1.1. la sélection des points à appairer

La façon dont sont sélectionnés les points en entrée de ICP peut avoir un impact sur la convergence de celui-ci. Est-il préférable de traiter toutes les données disponibles ou faut-il les échantillonner ?

Il existe plusieurs approches pour sélectionner ces points.

Masuda et al [10] utilisent un échantillonnage aléatoire pour améliorer la robustesse de l'algorithme aux faux appariements.

Seung-Hwan Kim et al [11], proposent une version de ICP utilisant un sous échantillonnage des points suivant la direction radiale à partir du centre de gravité de l'ensemble de points à échantillonner. Les auteurs montrent que leur algorithme est aussi efficace que ICP classique (sans échantillonnage), et a l'avantage d'être considérablement plus rapide.

Rusinkewitz & Levoy [9] montrent, à travers plusieurs approches étudiées, qu'il est plus intéressant d'échantillonner ces points selon l'orientation de leurs normales, au lieu d'effectuer un tirage aléatoire sur l'ensemble des données.

Il est préférable de trier, d'abord, et regrouper dans des ensembles différents ces points en fonction de l'orientation de leurs normales. Ensuite, un échantillonnage uniforme est effectué sur chaque ensemble.

II.3.3.2.1.2. la technique d'appariement

La convergence de ICP dépend beaucoup de la qualité des appariements utilisés. En effet, La présence de faux appariements, dans le meilleur des cas, ralentit la convergence de l'algorithme et peut, au pire des cas, causer sa divergence.

Pour cela il existe plusieurs critères qui ont été proposés par des auteurs

- Utilisation de la distance géométrique euclidienne "classique", mais cela reste insuffisant pour établir des appariements relativement corrects et nécessaires à la convergence de ICP.
- Utilisation de la couleur en introduisant la notion des plus proches points compatibles [12], Dans ce cas, les points sont classés une première fois selon leurs distances couleur qui ne doit pas dépasser un certain seuil, ensuite parmi ces points qu'on appelle compatibles calculer les points les plus proches en utilisant une distance géométrique
- Les données photométriques constituent une information supplémentaire intéressante pour améliorer la qualité des appariements. Il est possible de les intégrer en utilisant une distance mixte comportant un terme de distance couleur et un terme de distance euclidienne [13], au lieu de la distance classique.

II.3.3.2.1.3. la pondération des paires de points appariés

La pondération des couples de points appariés a pour objectif de renforcer l'apport des appariements supposés être corrects et atténuer l'effet des faux appariements.

Timothée Jost [12], considère deux types de pondérations possibles

- Une pondération binaire où le poids affecté vaut un lorsque l'appariement est considéré correct sinon ce poids prend la valeur nulle. Ceci revient à rejeter les appariements considérés être faux.
- Le second type de pondération revient à ne pas considérer les appariements comme étant soit exclusivement "correct" ou exclusivement "faux", mais à considérer, également, les couples de points dont la qualité de l'appariement se situe entre les deux catégories.

Luck et al [14], utilisent une version de l'algorithme ICP avec une pondération des paires de points appariés basée sur la médiane des carrés des distances entre ces points.

II.3.3.2.1.4. le rejet des mauvais appariements

Il est très important de rejeter les appariements supposés faux. Ceux-ci induisent en erreur les estimateurs par moindres carrés. La difficulté réside dans la définition même d'un "mauvais appariement". Sur quel critère se baser pour décider qu'un appariement est faux ? La façon la plus basique d'éliminer ces points, est d'utiliser un seuil fixe de distance géométrique ou mixte (comportant un terme photométrique). Ce seuil serait difficile à fixer dans le cas de ICP, étant donné que d'une itération à l'autre la distance moyenne entre les points appariés est sensée décroître.

Il est possible d'utiliser un seuil adaptatif statistique comme dans

- **Zhang [15]**, Le seuil proposé par Zhang s'adapte en fonction des caractéristiques statistiques (moyenne, écart-type et médiane) des distances entre les points appariés.
- **Pulli [16]**, applique plusieurs contraintes pour éliminer les mauvais appariements. La première impose que les points mis en correspondance soient compatibles. Cette compatibilité est liée aux normales de ces points (l'écart d'orientation des normales de deux points appariés ne doit pas dépasser 45 degrés). En plus de cette contrainte, les points se trouvant sur les bords des deux surfaces à recalcer ne sont pas pris compte (ils ne sont pas appariés, ces points ne sont pas fiables car ils sont souvent entachés d'erreurs de mesure). Les deux dernières contraintes consistent à appliquer deux seuils différents. Le premier (dynamique) a pour principe d'éliminer un certain pourcentage de points appariés ayant passé les deux premiers tests. Le second seuil est ensuite appliqué pour éliminer les paires de points dont les distances sont relativement grandes. Ce seuil est de l'ordre de la résolution du capteur 3D.
- **Masuda et al [10]**, classent les points à appairer en quatre catégories: occultés, non appariés, aberrants et corrects.
 - Les points occultés sont des points qui ne sont pas visibles dans une des images, car ils sont cachés par d'autres parties de l'objet (ils sont dans une zone d'ombre du capteur).
 - Les points d'une image non appariés sont des points qui ne peuvent avoir de correspondants dans l'autre.
 - Les points aberrants concernent les paires de points appariés dont la distance dépasse un certain seuil.
 - Les points corrects sont donc les points qui n'appartiennent à aucune des trois catégories citées ci-dessus.

Le rejet des points aberrants permet de se libérer de la condition qui exige, dans l'algorithme de **Besl et McKay [2]** que le second ensemble de données (points de la deuxième image) soit un sous-ensemble du premier. Le recalage est amélioré du fait que les mauvais appariements ne contribuent plus dans l'estimation du déplacement.

II.3.3.2.1.5. le type de critère à minimiser et l'algorithme de minimisation

Le calcul de la meilleure transformation revient à minimiser un critère de distance. Le critère le plus simple est la somme des erreurs de distance quadratiques entre les paires de points appariés. Cette erreur est une fonction de la matrice de rotation R et du vecteur de translation T (qui constituent la matrice de transformation). Dans ce cas il existe plusieurs approches pour l'estimation de la transformation rigide telles que la décomposition en valeurs singulières (SVD) [17], l'utilisation des quaternions unitaires [2], ou des quaternions duaux [18].

Luck et al [14] proposent une méthode hybride de recalage basée sur ICP et le recuit simulé. Ce dernier est utilisé, ici, pour éviter le problème des minimums locaux dont souffre ICP. Le recuit simulé fourni à ICP une "bonne" transformation initiale, lorsque celui-ci est pris dans un minimum local.

Chen et al [26] utilisent un critère de distance différent de celui utilisé par **Besl et al [2]**. Celui-ci se base sur la somme des carrés des distances entre les points d'une image et le plan (la surface) contenant les points de l'autre [26]. Ce critère s'avère plus intéressant que la distance euclidienne classique entre deux points, mais il impose un calcul des normales à l'élément de surface qui entoure chaque point considéré.

II.4. Conclusion

Dans le présent chapitre nous avons fait un tour d'horizon des principales méthodes d'association d'élément géométrique à des données géométriques (nuage de points).

Ces méthodes ont été classées en trois classes: méthodes itératives, méthodes basées sur des caractéristiques et méthodes par optimisation. Cependant, cette classification n'est pas unique. En effet, les méthodes de mise en correspondance peuvent être classées suivant le type de données traitées, la taille de ces données, le critère de minimisation utilisé, etc...

La méthode des petits déplacements malgré sa simplicité, qui a fait d'elle la méthode la plus utilisée pour les logiciels des MMT, reste un peu limitée par la condition qui impose son utilisation dans un repère local. La méthode ICP qui est une méthode assez nouvelle qui converge facilement vers un minimum local et qui est facile à mettre en œuvre surtout avec le choix qu'on a fait pour la modélisation de la surface théorique (format STL). Tout ceci, fait de cette méthode la plus favorite pour être utilisée pour notre problème.

II.7. Références bibliographiques

[1] **DOUADI, L.** Contribution à l'étude du recalage de données 3D /couleur. Thèse doctorat, Université Montpellier 2, Octobre 2006.

[2] **Besl P.J, McKay N.D,** "A Method for Registration of 3D Shapes", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 14, n° 2, pp.239-256, 1992

[3] **BOUCHENITFA, H.** Contribution a la détermination et a l'analyse des sources d'erreurs en vue d'une maîtrise des procédés de fabrication, thèse de doctorat, Université MENTOURI Constantine, juin2010.

[4] **Talbi, H ; Layeb, A.** Un réseau neurones pour la mise en correspondance des primitives en recalage d'images, mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en informatique, département d'informatique, Université Mentouri, Constantine, Juin 2000.

[5] **Godin G, Laurendeau D, Bergevin R,** "A method for the registration of Attributed Range Images", 3DIM, pp. 179-186, Québec, 2001.

[6] **Gregory, C. Sharp, Sang, W. Lee and David K.Wehe,** "ICP Registration Using Invariant Features", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 24, n° 1, pp. 90-102, 2002.

[7] **SISTIAGA, M.** "Navigation référencée images de terrain pour engins sousmarins", Thèse de Doctorat, Université de Montpellier2, LIRMM, 2000.

[8] **SISTIAGA M,** "Navigation référencée images de terrain pour engins sousmarins", Thèse de Doctorat, Université de Montpellier2, LIRMM, 2000.

[9] **RUSINKIEWICZ, S; LEVOY, M.** "Efficient Variant of the ICP Algorithm". 3DIM 2001, pp. 145-152, 2001.

[10] **MASUDA, T; YOKOYA, N.** "A Robust Method for Registration and Segmentation of Multiple Range Images", Computer Vision And Image Understanding, Vol. 61, No. 3, May, pp. 295-307, 1995.

[11] **Seung-Hwan KIM, Dong-O KIM, Sang Wook LEE and Rae-Hong PARK,** "Reducing Computation Time for Range Image Registration Using Radial-Distance Down-Sampling", FCV2004.

[12] **JOST, T.** "Fast Geometric Matching for Shape Registration", PhD report, Faculté des Sciences de l'Université de Neuchâtel, 2002.

[13] **JOHNSON, A; KANG, S B.** "Registration and Integration of Textured 3D Data", Cambridge Research Lab, Technical Research Series, CRL 96/4, Oct., 1996.

[14] **Luck, J; LITTLE,Ch; HOFF, W.** "Registration of Range Data Using a Hybrid simulated Annealing and Iterative Closest Point Algorithm", Proc. Of IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Fransisco, April 24-28, 2000.

[15] **ZHANG, Z.** "Iterative Point Matching for Registration of Free Form Curves", IJCV, vol. 13, n° 2, pp 119-152, 1994.

[16] **PULLI, K.** "Multiview Registration for Large Data Sets". 3DIM, pp.160-168, Ottawa, 1999.

[17] **ARUN, K; HUANG, T; BLOSTEIN, S.** "Least Squares Fitting of two 3D Point Sets", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 9, n° 5, pp. 698-700, 1987.

[18] **WALKER, M; SHAO, L; VOLZ, R.** "Estimating 3D Location Parameters Using Dual Number Quaternions", CVGIP: Image Understanding, Vol.5, No. 3, 1991.

[19] **Fitzgibbon A.W,** "Robust Registration of 2D and 3D Point Sets", Proceedings, British Machine Vision Conference, pp. 411-420, 2001.

[20] **Blais G, Levin M.D.** "Registering Multiview Range Data to Create 3D Computer Objects", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 17, n° 8, pp. 820-824, 1995.

[21]**Fischler M.A, Bolles R.S.** "Random Sample Consensus: A Paradigm For Model Fitting With Applications to Image Analysis and Automated Cartography", Communications of the ACM, Vol. 24, no. 6, june 1981.

[22]**Chu-Song Chen, Yi-Ping Hung, Jen-Bo Cheng.** "RANSAC-based DARCES: a new approach to fast automatic registration of partially overlapping range images", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 21, n° 11, Nov 1999, Page(s):1229-1234.

[23]**BOURDET, Pierre.** Logiciel des machines à mesurer tridimensionnelles. France. Technique de l'ingénieur, 1999. R 1316.

[24] **MARCHÈSE, Jean-Hugues.** *Spécification géométrique des produits (GPS)*. Cachan : Technique de l'ingénieur, 2001.

[25] **S. Granger.** Une approche statistique multi-échelle au recalage rigide de surfaces : Application à l'implantologie dentaire. Thèse de : INRIA - Sophia Antipolis, 2003.

[26]Y. Chen, G.Medioni."Object Modelling by Registration of Multiple Range Images", Image and Vision Computing, Vol. 10, n° 3, pp. 145-155, 1992.

Chapitre III

Techniques et méthodes appliquées

III.1.Introduction

Dans ce présent chapitre nous allons présenter le déroulement des étapes et techniques utilisées dans la mise en correspondance des pièces par l'algorithme **ICP**, cette méthode a pour but à déterminer les erreurs de fabrication des pièces.

Cela consiste à suivre les étapes suivantes :

- La création du modèle théorique.
- Fabrication et acquisition du modèle réel.
- Association du modèle théorique et nuage de points (par algorithme ICP).

Après avoir choisi une représentation de l'ensemble de données géométriques D , de modèles M et de transformation, à partir d'une sélection de primitive dans D et M , trouver l'ensemble des paramètres de la transformation qui minimise un critère de distance entre l'ensemble de données transformées et le modèle. D'un point de vue mathématique, le problème étant fortement non linéaire, il s'agit de trouver les paramètres de la transformation qui minimisent globalement un critère de distance, ce qui nécessite un choix convenable de transformations initiales.

III.2. La création du modèle théorique

A l'entrée du programme on trouve les données du problème à savoir le modèle théorique de la surface gauche et le nuage de points. Concernant le modèle théorique au format STL il est donné sous forme d'un fichier texte obtenu, par exemple, par l'exportation d'un modèle 3D vers le format STL à l'aide d'un logiciel de CAO (CATIA V5).

Le modèle au format STL il obtenu généralement par une triangulation d'un modèle exact à l'aide d'un logiciel de CAO qui nous fournit un fichier au format STL. Ce fichier contient les sommets (vertex1 X1 Y1 Z1) et la normale (facet normal1 n1, n2, n3) orientée vers l'extérieur pour chaque triangle.

```

solid CATIA STL
facet normal -6.043001e-002 -8.592173e-001 -5.080294e-001
  outer loop
    vertex 2.705841e+001 -3.814824e+001 -1.900425e+001
    vertex 2.705841e+001 -3.503622e+001 -2.426752e+001
    vertex 3.941545e+001 -3.639635e+001 -2.343704e+001
  endloop
endfacet
facet normal -4.931152e-002 -8.742450e-001 -4.829742e-001
  outer loop
    vertex 3.941545e+001 -3.921528e+001 -1.833442e+001
    vertex 2.705841e+001 -3.814824e+001 -1.900425e+001
    vertex 3.941545e+001 -3.639635e+001 -2.343704e+001
  endloop
endfacet
facet normal -6.242216e-002 -7.739236e-001 -6.301950e-001
  outer loop
    vertex 2.705841e+001 -3.503622e+001 -2.426752e+001
    vertex 2.705841e+001 -3.086263e+001 -2.939298e+001
    vertex 3.941545e+001 -3.261545e+001 -2.846439e+001
  endloop
endfacet

```

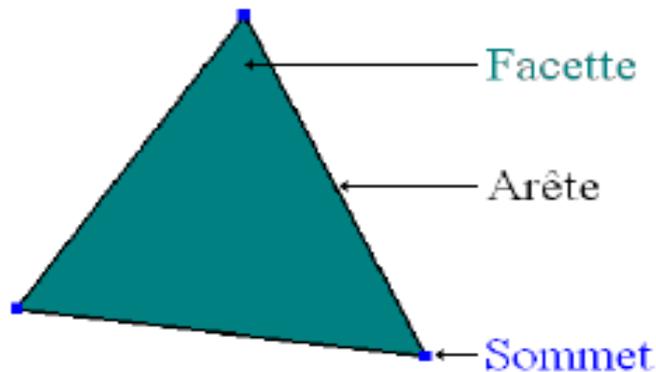
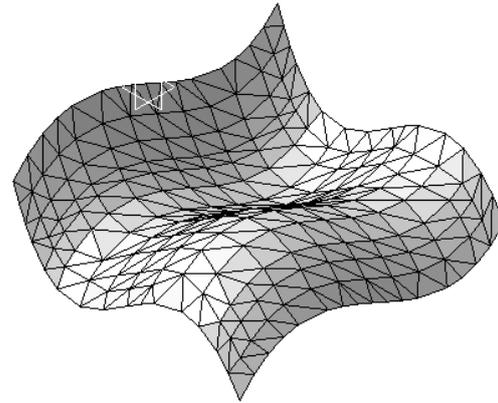


Figure III.1 : Extrait d'un fichier STL [3].

III.2.Fabrication et acquisition du modèle réel

Pour le modèle numérique de la surface réelle il est lui aussi sous forme texte généralement au format ASC obtenu par le logiciel qui accompagne l'outil d'acquisition utilisé (MMT, triangulation laser, ... etc.).

Comme on ne dispose pas de ces outils au niveau de notre département nous avons opté pour une astuce qui consiste à :

- Prendre une copie du modèle théorique sous le logiciel CATIA et lui déformer légèrement pour simuler des défauts de fabrication
- Toujours sous CATIA convertir cette surface déformée, qui l'équivalent de la surface réelle, en nuage de points.
- Eloigner ce nuage de point en appliquant des rotations et des translations suivant les différents axes.

A la fin ce nuage de points peut être considéré comme un nuage de points issu d'une acquisition car il a la forme de la surface théorique avec des défauts qui simulent les défauts de fabrication et un décalage qui simule le décalage du repère d'acquisition par rapport au repère de modélisation. Après exécution du programme ce nuage de points devrait revenir à se placer sur la surface théorique.

```

! ASCII généré par Digitized Shape Editor/CATIA
! Without Scans
! Point Format          = 'X %f Y %f Z %f'
! Total number of points = 684
!
X 27,058411 Y -38,148239 Z -19,004250
X 27,058411 Y -35,036221 Z -24,267521
X 39,415451 Y -36,396351 Z -23,437040
X 39,415451 Y -39,215279 Z -18,334419
X 27,058411 Y -30,862631 Z -29,392981
X 39,415451 Y -32,615452 Z -28,464390
X -53,739368 Y -12,826520 Z -8,082139
X -53,739368 Y -10,978290 Z -10,455510
X -47,258411 Y -16,753420 Z -11,604100
X 39,415451 Y -27,806450 Z -33,178162
X 39,415451 Y 0,000000 Z -43,289589
X 27,058411 Y 3,646430 Z -42,463551
X 39,415451 Y 3,927303 Z -43,111080

```

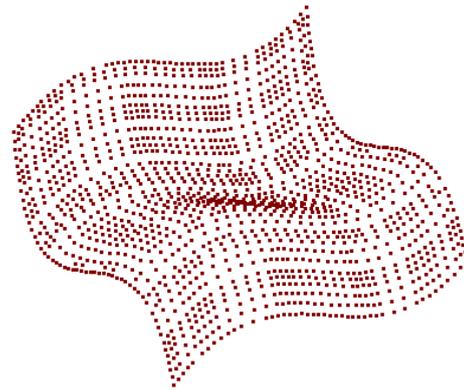
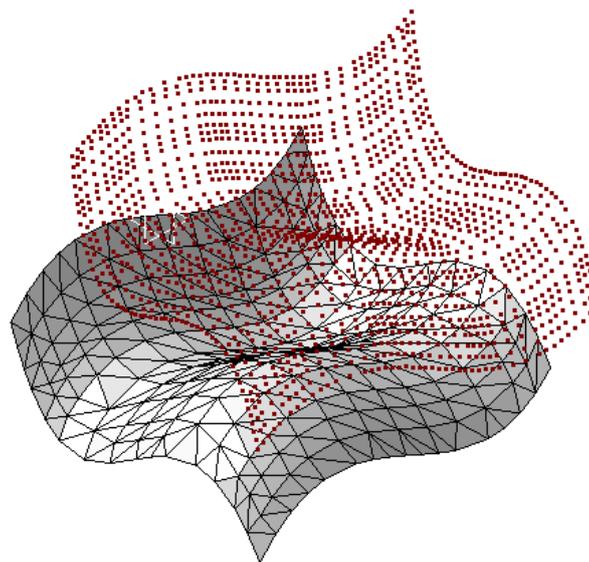


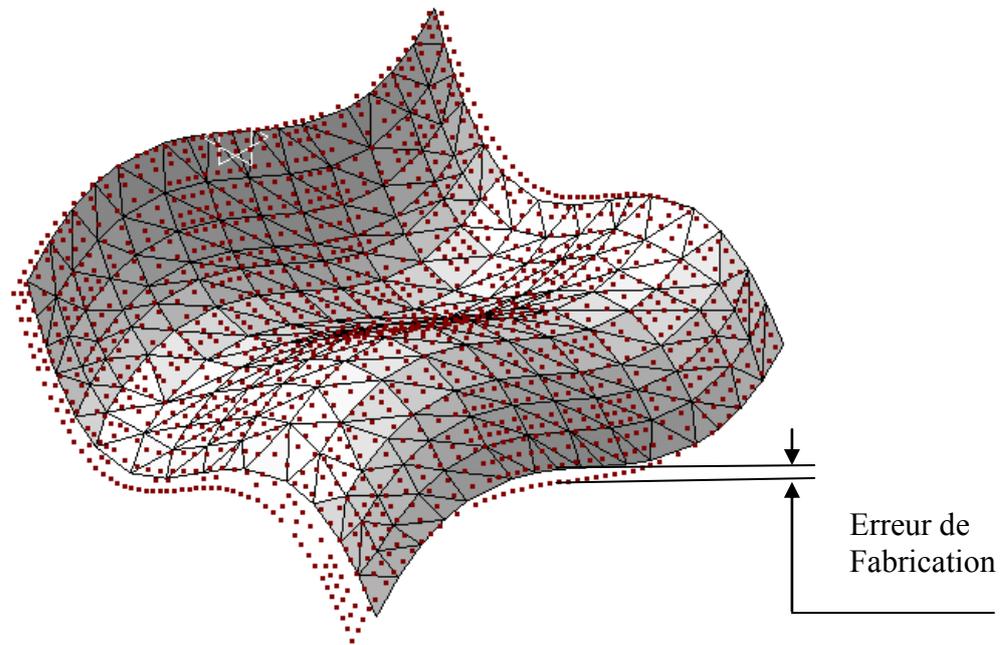
Figure III.2 : Extrait d'un fichier ASC contenant le nuage de points.

III.3. Association du modèle théorique et nuage de points (par algorithme ICP)

On obtient la première configuration présente dans la **Figure III.3**. L'application de la démarche inverse de mise en correspondance permet le recalage du nuage de points avec le modèle STL facettisé.



(a) Position initial



(b) Position après itération

Figure III.3 : Le nuage de points associé au modèle de la surface théorique au format STL

III.4. Algorithme utilisé

Pour faire le choix d'un algorithme, plusieurs critères sont à vérifier : vitesse, précision des résultats, stabilité, robustesse, et simplicité. Pour cela on a opté aux démarches suivantes :

1. Calculer la projection ou la correspondance pour les points sélectionnés.
2. Calculer la transformation rigide optimale avec la méthode SVD.
3. Appliquer la transformation calculée sur les points sélectionnés.
4. Evaluer la qualité de la mise en correspondance.
5. Si la qualité est bonne, appliquer la transformation calculée sur l'ensemble des points disponibles.
6. Répéter les étapes jusqu'à la convergence.

Pour le modèle de la surface théorique nous avons opté pour une surface au format STL à cause de la simplicité de manipulation, sa génération et sa compatibilité avec la plupart des logiciels de CAO. Il nous facilite ainsi son exploitation pour les tests de l'application finale.

III.4.1. Calcul de la projection de points sur une surface au format STL

Une surface au format STL est composée de plusieurs surfaces planes sous forme de triangles définis par leurs sommets. Le calcul de la projection d'un point sur un plan n'est pas difficile, mais le problème c'est de savoir sur quel plan, il faut le faire. La réponse est de considérer que le plan sur lequel la projection du point palpé appartienne à l'intérieur du triangle.

Donc pour tout point P , et pour chaque triangle, nous calculons sa projection P' (Figure III.4) sur le plan qu'il définit. Si P' se trouve à l'intérieur du triangle nous le considérons comme étant la projection du point P sur la surface et on passe à un autre point, sinon on passe à un autre triangle pour effectuer le calcul de projection et vérifier de nouveau l'appartenance.

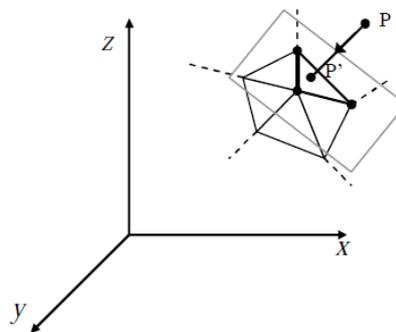


Figure III.4 : Calcul de la projection d'un point P sur Surface au format STL (triangulée)

III.4.1. 1. Calcul de la projection d'un point sur un plan (triangle)

Soit le triangle défini par ses sommets P_1, P_2, P_3 et le vecteur normal \vec{N} , et soit P un points et P' sa projection sur le plan (Figure III.5).

Nous pouvons donc écrire :

$$\vec{OP} = \vec{OP'} + k \vec{N}$$

III.1

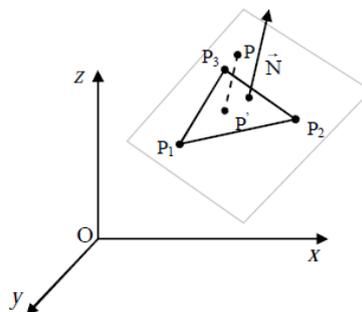


Figure III.5 : Projection d'un point sur le plan défini par un triangle.

$$\vec{OP} = \vec{OP'} + k \vec{N} \quad \text{et} \quad k = \vec{P_1P} \cdot \vec{N}$$

III.4.1.2. Vérification de l'appartenance de la projection d'un point à l'intérieur d'un triangle

Soit u et v les coordonnées du point P' par rapport au repère (P_1, P_1P_2, P_1P_3) défini par le sommet P_1 et les deux vecteurs P_1P_2 et P_1P_3 (Figure III.6).

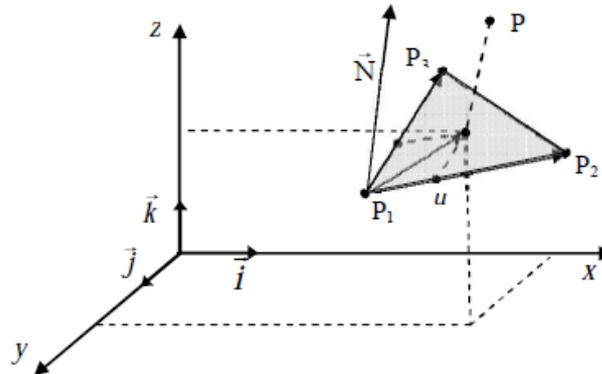


Figure III.6 : Calcul des coordonnées du point P' par rapport au Repère lié à un triangle

Dans ce cas on dit que P' est à l'intérieur du triangle seulement si : $(u \geq 0)$ et $(v \geq 0)$ et $(u + v \leq 1)$.

III.4.2. Calculer la transformation rigide optimale avec la méthode SVD

Nous présentons l'algorithme pour résoudre le problème de moindres carrés, dans le cas d'une rotation, par la méthode de la décomposition en valeurs singulières (SVD: Singular Value Decomposition). Nous avons préféré présenter celui-ci plutôt que ceux fondés sur les quaternions, car il est utilisable dans un espace de dimension quelconque. Pour avoir la démonstration du résultat et de ses propriétés, il faut se reporter à [1]. L'algorithme avec SVD se résume de la façon suivante :

- Calculer la matrice de covariance croisée des deux ensembles de points, dans les repères centrés sur les barycentres $Q = V_2 V_1^t$ où l'exposant t indique la transposition.

$$V_1 = P' - C_1 \quad \text{et} \quad V_2 = P - C_2$$

- Trouver la décomposition en valeurs singulière de Q , $Q = Z D W^t$ où Z et W^t sont des rotations et D est diagonale.
- La meilleure rotation est alors $R = Z W^t$.
- La meilleure translation est $T = C_1 - R C_2$
-

$$C_1 = \mathbf{1}/n \sum_{i=1}^n P'_i \quad \text{et} \quad C_2 = \mathbf{1}/n \sum_{i=1}^n P_i$$

Avec : P_i sont les points du nuage initiale.

P'_i sont les points du nuage projeté.

L'algorithme d'obtention d'un déplacement optimal sert de base aux méthodes de recalage rigide 2D et 3D. Il est en particulier utilisé dans l'algorithme ICP.

III.5. Programmation et test de performances

Le langage de programmation choisi est le MatLab à cause de sa grande richesse en fonctions prédéfinies ce qui nous permet de tester rapidement l'algorithme et effectuer les corrections nécessaires, comme il dispose aussi des outils qu'il faut pour la visualisation des résultats. Le programme MatLab ainsi développé pourra être utilisé plus tard par exemple pour la réalisation d'application autonome ou de module intégrable dans des logiciels de CFAO.

Le principe adopté pour effectuer les tests est simple, il suffit de générer une ou plusieurs surfaces gauches au format STL (triangulation), pour simuler le modèle théorique, et un nuage de points idéal (Figure III.7) auquel nous pouvons ajouter des perturbations pour simuler des défauts de forme ou des erreurs d'acquisition. Si on éloigne le nuage de points de la surface, avec l'application d'une transformation rigide, la transformation finale fournie par le programme doit être l'inverse de cette dernière.

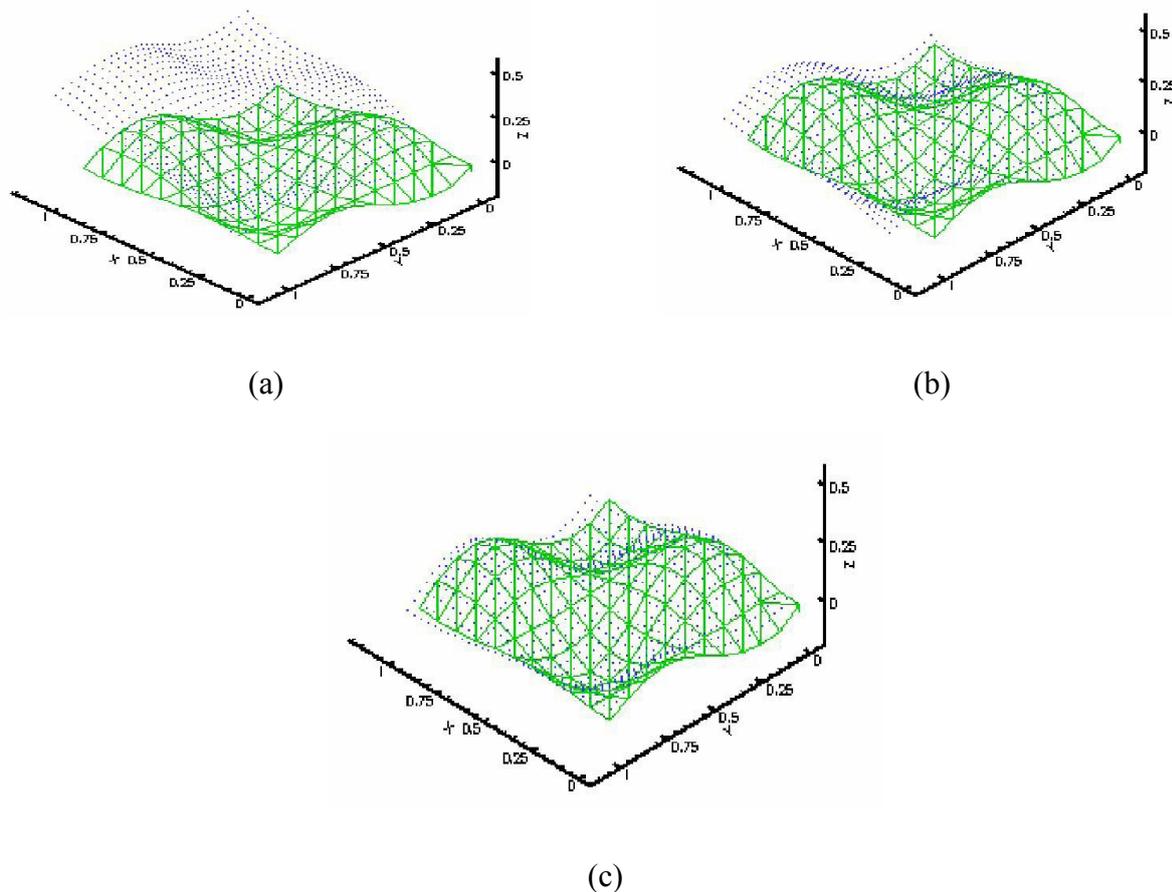


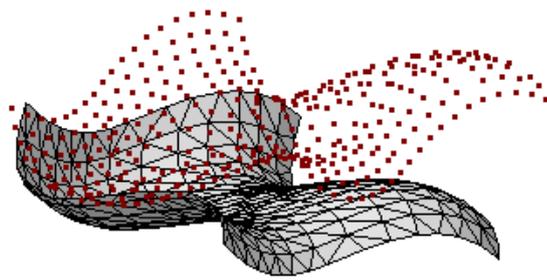
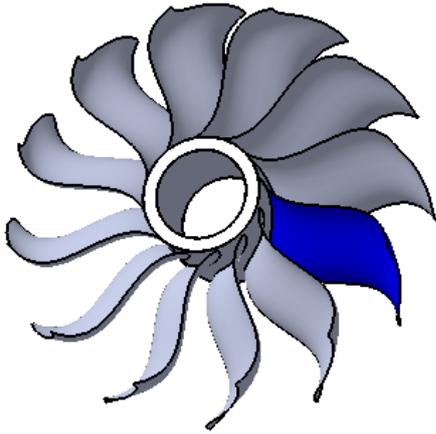
Figure III.7 : Le nuage de points associé au modèle de la surface théorique au format STL:

(a) position initiale, (b) position après 5 itérations, (c) position après 10 itérations [4].

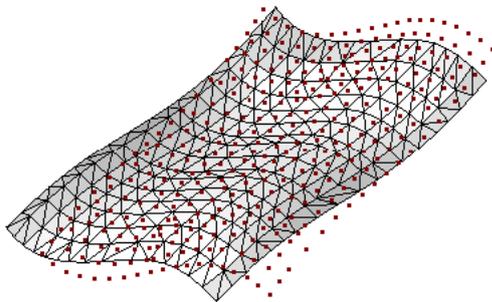
III.6.Exemples d'application :

Le programme Matlab réalisé est capable de d'effectuer une association ou superposition entre un nuage de points issu de l'acquisition d'une surface gauche quelconque et son modèle théorique. Dans ce qui suit nous allons voir quelle que applications pour des formes que nous pouvons rencontrer dans le domaine pratique.

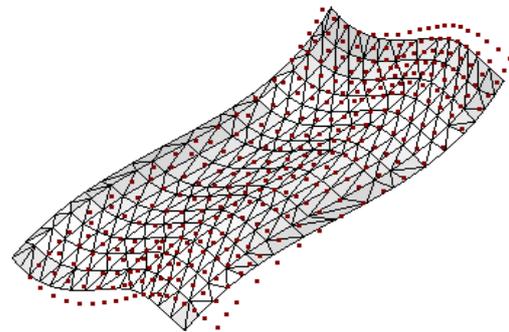
III.6.1.application sur une pale d'une turbine



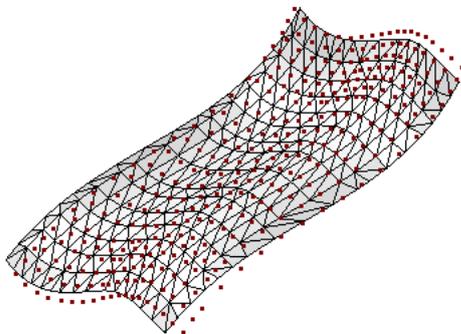
Position initiale



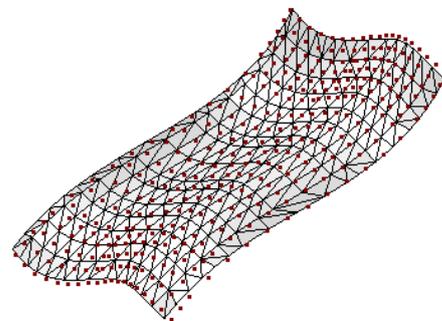
Après 5 itérations



Après 10 itérations



Après 15 itérations



Après 25 itérations

Figure III.8 : Superposition du nuage de points et du modèle théorique pour une pale

III.6.2.application sur un cône cintré

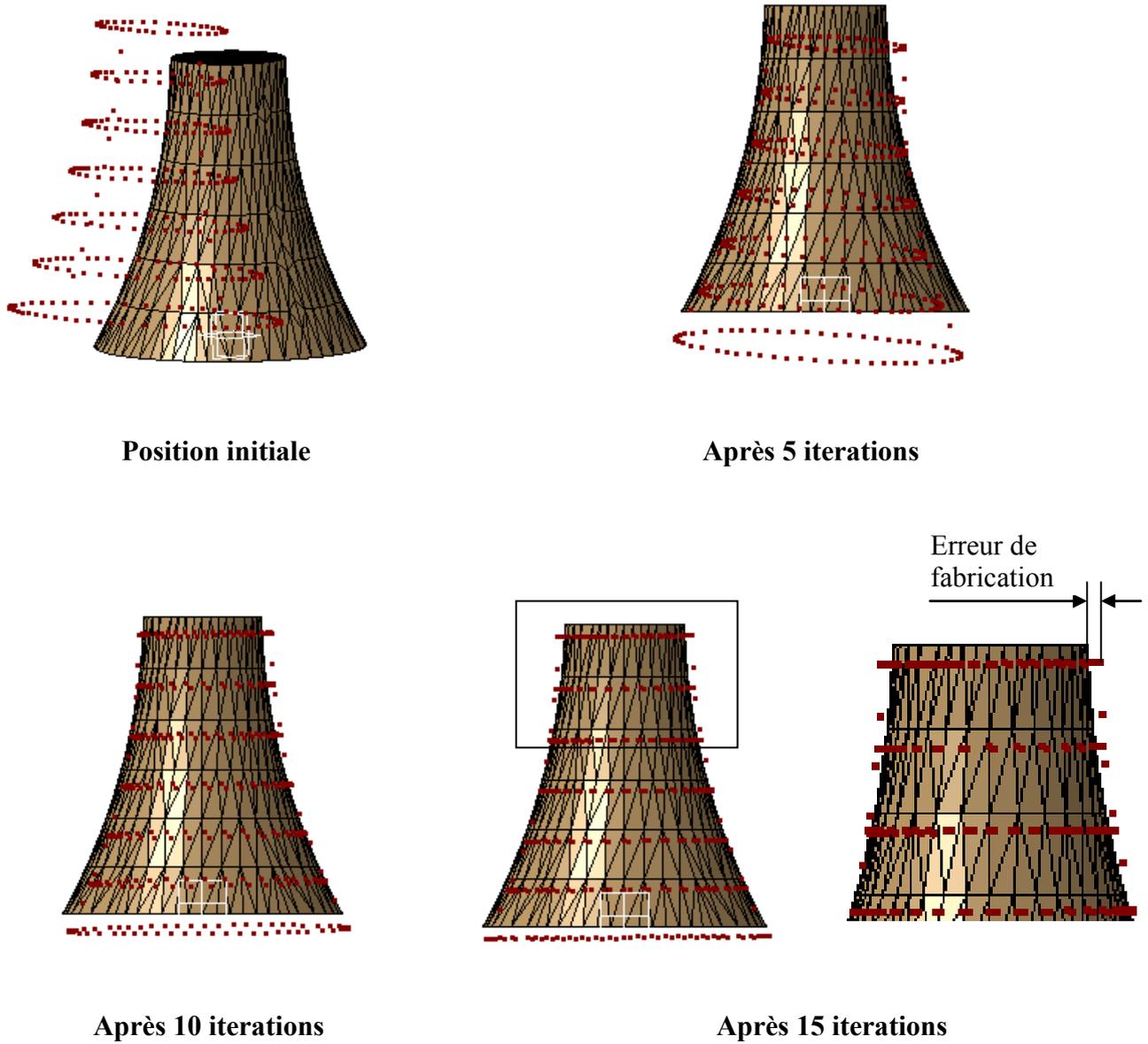
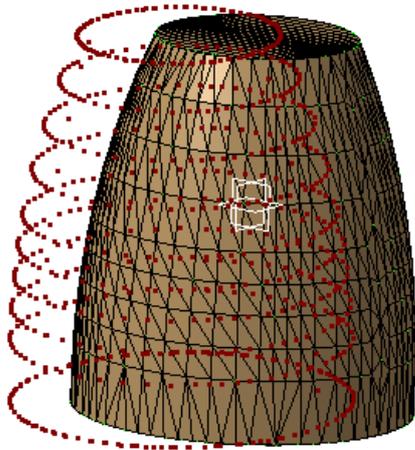
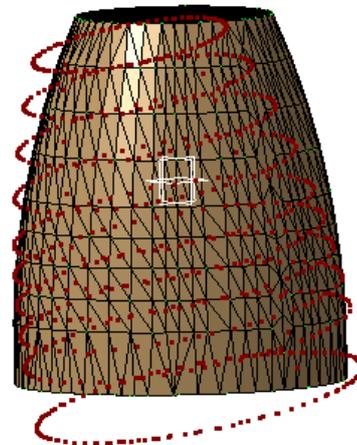


Figure III.9: Superposition du nuage de points et du modèle théorique pour un cône cintré

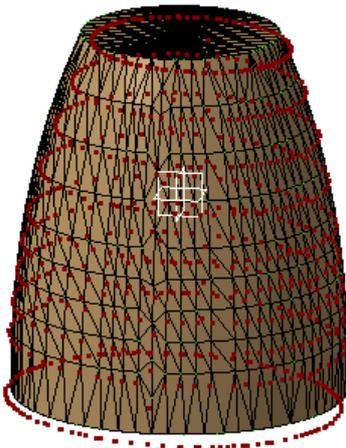
III.6.3.application sur un cône dôme



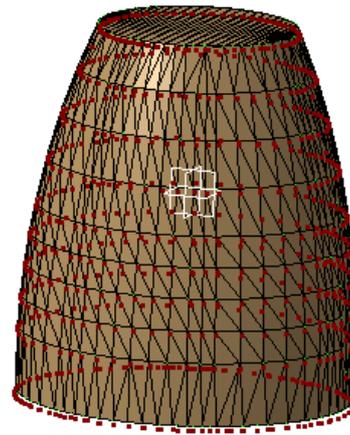
Position initiale



Après 5 itérations



Après 25 itérations



Après 30 itérations

Figure III.10: Superposition du nuage de points et du modèle théorique pour un cône dôme

III.7.CONCLUSION

Ce que l'on peut dire finalement c'est que la méthode qu'on propose pour le contrôle des surfaces gauches est une méthode générale pour le contrôle de pièces mécaniques comprenant des surfaces gauches et/ou de surfaces élémentaires (Cylindriques, Sphériques, ... etc.). Son application utilisée pour le contrôle des différents types d'éléments mécaniques. On peut dire aussi que les résultats ont été suffisamment bons mais ils peuvent être améliorés d'avantages au niveau des précisions.

III.9.Références bibliographiques

- [1] **Kanatani (K.)**. Analysis of 3D roation fitting. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 16, n° 5, May 1994, pp. 543–549.
- [2] **Faugeras (O.) ET Hebert (M.)**.The representation, recognition and positioning of 3D shapes from range data. *In: Proceedings of the 8th International Conference On Artificial Intelligence*, pp. 996–1002. – Karlsruhe, BRD, August 1983.
- [3] **AZZAM, N.** Mise en place d'un modèle d'inspection des surfaces a géométries complexes en vue d'une correction process : application à l'usinage des prothèses par prototypage rapide, Mémoire de magister, Université MENTOURI Constantine, mai2010.
- [4] **BOUCHENITFA, H.** Contribution à la détermination et a l'analyse des sources d'erreurs en vue d'une maitrise des procédés de fabrication, thèse de doctorat, Université MENTOURI Constantine, juin2010.
- [5] **HOPPE, H. 1995.** *Surface reconstruction from unorganized point*. University of Washington : PHD thesis, 1995.
- [6] **BOISSONNAT, J D et GEIGER, B. 1993.** *Threedimensional reconstruction of complex shapes based on the delaunay triangulation*. Conference, PP 964-975: Biomedical image processing and biomedical visualization. vol 1905 of presented at the society of photo-optical instrumentation engineers. 1993.
- [7] **FREY, P, BOROUCHAKI, H et GEORGE, P. 1996.** *Tétraédrisation de delaunay basée sur une approche frontale*. Technical report, INRIA. 1996.
- [8] **GAYRE, F. 2003.** *Contributions au tatouage de maillages surfaciques 3D*. Université catholique de Louvain : PhD thesis, TELECOM Paris, 2003.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est d'arriver à déterminer les erreurs de fabrication sur des surfaces gauches (surfaces complexe), Ceci nous impose un maximum de cohérence avec les standards et les normes issus des avancés réalisés dans les autres phases du processus de production, à savoir la phase de conception et la phase de fabrication.

D'une manière générale, on peut définir l'inspection d'une pièce industrielle comme étant la vérification des dimensions et tolérances imposées lors de sa conception. Les dimensions déterminent les propriétés géométriques d'une pièce, en définissant les tailles, les formes, les caractéristiques, les positions, les orientations et distances entre caractéristiques nominales de la pièce.

Comme l'imprécision inévitable des procédés de fabrication fait qu'une pièce ne peut jamais être réalisée rigoureusement conforme aux dimensions fixées par son concepteur, il est toléré que chaque dimension réalisée soit comprise entre deux dimensions limites, compatibles avec un fonctionnement correct de la pièce.

La différence entre ces dimensions définit la tolérance 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.

Concernant les méthodes d'association ou de mise en correspondance nous avons exposé les plus utilisées pour le cas tridimensionnel. La méthode des petites déplacements qui impose l'utilisation d'un repère local afin d'obéir à la condition des petites déplacements qui limite son exploitation pour des nuages de points un peu éloignés de la surface réelle, mais avec moins de complexité pour les traitements mathématiques.

La méthode non linéaire quant à elle offre théoriquement la possibilité de réaliser une association entre un nuage de points et une surface assez éloignée l'un de l'autre, mais la nature non linéaire du problème dans ce cas pose des difficultés de stabilité et de convergence.

On a vu aussi la méthode ICP avec un peu de détail et on a trouvé que en plus de son caractère non linéaire est sa simplicité elle est très adapté au modèle de surface choisi c'est-à-dire le modèle STL ce qui nous a poussé à l'utiliser.

Nous avons adopté la solution de SVD pour notre étude, puisqu'elle nécessite moins de temps à s'exécuter sur Matlab.

Des auteurs ont démontré empiriquement que la méthode SVD produit des résultats légèrement plus précis que celle des quaternions, ce qui est très important dans notre cas, où on affine la superposition entre deux nuages de points.

Ce que l'on peut dire finalement c'est que la méthode qu'on propose pour le contrôle des surfaces gauches est une méthode générale pour le contrôle de pièces mécaniques comprenant des surfaces gauches et/ou de surfaces élémentaires (Cylindriques, Sphériques, ... etc.). Son application utilisée pour le contrôle des différents types d'éléments mécaniques. On peut dire aussi que les résultats ont été suffisamment bons mais ils peuvent être améliorés d'avantages au niveau des précisions.

Algorithme ICP permet de trouver la transformation allant d'un modèle 3D à un ensemble de données obtenu par un système d'acquisition. Ce système d'assistance par la mise en correspondance ayant pour référence l'axe mécanique du membre inférieur et l'orientation des coupes osseuses ce qui n'est pas toujours facile avec les techniques traditionnels. Les distances entre la surface nominale et les points mesurés (c'est-à-dire les défauts de forme) sont calculés après que les étapes d'alignement soient nécessaires pour corriger les erreurs cumulées pendant la phase de fabrication.

Références bibliographique

Chapitre I : Outils et techniques d'acquisition 3D

[1] **BOUCHENITFA, H.** Contribution à la détermination et à l'analyse des sources d'erreurs en vue d'une maîtrise des procédés de fabrication, thèse de doctorat, Université MENTOURI Constantine, juin 2010

[2] **AZZAM, N.** Mise en place d'un modèle d'inspection des surfaces à géométries complexes en vue d'une correction process : application à l'usinage des prothèses par prototypage rapide, Mémoire de magister, Université MENTOURI Constantine, mai 2010

[3] **LORIOT, B.** Automatisation de l'acquisition et des post-traitements en numérisation 3D. Le Creusot, France. 2009.

[4] **PRIETO, L.** Métrologie assistée par ordinateur : Apport des capteurs 3D sans contact, thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1999.

[5] <http://www.laser-ndt.com/profilometry.html>

[6] **Moron, V.** Mise en correspondance de données 3D avec un modèle C.A.O : application à l'inspection automatique, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, décembre 1996

[7] <http://www.evasion.inrialpes.fr/people/Lionel.Reveret/M2R07/M2Rscanner.html>

[8] http://fr.wikipedia.org/wiki/Scanner_3D

[9] **Forest, J.** New Methods For Triangulation-Based Shape Acquisition Using Laser Scanners. PhD thesis, Universitat de Girona, Girona, Espagne, 2004.

[10] **Salvi, J., Pages, J. et Batlle, J.** A review of recent range image registration methods with accuracy evaluation. Image and Vision Computing, 25(5):578–596, 2007.

[11] **Robinson, A., Alboul, L. et Rodrigues, M.** Methods for indexing stripes in uncoded structured light scanning systems. Journal of Winter School of Computer Graphics, 12(1-3), 2004.

[12] **Lathuiliere, A.** Génération de mires colorées pour la reconstruction 3D couleur par système stéréoscopique de vision active. Thèses de PhD, Université de Bourgogne, Le Creusot, France, 2007.

[13] **Beraldin, J.-A., Blais, F., Cournoyer, L., Godin, G. et Rioux, M.** Active 3d sensing. In Modelli E Metodi Per Lo Studio E La Conservazione Dell'Architettura Storica, volume 10, pages 22–46, Pisa, Italie, 2000.

[14] **GARCIA, D.** Mesure de formes et de champs de déplacements tridimensionnels par stéréocorrélation d'images. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 21 déc. 2001

[15] **GARCIA, D., ORTEU J.J., DEVY M.** Accurate Calibration of a Stereovision Sensor for 3D Metrology Applications. Image and Vision Computing, Elsevier Science (à paraître).

[16] <http://www.geodesie-maintenance.com/fr/photogrammetrie.php>

Chapitre II : Méthodes d'association

[1] **DOUADI, L.** Contribution à l'étude du recalage de données 3D /couleur. Thèse doctorat, Université Montpellier 2, Octobre 2006.

[2] **Besl P.J, McKay N.D,** "A Method for Registration of 3D Shapes", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 14, n° 2, pp.239-256, 1992

[3] **BOUCHENITFA, H.** Contribution a la détermination et a l'analyse des sources d'erreurs en vue d'une maîtrise des procédés de fabrication, thèse de doctorat, Université MENTOURI Constantine, juin2010.

[4] **Talbi, H., Layeb, A.** Un réseau neurones pour la mise en correspondance des primitives en recalage d'images, mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en informatique, département d'informatique, Université Mentouri, Constantine, Juin 2000.

[5] **Godin, G., Laurendeau, D. et Bergevin, R.** "A method for the registration of Attributed Range Images", 3DIM, pp. 179-186, Québec, 2001.

[6] **Gregory, C., Sharp., Sang Wook LEE and David K. Wehe,** "ICP Registration Using Invariant Features", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 24, n° 1, pp. 90-102, 2002.

[7] **SISTIAGA, M.** "Navigation référencée images de terrain pour engins sousmarins", Thèse de Doctorat, Université de Montpellier2, LIRMM, 2000.

[8] **SISTIAGA, M.** "Navigation référencée images de terrain pour engins sousmarins", Thèse de Doctorat, Université de Montpellier2, LIRMM, 2000.

[9] **RUSINKIEWICZ, S., LEVOY, M.** "Efficient Variant of the ICP Algorithm". 3DIM 2001, pp. 145-152, 2001.

[10] **MASUDA, T., YOKOYA, N.** "A Robust Method for Registration and Segmentation of Multiple Range Images", Computer Vision And Image Understanding, Vol. 61, No. 3, May, pp. 295-307, 1995.

- [11] **Seung-Hwan, KIM., Dong-O, KIM., Sang Wook LEE and Rae-Hong PARK.** "Reducing Computation Time for Range Image Registration Using Radial-Distance Down-Sampling", FCV2004.
- [12] **JOST, T.** "Fast Geometric Matching for Shape Registration", PhD report, Faculté des Sciences de l'Université de Neuchâtel, 2002.
- [13] **JOHNSON, A., KANG, S -B.** "Registration and Integration of Textured 3D Data", Cambridge Research Lab, Technical Research Series, CRL 96/4, Oct., 1996.
- [14] **Luck, J., LITTLE, Ch., HOFF, W.** "Registration of Range Data Using a Hybrid simulated Annealing and Iterative Closest Point Algorithm", Proc. Of IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Fransisco, April 24-28, 2000.
- [15] **ZHANG, Z.** "Iterative Point Matching for Registration of Free Form Curves", IJCV, vol. 13, n° 2, pp 119-152, 1994.
- [16] **PULLI, K.** "Multiview Registration for Large Data Sets". 3DIM, pp.160-168, Ottawa, 1999.
- [17] **ARUN, K., HUANG, T., BLOSTEIN, S.** "Least Squares Fitting of two 3D Point Sets", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 9, n° 5, pp. 698-700, 1987.
- [18] **WALKER, M., SHAO, L., VOLZ, R.** "Estimating 3D Location Parameters Using Dual Number Quaternions", CVGIP: Image Understanding, Vol.5, No. 3, 1991. [19] Fitzgibbon A.W, "Robust Registration of 2D and 3D Point Sets", Proceedings, British Machine Vision Conference, pp. 411-420, 2001.
- [20] **Blais, G., Levin, M-D.** "Registering Multiview Range Data to Create 3D Computer Objects", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 17, n° 8, pp. 820-824, 1995.
- [21] **Fischler, M-A., Bolles, R-S.** "Random Sample Consensus: A Paradigm For Model Fitting With Applications to Image Analysis and Automated Cartography", Communications of the ACM, Vol. 24, no. 6, june 1981.
- [22] **Chu-Song, Chen., Yi-Ping, Hung., Jen-Bo, Cheng.** "RANSAC-based DARCES: a new approach to fast automatic registration of partially overlapping range images", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 21, n° 11, Nov 1999, Page(s):1229-1234.
- [23] **BOURDET, Pierre.** Logiciel des machines à mesurer tridimensionnelles. France. Technique de l'ingénieur, 1999. R 1316.
- [24] **MARCHÈSE., Jean-Hugues.** *Spécification géométrique des produits (GPS)*. Cachan : Technique de l'ingénieur, 2001.

[25] **Granger, S.** Une approche statistique multi-échelle au recalage rigide de surfaces : Application à l'implantologie dentaire. Thèse de : INRIA - Sophia Antipolis, 2003.

[26] **Y. Chen, G. Medioni.** "Object Modelling by Registration of Multiple Range Images", Image and Vision Computing, Vol. 10, n° 3, pp. 145-155, 1992.

Chapitre III : Techniques méthode appliquées

[1] **Kanatani, K.** Analysis of 3D roation fitting. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 16, n° 5, May 1994, pp. 543–549.

[2] **Faugeras, O. ET Hebert, M.** The representation, recognition and positioning of 3D shapes from range data. In: Proceedings of the 8th International Conference On Artificial Intelligence, pp. 996–1002. – Karlsruhe, BRD, August1983.

[3] **AZZAM, N.** Mise en place d'un modèle d'inspection des surfaces a géométries complexes en vue d'une correction process : application à l'usinage des prothèses par prototypage rapide, Mémoire de magister, Université MENTOURI Constantine, mai2010

[4] **BOUCHENITFA, H.** Contribution à la détermination et a l'analyse des sources d'erreurs en vue d'une maitrise des procédés de fabrication, thèse de doctorat, Université MENTOURI Constantine, juin2010.

[5] **HOPPE, H.** 1995. Surface reconstruction from unorganized point. University of Washington: PHD thesis, 1995.

[6] **BOISSONNAT, J D et GEIGER, B.** Three dimensional reconstruction of complex shapes based on the delaunay triangulation. Conference, PP 964-975: Biomedical image processing and biomedical visualization. vol 1905 of presented at the society of photo-optical instrumentation engineers. 1993.

[7] **FREY, P., BOROUCAKI, H et GEORGE, P.** Tétraédrisation de delaunay basée sur une approche frontale. Technical report, INRIA. 1996.

[8] **GAYRE, F.** Contributions au tatouage de maillages surfaciques 3D. Université catholique de Louvain : PhD thèses, TELECOM Paris, 2003.