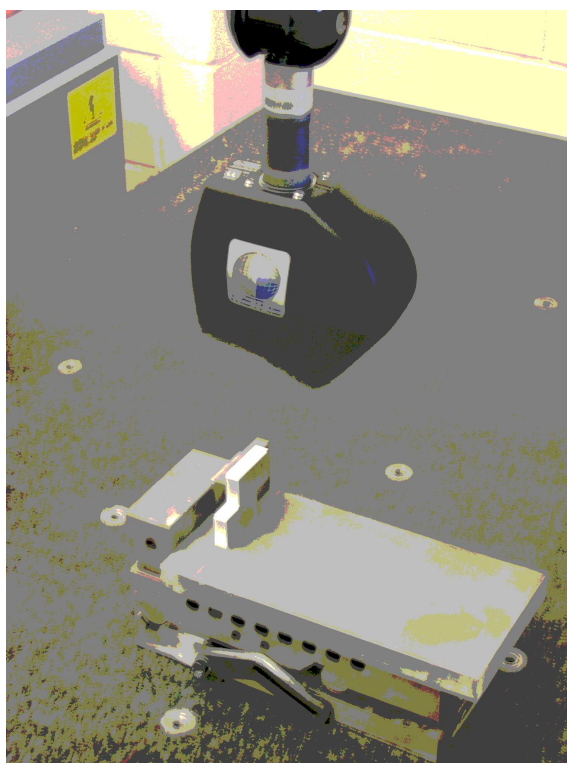


Rapport de stage : IMS center - Windsor - Canada

Caractérisation des capteurs lasers plan pour l'inspection



Maître de stage : Pr. Hoda ElMaraghy - IMS center - Canada
Enseignant correspondant : Pr. Pierre Bourdet - ENS Cachan -

Raphaël LAGUIONIE

11/09/2005

Remerciements

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui ont rendu ce stage possible et en ont fait une période très agréable et enrichissante :

Pr. Hoda Elmaraghy, mon maître de stage au centre IMS de Windsor, qui a acceptée de m'accueillir dans le laboratoire et qui m'a donné l'opportunité de vivre 3 mois très plaisants.

Pr. Waghuy Elmaraghy, qui a été mon premier contact au laboratoire et qui a rendu ce stage possible. Merci aussi d'être si accessible et de mettre tout en oeuvre pour permettre de partager votre savoir.

Pr. Pierre Bourdet, mon tuteur à l'ENS, pour m'avoir accordé du temps en vidéoconférence pour me faire partager votre précieux point de vue et savoir.

Dr. Sébastien Rémy, qui a été un très bon guide durant ce stage : il a suivi et supervisé mon travail, me donnant de bons conseils lorsque j'en avais besoin. Merci aussi de m'avoir éclairé et appris beaucoup de choses sur le monde de la recherche. Par dessus tout, il a été très accessible dès le début, que ce soit pendant les heures au laboratoire comme en dehors.

Armed Mohib que je serais enchanté de revoir en Egypte.

Billiana, Ana, Paul, Zaina qui m'ont chaleureusement accueilli et m'ont beaucoup aidé, tant pour franchir la barrière de la langue que pour me faire découvrir le Canada.

A toutes les autres personnes du laboratoire et de l'université qui ont rendu cet endroit très agréable.

Résumé :

La caractérisation d'un capteur laser a pour but de déterminer l'ensemble des conditions qui permettent au capteur de restituer un nuage de points avec une qualité donnée lors de la numérisation d'une pièce. Nous nous proposons de mettre au point une méthode expérimentale de caractérisation d'un capteur laser. Nos travaux proposent une méthode standard basée sur un plan d'expériences facilement reproductible et sur l'utilisation d'un artefact de mesure précis et simple à réaliser. Notre démarche permet de tester l'influence de trois facteurs (la distance du capteur laser à la pièce, l'angle d'inclinaison dans le plan laser et l'angle d'incidence entre le plan laser et la surface) sur des indicateurs qui permettent à chaque utilisateur de définir la qualité du nuage de point (précision de la mesure et bruit de numérisation). Appliquée par la suite au capteur Metris LC50 du laboratoire IMS center de l'université de Windsor, Canada, notre approche a été validée en terme de répétabilité et nous a apporté des résultats permettant de caractériser le capteur Metris. La validation de celle ci doit se poursuivre en effectuant ces mêmes expériences dans d'autres laboratoires équipés du capteur Metris mais aussi dans des laboratoires équipés d'autres capteurs.

Abstract :

Characterise a sensor is to determine the set of conditions that permits to this sensor to provide a point cloud with a given quality depending on the application. In this study, we are going to design a method based on experiments to characterise a laser sensor. Our work propose a standard method based on an easily reproducible set of experiments. We use an accurate artefact which is simple to realize. This method allows to test the influence of three parameters (the distance between laser sensor and the part, the incline angle in the laser plane and the incidence angle between the laser plane and the surface) on indicators that allow every user to define the quality of the point cloud (accuracy of the measure and noise of digitization). Thereafter applied to the sensor Metris LC50 at laboratory IMS center of the university of Windsor, Canada, our approach was validated in terms of repetability and we had results allowing to characterise the sensor Metris. The validation of the method must continue by doing these experiments in other laboratories on sensors Metris but also on other laser plane sensors.

Table des matières

1	Présentation du cadre de l'étude	9
1.1	Le laboratoire IMS center de Windsor	9
1.2	Définition de la problématique	10
2	Approche et 'état de l'art'	11
2.1	Quelques modèles différents	11
2.2	Fonctionnement global d'un capteur laser	11
2.2.1	Coordonnées des points dans l'espace	13
2.2.2	Fenêtre de mesure et principe d'acquisition	13
2.3	Stratégie de scan d'une surface	14
2.3.1	Directions locales d'accessibilité (LAD)	14
2.3.2	Directions globales d'accessibilité (GAD)	15
2.3.3	Détermination des directions de scan	15
2.4	Caractérisation d'un capteur laser	16
2.4.1	Définition	16
2.4.2	Survey	16
3	Analyse, synthèse et mise en place de l'expérimentation	19
3.1	Mesure d'une pièce	19
3.1.1	Distance entre le capteur et la surface de la pièce : d	19
3.1.2	Angle d'incidence dans le plan du scanning α	20
3.1.3	Angle d'incidence dans le plan perpendiculaire au plan du scanning β	20
3.1.4	Intensité du laser	21
3.2	Mesures répétées	21
3.3	Indicateurs	22
3.3.1	La précision	22
3.3.2	Le bruit	22
3.3.3	La densité	22
4	Etude expérimentale et résultats	23
4.1	Etude préliminaire	23
4.2	Description du mode expérimental	24
4.3	Première série de mesures	25
4.4	Seconde série de mesures	28
4.5	Résultats :	30
4.5.1	Capteur Metris LC50 :	30
5	Perspectives	36
5.1	Application de la méthode à d'autres capteurs laser plan	36
5.2	Autres perspectives de travaux	37
6	Conclusion	38
7	Documents annexes	40

1 Présentation du cadre de l'étude

Mon stage de première année de master s'est déroulé au centre Intelligent Manufacturing Systems (IMS center) situé à l'université de Windsor, Canada. Cette étude s'est déroulée en trois phases principales : une partie bibliographique visant à rassembler les informations concernant 'l'état de l'art', une partie expérimentation où j'ai été amené à mettre en oeuvre les outils appropriés pour la caractérisation des capteurs lasers, et finalement une analyse des résultats de la méthode appliquée au capteur laser Metris de l'université de Windsor.

1.1 Le laboratoire IMS center de Windsor

La ville de Windsor est située à quelques centaines de mètres de Détroit (USA), séparée de celle-ci par la rivière Detroit, frontière naturelle entre le Canada et les Etats-unis. C'est une ville d'environ 200 000 habitants dont l'économie est étroitement liée au secteur de l'automobile. C'est en effet le centre de l'automobile canadienne avec la présence des trois principaux constructeurs : General Motor (GM), Ford et Chrysler. C'est dans cet environnement que l'université de Windsor accueille près de 16 000 étudiants dans toutes les disciplines.

L'université de Windsor héberge une cinquantaine de laboratoires dans tous les domaines. La plupart de ces laboratoires sont en étroite collaboration avec le secteur de l'automobile et les projets dans ce domaine sont multiples. L'Intelligent Manufacturing Systems (IMS center) en fait partie et les lignes de recherche sont scindés en 3 axes regroupés sous forme de départements :

- l'IDM Laboratory dont la thématique est orientée vers la recherche appliquée et fondamentale en conception et fabrication.
- le FAR Laboratory (Flexible Automat Robotics Laboratory) dont la thématique est l'augmentation de la productivité, de la souplesse et de l'adaptabilité des systèmes de production à travers l'introduction de capteurs et de systèmes de simulation de production.
- L'AMR Laboratory (Advanced Manufacturing Research Laboratory) dont la thématique est l'intégration des technologies avancées dans les systèmes de production notamment avec des applications en robotique, métrologie 3D et rétroconception.

C'est dans ce dernier laboratoire qu'il m'a été offert de mener mon étude. Le parc machine était composé de 2 robots industriels (COMAU S2, COMAU 6.60R), une machine de prototypage rapide (Stratasys - Prodigy FDM), et enfin une machine à mesurer tridimensionnelle (CMM,DEA) équipée d'un capteur laser plan Metris LC50. Les logiciels à notre disposition pour le traitement des nuages de points numérisés sont Metriscan (fournit avec le capteur Metris) et Matlab v8.

1.2 Définition de la problématique

‘Caractérisation des capteurs lasers plan pour l’inspection’

La technologie laser-scanner montée sur machine à mesurer tridimensionnelle peut avoir plusieurs applications dont les 2 principales sont la rétro-conception et l'inspection de pièces. La rétro-conception consiste à fabriquer le modèle CAO en scannant un objet réel pour pouvoir, par la suite, fabriquer des objets identiques aux originaux. L'inspection consiste, quant à elle, en la comparaison entre le modèle CAO et l'objet réel fabriqué à partir de ce modèle CAO.

Dans le cadre de cette étude, je m'intéresserai donc plus particulièrement à des utilisations du capteur dans un contexte d'inspection des pièces. L'objectif à atteindre pendant ces trois mois est le suivant : après avoir effectué une recherche bibliographique des différentes sources d'erreurs et d'imprécisions de mesure par capteur laser, je m'intéresserai aux méthodes et aux essais possibles pour pouvoir les caractériser et les quantifier (choix d'indicateurs) .

Il en résultera donc un plan d'expérience mettant en jeu plusieurs artefacts convenablement choisis . Ce plan doit d'être applicable pour tout type de capteur laser plan. Ces expérimentations seront ensuite mises en place et effectuées sur le capteur laser Metris LC50 de l'IMS center de Windsor.







FIG. 1.1 – Inspection d'un prototype de modèle réduit

2 Approche et 'état de l'art'

La précision des données acquises par le capteur dépend des caractéristiques physiques et du mode de fonctionnement du capteur en lui-même. Ainsi, pour pouvoir caractériser un capteur et les données qu'il nous fournit, il est intéressant de connaître son mode de fonctionnement et les effets mis en jeu pour permettre la numérisation 3D d'une pièce.

2.1 Quelques modèles différents

Nous nous intéressons particulièrement aux capteurs laser plans dont quelques modèles sont donnés ci-dessous :

Sensors :	lc15	LC50	XC50	Zephir
				
Weight	300g	315g	510g	400g
Dimensions	105x62x90	110x70x150	147x135x87	150x55x70
Speed (pts/s)	19200	19200	3x6400	60x480
Width of the field of view	15mm	50mm	3 x 50mm	
Depth of the field of view	15mm	65mm	3 x 50mm	
Accuracy	8 μm	15 μm	15 μm	
Distance of safety	100mm	100mm	70mm	
Laser Class	2	2 ou 3R	2 ou 3R	

Les données fournies dans ce tableau sont les données constructeur. Elles nous donnent les caractéristiques dimensionnelles des capteurs ainsi qu'une première estimation de la précision. Cette dernière se situe entre 8 et 15 μm . Il faut cependant prendre ces valeurs avec précaution car elles ne sont garanties que dans des conditions définies par le constructeur.

2.2 Fonctionnement global d'un capteur laser

Un rayon laser est émit sur la surface de la pièce à mesurer (fig.2.1). Les propriétés de réflexion du matériau permettent l'émission d'une ligne de la couleur du laser à l'intersection entre le plan du laser et la surface de la pièce :

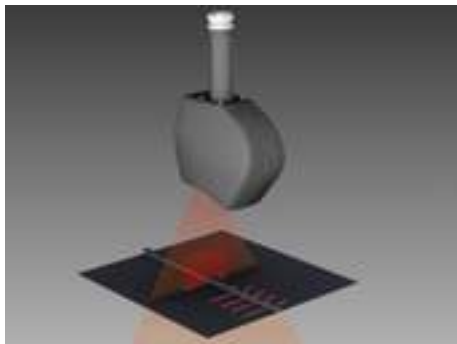


FIG. 2.1 – Intersection du plan laser et de la surface

Cette ligne lumineuse, image de la surface, est alors captée par la caméra CCD après être passé dans un système optique de lentilles (fig.2.2) :

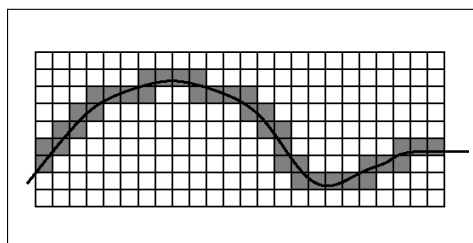


FIG. 2.2 – CCD camera

Le signal reçu par la caméra est alors numérisé et discrétisé pour devenir, un ensemble de points. Il est alors possible de numériser l'ensemble d'une pièce en déplaçant le capteur perpendiculairement au plan du laser. On effectue ainsi des mesures "par plans"

Remarque : l'image de la ligne reçue par la caméra CCD n'est pas parfaitement linéaire et le profil de l'intensité lumineuse est gaussien (fig.2.3). Il est donc nécessaire de sélectionner les points en fonction de la répartition de cette intensité lumineuse et pour cela, analyser le signal lumineux et le filtrer.

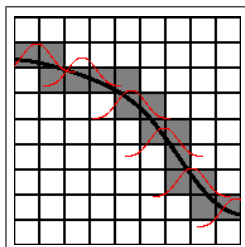


FIG. 2.3 – Répartition de l'intensité lumineuse

2.2.1 Coordonnées des points dans l'espace

Le système repère les coordonnées d'un point par triangulation optique. Dans le cas d'un capteur de profondeur classique, il est ainsi possible de calculer les coordonnées tridimensionnelles du point lumineux sur l'objet par simple trigonométrie de la façon suivante (fig.2.4) :

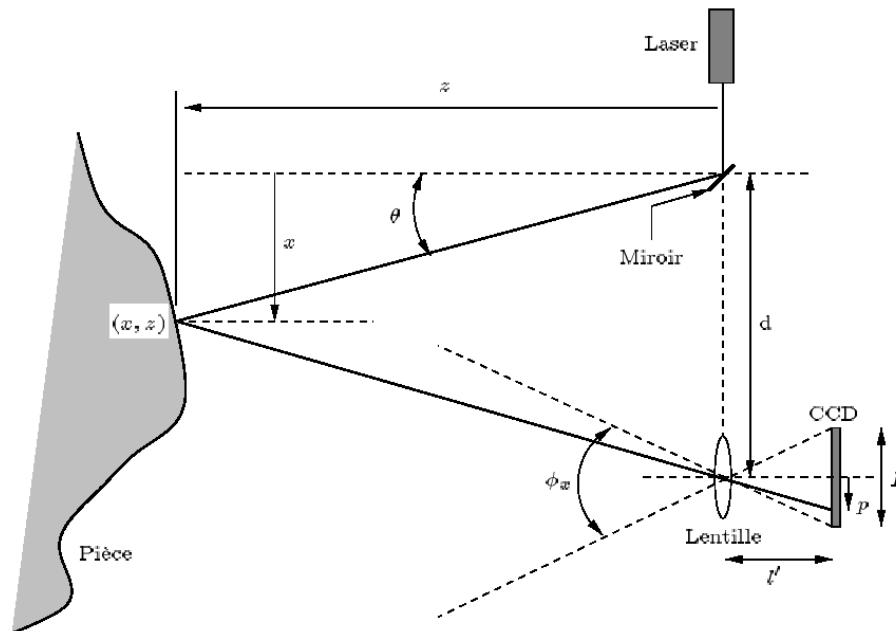


FIG. 2.4 – Triangulation optique

Les équations s'écrivent :

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

$$x = z \cdot \tan(\theta)$$

Ces équations permettent, en connaissant la distance focale du système optique, de calculer les coordonnées spatiales du point.

2.2.2 Fenêtre de mesure et principe d'acquisition

La taille de la caméra CCD et les propriétés du système optique de lentilles et du laser font que la mesure n'est possible que dans une zone appelée fenêtre de mesure ou champs de vue : c'est une zone rectangulaire ou trapézoïdale dont les dimensions diffèrent suivant les capteurs.

Le principe d'acquisition de point dans le cas d'un scanner laser plan est le suivant (fig.2.5) :

Le scanner numérise les points 'par bandes' dans le plan laser et de façon orthogonale à la direction du scan.

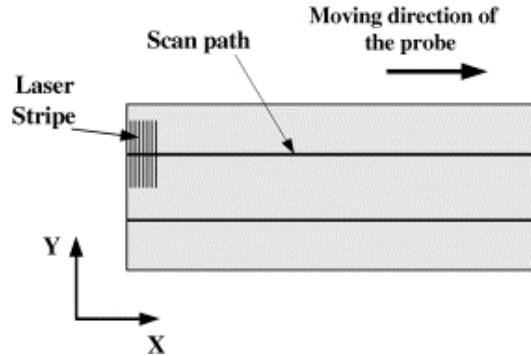


FIG. 2.5 – Direction de scan et numérisation 'par bandes'

2.3 Stratégie de scan d'une surface

Il est possible de systématiser par le calcul la façon d'aborder la numérisation d'une pièce. En effet, nous pouvons nous demander quelle doit être la stratégie à adopter pour pouvoir obtenir l'ensemble de points souhaités, image de la surface complexe [Lee et Park 00]. Ainsi, nous allons nous intéresser à la détermination de la direction de scan (orientation du laser \vec{D}_i) et à la direction de mesure (scan path) (fig.2.6).

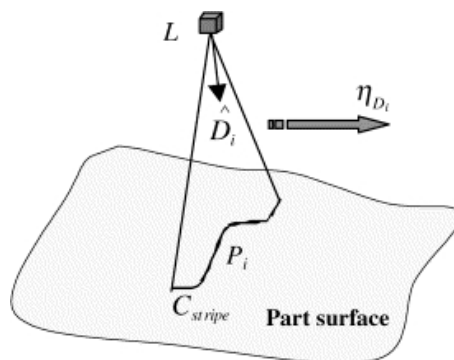


FIG. 2.6 – Direction de scan et de mesure

2.3.1 Directions locales d'accessibilité (LAD)

On appelle 'directions locales d'accessibilité' l'ensemble des directions possibles où le laser peut avoir accès au point (fig.2.7). Elles sont générées en fonction des contraintes du capteur (par exemple profondeur de champs, angle de vue, interférence

pièce/capteur...). L'ensemble de ces directions pour un point P_i est nommé LAD_i et il est possible de le calculer pour chaque point.

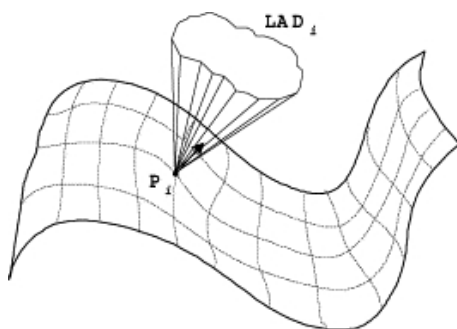


FIG. 2.7 – Directions locales d'accessibilité LAD

2.3.2 Directions globales d'accessibilité (GAD)

Pour pouvoir accéder à un ensemble de points P avec une direction de scan, il est nécessaire que cette direction appartienne à l'ensemble des LAD_i des points P_i de P. On appelle alors l'ensemble de ces directions 'Directions globales d'accessibilité' ou GAD (fig.2.8).

Soit LAD_1 et LAD_2 les directions locales d'accessibilité pour les points P_1 et P_2 respectivement. Les directions de scan qui permettent de mesurer simultanément les deux points sont l'intersection des deux LAD. Cette intersection est appelée GAD.

2.3.3 Détermination des directions de scan

A partir du moment où les directions globales d'accessibilité (GAD) sont déterminées, il est nécessaire pour chaque GAD de choisir une direction de scan particulière et la mieux adaptée parmi les directions du GAD. En général, les meilleures mesures sont obtenues lorsque la direction de scan et le vecteur normal à la surface sont parallèles. Ainsi, on choisit dans l'algorithme la direction qui minimise l'angle entre

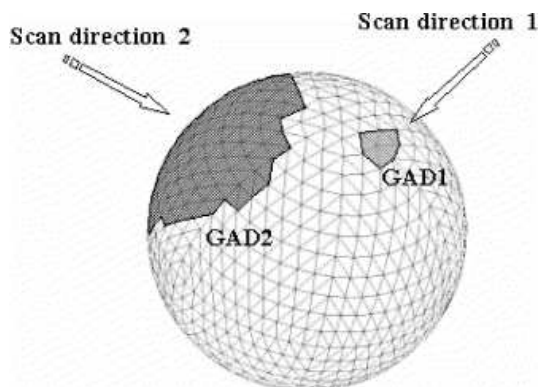


FIG. 2.8 – Directions globales d'accessibilité

la direction de scan et la normale à la surface.

2.4 Caractérisation d'un capteur laser

2.4.1 Définition

D'après la propre expérience des personnes qui m'ont entouré pendant cette étude et grâce à l'étude de la littérature scientifique dans ce domaine, il est possible de définir la caractérisation d'un capteur laser comme suit :

'Caractériser un capteur, c'est déterminer l'ensemble des conditions (sur les différents paramètres) qui permettent à ce capteur de restituer un nuage de points avec une qualité donnée (définie en fixant une limite sur les différents indicateurs) suivant l'application'

2.4.2 Survey

Comme défini par la norme [ISO 8402], la qualité est une série de caractéristiques qui confère à une entité la capacité de satisfaire des conditions implicites et exprimées. Cela signifie que la qualité d'un nuage de point dépend de la personne qui va l'utiliser. Ainsi, les caractéristiques nécessaires peuvent être différentes d'une personne à une autre et il n'existe pas de définition absolue d'un 'bon' nuage de points.

[Contri 02] réalise un 'état de l'art' du domaine et définit 4 indicateurs de qualité. Le bruit est la dispersion du nuage de points dans la direction du vecteur normal à la surface. La densité correspond à l'homogénéité du nuage de points. La plénitude représente les zones qui ne sont pas digitalisées. La précision est proche de la notion d'incertitude de mesure.

Il y a beaucoup de paramètres qui ont une influence sur ces indicateurs. Nous pouvons remarquer [Prieto 99] [Contri 02], par exemple, le matériel, sa couleur, sa rugosité (effet speckel), la méthodologie de calibrage utilisée pour le capteur, l'angle de rotation du capteur . . . Et [Martin Rabaud 98] montre que l'environnement, l'utilisateur, les méthodes d'interprétation et la stratégie de scan choisie sont très importants.

Concernant les paramètres dépendant du matériel, il n'y a de rien faire sauf l'application d'une petite couche de blanc (peinture, poudre . . .) sur la surface de la pièce. L'influence de cette couche blanche doit être expérimentalement vérifiée.

A propos de la méthode de calibrage, [Salvi 02] fait une étude pour comparer une série de différentes méthodes de calibrage en utilisant le critère NSCE de [Weng 92] qui représente le fait que la précision d'une image numérique est liée à la résolution de la caméra CCD.

Mais, dans le cas général, les détecteurs sont utilisés et sont calibrés avec la méthode fournie par le constructeur. Le but n'est pas d'améliorer les capacités du

détecteur mais d'obtenir un nuage de point avec une qualité capable de satisfaire l'utilisateur. Ainsi, les paramètres qui peuvent influencer celui-ci sont les translations et les rotations du capteur en fonction de la pièce à digitaliser.

Ces translations et rotations peuvent être décrites dans un système de coordonnées local. Dans notre cas, nous utilisons un scanner laser plan. Ainsi, le système de coordonnées utilisé peut être placé au centre de la fenêtre de vue du détecteur.

Dans un tel système de coordonnées, il y a 3 paramètres qui peuvent avoir une influence sur la qualité du nuage de points.

a) Une translation le long de l'axe Z du repère local, c'est la distance entre le capteur et la pièce.

b) Deux rotations, l'une autour du local X et l'autre autour de l'axe Y.

Pour étudier l'influence de ces paramètres sur la qualité du nuage de point, nous trouvons plusieurs expériences dans la littérature scientifique. Ceux-ci sont énumérés [Contri 02] et font appel à plusieurs artefacts. Le but est la comparaison entre la valeur connue d'une caractéristique de l'objet et le résultat de la mesure par le capteur laser.

1. Le bruit

[Prieto 99] et [Remy 04] étudient l'influence des 3 paramètres sur le bruit du nuage de point, c'est-à-dire la dispersion du point suivant le vecteur normal à la surface. Ici, l'artefact utilisé est un simple plan.

2. La densité

La densité définie par [Contri 02] est similaire à celle de [Remy 04]. L'influence des 3 paramètres peut être évaluée en utilisant un plan.

3. Plénitude

Cet indicateur n'est pas pris en compte si l'accessibilité est calculée de façon numérique et si une stratégie appropriée est choisie.

4. La précision

[Feng 01] propose une série d'expériences utilisant un plan de référence et une sphère sur ce plan (fig. 2.9). La distance entre le centre de la sphère et le plan est mesurée pour plusieurs valeurs de la translation suivant Z et la rotation autour de Y.

Il serait simple de vérifier, de même, l'influence de la rotation autour de X. Mais [Contri 02] montre que le calcul des coordonnées du centre d'une sphère à partir

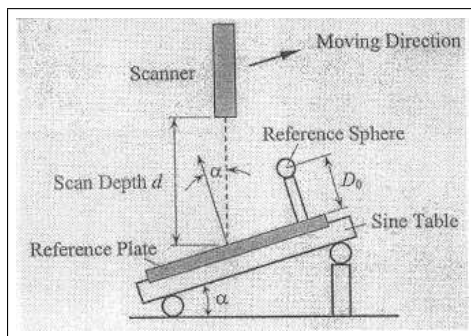


FIG. 2.9 – Feng 01

d'un nuage de points non complet (une calotte sphérique) introduit des erreurs.

[Luhmann 00] dit que l'erreur de mesure d'une distance devrait être l'indicateur de qualité associée à un capteur utilisant la technologie optique. Il propose un artefact composé de 2 sphères blanches sur une barre. La distance entre les 2 centres est la valeur de référence (fig. 2.10).

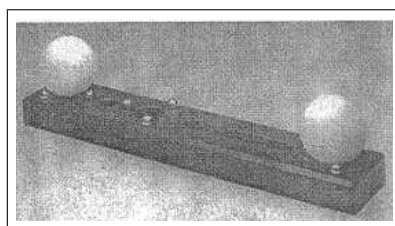


FIG. 2.10 – Luhmann 00

Avec seulement des sphères, seule la translation peut être étudiée, et non les rotations. Et, quant à [Feng 01], le calcul du centre d'une sphère d'un nuage de point non complet (une calotte sphérique) introduit des erreurs. Mais cette approche est intéressante dans la mesure ou la méthode proposée est standard.

[El Hakim 95] présente une méthode où plusieurs objets sont utilisés. Les pièces mesurées comportent des trous de diamètres différents, des cylindres, des plans et des sphères (fig. 2.11). Cinq objets permettent d'étudier les 3 paramètres (2 rotations et 1 translation). Le problème principal de cette méthode est qu'il existe différentes façons de mettre en oeuvre les expériences et d'interpréter les résultats. Mais c'est une méthode intéressante en raison du nombre d'objets utilisés.

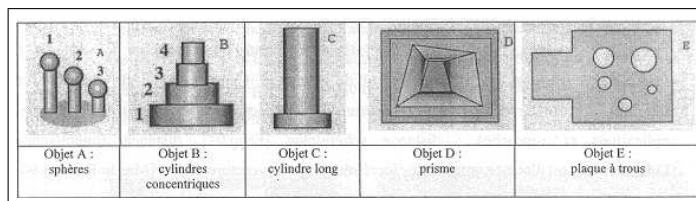


FIG. 2.11 – El Hakim 95

3 Analyse, synthèse et mise en place de l'expérimentation

3.1 Mesure d'une pièce

La mesure d'une pièce nécessite souvent plusieurs orientations du capteur. Pour chacune de ces orientations, il est nécessaire d'effectuer une procédure d'alignement sur sphère (qualification) pour minimiser l'incertitude sur les points enregistrés et garantir que les points mesurés suivant différentes orientations sont bien enregistrés dans un même système de coordonnées (on dit aussi que l'on 'recalc' les nuages de points).

Pour caractériser l'orientation et la position du palpeur par rapport à la pièce, il est possible de définir 3 paramètres distincts d, α, β ;

3.1.1 Distance entre le capteur et la surface de la pièce : d

Cette distance (fig. 3.1) varie dans la profondeur de champ.

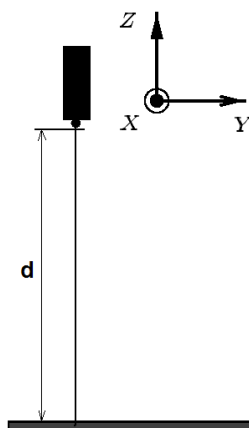


FIG. 3.1 – Distance entre le capteur et la surface de la pièce : d

Ainsi, en faisant varier cette distance, nous faisons varier la position de la pièce dans la fenêtre de mesure.

Pour tester cette distance, il est possible d'imaginer un dispositif expérimental composé de deux cales étalonnées disposées en 'marches d'escalier' : Ces deux cales nous permettent d'avoir deux plans parfaitement parallèles et dont la distance est parfaitement connue (cales rectifiées). Les cales sont tout d'abord posées sur une table sinus dont l'angle d'inclinaison est nul, et nous mesurons les deux plans. Dans les limites de la fenêtre de mesure du capteur, nous numériserons ces deux plans en faisant varier la distance d du capteur à la pièce.

Dans le cas du capteur Metris LC50 du laboratoire IMS de l'université de Windsor, la profondeur du champs de vue est de 65mm. La hauteur de la marche que nous avons l'intention de réaliser est de l'ordre de 20 mm. Nous aurons donc la possibilité de faire varier la distance sur une plage d'environ 45 mm. Nous pourrions ainsi tester 4 niveaux distants de 11 mm chacun.

3.1.2 Angle d'incidence dans le plan du scanning α

L'angle α (fig. 3.2) caractérise l'angle d'incidence, dans le plan du scanning, entre l'axe du capteur et la normale à la surface de la pièce.

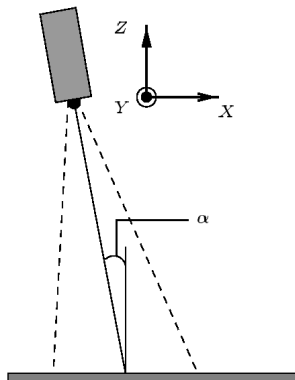


FIG. 3.2 – Angle d'incidence dans le plan du scanning α

Cet angle sera testé en agissant directement sur l'orientation du capteur et grâce au même jeu de cales que précédemment disposées en 'marches d'escalier'. Nous testerons cet angle en faisant varier l'orientation entre 0° et $+60^\circ$ par niveaux de 15° ($0-60^\circ$ correspond à la plage de variation de l'angle α la plus souvent utilisée, il est en effet rare que les mesures s'effectuent avec un angle supérieur à 60°).

3.1.3 Angle d'incidence dans le plan perpendiculaire au plan du scanning β

L'angle β (fig. 3.3) caractérise l'angle d'incidence, dans le plan perpendiculaire au plan du scanning, entre l'axe du capteur et la normale à la surface de la pièce.

Cet angle sera testé à l'aide d'une table sinus et du jeu de cales. Nous ferons varier l'angle de la table sinus entre -60° et $+60^\circ$ par niveaux de 20° .

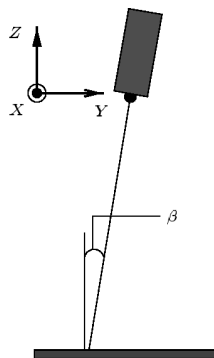


FIG. 3.3 – Angle d'incidence dans le plan perpendiculaire au plan du scanning β

3.1.4 Intensité du laser

Il est possible d'agir sur l'intensité du laser pour que celle-ci soit optimum lors de la mesure de la pièce : une intensité trop faible ne permet pas au rayon laser d'être détecté par la caméra CCD et entraîne la perte de points. De la même façon, une intensité trop élevée entraîne l'épaississement de la ligne intersection du plan laser et de la pièce. Lorsque l'incertitude sur la position des points relevés par la caméra CCD est trop importante, le système de traitement élimine ces points.

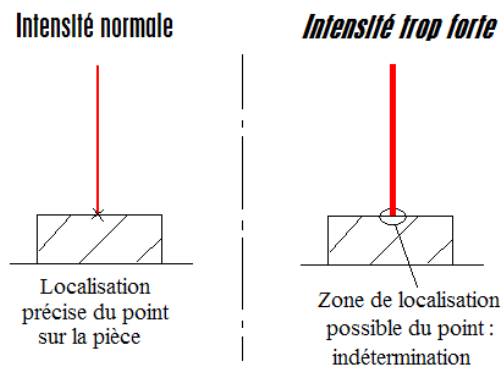


FIG. 3.4 – Intensité du laser

Nous ferons en sorte que l'intensité soit réglée au mieux pour toutes les mesures.

3.2 Mesures répétées

Pour chaque valeur des paramètres, nous effectuerons plusieurs mesures (5) pour nous assurer de la validité de la mesure et pour minimiser l'erreur que nous pouvons faire sur cette mesure.

La norme, à ce sujet, nous recommande de pratiquer beaucoup plus d'essais (100),

ce qui, dans mon cas, rend impossible l'élaboration d'un plan d'expérience suffisant pour cette étude (le traitement et l'élimination des 'points aberrants' de façon manuelle restreint le nombre total d'essais envisageables).

3.3 Indicateurs

3.3.1 La précision

Nous mesurons donc 2 plans parfaitement parallèles et distants d'une valeur connue. Nous allons obtenir 2 nuages de points. Le plan inférieur sera considéré comme le plan de référence et, à partir du nuage de points inférieur, nous construirons un plan par la méthode des moindres carrés (appelé plan réf). Nous construirons ensuite un plan parallèle au plan réf minimisant l'écart maximum avec les points du nuage supérieur (appelé plan sup). Nous appellerons d_{exp} la distance entre ces deux plans.

La valeur à laquelle nous nous intéresserons sera la valeur de :

$$ind = d_{exp} - d$$

Elle caractérisera la précision.

3.3.2 Le bruit

Les cales étalonnées étant rectifiées, nous pouvons considérer que les plans que nous allons scanner sont parfaits. Il est donc intéressant de quantifier le bruit créé lors du scan. Celui-ci est directement lié à l'écart type des points du nuage au plan des moindres carrés construit. Nous utiliserons donc comme définition du bruit cet écart type.

3.3.3 La densité

Il est aussi possible de s'intéresser à la densité de points par ligne η , c'est à dire au nombre de points relevé par ligne. Celle-ci est assez dépendante de l'intensité du laser (pour les raisons que nous avons vu précédemment), paramètre que nous ne pouvons tester que de façon trop imprécise. Nous nous restreindrons donc par la suite à faire des remarques plus qualitatives que quantitatives concernant ce facteur.

4 Etude expérimentale et résultats

Remarque préliminaire :

Tous les essais, que nous avons effectués dans l'étude préliminaire et par la suite dans l'étude, ont une très bonne répétitivité, confortant ainsi le fait que le nombre de mesures limité à 5 pour un essai semble suffisant.

4.1 Etude préliminaire

Dans un premier temps, une approche de la caractérisation du capteur laser consiste à intéresser à la justesse de celui-ci. Pour ceci, nous avons numérisé une sphère parfaite de rayon connu avec différentes configurations du capteur (fig.4.2). Nous avons fait 4 mesures de cette sphère (chacune répétée 5 fois) avec les configurations suivantes :

- $A=00^\circ$ $B=00^\circ$
- $A=90^\circ$ $B=00^\circ$
- $A=00^\circ$ $B=90^\circ$
- $A=90^\circ$ $B=90^\circ$

(A est l'angle d'inclinaison du capteur suivant le plan laser et B est l'angle de rotation du capteur autour de l'axe Z)

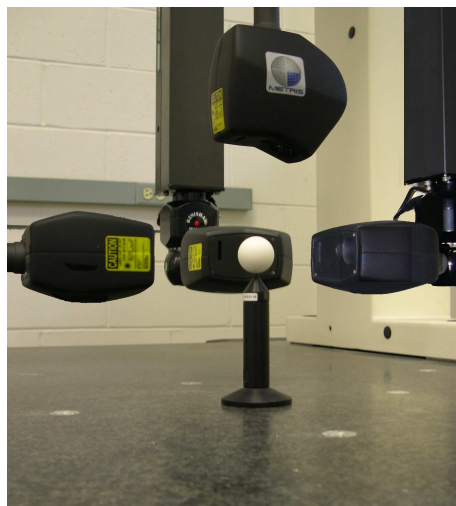


FIG. 4.1 – Etude de la justesse sur sphère

Nous comparons pour chacune de ces mesures les coordonnées du centre de la sphère numérisée et la valeur de son rayon.

- Première remarque concernant le système de coordonnées de prise de mesures :

Il apparaît clairement que le système de coordonnées dans lequel les points sont mesurés est créé lors de la qualification sur sphère de la machine et n'a pas pour origine les règles de la machine. Il est donc indispensable de qualifier les quatre configurations du capteur en même temps pour pouvoir comparer les coordonnées des centres des sphères.

- Seconde remarque concernant la calotte de sphère numérisée :

Lorsque nous numérisons la sphère sans changer la direction du capteur, celui-ci ne numérise qu'une calotte de cette sphère. Comme nous l'avons vu précédemment, il est préférable de numériser une pièce avec une orientation du scanner normale à la surface (meilleure réflexion). La partie centrale de la calotte de sphère est donc mesurée dans de bonnes conditions mais les bords présentent du bruit (la direction de scan s'éloigne de la normale à la surface).

De plus, il est difficile de caractériser une sphère à partir d'une simple calotte.

Résultats :

Les nuages de points ont été traité avec l'approche suivante : en faisant passer une sphère des moindres carrés par l'ensemble des points. Nous étudions les différentes positions du centre de la sphère ainsi que les valeurs du rayon. Nous observons que ces coordonnées diffèrent de l'ordre du centième de millimètre sur chacun des axes de la mmt (les centres des sphères varient de l'ordre de 0.019 mm suivant l'axe X, 0.008 sur Y et 0.013 sur Z).

Conclusion :

La méthode de la justesse sur sphère permet de mettre en avant les erreurs liées au problème de recalage du nuage de points entre différentes orientations du capteur laser. Ce recalage est calibré lors de la phase de qualification initialement faite. Cette phase consiste, de façon similaire, à scanner une sphère pour chaque orientation du capteur et en différents domaines de la fenêtre de mesure. Les résultats que nous obtenons permettent donc d'évaluer la qualification initiale.

Pour le capteur Metris LC50 que nous possédons, nous savons donc d'ores et déjà que l'erreur de recalage des nuages de points entre différentes orientations du capteur est de l'ordre du centième de millimètre .

Il apparaît donc nécessaire d'éviter au maximum les changements de configuration du capteur lors de la mesure d'une même pièce pour éviter cette erreur

4.2 Description du mode expérimental

Nous avons ensuite élaboré le dispositif expérimental suivant : des cales étalonnées sont montées en 'escalier' et posées sur la table sinus. La tête du scanner permet de faire varier l'angle α et la table sinus l'angle β .

L'empilement des cales étalonnées 'en escalier' nous permet d'avoir deux plans rectifiés parfaitement parallèles et distants d'une valeur connue au micron. Le fait de scanner ces deux plans nous permettra de caractériser le capteur dans la mesure ou nous considérons ces deux plans comme 'parfaits'.

4.3 Première série de mesures

Lorsque nous faisons varier l'angle β , la surface alors visible par la caméra diminue proportionnellement à $\sin(\beta)$ (fig. 4.2)

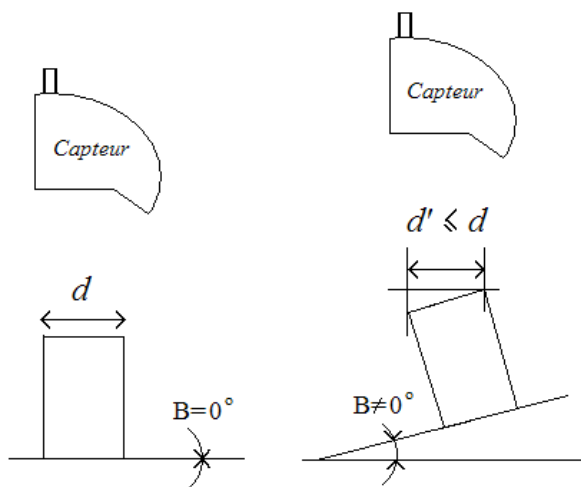


FIG. 4.2 – Angle β

Pour remédier à ceci, nous avons pensé à la solution suivante : Placer 3 cales de même hauteur (deux d'entre-elles sont constituées d'un empilement de cales plus petites) pour nous permettre d'avoir un plan supérieur dont la surface est suffisante pour être scannée avec des angles β importants (fig. 4.3). Il est alors nécessaire de retoucher manuellement le nuages de point après la mesure et d'enlever les points qui correspondent aux jointures entre les cales. Ceci est directement fait sur le logiciel Metris.

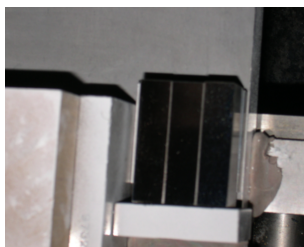


FIG. 4.3 – Jeu de 3 cales

Pour nous assurer que les trois surfaces supérieures des cales peuvent être considérées comme appartenant à un même plan, nous avons procédé de la manière suivante : nous scannons le plan supérieur et nous séparons les points provenant des trois cales. Grâce au logiciel matlab, nous faisons passer un plan des moindres carrés par chacun des trois nuages de points et nous calculons la distance entre ces plans (voir plus loin la méthode exacte utilisée pour calculer une distance entre les plans).

Les cales étalonnées que nous avons à disposition sont des cales de 'série B', ce qui signifie pour la norme américaine une tolérance de l'ordre du micron ($\pm 1, 2\mu m$).

Remarque :

On applique une fine couche de bombe blanche pour permettre d'améliorer les propriétés de réflexion de la pièce. Cette étape doit se faire avec beaucoup d'attention car cette couche de poudre blanche n'a pas une épaisseur totalement nulle et il est donc nécessaire de la passer de façon similaire sur les 2 plans (jamais de seconde couche).

Traitement des nuages de points : méthode utilisée

Après avoir scanné la pièce, récupéré un nuage de points et éliminé les points aberrants à l'aide du logiciel Metris (principalement les bordures des plans), nous sommes en mesure de récupérer deux nuages de points, le nuage 'haut' (N1) et le nuage 'bas' (N2).

Nous avons ensuite élaboré sur le logiciel Matlab un soft (donné en annexe) nous permettant d'associer un plan des moindres carrés à un nuage de points. Cela nous permet de faire correspondre deux plans (P1) et (P2) respectivement aux nuages (N1) et (N2). Le soft nous retourne l'écart type de la distance entre les points et le plan ce qui correspond à notre indicateur bruit. Pour calculer la distance entre les deux plans, nous pouvons procéder par deux méthodes qui sont équivalentes et donnent les mêmes résultats :

– première méthode (fig. 4.4) :

Nous cherchons les centres de gravité (G1) et (G2) respectifs des nuages (N1) et (N2) et calculons la distance du point (G1) au plan (P2) et inversement du point (G2) au plan (P1). En prenant la moyenne de ces distances, nous obtenons la distance désirée du plan supérieur au plan inférieur.

– seconde méthode :

A partir de l'équation cartésienne du plan bas, nous construisons un plan parallèle minimisant l'écart avec les points du nuage haut. La distance entre ces deux plans parallèles est alors simple à obtenir. En faisant la même opération avec le plan haut et le nuage bas, nous obtenons, en faisant la moyenne, la distance désirée du plan supérieur au plan inférieur.

– équivalence des méthodes :

Ces méthodes sont équivalentes dans la mesure où le centre de gravité d'un nuage

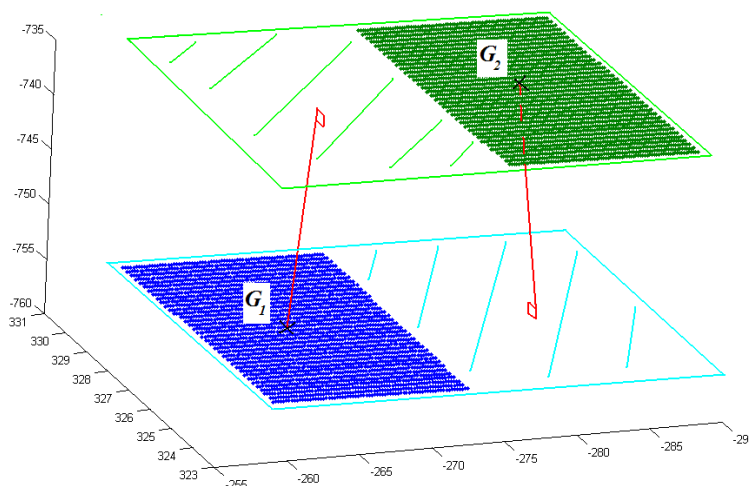


FIG. 4.4 – Calcul de la distance entre 2 plans

de points appartient au plan des moindres carrés qui lui correspond. Or un plan minimisant l'écart passe aussi par le centre de gravité du nuage, donnant ainsi la même valeur.

Résultats :

La distance entre les trois plans supérieurs correspondant aux trois cales étalon varie, malgré toutes les précautions prises, entre 1 et 4 centièmes de millimètres. Nous avons vérifié au micromètre la hauteur des cales et celle-ci correspond bien à la valeur supposée pour un empilement de cales.

Hypothèse formulées :

L'hypothèse la plus probable est le fait que les plans présentent un défaut de parallélisme accentué par le capteur. En effet, nous observons que la différence de distance ((d1) et (d2)) entre les centres de gravité des nuages de points et les plans associés est importante. Pour vérifier cela, nous avons utilisé un soft Matlab qui nous permet de trouver les normales aux plans et ainsi de pouvoir comparer leurs orientations. Il s'avère que les plans ont des normales parfaitement parallèle (à 10^{-3} degrés sur chaque axe). Cette hypothèse est donc remise en cause.

Nous avons alors imaginé le test suivant :
 Nous scanons un plan (la face d'une cale étalon) en élevant le capteur durant la mesure (fig.4.5)

Les deux nuages de points sont alors analysés et il s'avère que la distance entre eux est de l'ordre de 5 centièmes de mm! Nous retrouvons de même un défaut de parallélisme entre les deux plans.

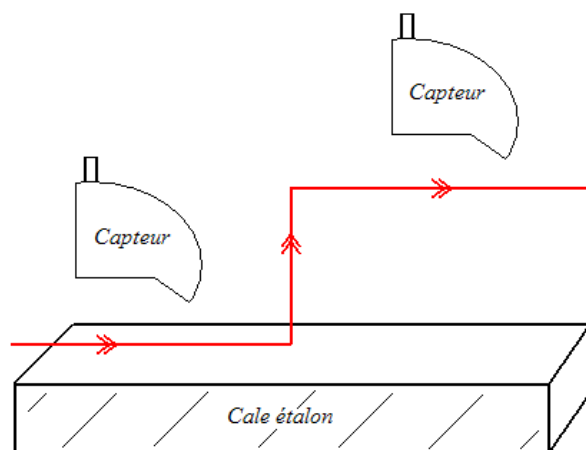


FIG. 4.5 – Plan scanné avec 2 hauteurs du capteur

4.4 Seconde série de mesures

La caractérisation du capteur laser étant donc difficile dans les conditions précédentes, nous avons mis au point une autre série d'expérimentations en vue de caractériser le capteur laser. Le mode expérimental permettant de reproduire cette étude est donné plus en détails en annexe A et pourra faire l'objet par la suite d'autres tests sur différents capteurs.

Dispositif expérimental :

Nous avons effectué les mesures sur un simple empilement de cales étalon (fig.4.6). Nous avons par la suite pris soin de disposer les cales sur la table sinus de telle façon

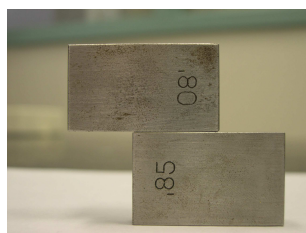


FIG. 4.6 – Cales étalonnées disposées 'en marche d'escalier'

qu'elles soient visibles avec le plus grand angle possible (nous nous sommes aidé pour ceci d'autres cales pour créer le support). Lors du scan, la 'marche' est centrée horizontalement dans la fenêtre de mesure (fig.4.7).

– Etude de la distance :

La qualification sélectionnée est $A = 0^\circ$ et $B = 0^\circ$. L'angle de la table sinus est $\beta = 0^\circ$. La largeur de 'stripe' est de 0.1 mm. (distance entre les plans de scan successifs)

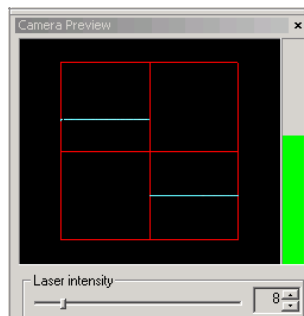


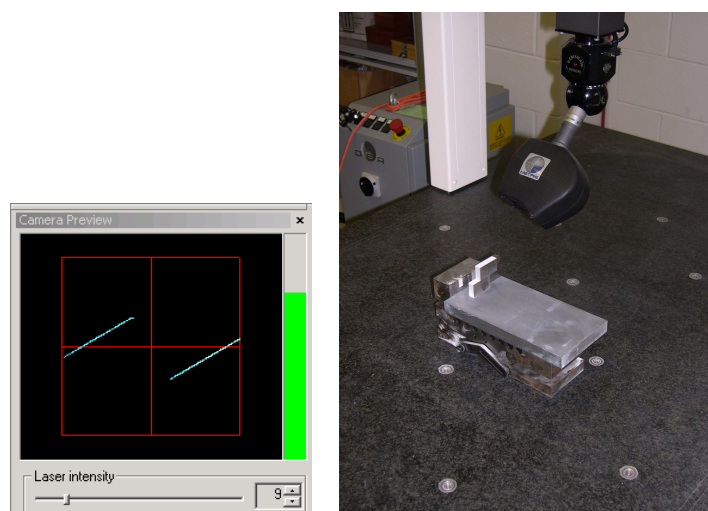
FIG. 4.7 – 'marche' centrée horizontalement

Nous réalisons alors la numérisation des deux plans supérieurs pour 4 hauteurs différentes dans la fenêtre de mesure (chacune répétée 5 fois). Il est ensuite nécessaire de trier les points aberrants et éliminer les bords des plans.

- Etude de l'angle α :

Nous faisons varier l'angle d'inclinaison du capteur.

L'angle de la table sinus est $\beta = 0^\circ$. La largeur de 'stripe' est de 0.1 mm. Dans toutes les mesures qui suivent, nous nous plaçons au centre de la fenêtre de mesure, ce qui permet de garder une distance constante entre le capteur et le centre de la marche, quelque soit l'angle α de rotation du capteur.



TAB. 1 – L'angle α varie

Nous faisons varier l'angle α tout les 15° de 0° à 60° (chacune répétée 5 fois).

- Etude de l'angle β :

Nous faisons varier l'angle de la table sinus.

La largeur de 'stripe' est de 0.1 mm. Dans toutes les mesures qui suivent, nous nous

plaçons au centre de la fenêtre de mesure.

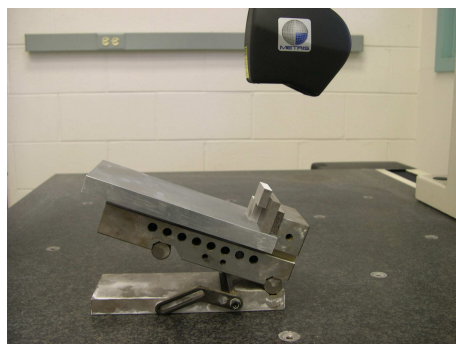


FIG. 4.8 – Angle β

Comme nous l'expliquions précédemment, le désavantage de cette technique est le fait que les cales soient de moins en moins visibles par le capteur lorsque l'angle β augmente. L'étude pour l'angle β sera donc restreinte pour des angles variant entre -60° et 60° .

Nous faisons en sorte dans cet essai que le capteur laser se déplace parallèlement aux plans (c'est-à-dire suivant une rampe d'angle β). Cela permet de rester au centre de la fenêtre de mesure (la distance n'intervient alors pas et nous testons bien seulement l'angle β). Nous faisons aussi l'hypothèse que les défauts de justesse de la machine sont faibles par rapport à ceux du capteur laser.

4.5 Résultats :

Nous avons mis en place ce plan d'expérience sur le capteur laser Metris de l'IMS center de Windsor au Canada. Les résultats sont détaillés dans la partie suivante.

4.5.1 Capteur Metris LC50 :

La cale utilisée à une hauteur de 0,8 inch, c'est à dire 20,32mm exactement (coeff. 25,4)

Influence de la distance du capteur aux cales

Les résultats donnés en annexe nous permettent de tracer les courbes d'évolution de la hauteur de la cale et du bruit en fonction de la distance du capteur aux cales (fig.4.9).

Tout d'abord, la hauteur mesurée de la cale est croissante lorsque la distance du capteur aux cales croît, et ceci en s'éloignant de la valeur réelle de la hauteur de la cale (20,32mm). Cela signifie dans un premier temps que, plus la pièce est située dans la partie basse de la fenêtre de mesure, plus la précision diminue.

Au milieu de la fenêtre de mesure, le défaut de hauteur mesuré de la cale est de $45 \mu\text{m}$. De plus, même au mieux de la mesure (partie supérieure de la fenêtre de

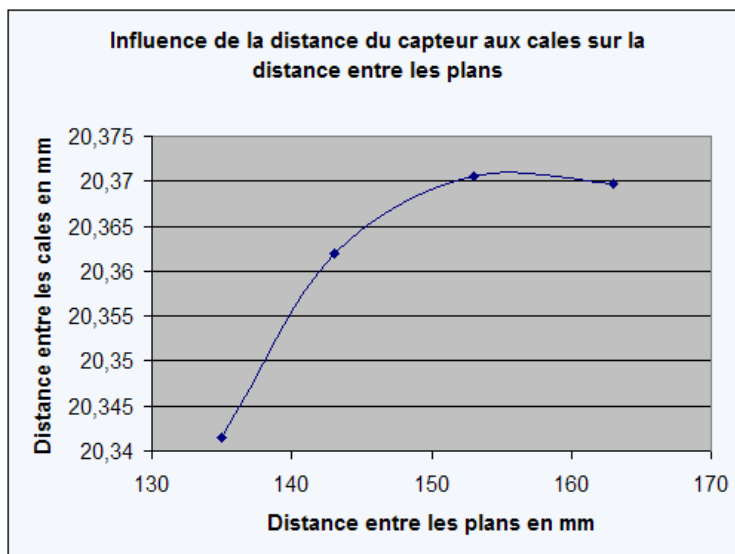


FIG. 4.9 – Etude de la précision en fonction de la distance du capteur aux cales

mesure), le défaut sur la hauteur de la cale étalonnée est de $20 \mu\text{m}$. Il y a donc, dans cette configuration du capteur, un défaut de plusieurs centièmes de mm, et ce quelque soit la localisation de la pièce dans la fenêtre de mesure.

Intéressons-nous maintenant à l'influence de la distance du capteur aux cales sur le bruit (fig.4.10) :

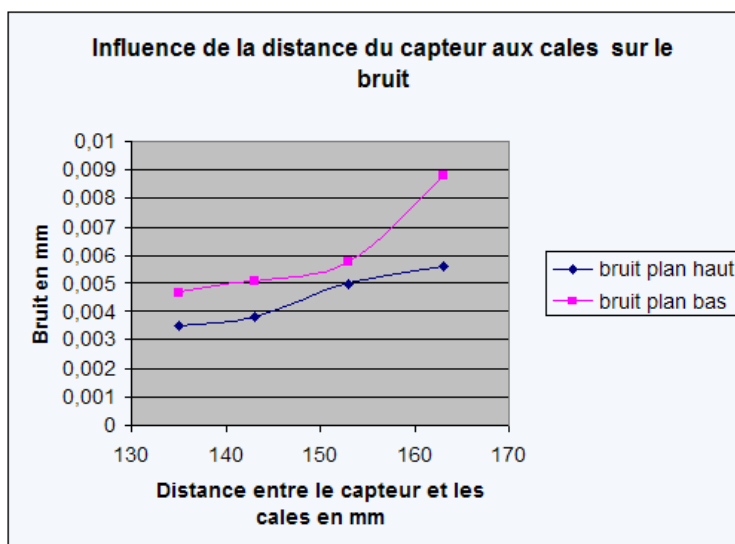


FIG. 4.10 – Etude du bruit en fonction de la distance du capteur aux cales

Nous avons tracé la courbe du bruit en fonction de la distance du capteur aux cales. Le bruit augmente lorsque la distance augmente, ce qui signifie que le bruit est plus important dans la partie basse de la fenêtre de mesure. Nous remarquons

une similitude d'évolution du bruit pour le plan haut et le plan bas, ce qui est assez logique. De plus, à bruit égal (par exemple 0,005), la distance correspondante entre les deux distances du capteur aux cales est de l'ordre de 20 mm, ce qui représente la hauteur de la cale. Le bruit varie donc bien suivant la position des cales dans la fenêtre de mesure et non en fonction des plans (nous aurions pu retrouver ici des défauts liés par exemple au passage d'une mauvaise couche de poudre, créant plus de bruit sur un plan que sur l'autre).

Nous pourrions modéliser cette évolution par deux droites parallèles distantes horizontalement de 20 mm.

Influence de l'angle α

L'influence de l'angle α sur la hauteur de la cale et du bruit est donnée par les courbes suivantes (fig.4.11) :

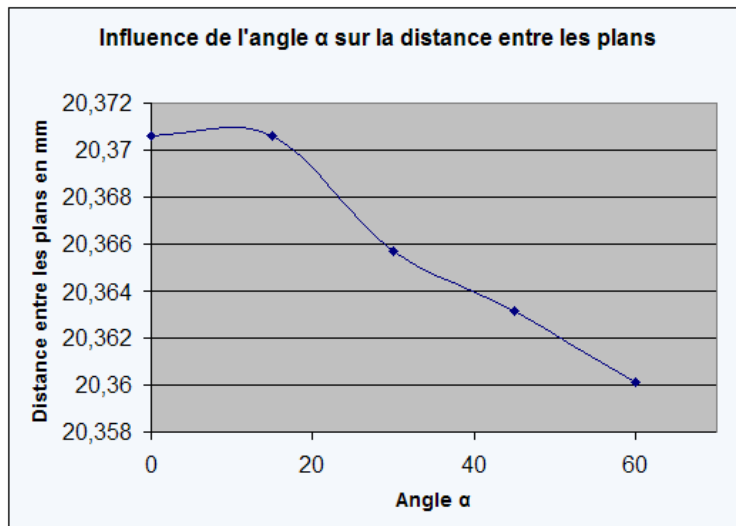


FIG. 4.11 – Etude de l'influence de l'angle α sur la hauteur de la cale

La première chose que nous pouvons constater est le fait que les variations de l'angle α n'ont pas une influence très importante sur la valeur de la distance entre le plan haut et la plan bas. En effet, les variations de l'angle α entraînent des différences de hauteur mesurée de la cale inférieures au centième de mm.

Il apparaît aussi que plus l'angle α augmente, plus la hauteur mesurée diminue vers la valeur réelle. Il apparaît difficile de conclure que l'augmentation de l'angle α entraîne une amélioration de la précision mais cela vient plutôt appuyer le fait que l'influence de l'angle α est minime sur la précision.

Regardons maintenant l'effet sur le bruit (fig.4.12) :

L'effet sur le bruit semble aller dans la même direction : le bruit diminue lorsque l'angle α augmente. Nous remarquons de même que l'évolution du bruit sur les

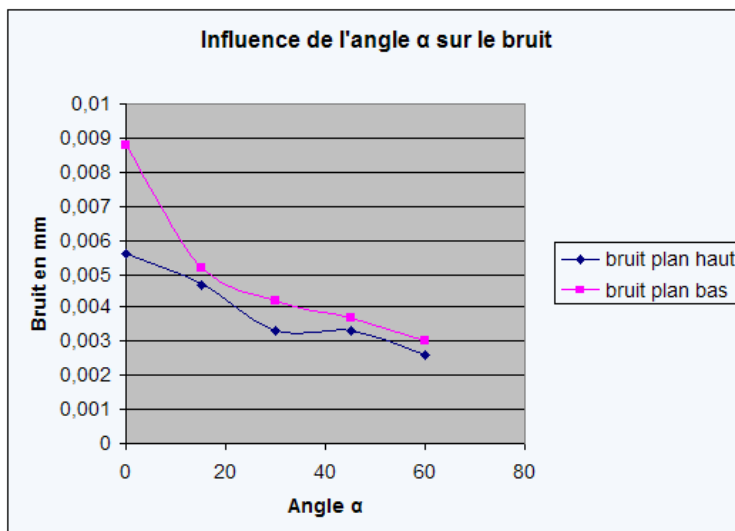


FIG. 4.12 – Etude de l'influence de l'angle α sur le bruit

2 plans est similaire et nous pourrions modéliser ces courbes par 2 droites parallèles. Ces 2 droites ne sont pas confondues et la distance entre elles vient de la différence de la distance de la marche au capteur. Si notre modélisation de droites parallèles convient, cela signifie que l'angle α et la distance du capteur aux cales sont indépendants (pour l'indicateur bruit).

Influence de l'angle β

De la même façon, étudions l'influence de l'angle β (fig.4.13) :

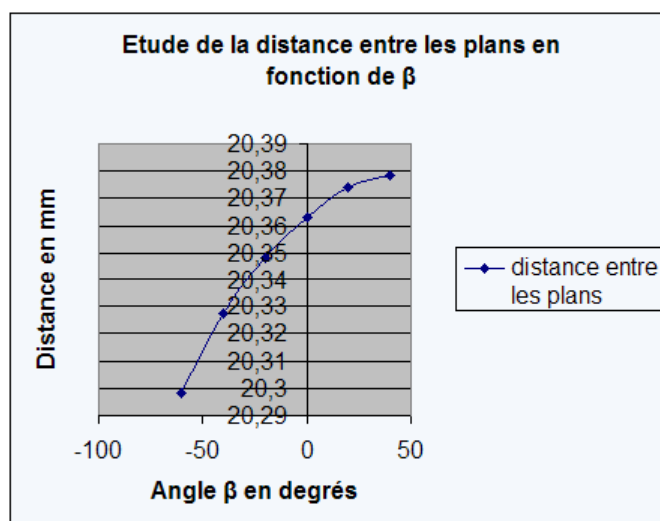


FIG. 4.13 – Etude de l'influence de l'angle β sur la hauteur de la cale

Nous remarquons que la distance entre les 2 plans diminue lorsque l'angle β diminue. Pour des valeurs positives de cet angle, la hauteur mesurée de la cale est éloignée de la valeur réelle de celle-ci (4 à 6 μm de différence positive). Nous atteignons la valeur réelle pour $\beta = -45^\circ$. C'est la première configuration du capteur qui nous donne la valeur réelle de cette distance. Pour un angle plus faible encore, la valeur de la hauteur de la cale mesurée diminue encore (il serait intéressant de continuer à faire diminuer cet angle β pour voir si cette tendance se confirme). Nous remarquons de même que l'angle $\beta = -45^\circ$ correspond à la position où l'axe de la caméra est normal au plan scanné (l'angle entre l'axe du faisceau laser et celui de la caméra CCD est de cet ordre de grandeur). Il semblerait donc que la meilleure position corresponde à celle où l'axe optique est confondu avec la normale à la surface (les erreurs de triangulation sont alors minimisées ?).

L'effet de l'angle β sur le bruit est le suivant (fig.4.14) :

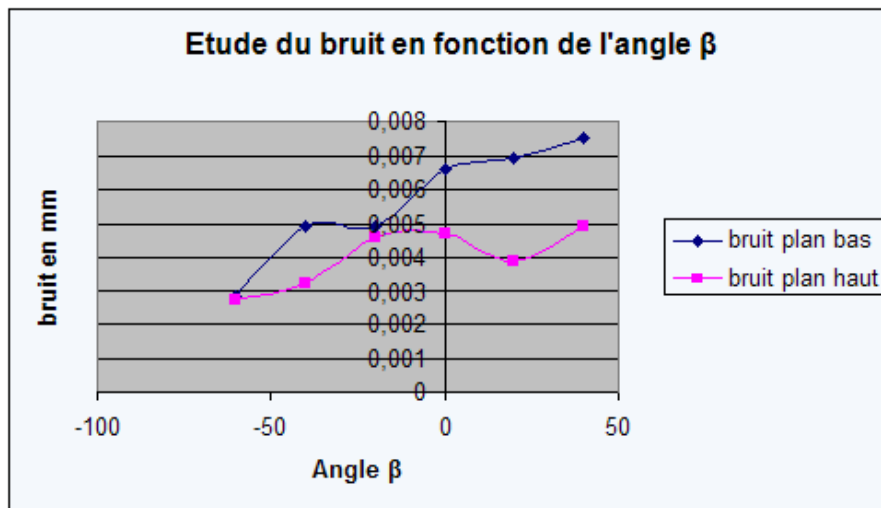


FIG. 4.14 – Etude de l'influence de l'angle β sur le bruit

Le bruit diminue lorsque l'angle β diminue. Il semble ainsi que le fait que l'axe du système optique se rapproche de la normale à la surface ait un impact positif sur le bruit. Nous remarquons que globalement le bruit sur les 2 plans augmente avec l'angle β mais nous ne pouvons pas considérer que les courbes sont colinéaires. Il est donc possible que l'angle β et la distance entre le capteur et les cales étalonnées soient liées pour le facteur bruit.

Conclusion

Pour reprendre l'ensemble des résultats que nous avons obtenus, le capteur présente des défauts qui, suivant les valeurs des paramètres que nous avons testés, varient jusqu'à 6 centièmes de mm pour une hauteur de cales de l'ordre de 20,32mm. Si nous faisons une moyenne de l'ensemble des essais que nous avons effectué, l'erreur sur la hauteur est de 3 centièmes de mm, ce qui paraît important dans l'optique

d'inspection de pièces. Nous pouvons aussi retenir que l'angle α n'a pas un effet très important dans la mesure où il reste faible ($\leq 60^\circ$). Il semble que ce soit plus l'orientation de l'axe du système optique par rapport à la normale à la surface qui soit important. La meilleure précision (hauteur parfaite de la cale étalon) correspond au domaine où l'axe optique est proche de la normale à la surface. Le bruit, qui pour nous est défini comme l'écart type, varie entre 3 et 9 μm . Si nous supposons que la loi associée est gaussienne, alors 99,7% des distances des points au plan des moindres carrés sont compris dans la distance moyenne ± 3 écarts types, c'est-à-dire ici $\pm 2,7$ centième de mm au maximum.

Aux vues de ces résultats, il semblerait que l'inspection de pièces comportant des tolérances très faibles soit faussée de manière significative par l'utilisation de ce capteur. Il peut être envisageable de corriger numériquement cette erreur, dans une recherche future.

5 Perspectives

5.1 Application de la méthode à d'autres capteurs laser plan

Pour valider cette démarche de caractérisation d'un capteur laser, il est logique de l'appliquer à plusieurs autres capteurs et de répéter plusieurs fois ces mesures pour chaque capteur. Cela permettrait de mettre en avant les phénomènes mis en jeu pour les différents lasers scanners plans et de pouvoir les quantifier. Dans cette optique, j'ai mis au point une trame détaillée de l'ensemble de la procédure expérimentale à suivre pour permettre la caractérisation d'un capteur laser. Cette série d'expériences doit pouvoir être effectuée par un technicien ou une personne n'ayant pas forcément des compétences fines dans le domaine de la métrologie 3D.

Le protocole expérimental (voir annexe A) que nous avons mis au point comporte les grandes lignes suivantes :

L'opérateur, après avoir mis en place la machine et réalisé le dispositif expérimental, est invité à effectuer les mesures dans un certain ordre. Il exporte alors le nuage de point sous la forme d'un fichier texte et le nomme dans un répertoire déterminé (fig.5.1). Il suffit alors d'exécuter Matlab pour obtenir les courbes d'évolution de la précision et du bruit en fonction des facteurs étudiés.

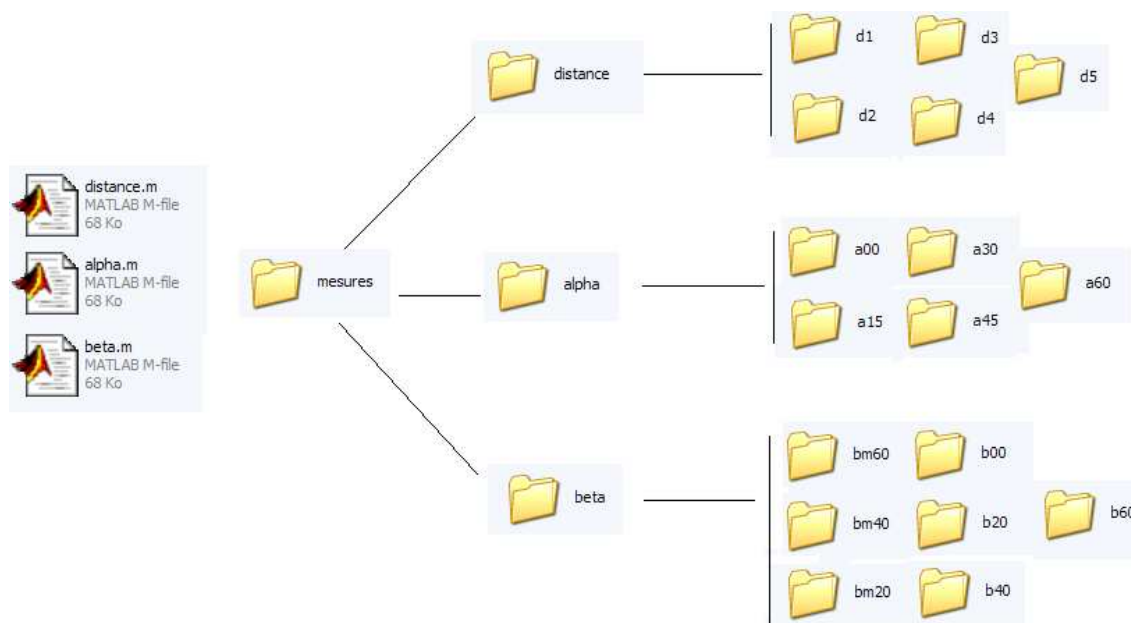


FIG. 5.1 – Arborescence des répertoires à compléter

L'ensemble de cette procédure doit être mise en place, si possible, dans plusieurs laboratoires comme le LURPA de l'ENS de Cachan, le laboratoire de l'IUT de Bourgogne à Auxerre, et par une autre personne du laboratoire IMS center de l'université de Windsor, Canada.

5.2 Autres perspectives de travaux

Interaction entre les facteurs

Notre plan d'expérience prévoit que nous fassions varier les facteurs séparément les uns des autres. Il serait intéressant de mettre en place un plan d'expérience visant à étudier l'interaction des facteurs entre eux sur la précision et sur le bruit lors de la mesure. Cela représente, dans le cas d'un plan complet avec un nombre de niveaux suffisant, un nombre d'essais pouvant augmenter rapidement.

Influence de la vitesse de numérisation

Nous avons effectué l'ensemble des mesures avec une vitesse de déplacement du capteur constante. Selon le principe de fonctionnement du capteur, il est possible de faire varier cette vitesse de déplacement du capteur pour numériser des pièces de différentes tailles. L'évolution de la vitesse peut entraîner des erreurs ou imprécisions dans l'acquisition des points. Il est nécessaire, dans l'optique de caractériser le capteur laser, de bien faire la différence entre les erreurs dues à la CMM (effets dynamiques, asservissements et défauts intrinsèques) et les erreurs entraînées par le capteur. Il est possible en effet que, suivant la qualité de la caméra CCD et du système de traitement de l'information aval, il existe une différence entre le 'top' de lecture des coordonnées de la machine et le moment où l'information est enregistrée par le système de capteurs. Il serait intéressant de quantifier l'effet de ce phénomène sur la précision, le bruit et la densité de points.

Remarque concernant le capteur Métris : la technologie utilisée pour créer le plan laser est la suivante : un miroir rotatif réfléchit un rayon laser, balayant ainsi le plan laser. Il s'avère très clairement que le temps de balayage du plan laser n'est plus négligeable lorsque la vitesse devient importante. Metris utilisent un algorithme permettant de palier à cet effet. Il serait intéressant de le tester.

6 Conclusion

L'étude que nous avons effectuée ayant pour but d'élaborer une méthodologie de caractérisation de capteurs lasers, nous avons mis au point un plan d'expérience ainsi qu'une démarche expérimentale permettant de tester l'influence de 3 facteurs sur la précision et le bruit du capteur. Cette démarche a été appliquée au capteur laser Metris LC50 du laboratoire IMS center de l'université de Windsor, ce qui nous a permis de la mettre en oeuvre et de commencer à l'améliorer. Cette méthode se base sur des artefacts simples d'utilisation et du matériel souvent présent à proximité de toute salle de métrologie. De plus, elle se veut simple à mettre en oeuvre et à réaliser. Après une phase de test par d'autres laboratoires équipés de capteurs laser (LURPA de l'ENS de Cachan, IUT de Bourgogne à Auxerre...), cette méthode pourra être implémentée et donner lieu à la publication d'un article.

Impressions personnelles :

Cette étude m'a avant tout permis d'aborder le monde de la recherche sous un autre angle, d'en comprendre les principes et le fonctionnement global. Outre le travail de recherche en lui-même, la communication autour de cette recherche est toute aussi importante : j'ai enfin compris la signification d'une publication qui est, en fait, la reconnaissance du travail effectué. J'ai aussi beaucoup apprécié l'ambiance de travail dans la bonne humeur au sein du laboratoire ainsi que l'autonomie et la liberté d'organisation dans le travail. J'ai pu me rendre compte que, contrairement aux idées souvent reçues, le monde de la recherche est basé sur l'ouverture d'esprit et la communication, en faisant ainsi un métier à part.

Références

- [Lee and Park 00] Kwan H. Lee, Hyun-pung Park, Automated inspection planning of free-form shape parts by laser scanning, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 16, 2000.
- [Contri 02] Alexandre Contri, Qualité géométrique de la mesure de surfaces complexes par moyens optiques, PhD thesis, ENS Cachan, 2002.
- [El Hakim 95] S.F. El Hakim, J.A. Beraldin, Configuration design for sensor integration, *SPIE proceedings Volume 2598*, p. 274, 1995.
- [Feng 01] H.Y. Feng, Y. Liu, F. Xi, Analysis of digitizing error of a laser scanning system, *Precision Engineering*, 25, p. 185, 2001.
- [Luhmann 00] T. Luhmann, K. Wendt, Recommendations for an acceptance and verification test of optical 3D measurement systems, *IAPRS*, Vol. 33, Amsterdam, 2000.
- [Martin Rabaud 98] A. Martin Rabaud, Résultats de l'intercomparaison dans le domaine de la métrologie 3D par procédés optiques, *Numérisation 3D*, 1998.
- [Prieto 99] Flavio Prieto, Metrologie assistée par ordinateur : Apport des capteurs 3D sans contact, PhD thesis, INSA Lyon, 1999.
- [Remy 04] Sébastien Remy, Contribution à l'automatisation du processus d'acquisition de formes complexes par capteur laser plan en vue de leur contrôle géométrique, PhD thesis, UHP Nancy I, 2004.
- [Salvi 02] J. Salvi, X. Armangué and J. Batlle, A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation, *Pattern Recognition*, n°35, p 1617, 2002.
- [Weng 92] J. Weng, P. Cohen and M. Herniou, Camera Calibration with distortion Models and accuracy evaluation, *IEEE on pattern and machine intelligence*, Vol 14, n°10, 1992.

7 Documents annexes

Doc A : Protocole expérimental détaillé à mettre en oeuvre pour caractériser un capteur laser plan.

Doc B : Exemple d'un nuage de points exporté du logiciel Metris et partie du programme Matlab de traitement des nuages de points détaillée et commentée .

Doc C : Version en anglais du rapport pour le laboratoire IMS center de Windsor.