

Inspection Automatisée de Pièces Manufacturées

Automatic Inspection of Manufactured Parts

F. Prieto¹ P.Boulanger² R. Lepage³ T. Redarce⁴

- ¹ Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, PCI, Carrera 27 # 64 – 60.
Manizales (Caldas) Colombie. fprieto@nevado.manizales.unal.edu.co
- ² University of Alberta, Department of Computing Science, 2-21 Athabasca Hall,
Edmonton, Alberta, T6G 2E8, Canada. e mail: pierre@cs.ualberta.ca
- ³ École de Technologie Supérieure, LIVIA, 1100 rue Notre-Dame Ouest, Montréal,
Québec, H3C 1K3, Canada, lepage@livia.etsmtl.ca
- ⁴ Institut National des Sciences Appliquées, LAI, 20 avenue Albert Einstein,
69621 Villeurbanne Cedex, France, redarce@lai.insa-lyon.fr

Résumé

Ce travail concerne l'inspection automatique de pièces industrielles à partir du modèle CAO de la pièce et de son image 3D obtenue à l'aide d'un capteur laser de haute précision. Tout d'abord nous déterminons et modélisons les différents paramètres qui influencent la précision du capteur laser lors du processus de numérisation d'une pièce. Ce modèle est utilisé pour générer automatiquement une stratégie d'acquisition pour la numérisation complète et précise de la pièce. La stratégie d'acquisition consiste en la détermination d'un ensemble de points de vue qui définissent la position spatiale et l'orientation exacte du capteur par rapport à la pièce, ainsi que d'autres paramètres du capteur. Le but de la stratégie de numérisation est d'améliorer l'exactitude des mesures de profondeur afin de pouvoir utiliser ce nuage de points 3D dans des tâches de métrologie. Le nuage de points issu de la numérisation d'une pièce est recalé avec son modèle CAO et postérieurement segmenté. Les résultats de la segmentation sont utilisés pour contrôler les tolérances dimensionnelles et géométriques de la pièce.

Mots Clef

Inspection, Numérisation, segmentation d'image, système de vision

Abstract

This work is related to the automatic inspection of manufactured parts by using the CAD model of the part and the cloud of 3D points obtained by the digitization of the part with a laser range sensor. Initially we determine and model the parameters most influent for the accuracy of the range sensor in the digitalization of a part. This model is used to produce automatically a sensing plan in order to acquire completely and precisely the geometry of a surface or of the whole part. A sensing plan includes the set of viewpoints which defines the exact position and orientation of the camera relative to the part and other

digitization parameters. The goal of the sensing plan is to improve the accuracy of the depth measurement in order to be able to use the cloud of 3D points in inspection tasks. After registration between the 3D data and the CAD model, the cloud is segmented. Segmentation results are used to check dimensional and geometric tolerances of the part.

Keywords

Inspection, Numerisation, Image segmentation, CAD based vision.

1 Introduction

La CAO (Conception Assistée par Ordinateur) est maintenant, et cela depuis de nombreuses années, utilisée dans l'industrie, et les logiciels continuent à évoluer en permanence. A partir du noyau central de ces logiciels (conception de pièces mécaniques) sont apparus des logiciels de FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur) et de robotique, ceux-ci permettant, en plus de la visualisation en statique des encombrements et des contacts avec l'environnement, de simuler des trajectoires soit d'outils soit de robots.

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

grande lenteur, plusieurs dizaines de minutes pour obtenir un nuage d'une centaine de points. Ce nuage de points sera ensuite traité par un logiciel qui donnera automatiquement les résultats du contrôle.

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

Enfin, la réalisation de prototypes grâce aux machines de prototypage rapide, qui sont associées à des logiciels de CFAO, permettent d'obtenir des pièces en quelques heures. Ce gain de temps sera complètement annihilé si on ne peut effectuer le contrôle, donc valider la conception en quelques minutes. La rapidité du contrôle ne pourra être effective que si l'on dispose de capteurs autres que les capteurs à contact montés sur une MMT. Un seul type de capteur permettra ce gain de temps significatif, ce sont les télémètres laser à balayage. Ils autorisent une vitesse de numérisation de l'ordre de 20000 *points par seconde* avec des précisions de l'ordre de 25 μm pour les meilleurs. Il devient alors possible d'envisager le développement d'applications de MTAO intégrant les données de conception.

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

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

Nous présentons dans ce travail une analyse et la démonstration de la faisabilité de réalisation d'applications de MTAO automatique.

2 Modèle du bruit du capteur

Afin d'évaluer l'exactitude des données 3D obtenues lors de la numérisation d'une surface ou d'une pièce avec le capteur autosynchronisé (développé au CNRC [1]), nous

avons réalisé des mesures dans différentes positions de distance et d'orientation du capteur laser par rapport à la surface. Les mesures ont été effectuées après le processus de calibrage du capteur, et les positions de celui-ci (position, orientation) étaient proche des conditions de calibrage.

L'objectif des mesures est la détermination de la matrice de covariance Σ , que nous définissons par: $\Sigma = \Sigma(\alpha) + \Sigma(\beta) + \Sigma(d)$, où:

- α est l'angle d'incidence du faisceau laser sur la surface dans la direction du balayage du rayon.
- β est l'angle d'incidence du faisceau laser sur la surface dans la direction perpendiculaire au balayage du rayon laser.
- d la distance du capteur de profondeur à la surface.

Nous montrons dans la Figure 1 l'allure de la variance en z (σ_{zz}), l'équation $\sigma_{zz}(\alpha) = 3.77 \times 10^{-7} e^{6.01 \times 10^{-2} |\alpha|}$ (α en degrés) définit la meilleure courbe qui approche les valeurs réelles.

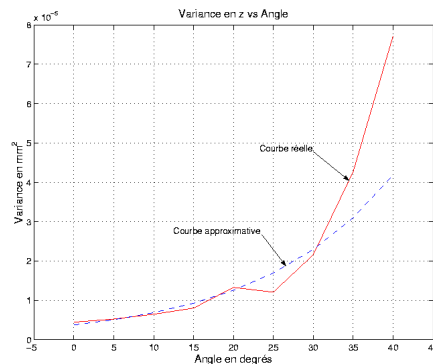


Fig. 1. Variance en z en fonction de l'angle d'incidence α .

L'allure de la courbe est exponentielle, donc une valeur plus petite de la dispersion est produite pour un angle d'incidence près de zéro degré, ce qui suggère un emplacement optimal du capteur dans la direction normale à la surface. La courbe d'ajustement est valable dans l'intervalle $0^\circ \leq \alpha \leq 35^\circ$, donc lors de la numérisation d'une surface, l'angle d'incidence du faisceau laser sur la surface doit être compris dans l'intervalle $-35^\circ \leq \alpha \leq 35^\circ$. L'intervalle commence à -35° et non à 0° parce que nous avons un résultat symétrique quand l'angle α varie dans la direction opposée. Pour cet intervalle du paramètre α , la variance σ_{zz} peut prendre des valeurs dans l'intervalle $0.38 \text{ mm}^2 \leq \sigma_{zz}(\alpha) \leq 3.09 \text{ mm}^2$.

La matrice de covariance en fonction de l'angle β a été déterminée par des mesures effectuées avec plusieurs orientations du capteur de profondeur, dans une direction

perpendiculaire à celle du balayage du faisceau laser. La meilleure courbe qui ajuste la courbe réelle est la courbe exponentielle définie par $\sigma_{zz}(\beta) = 5.47 \times 10^{-6} e^{4.15 \times 10^{-2} |\beta|}$. Comme pour le cas de la variation en fonction de l'angle α , lors de la numérisation, l'angle d'incidence du faisceau laser sur la surface dans la direction perpendiculaire au balayage du rayon laser doit être compris dans l'intervalle $-15^\circ \leq \beta \leq 15^\circ$ (donc $5.47 \text{ mm}^2 \leq \sigma_{zz}(\beta) \leq 10.19 \text{ mm}^2$).

En changeant la distance du capteur par rapport à la surface, nous avons déterminé la matrice de covariance en fonction du paramètre d . L'équation $\sigma_{zz}(d) = 8.86 \times 10^{-10} d^2 - 3.47 \times 10^{-7} d + 3.81 \times 10^{-5}$ est la courbe qui ajuste au mieux l'allure de la variance en z . Nous concluons que lors de la numérisation d'une surface, le capteur de profondeur doit être placé dans l'intervalle de distance suivant: $170 \text{ mm} \leq d \leq 240 \text{ mm}$ (donc $4.72 \text{ mm}^2 \leq \sigma_{zz}(d) \leq 5.85 \text{ mm}^2$).

L'analyse précédente confirme que nous pouvons améliorer l'exactitude des données 3D acquises par le capteur de profondeur en plaçant le capteur d'une façon telle que les paramètres α , β et d minimisent la matrice de covariance Σ . Nous remarquons aussi que le paramètre α introduit la plus grande dispersion, tandis que le paramètre d introduit la plus petite.

3 Stratégie d'acquisition optimale de points 3D

Le but principal de cette stratégie d'acquisition est d'améliorer la précision de numérisation d'une surface ou d'une pièce et de connaître la précision avec laquelle chaque point 3D a été acquis afin d'utiliser ce nuage de points dans la tâche d'inspection. Nous définissons la stratégie de numérisation d'une pièce comme la détermination d'un ensemble de points de vue optimaux de façon à ce que l'image 3D soit optimale pour la tâche d'inspection. De façon générale, les travaux en stratégies d'acquisition optimisent le nombre de points de vue [2 – 4].

Point de vue. Est défini comme l'ensemble de sept paramètres $x^i = \{x, y, z, \phi, \theta, \psi, \gamma\}^i$ composé de trois paramètres de position, trois paramètres d'orientation et un paramètre de balayage. Le paramètre γ spécifie le champ de vue du capteur. La Figure 2 illustre tous les paramètres qui définissent un point de vue.

- *Paramètres de position.* Ces paramètres dans R^3 définissent la position spatiale du capteur par rapport au système référentiel de la pièce. Ce sont les coordonnées (x, y, z) .
- *Paramètres d'orientation.* Ces paramètres dans R^3 définissent l'orientation que doit prendre le capteur lors de la numérisation. Ce sont les angles (ϕ, θ, ψ) ,

l'angle ϕ par rapport à l'axe Z , l'angle θ par rapport au plan XY et l'angle ψ par rapport à l'axe de projection du rayon laser qui définit la direction du balayage.

- *Paramètre de balayage.* Le paramètre γ spécifie l'amplitude du balayage du rayon laser, ce paramètre est aussi appelé le "champ de vue du capteur". Un autre paramètre qui est défini quand le support mécanique de la caméra est un bras de robot est ζ . Il définit l'amplitude du balayage du capteur réalisée par le support mécanique et dans une direction perpendiculaire à la direction du balayage du rayon laser.

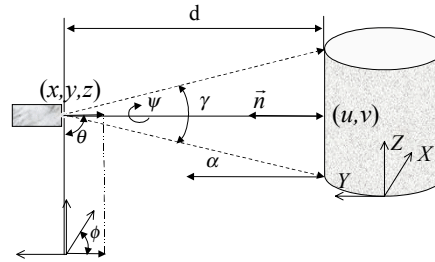


Fig. 2. Définition des paramètres d'un point de vue

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

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

Algorithme pour déterminer une stratégie de numérisation optimale

1. Traitement des données d'entrée.
 - 1.1. Extraction de l'information à partir du fichier CAO.
 - 1.2. Création d'un modèle voxel de la pièce.
2. Recherche de l'ensemble \mathbf{X} de points de vue.
 - 2.1. Détermination des points de vue projetés sur la surface.
 - 2.2. Localisation optimale du point de vue dans l'espace.
 - 2.3. Vérification de l'accessibilité et des conditions de non-occlusion.
3. Estimation de la précision des données 3D.
4. Présentation optimale de l'ensemble \mathbf{X} de points de vue.

Par la suite nous présentons rapidement chaque étape de cet algorithme, dans Prieto [5] on peut trouver une description plus détaillée.

4.1 Traitement des données d'entrée

Cette étape est composée essentiellement de deux processus qui servent à extraire, à partir des données d'entrée, l'information nécessaire pour réaliser la recherche de l'ensemble de points de vue. Dans un premier processus, le fichier CAO de la pièce (format IGES) est lu et utilisé pour déterminer les surfaces composantes de la pièce. Le deuxième processus consiste à la création d'un modèle *voxel* de la pièce.

4.2 Recherche de l'ensemble X de points de vue

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

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

Localisation du point de vue dans l'espace. Pour chaque point qui appartient à l'ensemble de points de vue projeté PVP_{S_i} dans l'espace discret (u^d, v^d) , nous orienterons les points de vue répondant aux conditions optimales de distance et d'orientation choisies en fonction du modèle du capteur. De la Section 2 nous concluons que la meilleure orientation pour localiser le point de vue est en suivant la direction normale à la surface \vec{S}_i . Pour trouver la direction normale au point $(u^d, v^d) \in PVP_{S_i}$, nous déterminons son point équivalent $(u, v) \in \vec{S}_i$, et nous utilisons les paramètres de la surface NURBS. La direction normale au point (u, v) est déterminée en utilisant l'équation suivante:

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

$$\text{avec } \vec{r}_u = \frac{\partial \vec{r}}{\partial u} = \frac{AB - CD}{B^2} \text{ et } \vec{r}_v = \frac{\partial \vec{r}}{\partial v} = \frac{EB - FD}{B^2}.$$

où

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

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

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

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

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

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

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

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

où: n est le nombre de points de contrôle dans la direction paramétrique u, m est le nombre de points de contrôle dans la direction paramétrique v, $\vec{P}_{i,j}$ les points de contrôle, $w_{i,j}$ le poids associé au point de contrôle $\vec{P}_{i,j}$, $N_{i,p}$ (ou $N_{j,q}$) les fonctions de la base B-Splines définies.

Vérification de l'accessibilité et de la visibilité du point de vue. Pour l'accessibilité, nous supposons que la pièce est dans l'espace du travail du système capteur/support mécanique. Cet espace définit la région dans laquelle nous pouvons déplacer le capteur, toujours orienté vers le centre de l'espace. Pour la MMT cet espace a la forme d'un parallélépipède. Le point de vue est transformé du système référentiel de la pièce au système référentiel de l'espace de travail. Si nous obtenons une position valable, nous dirons que le point de vue est accessible.

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

Pour l'évaluation des conditions de non-occlusion, une sonde est envoyée à partir du point de vue vers la région qui doit être numérisée. La stratégie vérifie (en utilisant le modèle voxel de la scène) qu'aucune partie de la pièce intersecte la sonde, autrement dit, que la sonde est capable

d'arriver à son objectif. Quand un problème d'occlusion est détecté, le système recherche un nouveau point de vue en déplaçant l'ancien dans la direction du balayage du rayon laser. Le déplacement est fait en augmentant et en diminuant l'angle d'incidence du rayon laser, dans la direction du balayage et des deux côtés du point de vue projeté. Le nouveau point de vue doit permettre de numériser les régions de la surface souhaitée, et en plus il doit rester le plus proche possible de la direction normale du point de vue projeté afin d'optimiser la précision des mesures.

4.3 Estimation de la précision des données 3D

Nous avons vu à la section 2 que l'exactitude des points mesurés par les capteurs de profondeur est fonction de la distance d entre le capteur et la pièce à numériser et des angles α et β et d'incidence du rayon laser. Ainsi, pour estimer l'exactitude des points mesurés, nous devons calculer ces paramètres.

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

$$\Sigma_{x_0 z_0} = \begin{pmatrix} \sigma_{x_0 x_0} & \sigma_{x_0 z_0} \\ \sigma_{z_0 x_0} & \sigma_{z_0 z_0} \end{pmatrix}$$

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

La matrice de dispersion globale est estimée en calculant la somme des dispersions introduites par chaque paramètre d , α et β , ceux-ci obtenus à partir des modèles développés à la Section 2.

Si l'exactitude des points mesurés ne satisfait pas la spécification, un nouvel ensemble de points de vue doit être défini. Ce nouvel ensemble de points de vue est composé de deux trajectoires parallèles qui utilisent la trajectoire précédente comme bord.

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

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

La dernière étape de la stratégie consiste à présenter l'ensemble X de points de vue de façon que le déplacement entre points de vue, réalisé par le support mécanique, soit optimal, c'est-à-dire que les changements

des paramètres d'un point de vue à un autre soient minimaux pour réduire le temps de numérisation.

4.5 Apport de la stratégie

Dans la Figure 3 nous présentons la planification pour la numérisation d'une pièce complète qui est composée de surfaces planes. La stratégie montrée a été produite par le système de numérisation composée d'un capteur autosynchronisé monté sur une MMT. Nous remarquons que tous les problèmes d'occlusion ont été résolus.

Nous présentons dans la Figure 4 la planification pour la numérisation d'une pièce complète qui est composée de surfaces complexes. Nous remarquons que la variation des points de vue demeure toujours près à la direction normale des surfaces.

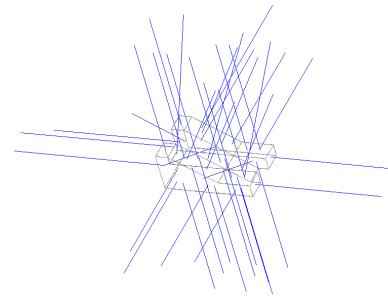


Fig. 3. Stratégie de numérisation pour une pièce simple

Nous résumons dans le Tableau 1 les résultats de la mesure de la distance moyenne entre chaque point du nuage et le point le plus proche sur la surface NURBS. La moyenne de la distance pour la numérisation standard est présentée dans la colonne *Dist Num Stand* et la distance pour la numérisation utilisant la stratégie d'acquisition est présentée dans la colonne *D N Strat*. Nous présentons dans la dernière colonne l'amélioration obtenue quand la stratégie est utilisée.

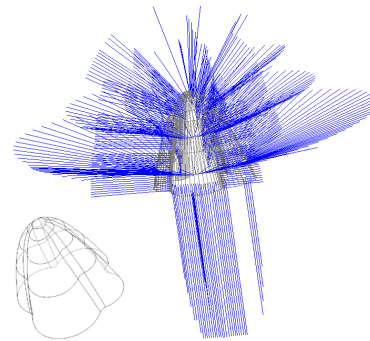


Fig. 4. Stratégie de numérisation pour une pièce complexe

Pièce	Dist N Stand	Dist N Strat	Amélioration
Pièce un	73 μm	48 μm	25 μm (34%)
Pièce deux	106 μm	92 μm	14 μm (13%)
Pièce trois	99 μm	66 μm	33 μm (33%)
Pièce quatre	153 μm	100 μm	53 μm (35%)

Tab. 1. Mesure de la distance entre chaque point 3D et le point le plus proche sur la surface NURBS

La plus petite distance moyenne obtenue est celle de la pièce un, suivie de celle de la pièce trois, qui sont deux pièces composées seulement par des surfaces planes. Pour ces deux pièces nous obtenons une amélioration d'environ 33%. Pour la pièce quatre l'amélioration obtenue est de 35% mais la distance moyenne est de 100 μm : elle représente la distance la plus grande. Ce résultat est dû au fait que cette pièce est composée de surfaces avec des courbes complexes, et donc l'angle d'incidence du faisceau laser est éloigné de l'angle d'incidence optimal. Finalement, pour la pièce deux l'amélioration est seulement de 13% avec une distance moyenne de 92 μm . Ceci est dû à la forme de la pièce qui, en plus d'être composée de quelques surfaces courbes, a des problèmes d'occlusion, et c'est pourquoi la numérisation se fait dans des conditions non-optimales.

Les résultats présentés montrent que la précision des données 3D obtenues avec des capteurs de profondeur peut être améliorée par l'utilisation d'une stratégie d'acquisition. Ces données 3D à haute précision sont particulièrement intéressantes pour le contrôle de tolérances très fines.

4 Vérification de tolérances

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

Lors du tolérancement d'une pièce, seules quelques surfaces sont affectées de tolérances géométriques. Le

problème qui se pose est donc: définir une méthode pour contrôler ces tolérances avec les données 3D obtenues à l'aide d'un capteur télémétrique. Nous savons qu'un tel capteur nous fournit un nuage de points 3D dans lequel il y a toujours des points appartenant à plusieurs surfaces, par conséquent une étape de segmentation s'avère nécessaire.

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

Après la numérisation de la pièce, nous avons deux ensembles de données, le premier est le fichier CAO issu de la conception et le second, le nuage de points 3D. Ces données sont exprimées chacune dans leur propre repère. L'opération qui consiste à superposer ces deux ensembles en calculant la transformation rigide (rotation + translation) est celle que l'on appelle le recalage ou la mise en registre. Le problème du recalage a été abordé par plusieurs chercheurs: Zhang [6], Dorai [7].

Moron *et al* [8-9] ont développé une méthode de recalage que nous avons utilisée dans ce travail. Celle-ci repose sur le travail bien connu de Besl et McKay [10], qui ont développé une méthode générale, précise et facilement implémentable de mise en registre de formes 3D, prenant en compte même les surfaces gauches. La méthode est basée sur l'algorithme ICP (Iterative Closest Point) qui ne nécessite qu'un calcul de distance pour trouver le point le plus proche d'une forme géométrique à un point donné. La transformation rigide est calculée en utilisant les quaternions. Mais comme l'estimation de la transformation est donnée par une distance aux moindres carré, la méthode n'est pas suffisamment robuste par rapport aux points n'appartenant pas à la forme (points dûs au bruit ou à la présence d'autres formes dans la scène). Comme solution à ce problème, Masuda et Yokoha [11] estiment la transformation entre deux images de profondeur de façon robuste en intégrant l'algorithme ICP avec un échantillonnage aléatoire et une estimation de la médiane au moindre carré (Least Median Square - LMS). Ils ont montré que la mise en registre entre deux images se fait avec une très grande robustesse (jusqu'à 50% de points aberrants). Moron a implémenté un algorithme pour la mise en registre d'un nuage de points 3D non-ordonnés, avec un modèle CAO de format STL ou NURBS reposant sur cette méthode.

4.2 Segmentation de données 3D

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

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

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

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

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

4.3 Tolérances géométriques

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

Tolérance de forme. C'est la valeur maximum autorisée de la déviation de forme d'un élément. Suivant la géométrie de l'élément, la zone de tolérance est limitée par deux lignes ou par deux surfaces, de forme adéquate, distantes de t entre lesquelles doit se situer la ligne ou la surface considérée. Une tolérance de forme s'applique uniquement à la forme de l'élément tolérancé indépendamment de son environnement, de sa position ou de son orientation. L'ensemble des tolérances de forme qui s'appliquent aux surfaces comprend des tolérancements tels que: planéité, cylindricité, surface quelconque.

Nous vérifions les tolérances de forme d'une surface en utilisant seulement les points 3D associés à cette surface et obtenus à partir du procédé de segmentation. Ce sous-ensemble de points 3D est de nouveau recalé avec le modèle CAO, et la distance entre chaque point 3D et la

surface NURBS est calculée. La distribution de ces distances est utilisée pour définir la zone de tolérance mesurée. En effet, nous ajustons la valeur moyenne de la distribution avec la surface NURBS (du modèle CAO). En faisant passer deux surfaces parallèles à la surface NURBS à une distance de $\pm 2\sigma$, la tolérance mesurée est donc égale à: $t_m = 4\sigma$. Pour la tolérance de planéité, ces surfaces sont des plans tandis que pour la tolérance de cylindricité, ces sont des cylindres de différents rayons.

Pour toutes les tolérances de forme, nous dirons que la surface est conforme aux spécifications si la relation suivante est satisfaite: $t_m \leq t_s$, où: t_m est la distance entre les plans parallèles mesurés et t_s est la distance spécifiée entre les plans parallèles.

Tolérance d'orientation. C'est la valeur maximum autorisée de la déviation de l'orientation d'un élément. Suivant la géométrie de l'élément, la zone de tolérance est limitée par deux droites, deux plans, un parallélépipède ou un cylindre à l'intérieur desquels doit se situer la ligne ou la surface considérée. Un tolérancement d'orientation limite uniquement la dispersion d'orientation de l'élément tolérancé, indépendamment de sa position, et en conséquence, une zone d'orientation est mobile en translation et ne détermine ni contrôle la position de l'élément. Les tolérancements géométriques d'orientation sont: la tolérance de parallélisme, la tolérance de perpendicularité et la tolérance d'inclinaison.

Pour définir l'orientation, ces tolérances sont toujours rapportées à une surface de référence. Par conséquent, nous devons utiliser deux sous-ensembles de points: S_i associé à la surface à inspecter et S_r associé à la surface de référence et qui sera la référence réelle. Le sous-ensemble S_r est recalé avec le modèle CAO et la transformation rigide trouvée est aussi appliquée à S_i . La distance entre chaque point 3D de S_i et la surface NURBS est calculée. La distribution de ces distances n'a pas forcément une forme gaussienne, et donc deux points sont définis afin d'évaluer la zone de tolérance mesurée: p_1 à une distance d_1 de la surface NURBS tel que 2.5% des points en S_i ont une distance $d_i \leq d_1$. Le point p_2 à une distance d_2 de la surface NURBS tel que 2.5% des points en S_i ont une distance $d_i \geq d_2$. La zone de tolérance mesurée est alors définie comme celle comprise entre deux plans parallèles et orientés par rapport à une surface de référence. Les deux plans passent par les points p_1 et p_2 , pour garantir que 95% des points en S_i sont compris. Pour la tolérance de parallélisme, les plans sont orientés parallèlement à la référence; pour la tolérance de perpendicularité, ils sont perpendiculaires; et pour la tolérance d'inclinaison, ils forment l'angle spécifié avec la surface de référence.

Pour les tolérances d'orientation, la surface inspectée est conforme à la spécification t_s si la relation suivante est satisfaite: $t_m = |d_2 - d_1| \leq t_s$.

Tolérance de position. C'est la valeur maximum autorisée de la déviation de la position d'un élément. Suivant la spécification et la géométrie de l'élément, la zone de tolérance est limitée par deux droites, deux plans, un cercle, un parallélépipède ou un cylindre à l'intérieur desquels doit se situer la ligne ou la surface considérée. Un tolérancement de position limite à la fois les erreurs de position, d'orientation et de forme d'un élément. Les tolérancements géométriques de position forment un groupe qui comprend: la tolérance de localisation, la tolérance de coaxialité et de concentricité.

Les tolérances de position sont contrôlées de façon similaire aux tolérances d'orientation. Pour assurer la conformité de la surface sous inspection, la relation suivante doit être satisfaite : $t_{1s} \leq t_{1m} < t_{2m} \leq t_{2s}$, où : t_{1s} et t_{2s} sont les distances au plan qui définissent la zone de tolérance spécifiée jusqu'à la référence, et t_{1m} et t_{2m} sont les distances de plan qui définissent la zone de tolérance mesurée jusqu'à la référence réelle.

5 Résultats

Afin de connaître les déviations exactes des caractéristiques géométriques que nous allons inspecter, qui sont spécifiées dans la Figure 5, nous avons réalisé le contrôle de celles-ci en utilisant une MMT qui a une précision de $5 \mu\text{m}$. Nous présentons les résultats dans le Tableau 2.

Les résultats montrent que sauf la tolérance géométrique de planéité, toutes les tolérances contrôlées sont conformes à leurs spécifications.

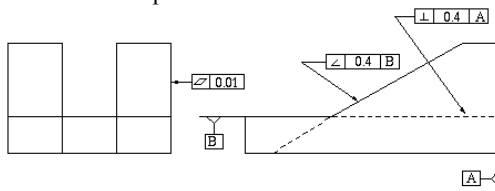


Fig. 5. Spécifications des tolérances géométriques sur une pièce

Tolérance	T. Spécif.	T. Mesur.	Nb. pts	Résultat
Planéité	10 μm	10.8 μm	20	Conforme
Perpendic.	400 μm	39 μm	29	Conforme
Inclinaison	400 μm	26 μm	32	Conforme

Tab. 2. Contrôle de tolérances en utilisant la MMT

Dans la Figure 6 nous présentons quelques des nuages de points 3D utilisés pour l'inspection des tolérances. Ces sous-ensembles de points 3D ont été obtenus avec la méthode de segmentation développée.

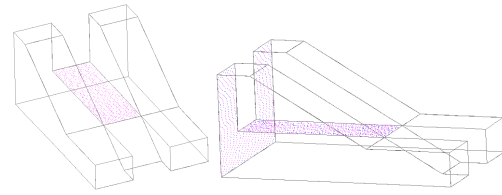


Fig. 6. Sous-ensembles de points 3D utilisés pour le contrôle des tolérances géométriques

Les résultats du contrôle de tolérances en utilisant le nuage de points 3D issu du processus de numérisation sans la stratégie, avec le capteur autosynchronisé sont rassemblés au Tableau 3. Lors d'une numérisation standard avec le capteur autosynchronisé nous estimons donc que des tolérances dont les spécifications sont supérieures ou égales à $75 \mu\text{m}$ peuvent être contrôlées.

Tolérance	T. Spécif.	T. Mesur.	Nb. pts	Résultat
Planéité	10 μm	146 μm	888	Non-Conf
Perpendic.	400 μm	267 μm	1680	Conforme
Inclinaison	400 μm	299 μm	2625	Conforme

Tab. 3. Contrôle de tolérances en utilisant le nuage de points issu du processus de numérisation sans la stratégie

Le Tableau 4 rassemble les résultats du contrôle de tolérances en utilisant le nuage de points issu du processus de numérisation avec la stratégie d'acquisition pour le capteur autosynchronisé monté sur la MMT. Les résultats de l'inspection de tolérances obtenus sont identiques aux cas précédents, mais les valeurs de tolérances mesurées sont plus petites. Ces tolérances sont comprises entre $13 \mu\text{m}$ et $180 \mu\text{m}$ avec une valeur moyenne de $66 \mu\text{m}$. La numérisation de pièces en utilisant la stratégie d'acquisition nous permettra donc de contrôler les tolérances dont les spécifications sont plus grandes ou égales à $50 \mu\text{m}$.

Tolérance	T. Spécif.	T. Mesur.	Nb. pts	Résultat
Planéité	10 μm	72 μm	1467	Non-Conf
Perpendic.	400 μm	134 μm	2166	Conforme
Inclinaison	400 μm	41 μm	1745	Conforme

Tab. 4. Contrôle de tolérances en utilisant le nuage de points issu du processus de numérisation avec la stratégie

Nous avons présenté dans la colonne *Nb. pts* des tableaux de contrôle de tolérances le nombre de points 3D ou mesures utilisés pour chaque contrôle. En général ce nombre est supérieur à 1000 points par surface, distribués uniformément sur toute la surface. Cette caractéristique de la méthode d'inspection visuelle est très intéressante. Car avec un capteur à contact monté sur une MMT, il est impossible au point de vue pratique d'acquérir autant de points car cela nécessiterait plusieurs heures de travail par surface.

6 Conclusion

Ce travail est une première approche de la Métrologie Assistée par Ordinateur ; notre conclusion est qu'à l'heure actuelle la seule limitation à ce problème de contrôle, tel que nous l'avons résolu, est surtout un problème de capteurs. Si l'on peut trouver un capteur très précis (même précision que celle obtenue avec une MMT, soit le μm), sans contact et permettant des vitesses d'acquisition de l'ordre de *20000 points par seconde*, alors il sera possible de faire prendre des décisions sur la conformité d'une pièce par un ordinateur.

Afin d'effectuer le contrôle de tolérances dimensionnelles et géométriques, il a été nécessaire de développer un outil de segmentation du nuage des points en surfaces, qui nous permettront de vérifier ces tolérances. Initialement, le nuage de points 3D est recalé avec le modèle CAO de la pièce. La méthode de recalage que nous avons utilisée est très robuste et peut supporter jusqu'à 50% de points aberrants. La méthode repose sur le tirage aléatoire d'échantillons pour calculer la transformation rigide permettant de superposer les deux entités. Suite au recalage, pour chaque point 3D du nuage, le point le plus proche de la surface est calculé et utilisé pour la comparaison de caractéristiques géométriques locales, et ainsi on peut décider du label (surface) à associer au point 3D. Cet outil de segmentation est gourmand en temps calcul, mais très robuste. Une fois la segmentation effectuée, le contrôle des tolérances n'est que du calcul peu complexe à effectuer. Ce n'est donc qu'un problème de temps pour implanter l'ensemble des tolérances spécifiées par les normes, dans notre logiciel.

Bibliographie

- [1] Blais F., Rioux, M. And Beraldin J.A., "Practical considerations for a design of a high precision 3-D laser scanner system", in *SPIE Proceedings, Optomechanical and Electro-Optical Design of Industrial Systems*, pp. 225-246, June 1988.
- [2] Tarbox, G.H. and Gottschlich, S.N., "Planning for complete sensor coverage in inspection", *Computer Vision and Image Understanding*, 61, pp. 84-111, January 1995.
- [3] Tarabanis, K.A., Tsai, R.Y. and Anil, K., "Computing occlusion-free viewpoints", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 18, pp. 279-292, March 1996.
- [4] Trucco, E., Umasuthan, M., Wallace, A.M. and Roberto, V., "Model-based planning of optimal sensor placements for inspection", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 13, pp. 182-194, April 1997.
- [5] Prieto, F. "Métrologie assistée par ordinateur: apport des capteurs 3D sans contact". *Ph.D. dissertation* :

Laboratoire d'Automatique Industrielle, INSA de Lyon, France, 168 p, December 1999.

- [6] Zhang, Z., "Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces", *International Journal of Computer Vision*, 13, pp. 119-152, 1994.
- [7] Dorai, C., Weng, J. and Jain, A.K., "Optimal registration of object views using range data", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 19, pp. 1131-1138, October 1997.
- [8] Moron, V. "Mise en correspondance de données 3D avec un modèle CAO: Application à l'inspection automatique". *Ph.D. dissertation: Laboratoire d'Automatique Industrielle*, INSA de Lyon, France, 212 p, Décembre 1996.
- [9] Moron, V., Boulanger, P., Redarce, H.T. and Jutard, A., "3D Range data/CAD model comparison: industrial parts conformity verification". In *Proceedings of the First International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, IDMME'96*, Nantes, France, pp. 1023-1032, April 1996.
- [10] Besl, P.J. and McKay, N.D., "A method for registration of 3-D shapes", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14, pp. 239-256, February 1992.
- [11] Masuda, T. And Yokoya, N. "A robust method for registration and segmentation of multiple range images", *Computer Vision and Image Understanding*, 61, pp. 295-307, May 1995.