

## Contrôles automatiques

## Robotique et contrôles non destructifs

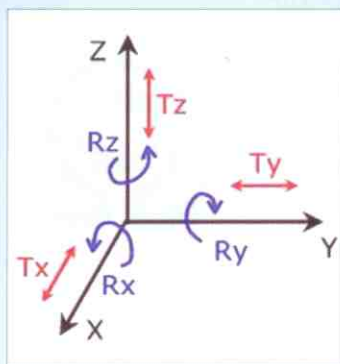
Les exigences croissantes de qualité, dans tous les secteurs industriels, en production ou en maintenance, imposent que les contrôles non destructifs soient accompagnés de cartographies. Les imperfections relevées pourront être suivies tout au long de la vie de l'appareil ou du composant.

L'automatisation des contrôles apporte efficacité et fiabilité tout en générant des gains de productivité importants, gages de la compétitivité de nos industries.

Les machines ou robots cartésiens répondent à ce besoin d'automatisation dans grand nombre d'applications. Les robots polyarticulés ouvrent une porte vers le contrôle automatique de pièces de formes complexes mais à condition de bien prendre en compte les contraintes propres aux END (exactitude des cartographies, programmation des contrôles...).

## Les machines cartésiennes

Un grand nombre de systèmes automatiques de contrôles non destructifs, que ce soit ultrasons ou courants de Foucault, utilise des machines cartésiennes. Elles sont généralement composées de 2 ou 3 axes linéaires (X, Y et Z) auxquels peuvent éventuellement venir s'ajouter des axes rotatifs (plateau tournant, orientation de la sonde).



Ces machines sont largement utilisées pour les contrôles de pièces de formes simples (plans, cylindres, cônes) ou peu évolutives (pièces de révolutions, hélicoïdales...). Ce sont généralement des machines spéciales ou totalement dédiées au contrôle de pièces de formes et/ou de dimensions identiques.



Exemple de mécanique 3 axes.

La qualité des cartographies, quelle que soit la méthode CND utilisée, est tributaire de l'acquisition du signal mais aussi de la position de la ou des sondes au moment où le signal est acquis. La plupart des machines cartésiennes sont équipées de moteurs pas à pas ou de codeurs qui permettent de connaître cette position en quasi temps réel. Ainsi, leurs performances en matière de précision, de résolution et de cadences de contrôle répondent à la demande des industriels. Toutefois, leur souplesse d'utilisation et leur capacité à s'adapter à des pièces de formes complexes sont limitées.

## Les robots polyarticulés

L'intégration de robots polyarticulés s'impose dès lors que l'on veut simplifier les

opérations de contrôle sur des pièces de formes complexes et évolutives.

Si, comme nous l'avons vu précédemment, sur les machines cartésiennes connaître la position de la sonde en temps réel ne pose pas de problème en soit, ce n'est pas le cas avec un robot polyarticulé.

Les robots standards ne délivrent leur position (articulaire ou cartésienne) que périodiquement toutes les 2 à 8 millisecondes (voire plus). Les fréquences d'acquisition avec la position réelle de la sonde ne sont donc possibles qu'à des fréquences de 100 à 500 Hertz.

L'interpolation permet de créer des positions virtuelles entre les positions réellement connues. Les algorithmes d'interpolation sont relativement simples à développer et à mettre en place mais cette solution impose 2 conditions :

- la fréquence d'acquisition des signaux doit être constante ;
- la vitesse de déplacement de la sonde (du robot) doit, elle aussi, être constante.

La fréquence d'acquisition est très bien maîtrisée par la plupart des appareils.

La vitesse de déplacement ne peut être considérée comme constante que dans 2 cas :

- en dehors des phases d'accélération et de décélération du robot (début et fin de lignes d'acquisition). On doit donc étendre la zone de balayage à l'extérieur de la zone à contrôler ;
- dans des zones où les changements de direction ne sont pas trop importants. Or, le propre des pièces à formes complexes est justement de comporter des zones nécessitant des changements notables dans la direction des trajectoires.

## Sysaxe, robotique et CND

Nous avons travaillé en collaboration avec ADEPT, fabricant de robots, sur

la problématique de la transmission des données de position du robot à haute cadence. L'objectif étant d'atteindre des fréquences d'acquisition des données compatibles avec les exigences des CND.

Par ailleurs, nous nous sommes imposés que le système soit utilisable et programmable par un opérateur n'ayant pas ou très peu de connaissance en robotique.

Enfin, nous avons voulu ouvrir le système à tout appareil de contrôle par ultrasons ou courants de Foucault munis d'entrées codeurs TTL (2 minimum).

### Interfaçage avec l'appareil de contrôles non destructifs

La solution retenue s'articule autour de 3 étapes décrites dans les paragraphes suivants.

#### Récupération des données de positions articulaires

Les positions angulaires de chacun des 6 axes du robot sont connues du rack de pilotage du ou des robots. Celles-ci sont nécessaires à la bonne exécution des trajectoires programmées. En collaboration avec le fabricant ADEPT, nous avons développé et implanté dans le rack de pilotage, un module logiciel qui saisit les positions articulaires à une cadence de 8 KHz.

Elles sont ensuite transmises, sous format numérique et à la même fréquence, à une électronique programmable qui les traite par groupe de 3 axes.

#### Transformations en coordonnées cartésiennes

Les données articulaires, à un format numérique, sont, par le modèle inverse du robot utilisé, transformées en coordonnées cartésiennes. Celles-ci sont disponibles dans différents repères (machine, cellule de contrôle, pièce) et suivant différentes formes (X-Y-Z ou X-Y-Z- $\theta_1$ - $\theta_2$ - $\theta_3$ ) ou en abscisses curvilignes (X'-Y') ou une combinaison des 2 (X'-Y'-X-Y-Z- $\theta$ ). Puis elles sont transmises à l'appareil de contrôle sous forme de signaux TTL (codeurs incrémentaux). Une abscisse curviligne correspond non pas à une coordonnée suivant un axe (X, Y ou Z) mais au trajet parcouru dans la direction de balayage (X') ou la direc-

tion d'incrémentement (Y'). Les acquisitions en abscisses curvilignes permettent ainsi :

- d'acquérir des données de position dans l'espace avec un appareil ne disposant que 2 entrées codeurs ;
- de réaliser des cartographies en temps réel en développé et non pas en projection sur le plan de balayage/incrémentation.

#### Transmission des coordonnées au format TTL (codeurs incrémentaux)

L'électronique convertit les données numériques en signaux TTL (codeurs incrémentaux) qui sont exploitables directement par la plupart des appareils de contrôles non destructifs.

#### Avantages de la technologie

L'acquisition en position réelle devient possible avec tous les avantages qui y sont liés :

- précision des cartographies ;
- absence d'effet de peigne ;
- acquisition durant les phases d'accélération et de freinage ;
- acceptation des accélérations en cas de changement de trajectoires en suivi de profil ;
- selon l'appareil utilisé, possibilité de retour au point précis.



Système Sysaxe® Single 850

#### Calibration des robots

Les coordonnées cartésiennes sont déduites des positions articulaires du robot à travers son modèle inverse. Il s'agit donc de positions théoriques liées

à l'exactitude de ce modèle inverse. Les tolérances de fabrication du robot peuvent conduire à des erreurs de position à l'échelle millimétrique. Ce n'est pas acceptable dans le cas de nos applications.

Pour s'affranchir de cette erreur dans le positionnement en absolu, il est nécessaire de procéder à une calibration précise du robot effectuée par laser.

#### Définition des trajectoires

Dans les cas les plus simples, les trajectoires sont définies à partir de surfaces élémentaires telles que rectangles droits ou gauches, cylindres, cônes, etc. qui pourront s'enchaîner pour obtenir la surface à scanner.



Pièce composite à contrôler

Dans le cas de pièces de formes plus complexes, les trajectoires sont définies à partir de fichiers CAO obtenus de différentes façons et à l'aide d'un logiciel de simulation robotique adapté aux applications CND.

#### Simulation

La définition des trajectoires est simplifiée par l'intégration d'un logiciel de simulation robotique développé par Applied Computing Engineering (ACE). Les développements des fonctions particulières au contrôle non destructif ont été réalisés en collaboration entre les 3 sociétés PROFILE, ADEPT et ACE avec la participation de laboratoires CND de grands groupes industriels.

En plus de la définition de la cellule de contrôle et de la position optimale du ou des robots dans celle-ci, la simulation a 3 objectifs :

- définir les trajectoires de balayage ;
- vérifier que le robot ne percute pas la pièce ou la cellule de contrôle ;
- vérifier qu'il ne se trouve pas dans des positions singulières ou inaccessibles.

### Apprentissage des trajectoires

Dans le cas de contrôle de pièces à profil évolutif mais peu complexe et que l'on ne peut pas décomposer en surfaces élémentaires, on a recouru à l'apprentissage par points.

L'opérateur enregistre, à l'aide du joystick, différents points de la surface judicieusement choisis. Le fichier de points obtenus est exporté à un format CAO vers le logiciel de simulation robotique et traité de la même manière que les fichiers CAO de fabrication ou ceux obtenus par scanning 3D (voir paragraphes suivants).

### Fichiers CAO de réalisation

Dans le cas de contrôles en fabrication, on dispose très souvent des données CAO nécessaires à la réalisation de la pièce.

Celles-ci sont directement exploitables par le logiciel de simulation à condition d'avoir sélectionné le format adéquat (Catia, Step, Iges...).

L'opérateur importe le fichier, positionne la pièce dans la cellule de contrôle définie, saisit les paramètres de balayages (finesse de suivi de trajectoires, pas d'incrément, etc.) et les valide après avoir vérifié la faisabilité de l'inspection (accessibilité, zones singulières...). Cette étape limite considérablement les risques de mauvaise manipulation lors des contrôles.

Dès lors que les trajectoires sont possibles et satisfaisantes, le système crée un fichier qui est transmis à la commande robots ainsi prête à effectuer l'inspection.

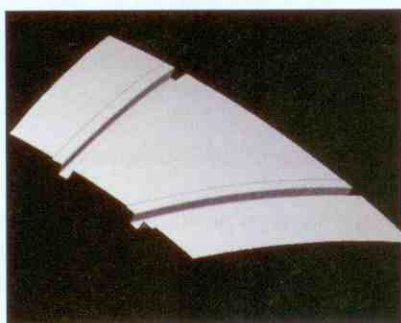


Écran de simulation robotique

### Scanning 3D

Dans le cas de contrôles de pièces au profil complexe et inconnu (maintenance, pièces réalisées hors CAO...), l'opérateur ne dispose d'aucune donnée lui permettant d'effectuer une simulation et déterminer les trajectoires.

La solution proposée est de scanner en 3D le profil à contrôler. Les essais ont été réalisés avec un appareil KONICA-MINOLTA VI-910. La prise de clichés, sur une surface de l'ordre du mètre carré, s'effectue en quelques secondes. Pour les surfaces de plus grandes dimensions, le scanning s'effectue en plusieurs clichés qui sont "raboutés" automatiquement par logiciel. On obtient ainsi un nuage de points que l'on transforme et exporte à un format CAO (rétroconception) vers le logiciel de simulation.



Nuages de points obtenus par scanning laser

L'opérateur se retrouve ainsi dans la même situation que s'il avait disposé des données d'origine mais avec le profil exact de la pièce à inspecter.

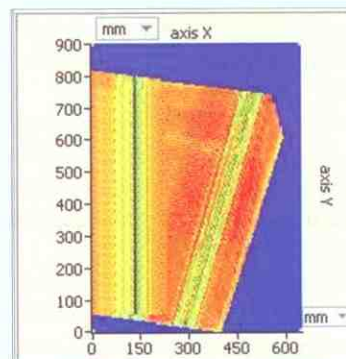
### Recalage des origines

Dans certains cas, il n'est pas possible d'assurer un positionnement ou repositionnement précis des pièces (pièces composites, par exemple). Il faut alors recalibrer les origines et/ou les trajectoires. Le recalage des origines s'effectue par prise de référence de 3 points sur la pièce à contrôler. L'opérateur positionne, avec le joystick, le robot sur les 3 points de référence. Après validation de ces 3 positions, le recalage des origines est effectué automatiquement.

Si les pièces à contrôler ont des différences de formes, le recalage peut s'effectuer par un "prébalayage" grossier par ultrasons qui a pour but de déterminer la surface de la pièce (par mesure de la hauteur de la colonne d'eau) et de déterminer les nouvelles trajectoires.

Toutefois, les recalages (de position ou de forme) doivent rester limités pour

éviter de placer le robot dans des zones de singularités.



C-Scan amplitude obtenu

### Contrôle ultrasons en réflexion ou contrôle Courants de Foucault

La sonde ou les sondes sont embarquées en bout du bras du robot.

Pour les ultrasons, plusieurs méthodes sont applicables :

- au contact : dans ce cas, la sonde est montée dans un support adapté munie d'un système d'amenée (et, éventuellement, de récupération) d'eau de couplage ;
- en immersion locale : le couplage est assuré par une microbuse qui est déplacée à distance et à inclinaison constantes par rapport à la surface de la pièce à contrôler ;



- en immersion totale : la pièce est immergée dans une cuve et la sonde est déplacée à colonne d'eau constante.

Le degré de protection contre l'humidité du robot est différent selon la méthode (protection aux aspersion ou à l'immersion).

Ces systèmes intègrent un seul robot polyarticulé.

Cette configuration est transposable aux contrôles par courants de Foucault.

### Contrôle ultrasons en transmission, synchronisation de 2 robots

Le contrôle en transmission peut s'effectuer de plusieurs manières en mode automatique. La méthode la plus simple est d'utiliser une fourche dotée, à l'extrémité de chacune de ses branches, d'une "buse jet d'eau" (*squitter*). Un seul mouvement, donc un seul robot, est à gérer. Cette méthode, adaptée aux pièces de géométrie simple (plane ou de révolution), ne peut s'envisager sur des géométries complexes.

Dans ce cas, il faut utiliser 2 robots qui doivent se déplacer en vis-à-vis.

Les axes des faisceaux ultrasonores de la sonde émettrice et celui de la sonde réceptrice doivent être opposés et coaxiaux. L'erreur de positionnement tolérable est, selon la taille des robots utili-

sés, de l'ordre du millimètre et le défaut de coaxialité inférieur à quelques degrés. Nous avons utilisé les possibilités de la technologie Sysaxe, entre autres les cadences élevées de remontée de positions du ou des robots, pour assurer une synchronisation qui réponde au besoin décrit ci-dessus.

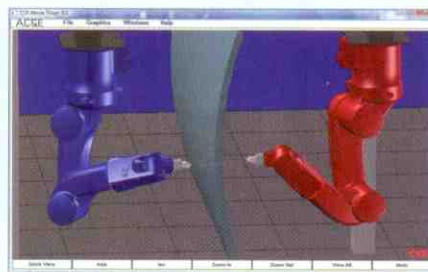
#### Axes externes

Il est possible d'adjoindre un ou plusieurs axes externes pour augmenter les capacités du système qu'il comporte 1 ou 2 robots :

- pour les pièces de révolution (cylindriques, elliptiques, ovoïdes...), on couple un plateau tournant ;
- pour les pièces de grande longueur, on couple un axe linéaire.

La programmation et la commande de ces systèmes s'effectuent de la même manière que pour les robots seuls.

Ces systèmes robotisés innovants et leurs déclinaisons trouvent des applications



*Synchronisation de 2 robots*

dans divers secteurs industriels :

- aéronautique (éléments composites ou métalliques ;
- chaudronnerie dans les domaines nucléaire, chimie et pétrochimie ;
- naval ;
- sidérurgie (forge, fonderie...) ■

**Patrick Louvriot<sup>(1)</sup>**  
**Aziss Tachattahte<sup>(2)</sup>**

(1) PROFILE Contrôles Industriels - Président.

(2) PROFILE Contrôles Industriels - Ingénieur R et D.