

Typologie et conception des machines à mesurer tridimensionnelles: un état de l'art

Thierry Coorevits^{2,a}, François Hennebelle¹

¹ LE2I UMR6306, CNRS, Arts et Métiers, Univ. Bourgogne Franche-Comté, F-21000 Dijon, France
² Laboratoire MSMP, Arts et Métiers Paris Tech - 8 Boulevard Louis XIV, 59046 LILLE Cedex, France

Abstract. This article is limited to coordinate measuring machines CNC ordered without addressing probing systems, measuring arms or optical techniques. We present an inventory of major architectures based on the standard ISO10360-1. Then, the key points of the design of coordinate measuring machines are studied. These key points are related to the design of the slideways, the Abbe principle introduced by Ernst Abbe in the late nineteenth which remains a fundamental point, the position of drives and materials. The geometry correction software becomes essential in the mid-1980s. We recall the basic ideas and confronts lapping practiced previously. Finally, we give some leads on trends in the design of CMM related to the introduction of sensors, the emergence of "microCMM" or three-dimensional comparator. This is to provide in a few pages, a panorama of the state of the main knowledge in terms of design and product evolution.

1 Introduction

La notion de machine à mesurer apparaît dès le début du vingtième siècle, avec, par exemple, la « MUL » (machine à mesurer universelle linéaire) introduite par SIP en 1909 qui est donc une machine unidimensionnelle. Les premières machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) [1] apparaissent dans les années 1960. On peut probablement écrire que la première MMT moderne est l'UMM500 de ZEISS apparue en 1973, elle est dotée d'un palpeur mesurant. La même année, RENISHAW introduisait le TP1, premier palpeur à déclenchement. Dans les grandes lignes, la typologie et la conception des machines à mesurer tridimensionnelles ont été fixées dès le début des années 1980. Le type le plus courant à cette époque est la machine à portique (ISO10360-1) constituée d'éléments en granit guidés par des patins aérostatiques.

La qualité géométrique était obtenue par rodage des éléments en granit. Cette qualité géométrique était chiffrée par une formule du type $U=A + L/B$ dite formule du papillon. Elle signifie que l'écart maximum toléré est de A pour une longueur nulle et de $A+L/B$ pour une longueur L. Par exemple, si $U=4+4L/1000$, cela signifie que pour une longueur de 500mm, on a un écart maximum toléré de 6µm. On peut donner des valeurs différentes pour une longueur mesurée le long d'un axe et une longueur évaluée dans l'espace. La vérification de la machine était généralement effectuée sur la base d'un document émis par la « Coordinate Measuring Machine Manufacturers Association » et intitulé « Accuracy Specification for Coordinate Measuring Machines », ce document est devenu (avec de nombreuses modifications) la norme ISO10360-2.

^a Email de correspondance de l'auteur : thierry.coorevits@ensam.eu

Cette période d'émergence des MMT en tant que produit industriel fiable se termine dès le milieu des années 1980 grâce à l'introduction de la correction de géométrie par logiciel (chez Renault Automation en France en 1984 par exemple) mais aussi aux travaux européens sur la qualité des logiciels [2], [3] et sur la validation des algorithmes basés sur le critère de Tchebychev [4].

2 Typologie

La norme ISO10360-1 fixe les principaux types de machines, les schémas sont issus de ce document.

2.1. Portique mobile

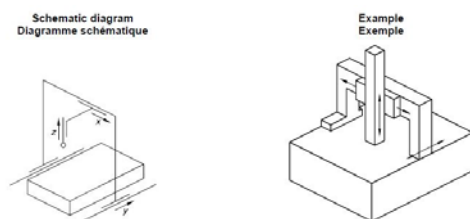


Figure 1 : machine type portique

Le portique est un très bon compromis entre l'accessibilité et la qualité géométrique. En laboratoire, c'est le type le plus fréquent. La table principale (notée y sur la figure 1) est généralement en granit, la pièce y est posée, elle est donc fixe.

2.2. Machine pont

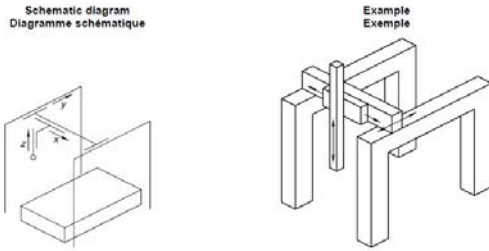


Figure 2 : pont

La structure pont ressemble beaucoup au portique à la différence que le guidage « Y » de la figure 2 est plus haut ce qui rapproche le centre de gravité de la partie mobile des entraînements et qui évite une fréquence propre « en tangage » de l'axe principal. Cette structure fait parfois l'objet d'un double entraînement (voir paragraphe 3.2).

4.2. Portique fixe

Le portique est fixe et la table est mobile (figure 3). Le portique peut ainsi être solidement construit comme un anneau fixé sur la table principale. L'inconvénient de la structure est de bouger la pièce ce qui peut devenir un réel problème pour les pièces lourdes. Ceci étant, c'est une structure choisie par LEITZ (groupe HEXAGON) pour sa PMM-C et par MITUTOYO pour sa LEGEX, deux machines de haute qualité.

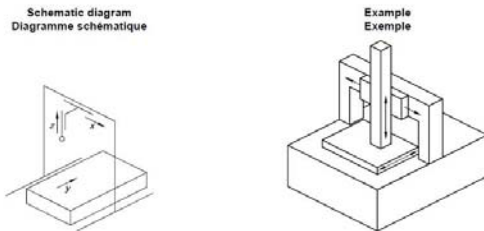


Figure 3 : portique fixe

2.4. Cantilever

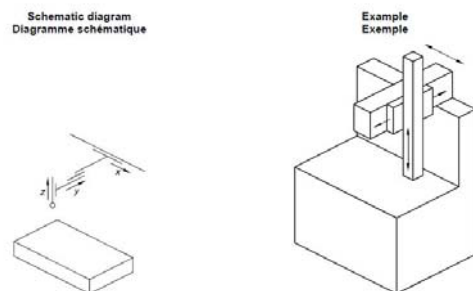


Figure 4 : structure cantilever

La structure cantilever est ancienne et était un peu passée de « mode » jusqu'à ces dernières années où elle réapparaît en tant que machine d'atelier bénéficiant des technologies permettant de travailler dans une large gamme de température et de se passer d'air comprimé (guidages à billes). L'idée est d'avoir une MMT qui se manipule comme une colonne de mesure 3D simple et conviviale installée au cœur de l'atelier.

2.5 Bras sortant

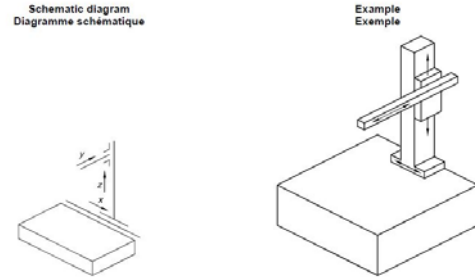


Figure 5 : bras sortant

La structure à bras sortant permet de grandes capacités faciles à charger, c'est typiquement une machine de mesures de carrosseries automobiles même si les technologies optiques prennent une vraie importance dans ce domaine. Tant à cause des technologies utilisées, que du volume ou de la difficulté à maîtriser la géométrie, cette structure n'est pas celle sur laquelle on attend des performances métrologiques de plus haut niveau.

3 Principes de conception

3.1. Isostatisme et guidage

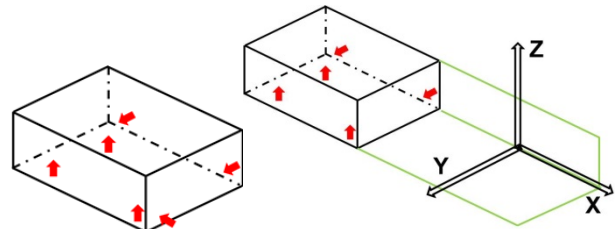


Figure 6: de l'isostatisme au guidage

La figure 6 montre la mise en position isostatique d'un solide sur 6 appuis ponctuels selon la liaison de Kelvin. Il suffit de supprimer le point servant de butée pour obtenir un guidage en translation. L'appui ponctuel est réalisé par un patin aérostatique surmonté d'une rotule (figure 2). Les patins volent normalement à des hauteurs comprises entre 5 et 7µm. Ces patins (figure 7) fonctionnent fondamentalement comme des systèmes asservis susceptibles d'instabilités vibratoires. Le brevet [5] propose une solution à ce problème.

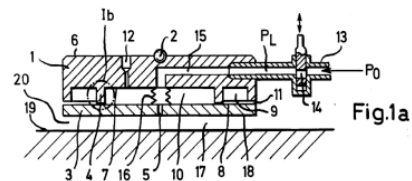


Figure 7 : patin aérostatique [5]

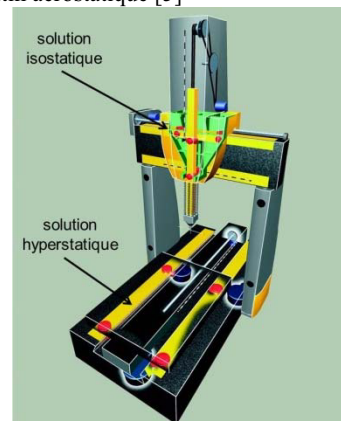


Figure 8 : position des patins (crédit LEITZ)

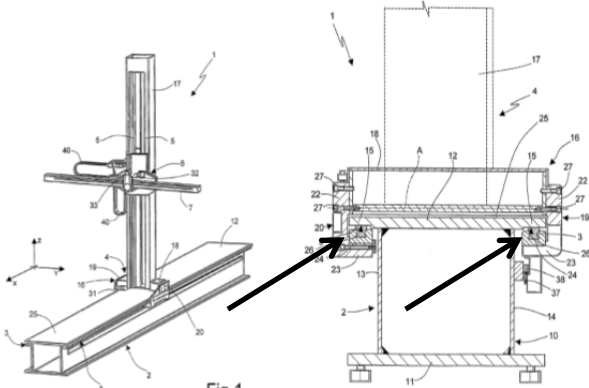


Figure 9 : guidages à billes [6]

La figure 8 permet de montrer la position des patins pour une machine à table mobile. Le montage de la table est hyperstatique, c'est une solution qui est intéressante en termes de raideur mais qui nécessite une haute qualité de réalisation. D'une façon générale, les patins sont précontraints soit par le poids de la structure lorsqu'il s'agit une réaction verticale soit par un montage de deux patins opposés formant un guidage précontraint.

Les progrès réalisés sur les guidages à billes à recirculation ont permis de les monter sur des machines à mesurer (figure 9). Il est probable que la première machine «de qualité» équipée fut le SIRIO de LEITZ. Depuis, on a également la DuraMax de ZEISS et d'autres. Ce système a l'avantage de la raideur et de ne pas nécessiter d'air comprimé mais ne correspond pas encore au plus haut niveau d'exigences.

3.2. Principe d'Abbe

On peut écrire le principe d'Abbe [7] comme suit : « Pour mesurer une longueur, en bénéficiant de toute la qualité de la règle, il faut placer cette longueur dans le prolongement de la règle ». Cette règle est respectée par le micromètre par exemple. En fait, sauf pour des architectures très particulières (voir paragraphe 5.3), il est difficile de respecter ce principe d'Abbe pour une machine tridimensionnelle. L'idée sera donc qu'il faut que la longueur mesurée soit la plus proche possible de la règle pour minimiser les effets des rotations. Cette règle est particulièrement importante pour des grandes machines de type gantry. L'idée sera de placer 2 règles (figure 10) pour éliminer l'influence du lacet. On parlera de Principe d'Abbe reconstitué.

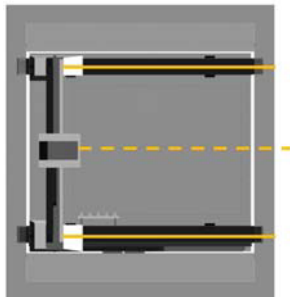


Figure 10 : principe d'Abbe reconstitué

3.3. Points fondamentaux



Figure 11: points fondamentaux

Un axe en mouvement est soumis à des efforts issus de l'accélération, de l'entraînement et du chemin de câbles. La position de la règle de lecture est également un point important à cause du Principe d'Abbe mais également pour le comportement de l'asservissement. L'idéal est que ces 4 points (figure 11) soient situés sur le même axe de manière à ne pas générer de moment.

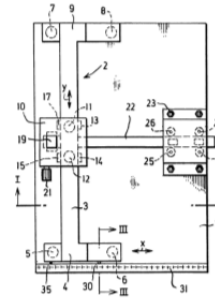


Figure 12 : poussée centrale [8]

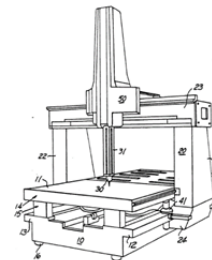


Figure 13 : portique en forme d'anneau [9]

La figure 12 présente une solution introduite par ZEISS sur la gamme UPMC qui consiste à placer un système de poussée à l'arrière de la machine. En figure 13, on a une solution qui consiste à fermer le portique sous la forme d'un cadre ce qui nécessite une fausse table. Cette solution permet un entraînement et une lecture du déplacement au centre de la machine. Cette solution a entre autre l'avantage de disposer, en plus, d'une table pour poser la pièce qui ne se déforme pas sous l'effet du déplacement du portique et qui constitue donc un espace de référence pour le « calibrage » de la géométrie dont nous discuterons au paragraphe 4.



Figure 14 : structure pont



Figure 15 : moteur linéaire (crédit ETEL)

La structure de la figure 14 à l'avantage de placer le centre de gravité à la même hauteur que les points de poussée des entraînements. Il est alors possible de placer un double entraînement et une double lecture ce qui permet de maîtriser le phénomène de « marche en crabe » du portique en mesurant le lacet en temps réel. Sur des machines de grande largeur, c'est une technique presque obligatoire pour obtenir des qualités intéressantes.

Un système d'entraînement doit être capable de fournir un effort suffisant pour accélérer le mobile concerné, sans jeu d'inversion, sans générer de vibrations dans des gammes de fréquences correspondantes aux fréquences propres de la structure et sans générer d'effort orthogonal au sens du déplacement. Toutes les technologies d'entraînement ont été utilisées sur les MMT (pignon et crémaillère, vis à billes, clinquant d'acier, etc.). Récemment, on a vu apparaître les moteurs linéaires (figure 15). Un inconvénient potentiel de cette technologie est que le maintien à l'arrêt des mobiles consomme de l'énergie donc est une source de chaleur.

3.4. Matériaux

Historiquement, la plupart des guidages des MMT étaient en granit puis d'autres matériaux ont été utilisés même si le granit reste un matériau important.

Un matériau adapté pour obtenir un bon comportement des patins aérostatiques est un matériau dur, susceptible d'un bon état de surface et stable sur le plan dimensionnel. Sur ces points, le granit est un bon candidat mais le granit n'est pas un matériau idéal sur les plans thermique et dynamique.

Un bon matériau doit présenter une forte diffusivité thermique. « La diffusivité thermique, qui caractérise l'aptitude d'un matériau à diffuser la chaleur, est une propriété intervenant dans tous les processus de transfert de chaleur en régime instationnaire, c'est-à-dire pour lesquels la température varie avec le temps » [10].

La diffusivité thermique (a) exprimée en $m^2.s^{-1}$ et vaut :

$$a = \frac{\lambda}{\rho.c} \quad (1)$$

où :

λ est la conductivité thermique du matériau, en $W.m^{-1}.K^{-1}$
 ρ est la masse volumique du matériau, en $kg.m^{-3}$

c est la capacité thermique massique en $J.kg^{-1}.K^{-1}$

Un bon matériau doit également avoir un comportement dynamique intéressant. En mécanique linéaire, la relation entre la contrainte et la déformation est linéaire, le rapport s'appelle le module d'Young. La raideur d'un élément dépend donc de sa géométrie et de son module d'Young noté E qui est exprimé en pascal. La masse d'un élément dépend de sa géométrie et de sa masse volumique. Comme la fréquence propre dépend du rapport $\sqrt{\frac{raideur}{masse}}$ et compte tenu de ce qui vient d'être écrit, à géométrie constante, la fréquence propre dépend du rapport $\sqrt{\frac{E}{\rho}}$ qui est d'ailleurs la vitesse de propagation des ondes longitudinales et s'exprime en $m.s^{-1}$.

De surcroît, il est aussi possible de tenir compte du coefficient de dilatation mais des dispositions constructives permettent de gérer un matériau à fort coefficient de dilatation, ce qui explique que des machines de grande qualité présentent des guidages en aluminium revêtu.

Pour l'essentiel, les matériaux constituant les guidages sont réunis dans le tableau suivant :

	Diffusivité ($m^2.s^{-1}$)	$\sqrt{\frac{E}{\rho}}$ ($m.s^{-1}$)
granit	$1.2 \cdot 10^{-6}$	4700
aluminium	$80 \cdot 10^{-6}$	5000
céramique alumine	$10 \cdot 10^{-6}$	9300
carbure de silicium	$70 \cdot 10^{-6}$	11000

Tableau 1 : comparaison de matériaux

Le tableau 1 doit être pris avec précaution en particulier pour la céramique issue de l'alumine et pour le carbure de silicium. Les caractéristiques de ces matériaux sont très sensibles à la composition et à la fabrication. Cependant, l'analyse paraît claire, le carbure de silicium à une diffusivité au même niveau que l'aluminium mais est bien meilleur sur le plan dynamique. Son coefficient de dilatation est de plus environ 5 fois plus faible que celui de l'aluminium. Ceci explique que la nouvelle XENOS de ZEISS possède des éléments en carbure de silicium.

3.5 Chaîne métrologique

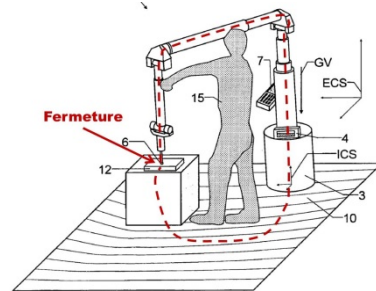


Figure 16 : chaîne métrologique

Le fond de la figure 16 est issu d'un brevet [21] qui ne concerne pas la notion de chaîne métrologique. La ligne pointillée a été ajoutée par les auteurs. La chaîne métrologique est, littéralement, le chemin des micromètres. Elle joint le point de contact entre la bille

du palpeur et la pièce considéré du côté du palpeur et le même point considéré comme appartenant à la pièce en passant par toute la structure de l'appareil métrologique et les supports.

C'est une notion particulièrement importante pour tous les matériels portables car des erreurs sont facilement commises en particulier sur la raideur des supports.

C'est également une notion importante sur le plan thermique car il ne suffit pas d'évaluer l'influence d'une variation de température sur la taille de la pièce mesurée, il faut prendre en compte le comportement de l'ensemble de la chaîne métrologique.

4 Correction de la géométrie

La géométrie des premières machines étaient généralement obtenues par rodage des guidages. Les premières idées pour une correction de la géométrie par logiciel datent de la fin des années 1970, voir [12] pour un état de l'art.

L'idée de base pour la modélisation de la géométrie d'une machine à portique consiste à faire l'hypothèse de la mécanique du corps solide c'est-à-dire que chaque axe se comporte comme un solide en déplacements indépendamment des autres. C'est une hypothèse valide pour les machines à portique mais qui nécessite des modifications pour les machines à bras horizontal par exemple.

La correction de géométrie et la correction par rodage ont un point commun, il faut un modèle de représentation des défauts constatés pour pouvoir agir. La technique du rodage est susceptible d'entraîner des défauts locaux sur les pistes de guidage et oblige l'exécutant à savoir « ne pas aller trop loin ». La correction logicielle à l'avantage d'être réversible (en cas d'erreur) et de corriger la totalité du défaut constaté. Le seul inconvénient est que la correction de géométrie est, a priori, perdue en cas de rétrofit par un autre constructeur exemple. La norme NF E11-151 proposait un système neutre de représentations des corrections mais elle a été supprimée en 2003 faute d'usage.

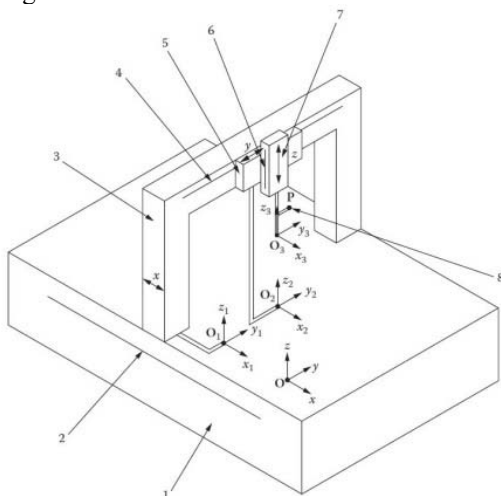


Figure 17 : notation pour la correction de géométrie [11]

Si on reprend les notations classiques, pour la figure 17, on note pour décrire le vecteur rotation :

$$\vec{\omega} = (xRx, xRy, xRz) = (\text{roulis}, \text{tangage}, \text{lacet})$$

et pour le vecteur translation

$$\vec{\varepsilon}_{(O_1)} = (xTx, xTy, xTz)$$

$$= (\text{justesse}, \text{rectitude}, \text{rectitude})$$

Si on utilise le formalisme des torseurs, la contribution au déplacement du point P lié à l'axe X s'écrit :

$$\vec{\varepsilon}_{x(P)} = \vec{\varepsilon}_{x(O_1)} + \vec{\omega}_x \times \overrightarrow{O_1P} \quad (2)$$

Le déplacement du point P lié à l'axe Y s'écrit :

$$\vec{\varepsilon}_{y(P)} = \vec{\varepsilon}_{y(O_2)} + \vec{\omega}_y \times \overrightarrow{O_2P} \quad (3)$$

Enfin, le déplacement du point P lié à l'axe Z s'écrit :

$$\vec{\varepsilon}_{z(P)} = \vec{\varepsilon}_{z(O_3)} + \vec{\omega}_z \times \overrightarrow{O_3P} \quad (4)$$

Le déplacement total s'écrit : $\vec{\varepsilon}_{(P)} = \vec{\varepsilon}_{x(P)} + \vec{\varepsilon}_{y(P)} + \vec{\varepsilon}_{z(P)}$

Ces formules sont bien connues, la plus grande difficulté reste la qualité et la rigueur des procédures expérimentales d'acquisitions des 18 fonctions. On corrigera ensuite les perpendicularités.

5 Tendances

5.1 Optimisation des structures

Les structures peuvent être l'objet d'optimisation en termes de masses et de fréquences propres comme le montre la figure 18. La vraie question est de maîtriser la stabilité dimensionnelle de ces ensembles soudés.

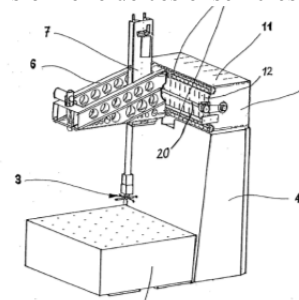


Figure 18 : structure ajourée type aéronautique [13]

5.2 Capteurs

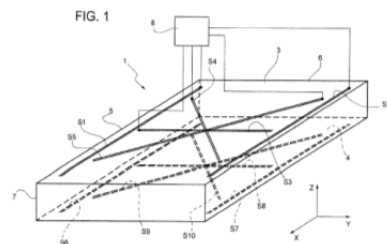


Figure 19 : intégration de capteurs [14]

Il existe deux stratégies en matière d'utilisation de capteurs sur les MMT.

La première stratégie est illustrée par la figure 19. Elle consiste à intégrer des capteurs, ici des capteurs de déformées du granit principal en vue de correction. On trouve également des capteurs de température pour les règles, la pièce etc.

La seconde stratégie est, littéralement, conceptuelle. Elle a été introduite par Goodhead dans [15]. Les auteurs, à partir de la mesure de rectitude au fil tendu qui est une méthode ancienne mais classique, développe l'idée de deux fils tendus de part et d'autre du solide en mouvement puis passent à des règles rigides et multiplient les capteurs (figure 20). Ils expliquent qu'à partir de 15 capteurs de proximité et des 3 règles, il est

possible de maîtriser la géométrie entièrement grâce aux capteurs et à une correction de géométrie adaptée. C'est un article qui constitue une rupture conceptuelle (sauf si on peut trouver une référence encore plus ancienne). Cette stratégie est complètement différente de celle qui consiste à ajouter des capteurs pour corriger en « dynamique » une machine de conception classique. On voit figure 21, une déclinaison pour une MMT.

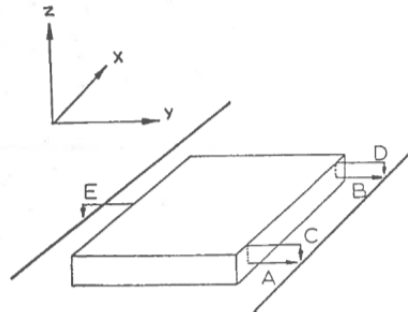


Figure 6. Transducer and reference wire orientation to detect table error motions

Figure 20 : une nouvelle stratégie [15]

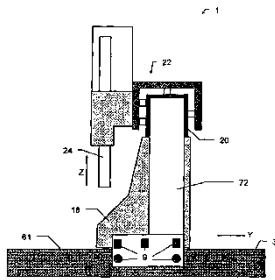


Figure 21 : application à une MMT [19]

5.3 MicroCMM



Figure 22 : microCMM [17]

Les « micro » machines à mesurer [17] présentent des volumes de quelques dm³ et des écarts maximum tolérés très faibles. La machine de la figure 22 est installée au METAS, le laboratoire national suisse. La structure est intéressante puisque la pièce est installée sur un ensemble constituée de 3 plans orthogonaux deux à deux sur lesquels on fait de l'interférométrie sur miroir plan avec les faisceaux dans le prolongement de la bille du palpeur ce qui permet de respecter le principe d'Abbe dans les trois directions [18]. Cette microCMM n'est pas la seule sur le marché.

5.4 Comparateur tridimensionnel

Le comparateur tridimensionnel de RENISHAW (figure 23) est une nouvelle approche basée sur la reproductibilité du processus plutôt que sur son

exactitude [20] dans une approche de type ISO15530-3. La structure en hexapode très légère permet d'obtenir des dynamiques très intéressantes.

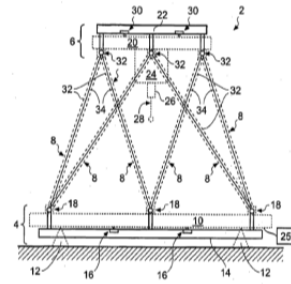


Figure 23 : Comparateur hexapode [16]

6 Conclusion

Si on considère l'année 1973 comme l'année de naissance de la machine à mesurer moderne, l'histoire du produit qui nous occupe approche donc le demi-siècle. Durant ce temps, la MMT qui est un ensemble comprenant une mécanique, une électronique comprenant une commande numérique et un ordinateur a considérablement évoluée mais les concepts de base sont étonnamment stables. La MMT est un produit en « phase de maturité » au sens du marketing. On est passé d'un produit « exploité du quotidien » à un produit industriel. Sur tous les plans, ergonomie, productivité, résistance aux conditions extérieures, incertitudes etc. les progrès sont considérables.

Nous n'avons pas discuté des technologies de palpéage dans cet article pourtant c'est un aspect fondamental car les lignes de force de l'évolution des MMT sont la productivité, l'intégration dans le système d'informations de l'entreprise et la maîtrise des incertitudes. Cette maîtrise des incertitudes a une dimension traçabilité évidemment mais si on prend en compte la pièce, le nombre de points mesurés est essentiel ce qui implique le développement des techniques de scanning ou de palpéage optique.

Références

1. John A. Bosch, Coordinate Measuring Machines and Systems, CRC Press, p24 (1995)
2. Technical report BCR EUR 10909 EN (1986)
3. Technical report BCR EUR 13418 EN (1991)
4. Technical report BCR EUR 15304 EN (1993)
5. ZEISS Patent EP0143471 (1984)
6. HEXAGON Patent US8091248B2 (2006)
7. E. Abbe, Zeitschrift Für Instrumentenkunde, **10**, 446-448 (1890)
8. ZEISS Patent EP0082442 (1981)
9. Warner & Swasey Co. Sheffield Measurement Div., Patent US694378 (1985)
10. B. HAY, J-R. FILTZ, J-C. BATSALE, Techniques de l'Ingénieur, r2955, (2004)
11. G. Zhang et al., Ann CIRP, 34 (1), p445-448, (1985)
12. H. Schwenke and al., CIRP Annals - Manufacturing Technology **57**, p660-675 (2008)
13. ZEISS PATENT EP1500903 (2003)
14. HEXAGON Patent EP2557390 (2011)

15. T.C. Goodhead and al, Automatic Detection of and Compensation for alignments Errors and Machine Tools Slideways, Proc of 18th MTDR Conf, p569-576, (1977)
16. RENISHAW Patent EP2035773 (2007)
17. M. Neugebauer, EURAMET Project 1105 (2011)
18. A Küng *et al*, *Meas. Sci. Technol.* **18**, 319 (2007)
19. HEXAGON Patent EP2449341 (2009)
20. RENISHAW Patent US2005005465A1 (2005)
21. HEXAGON Patent EP2108917B1 (2008)