



HAL
open science

Identification de la géométrie de machines CN par mesure d'artefacts

M Makki, S Lavernhe, F Thiébaud, Christophe Tournier, C Lartigue

► **To cite this version:**

M Makki, S Lavernhe, F Thiébaud, Christophe Tournier, C Lartigue. Identification de la géométrie de machines CN par mesure d'artefacts. 1er Congrès International Francophone de Mécanique Avancée, Faculté de Génie Mécanique, Université d'Alep, Syrie, May 2006, Alep, Syrie. hal-01101528

HAL Id: hal-01101528

<https://hal.science/hal-01101528>

Submitted on 8 Jan 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Identification de la géométrie de machines CN par mesure d'artefacts

M. Makki¹, S. Lavernhe¹, F. Thiébaud^{1,2}, C. Tournier¹, C. Lartigue^{1,2}

¹LURPA-ENS de Cachan, 61 avenue du Président Wilson, 94235 Cachan cedex

²IUT de Cachan-Université Paris 11-Sud, 9 av de la division Leclerc, 94234 Cachan cedex
mail : lartigue@lurpa.ens-cachan.fr

Résumé : Dans un contexte de copiage rapide de formes en usinage 5 axes positionnés, chaque activité depuis la numérisation des surfaces de l'objet jusqu'à l'usinage est source d'écart géométrique sur les pièces usinées. On s'intéresse dans cet article à l'analyse des défauts des éléments de machines. Si l'on s'intéresse plus particulièrement aux Machines à Mesurer Tridimensionnelles, la géométrie des axes est corrigée par une matrice de compensation. Les défauts de la machine étant supposés corrigés, nous présentons une méthode permettant d'évaluer les erreurs sur les paramètres d'orientation et de position d'un capteur optique dans l'espace machine par mesure d'une sphère. On montre l'importance de tels défauts dans le recalage des données mesurées selon différentes orientations de capteur. Dans le cas d'une MOCN 5 axes pour laquelle la justesse des axes est corrigée, il s'agit d'identifier les "paramètres réels" associés à la géométrie par différentes méthodes. Nous détaillerons en particulier une méthode basée sur la mesure directe à l'aide de palpeurs.

Abstract: Within the context of rapid copying in 5 positioned axes, each activity, from surface digitalization on a CMM to actual machining on a machine tool is source of geometrical errors on the machined part. This paper deals with an analysis of the geometrical defects linked to machine components. When considering CMM, most generally axis geometrical errors are corrected through the use of a compensation matrix. As axis geometrical defects are supposed corrected, we present a method allowing the evaluation of sensor set-up errors, in orientation and position, by the measurement of an artefact. This shows the importance of such errors in particular concerning point registration. In the case of a MOCN 5 axes for which each axis accuracy is corrected, the issue is the identification of actual parameters of the Inverse Kinematical Transformation linked to each part set-up for machining. We detail in particular a method based on direct measuring using touch probes.

Mots clés: Copiage, forme complexe, chaîne de numérisation, fraisage 5 axes, écarts géométriques

1. Introduction

Le copiage rapide de forme est une opération qui permet d'usiner directement un nuage de points issu de numérisation 3D, sans reconstruction surfacique préalable. Cette opération, liée au prototypage rapide, est souvent nécessaire lorsqu'il s'agit de passer d'un objet à un modèle physique de référence (dans le domaine du biomédical par exemple). Le LURPA a mis au point une chaîne de copiage rapide depuis la numérisation 3D sur Machine à Mesurer Tridimensionnelle (MMT) jusqu'à l'usinage 5 axes positionnés sur Machine Outil à Commande Numérique (MOCN) (Breteau et al. 2006). Dans ce contexte pour lequel l'objectif est la réalisation d'une pièce conforme, les activités de conception, fabrication et mesure sont sources d'erreurs soit de nature algorithmique, soit de nature « matériel ».

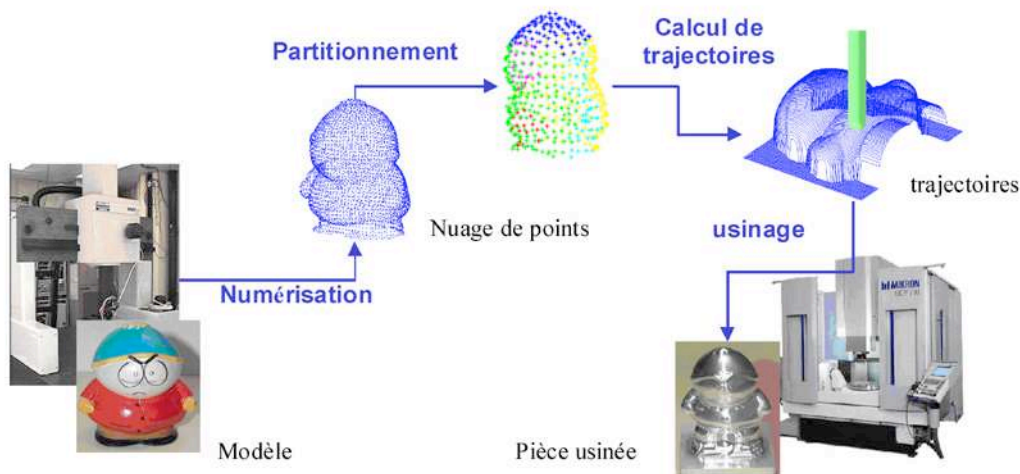


Figure 1 : Chaîne de copiage direct de forme

La numérisation consiste en l'acquisition d'ensembles de points représentatifs des surfaces de l'objet. Cette étape est réalisée sur une MMT équipée d'une tête motorisée pouvant être orientée selon un nombre fini d'orientations indexées. Cette tête orientable supporte un capteur optique de type laser-plan capable d'acquérir en un temps relativement court un nombre important de points. La numérisation de l'ensemble de la pièce est en général réalisée à l'aide de plusieurs orientations du capteur laser, en essayant de définir la situation relative capteur/surface de façon à limiter le bruit de numérisation (Souzani et al. 2005). A chaque orientation est associée une calibration dont on suppose qu'elle est stable dans le temps et qui permet de définir les matrices de situations relatives capteur/pièce : orientation et position d'un point du capteur. L'objectif des algorithmes de calibration est le recalage des points issus de différentes orientations afin d'obtenir un nuage de points exprimé dans un repère unique. Cependant, les algorithmes associés à la calibration ne sont pas accessibles à l'utilisateur.

Les données issues de numérisation sont de nature discrète, souvent denses, inhomogènes et bruitées. Ainsi, il est souvent nécessaire de réaliser des opérations de pré-traitement du nuage de points obtenus : filtrage, nettoyage, partitionnement. A cet effet, nous appuyons nos travaux sur une représentation de type occupation spatiale permettant de recréer une pseudo-continuité. Pour chaque ensemble de points contenu dans un voxel, nous associons des caractéristiques telles que la normale et le barycentre. Il est alors possible d'organiser le nuage de points en paquets de points usinables avec un même posage de la pièce dans l'espace machine (usinage 5 axes positionné). Ce partitionnement est basé sur les possibilités d'accessibilité de l'outil et la *visibilité de coupe* pour un posage donné.

L'étape suivante est le calcul de la trajectoire d'usinage pour un outil à bout hémisphérique selon la méthode du zbuffer inverse (Osty et al. 2000). L'usinage sur centre de fraisage termine le processus de copiage rapide de forme.

Les premières pièces réalisées font apparaître des défauts géométriques qui peuvent être dus à différentes causes soit de nature algorithmique, soit de nature matérielle (Breteau 2005). Une première analyse met en avant que les écarts géométriques constatés sont principalement liés à des problèmes de remise en position relative pièce/organe terminal de la machine considérée : recalage des nuages de points numérisés, recouvrement des paquets de points isolés pour chaque posage, recalage des posages dans l'espace de la MOCN (figure 2).



Figure 2 : Défaut géométriques constatés

On ne s'intéresse pas aux erreurs associées à l'étape de traitement logiciel. Cela ne veut pas dire que nous les considérons nulles, bien au contraire. Ainsi, on s'intéresse dans cette étude principalement aux défauts géométriques des éléments de machine qui pourraient induire les défauts précédemment énoncés. Ces défauts concernent :

- la géométrie des éléments de la machine elle-même, tels les défauts de justesse ou de rectitude des axes et/ou les défauts de positionnement relatif des éléments,
- la position et l'orientation des éléments terminaux tels que outil ou capteur

Après une analyse des défauts, l'objectif est de proposer des méthodes permettant d'identifier les différentes erreurs liées aux défauts géométriques des éléments de Machines (UCP 710) et les défauts de la numérisation (MMT).

Si l'on s'intéresse plus particulièrement aux Machines à Mesurer Tridimensionnelles, le modèle couramment associé aux défauts géométriques est le modèle des 21 défauts. Dans la majorité des cas, la géométrie des axes est corrigée par une matrice de compensation prenant en compte en outre les effets de la température. Les défauts de la machine étant supposés corrigés, nous présentons une méthode permettant d'évaluer les erreurs sur les paramètres d'orientation et de position d'un capteur optique dans l'espace machine par mesure d'une sphère. On montre l'importance de tels défauts dans le recalage des données mesurées selon différentes orientations de capteur. Cette étude sera détaillée au paragraphe 2.

Dans le cas d'une MOCN 5 axes pour laquelle la justesse des axes est corrigée, il s'agit d'identifier les "paramètres réels" associés à la géométrie par différentes méthodes. En usinage 5 axes positionné, c'est-à-dire on ne bouge pas les 5 axes en même temps, chaque paquet de points isolé est usiné selon un posage de la pièce dans l'espace de la machine. Pour chaque posage, il est nécessaire d'identifier certains paramètres du modèle géométrique de la machine d'usinage. Cette opération est essentielle puisque source potentielle des défauts de positionnement constatés. Nous détaillerons en

particulier une méthode basée sur la mesure directe à l'aide de palpeurs. Cette analyse fera l'objet du paragraphe 3.

2. Influence des écarts géométriques de la chaîne de numérisation

Pour effectuer l'étape de numérisation, un capteur laser plan est monté sur une tête automatique indexable d'une MMT. De façon à numériser l'intégralité de la pièce, plusieurs orientations du capteur par rapport à la pièce sont nécessaires. Lors de chaque numérisation, les coordonnées des points acquis par le capteur sont exprimées dans un repère R_c associé au capteur. Une étape de positionnement du capteur préalable à la numérisation permet d'exprimer les coordonnées des points acquis dans le repère de la machine R_0 .

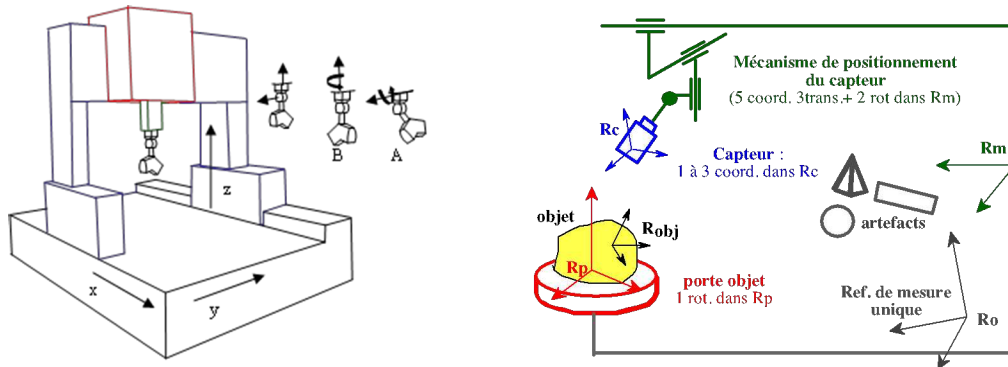


Figure 3: Repères utilisés durant l'étape de numérisation

Dans l'objectif de déterminer la qualité géométrique relative au matériel de numérisation, il est nécessaire d'établir des modèles d'écarts et d'identifier, voire corriger, les écarts constatés. Dans la suite, nous rappelons le modèle des écarts utilisé lors de la correction volumique des MMT puis nous proposons une méthode d'évaluation de la qualité de l'étape de positionnement du capteur dans l'espace de la MMT.

2.1. Modèle géométrique idéal de la machine à mesurer tridimensionnelle

Lors de l'utilisation d'une MMT avec un capteur à déclenchement, la position du centre de la sphère de palpation du palpeur est connue à une translation constante près à partir des positions relatives des organes mobiles de la MMT. Pour obtenir les coordonnées de tous points palpés dans le même repère, une sphère de calibration fixe dans l'espace de mesure est utilisée. La mesure de la sphère permet de déterminer les coordonnées de son centre dans R_m . Le centre de cette sphère est alors choisi comme origine des mesures, ce qui donne la valeur de la translation à appliquer pour passer des coordonnées des points acquises dans R_m à des coordonnées souhaitées dans un repère ayant pour origine le centre de la sphère. Cette procédure de calibration est appliquée pour chaque orientation du capteur à contact et permet de déterminer les coordonnées des points acquis dans un unique repère.

Dans le cas d'un capteur laser plan, une procédure de positionnement plus complexe est nécessaire car il est nécessaire de situer le repère lié au capteur par rapport au repère de mesure. Il faut donc connaître la matrice de rotation permettant de passer d'un repère à l'autre et la translation entre les origines des deux repères. Une procédure de positionnement non modifiable est proposée à l'utilisateur. Pour chaque orientation du capteur, cette procédure est appliquée et permet l'obtention des coordonnées des points acquis dans un repère unique.

Les coordonnées acquises lors de la numérisation par capteur laser sont d'une part les coordonnées des points dans le repère lié au capteur et d'autre part les coordonnées donnant les positions relatives des organes de la MMT. Les causes d'écarts entre les coordonnées acquises et les coordonnées vraies sont donc imputables à la machine ou au capteur.

2.2. Écarts considérés sur la machine

Le modèle d'écarts le plus couramment utilisé sur les MMT est le modèle des 21 défauts. Cette méthode s'applique aux machines composées de trois glissières orthogonales montées en série, avec trois capteurs de position placés parallèlement aux glissières en considérant chaque solide composant la machine comme indéformable.

Chacune des trois glissières est modélisée comme présenté figure 4, la direction théorique de la translation est x .

Les écarts généralement admis sur une MMT sont :

- les six écarts systématiques dus aux défauts géométriques des liaisons prismatiques
 - les écarts de justesse des règles de mesure pour chaque axe de translation (x)
 - les écarts de rectitude le long de chaque axe (y et z)
 - les écarts angulaires de tangage, roulis et lacet le long de chaque axe (autour de x , y et z)
- les trois écarts angulaires entre les axes de la MMT

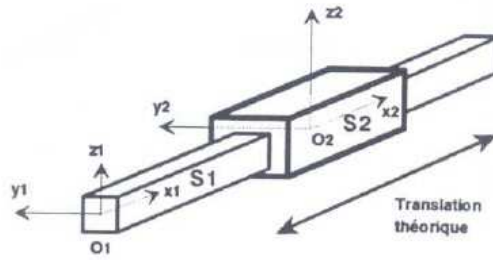


Figure 4 : Paramétrage d’une liaison glissière

Les procédures d’identification des écarts correspondant au modèle des 21 défauts sont utilisées pour établir la matrice de compensation des écarts géométriques de la MMT. Les écarts de géométrie associés à la qualité de la MMT utilisée (quelques μm) sont tels qu’ils peuvent être négligés dans la recherche des causes de marques sur les pièces fabriquées.

2.3. Ecarts relatifs à l’utilisation d’un capteur laser plan

Les écarts relatifs à l’utilisation d’un capteur plan sont de deux types :

- les écarts relatifs à la détermination de la position et de l’orientation du capteur dans l’espace de la MMT,
- les écarts propres au capteur.

L’étude approfondie de la qualité géométrique du capteur a fait l’objet d’études précédentes et a abouti à l’écriture de procédures permettant d’identifier des écarts propres au capteur utilisé, entre autres (Bourdet 2005):

- les relations entre le bruit de numérisation et la distance de numérisation,
- les relations entre le bruit de numérisation et l’angle de numérisation,
- les relations entre la justesse et la distance de numérisation.

Les valeurs des écarts obtenus dépendent de l’étape de calibration des paramètres internes du capteur qui n’est pas accessible à l’utilisateur.

En supplément des écarts propres au capteur utilisé, des écarts relatifs à la détermination du positionnement du capteur dans l’espace de la machine sont possibles. De façon à estimer les écarts liés au positionnement du capteur, une sphère étalon est mesurée en utilisant plusieurs orientations du capteur. Les points acquis pour chaque orientation du capteur appartiennent théoriquement à une même sphère. Dans le cas contraire, il existe des écarts liés au positionnement. Pour quantifier ces écarts, une sphère est associée suivant le critère des moindres carrés (Shakarji 1998) à chacun des nuages de points (figure 5). Les résultats des associations de sphères procurent la position du centre et le rayon de la sphère associée.

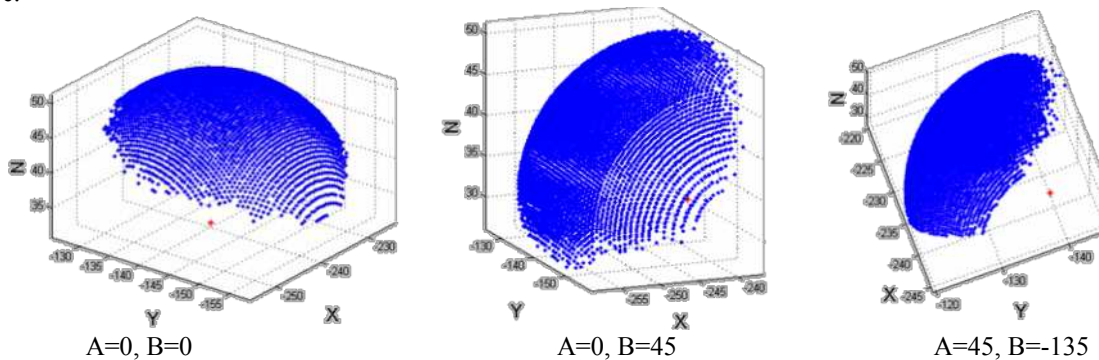


Figure 5 : Nuages de points acquis pour plusieurs orientations de capteur

Orientations	X centre	Y centre	Z centre	Rayon
A0/B0	-238.8366	-139.2224	30.6885	20.4039
A45/B0	-238.6453	-139.2201	31.0336	20.1597
A45/B-135	-239.0713	-139.6291	30.9092	20.3633

Tableau 1 : Résultats issus de l’association d’une sphère

2.4. Influence des différents écarts sur le recouvrement

Les résultats issus de l’étude du capteur seul (non présentés dans cet article) montrent que l’étape de calibration du capteur peut être source d’écarts de géométrie, notamment parce que la justesse relative du capteur évolue dans la fenêtre de vue du capteur. Les résultats de l’association d’une sphère aux nuages de points (tableau 1) montrent que les centres des sphères associées aux nuages de points ne sont pas confondus, ce qui identifie une cause de décalage des nuages de points acquis pour les différentes orientations de capteur imputable au moins pour partie à l’étape de positionnement.

3. Influence des écarts géométriques d'un centre de fraisage 5 axes

Une fois la pièce numérisée et les trajectoires d'usinage calculées, la pièce est usinée sur une machine à 5 axes. L'usinage est dit « positionné » car l'orientation de la pièce par rapport à l'outil n'évolue pas durant l'usinage. L'expérience montre l'apparition de lignes de recouvrements entre les différentes zones d'usinage sur la surface de la pièce usinée (figure 2). Dans l'objectif de minimiser les erreurs de recouvrement, il est nécessaire d'identifier les paramètres du modèle géométrique de la machine d'usinage et plus largement de la phase d'usinage en tenant compte des caractéristiques de l'outil et de la pièce.

3.1. Modèle géométrique idéal du centre de fraisage 5 axes

Dans le processus de copiage rapide, les trajectoires d'usinage calculées sur les nuages de points sont décrites dans le repère associé à la pièce indépendamment de la structure de la machine qui usinera la pièce. Le programme contient donc les coordonnées des points à atteindre, X_{pr} , Y_{pr} , Z_{pr} et l'orientation de l'axe de l'outil par ses cosinus directeurs I , J et K . Un post-processeur dédié à la machine utilisée doit donc effectuer la transformation de coordonnées pour passer du repère pièce au repère machine. Il s'appuie pour cela sur le modèle géométrique de la machine. Le centre d'usinage considéré est un centre à structure de type *RRTTT* (Mery 1997) avec les rotations affectées à la pièce sur les axes A et C . La transformation géométrique consiste donc à déterminer les coordonnées articulaires (X_m , Y_m , Z_m , A , C) en fonction des coordonnées pièce (X_{pr} , Y_{pr} , Z_{pr} , I , J , K) (Laverne 2006).

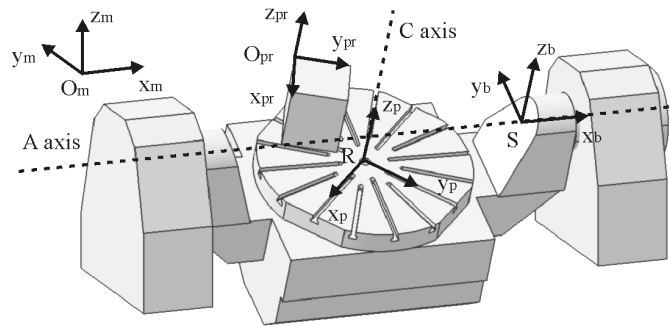


Figure 6 : Définition des différents repères

Les différents repères (figure 6) sont les suivants :

- le repère machine (O_m , x_m , y_m , z_m) qui s'appuie sur la structure de la machine. Ses axes sont parallèles aux axes de translation X , Y et Z de la machine. L'axe Z_m est parallèle à l'axe de l'outil ;
- le repère berceau (S , x_b , y_b , z_b) est lié au berceau de la machine : x_b est parallèle à x_m , S est sur l'axe A et est donné par l'équation suivante (1) :

$$\overrightarrow{OmS} = m_x \cdot \overrightarrow{x_m} + m_y \cdot \overrightarrow{y_m} + m_z \cdot \overrightarrow{z_m} \quad (1)$$

- le repère plateau (R , x_p , y_p , z_p) est lié au plateau tournant : z_p est parallèle à z_b , R est défini comme l'intersection entre l'axe C et la face supérieure de la table (2) :

$$\overrightarrow{SR} = b_y \cdot \overrightarrow{y_b} + b_z \cdot \overrightarrow{z_b} \quad (2)$$

- le repère de programmation (O_{pr} , x_{pr} , y_{pr} , z_{pr}) est lié à la pièce : c'est le repère utilisé pour générer les trajectoires d'usinage. Son origine O_{pr} est donné par l'équation (3) :

$$\overrightarrow{RO_{pr}} = p_x \cdot \overrightarrow{x_p} + p_y \cdot \overrightarrow{y_p} + p_z \cdot \overrightarrow{z_p} \quad (3)$$

Les paramètres m_x , m_y , m_z , b_y et b_z sont fixes, identifiés sur la machine outil. La position de la pièce sur la table est définie par les paramètres p_x , p_y et p_z . Pour passer d'un repère à l'autre, on utilise généralement la matrice P_{ij} qui permet d'exprimer un vecteur initialement dans le repère j dans le repère i . Voici l'ensemble de ces matrices :

$$P_{mb} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & m_x \\ 0 & \cos(A) & \sin(A) & m_y \\ 0 & -\sin(A) & \cos(A) & m_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} P_{bp} = \begin{bmatrix} \cos(C) & \sin(C) & 0 & 0 \\ -\sin(C) & \cos(C) & 0 & b_y \\ 0 & 0 & 1 & b_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} P_{ppr} = \begin{bmatrix} a & d & g & p_x \\ b & e & h & p_y \\ c & f & i & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Les paramètres $a, b, c, d, e, f, g, h, i$ définissent l'orientation de la pièce sur la table.

L'équation (5) traduit le fait que l'orientation de l'outil est fixe dans le repère machine. L'orientation de l'axe de l'outil par rapport à la pièce est obtenue par les deux rotations sur la pièce.

Ensuite, une fois que les angles A et C sont calculés, les axes de translation X, Y et Z se déplacent pour atteindre le point programmé tout en compensant l'effet des rotations sur la position de la pièce. Les consignes à appliquer aux axes de translation sont obtenues par l'équation (6). Il s'agit de la transformation géométrique inverse.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}_{(xm,ym,zm)} = P_{mb} \times P_{bp} \times P_{ppr} \times \begin{bmatrix} i \\ j \\ k \\ 0 \end{bmatrix}_{(xpr,ypr,zpr)} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{bmatrix}_{(Om,xm,ym,zm)} = P_{mb} \times P_{bp} \times P_{ppr} \times \begin{bmatrix} X_{pr} \\ Y_{pr} \\ Z_{pr} \\ 1 \end{bmatrix}_{(Opr,xpr,ypr,zpr)} \quad (6)$$

3.2. Ecartés considérés et méthode d'identification sur machine

La situation relative de l'outil par rapport à la pièce est assurée par un assemblage de corps solides. La liaison entre ceux-ci peut être complète mais démontable ou présenter un degré de liberté en translation ou rotation.

Les liaisons complètes sont celles liant l'outil au porte-outil, le porte-outil à la broche, la pièce au porte-pièce et le porte-pièce à la table. Les liaisons à un degré de liberté sont les liaisons glissières des axes X, Y et Z et les liaisons pivots des axes A et C . Tout comme pour les machines à mesurer tridimensionnelles, ces liaisons possèdent des défauts. Cependant nous considérons que la justesse des axes est corrigée et que chaque liaison à un degré de liberté est parfaite. Nous faisons également l'hypothèse que les axes de translations et de rotations sont perpendiculaires entre eux et que l'axe de rotation A est parallèle à l'axe X . Dans le cas particulier où la base de programmation est identique à celle du plateau, les huit paramètres $P_x, P_y, P_z, b_y, b_z, m_x, m_y, m_z$ définissent alors le modèle géométrique de l'usinage. Nous considérons donc que ces défauts sont prépondérants.

Les trois paramètres P_x, P_y et P_z , définissent la position de la pièce sur le plateau. Ils sont donc à identifier pour chaque nouvelle production ou pour chaque pièce de la série quand l'exigence de qualité dimensionnelle l'impose. Dans ce cas on utilise un capteur à déclenchement pour machines outil à commande numérique dont la précision intrinsèque est de l'ordre du μm mais qui peut se dégrader en quelques μm si la chaîne d'acquisition temps réel des coordonnées palpées n'est pas optimale (Renishaw 2006). Les cinq paramètres b_y, b_z, m_x, m_y, m_z sont les paramètres géométriques de la machine seule. Ils sont à identifier une fois pour toutes après installation de la machine.

Si tous ces paramètres sont correctement identifiés, nous sommes capables de minimiser les écarts dimensionnels et en particulier les écarts de recouvrement quand une phase d'usinage est composée de plusieurs orientations de la pièce avec superposition des zones usinées.

Nous proposons maintenant d'identifier les « paramètres réels » associés à la géométrie de la machine. Nous détaillons en particulier une méthode basée sur la mesure directe à l'aide de palpeur pour déterminer la distance entre les deux axes de rotation définie par les paramètres b_y et b_z .

Étape 1 : se centrer sur l'axe de rotation C dans la direction Y ; pour cela, on vient accoster selon Y un plan dégauché selon X . Effectuer un demi-tour du plateau C , puis accoster le plan selon $-Y$. La position de l'axe C selon Y est donnée par :

$$Y_{axeC} = Y_1 + (Y_2 - Y_1)/2 \quad (7)$$

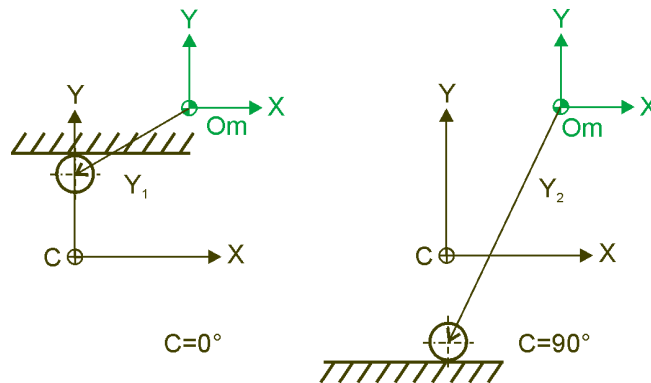


Figure 7 : Manipulations de l'étape 1

Etape 2 : effectuer un quart de tour sur A ($A=+90^\circ$) pour mettre la table verticale. Accoster la face supérieure de la table. Cette mesure nous donne l'équation :

$$Y_3 - R = Y_{axeC} - b_y - b_z \tag{8}$$

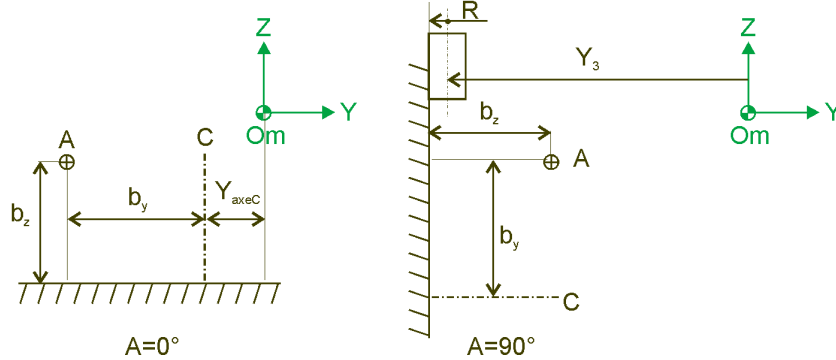


Figure 8 : Manipulations de l'étape 2

Etape 3 : accoster selon Y une face verticale à l'aide du palpeur. Nous obtenons la relation suivante :

$$Y_4 = Y_{axeC} - L - R \tag{9}$$

Monter un outil en broche ; le choix de l'outil et de sa jauge n'intervient pas. Venir accoster la cale étalon de hauteur E posée sur la table selon $-Z$, comme pour faire la jauge outil. Nous obtenons la relation suivante :

$$Z_{axeA} = Z_1 - E + b_z \tag{10}$$

Pivoter l'axe A de 90° , puis refaire la même mesure sur la face accostée précédemment. Nous obtenons la relation suivante :

$$Z_{axeA} = Z_2 - E - L + b_y \tag{11}$$

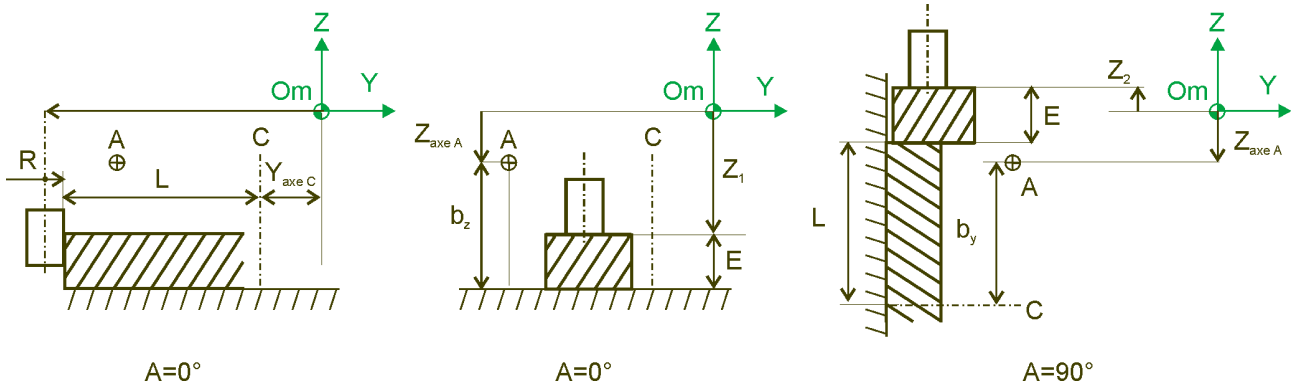


Figure 9 : Manipulations de l'étape 3

Résolution : En éliminant Z_{axeA} entre les équations (10) et (11) puis en éliminant L avec l'équation (9), nous obtenons :

$$b_y - b_z = Z_1 - Z_2 - Y_{axeC} - R + Y_4 \tag{12}$$

Nous pouvons réécrire l'équation (8) sous la forme :

$$b_y + b_z = Y_{axeC} - Y_3 + R \tag{13}$$

Les équations (12) et (13) permettent d'obtenir facilement :

$$b_y = \frac{1}{2}(Z_1 - Z_2 + 2 \times Y_{axeC} - Y_3 - Y_4) \quad b_z = \frac{1}{2}(-Z_1 + Z_2 + 2 \times R - Y_3 + Y_4)$$

3.3 Ecarts considérés et méthode d'identification sur l'outil

Les dimensions caractéristiques de l'outil sont sa longueur et son rayon. La longueur de l'outil intervient directement dans la transformation géométrique inverse pour générer les consignes articulaires. Son identification est donc primordiale. Elle peut s'effectuer à l'aide d'un banc de préréglage puis d'un usinage réel pour affiner sa valeur. Pour être le plus précis et éviter l'immobilisation du moyen de production, une mesure sur la machine outil et sans contact est également possible (Renishaw 2006).

Le rayon de l'outil a aussi une influence sur les dimensions des pièces usinées. Il est possible d'utiliser la correction de rayon en trois dimensions en spécifiant le rayon réel de l'outil dans la commande numérique. Cependant, cette correction ne tient pas compte du défaut de forme de l'outil qui peut avoir un effet non négligeable sur les écarts géométriques en particulier pour l'outil boule en usinage des surfaces complexes (Feautrier et al. 1998). Seul un affûtage parfait de l'outil permet de s'affranchir de ce défaut. Enfin, la déformation de l'outil à cause des contraintes mécaniques durant la coupe n'est pas nulle mais la diminution des portes à faux et une profondeur de passe minime permet de la minimiser.

3.4 Influence des différents écarts sur le recouvrement

Nous avons donc isolé neuf paramètres, en comptant la longueur de l'outil, dont la précision d'identification influence la qualité géométrique. En particulier, les nuages de points issus de la digitalisation de la forme se recouvrent par endroit ce qui génère au niveau des trajectoires des zones usinées plusieurs fois avec des orientations de l'outil différentes. Aussi, comme les consignes articulaires X_m , Y_m , et Z_m dépendent des angles A et C et des neuf paramètres géométriques (6), les positions atteintes par l'outil pour un même point visé dans l'espace pièce ne seront pas les mêmes selon l'orientation de l'outil. Certains paramètres (m_x , m_y , m_z , j_z) sont indépendants de l'orientation de l'outil mais pas les paramètres p_x , p_y , p_z , b_y et b_z . On peut donc s'attendre à un effet de ces défauts dans les écarts de recouvrement observés sur les pièces usinées. Des essais qualitatifs restent à mener en usinant le modèle exact de la sphère numérisée pour ne faire apparaître que l'effet des défauts étudiés.

4. Conclusion

Le processus de copiage rapide est un processus complexe faisant intervenir des moyens de numérisation et de fabrication complexes. Les travaux menés au LURPA sur ce domaine se sont focalisés jusqu'à présent sur l'aspect logiciel du traitement des données de numérisation pour aboutir à l'obtention des pièces. Les travaux présentés dans cet article se focalisent d'avantage sur les aspects matériels de ce processus en montrant les sources d'écarts géométriques potentielles liées aux procédés et des procédures pratiques de détermination et/ou correction de ces écarts. La détermination et la correction des écarts géométriques dans le processus de copiage rapide sont des parties incontournables des travaux de synthèse menés actuellement dans le cadre de la rétroconception de pièces de formes complexes.

Références

- Bourdet P.**, Evaluation des performances de la mesure par capteur optique sur machine à mesurer tridimensionnelle, 12e Congrès international de métrologie, Lyon, 2005
- Breteau**, mémoire de Master, Ecole Normale Supérieure de Cachan, juin 2005.
- Breteau P., Bourdet P., Thiébaud F., Lartigue C.**, Towards an approach for rapid copying of free-form surfaces in 5-axis machining, IDMME 2006, Grenoble(France), 17-19 May 2006
- Feautrier D., Thiébaud F., Timon G., Lartigue C.** Certification of free-form machining: a comprehensive approach from CAD/CAM to measurement, , 2nd International Conference on Integrated Design and Manufacturing In Mechanical Engineering, IDMME'98, Compiègne(France), pp. 653-660, May 1998.
- Lavernhe S., Tournier C., Lartigue C.**, Kinematical Performances in 5-axis machining, IDMME 2006, Grenoble(France), 17-19 May 2006
- Mehdi-Souzani C., Lartigue C., Thiébaud F., Bourdet P.**, Evaluation de la performance des systèmes optiques de numérisation 3D – Application à la numérisation automatique intelligente, 2005.
- Mery, B.** Machines à commande numérique, Hermes, 1997.
- Osty G., Contri A., Duc E.**, Free-form copying from point clouds; A tool-path calculation method using B-Spline interpolation, RCFAO, Rapid production, 2000, pp. 367-382.
- Renishaw**, <http://www.renishaw.com/client/product/UKEnglish/PGP-138.shtml>
- Shakarji C-M**, Least-Squares Fitting Algorithms of the NIST Algorithm Testing System, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Vol. 103, 1998, pp. 633-641.