

PREMIER COLLOQUE IMAGE
Traitement, Synthèse, Technologie et Applications

BIARRITZ — Mai 1984 —

Discrimination des positions d'équilibre de pièces industrielles.

Determination of stable rest positions for machined parts.

S. JACQMART

Centre de Recherche - Microsystèmes et Robotique - E.N.S.M.M. - 25030 Besançon cédex - France.

RESUME

SUMMARY

Cet article décrit un système de vision industriel déterminant la position d'équilibre stable d'une pièce en appui dans un trièdre. Ce type d'appui ramène généralement à une valeur finie p le nombre des positions possibles de la pièce ; une phase d'apprentissage par l'exemple mettant en oeuvre un traitement d'images sur 16 niveaux de gris permet de déterminer p modèles de référence. A l'exploitation, cette modélisation conduit à une identification très rapide, le modèle de la position étant obtenu par un simple seuillage local de certains points de l'image, sélectionnés lors de la phase d'apprentissage.

Nous présentons ensuite quelques résultats expérimentaux.

This paper describes an industrial vision system able to recognize any stable rest position of a complex workpiece lying in a corner. This positioning technique generally reduces to a finite value p the number of possible positions of the workpiece ; a training-by-showing phase involving a 16 gray-levels image processing allows us to determine the p reference models. This modelization leads, during runtime, to a very fast identification since the model of the position is obtained by use of a simple local thresholding of selected points of the image.

We then present experimental results.



1 - INTRODUCTION

Dans les systèmes flexibles d'assemblage, un robot prend les pièces d'un grand nombre de stations d'alimentation pour les assembler une à une dans un produit. Actuellement, quand ils ne disposent pas que de leurs seuls capteurs proprioceptifs, la plupart des robots industriels ne sont équipés que de capteurs extéroceptifs rudimentaires (binaires), tels que les contacts de fin de course, les détecteurs de proximité photoélectriques... Ils fonctionnent donc en boucle ouverte vis-à-vis de leur environnement et se révèlent incapables de saisir des composants présentés en vrac volumique. La tâche du robot est grandement simplifiée si chaque station d'alimentation peut présenter sa pièce dans une position prédéterminée pour la saisie et l'insertion. Il s'agit donc de développer des systèmes flexibles d'alimentation qui, à partir de pièces stockées en vrac volumique, fournissent au robot d'assemblage les pièces, une à une, dans un nombre restreint de positions, connues du robot et pour lesquelles les stratégies de saisie ont été déterminées lors de la programmation du montage.

La réduction du nombre de positions possibles des pièces (décrites par la donnée de 6 paramètres positionnels) peut être obtenue par un prépositionnement des pièces, c'est-à-dire par une mise en contact de surfaces connues supprimant certains degrés de liberté des pièces. Nous considérons que les pièces sont amenées en appui dans un trièdre constitué par des supports plans orthogonaux deux à deux, avant qu'un dispositif ne détermine la position des objets. Des prototypes ont déjà été développés dans cette voie de recherche, comme par exemple ceux qui consistent à utiliser un poussoir qui sépare les pièces en sortie de bol vibrant et les amène à vitesse constante devant un module de vision constitué par deux rubans de fibres optiques se rejoignant en un seul sous une caméra ligne ⁽¹⁾, ou à isoler et à bloquer chaque pièce par des liaisons bilatérales, après leur sortie du bol vibrant pour analyser leur position ⁽²⁾.

Dans cet article, nous nous limiterons à l'étude d'un dispositif rapide et peu coûteux d'identification de position de pièces. Dans un premier temps, nous exposerons les hypothèses et les contraintes de ce système. Puis nous décrirons brièvement l'architecture du système d'acquisition d'informations, nous proposerons un modèle pour caractériser les positions d'équilibre des pièces et nous formulerons l'algorithme d'identification. Enfin, nous conclurons sur les performances de notre dispositif.

2 - HYPOTHESES

Un système de vision n'observe qu'une seule pièce tridimensionnelle à la fois, en appui dans un trièdre fixe.

Nous supposons que les pièces à alimenter ne prennent qu'un nombre fini relativement petit de positions d'équilibre stables dans le trièdre. Par conséquent, nous excluons les pièces, qui dans un tel dispositif, ont une infinité d'orientations discernables autour d'un axe de rotation ou, plus généralement, qui présentent une suite de positions d'équilibre stables décrites par la variation continue d'un ou plusieurs paramètres positionnels dans des intervalles bornés.

3 - ARCHITECTURE DU SYSTEME D'ACQUISITION

Le capteur de notre système de vision est une caméra matricielle à éléments à transfert de charge (GE TN 2200) qui fournit des images de la scène échantillonnées spatialement en 128x128 points et numérisées par un convertisseur Analogique Numérique sur 8 bits (256 niveaux de gris). Ces images numériques sont alors traitées par un système informatique comportant un microprocesseur 8 bits (Z80), 48 k octets de mémoire vive et 12 k octets de mémoire morte (pour le stockage des programmes). Une console reliée au système microinformatique par une liaison série permet le dialogue avec l'opérateur au moyen d'un menu. Les images peuvent être visualisées sur un moniteur vidéo via une mémoire d'image de 16 k octets.

Discrimination des positions d'équilibre de pièces industrielles.

Determination of stable rest positions for machined parts. S. JACOMART

4 - OBTENTION DES PROTOTYPES

Puisque nous disposons d'un système mécanique qui fournit des pièces rigides dans un nombre fini restreint de positions d'équilibre, nous approchons ce problème simplifié de détection de position par une méthode apparentée au traitement par masques. Ainsi, la phase d'apprentissage détermine des points de l'image dont l'observation, au cours de la phase d'identification, permettra de reconnaître la position prise par la pièce.

4.1. Principe de l'apprentissage :

Lors de la phase d'apprentissage, la seule tâche de l'opérateur consiste à inventorier toutes les positions d'équilibre possibles d'une pièce de référence dans le trièdre et à présenter successivement la pièce dans chacune de ces positions.

Le système de vision acquiert alors une image de chaque position échantillonnée spatialement par la caméra, réduit la taille de cette image à 64x64 points par application d'une fenêtre centrée sur l'image originale, code l'intensité lumineuse reçue par chacun de ces pixels sur 4 bits ce qui correspond à 16 niveaux de gris et mémorise les matrices des images correspondant à chaque position d'équilibre.

Puis lorsque toutes les positions ont été mémorisées sous forme de matrices-images non binaires, l'opérateur lance l'exécution de l'algorithme d'apprentissage qui sélectionne q points P_j discriminant les différentes positions et q seuils locaux S_j associés. $I_k(P_j)$ étant l'intensité lumineuse quantifiée obtenue au point P_j de l'image discrétisée pour la $k^{\text{ième}}$ position d'équilibre stable, nous prenons comme prototype de la $k^{\text{ième}}$ position, le vecteur binaire V_k défini par :

$$V_k = \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_j \\ \vdots \\ v_q \end{bmatrix} \quad \text{où } \forall_j \begin{cases} v_j = 0 \text{ si } I_k(P_j) < S_j \\ v_j = 1 \text{ si } I_k(P_j) \geq S_j \end{cases}$$

4.2. Critère de sélection des points discriminants :

Nous définissons comme point discriminant un point permettant de distinguer une ou plusieurs positions de la pièce des autres positions possibles, tout en s'affranchissant au maximum des différences entre pièces (tolérances dimensionnelles, états de surface) et des parasites (lumineux, électriques...).

Il s'agit donc de mettre en place un critère de sélection des points discriminants qui ait les propriétés suivantes :

- il doit être très peu sensible aux variations des images de chaque position, c'est-à-dire que les points discriminants et les seuils associés déterminés lors d'un premier apprentissage et appliqués à des apprentissages successifs, doivent fournir des vecteurs de référence V_k identiques à ceux obtenus lors du premier apprentissage.
- il doit être rapide à exécuter, afin que la phase d'apprentissage ne dure que quelques minutes.
- il doit minimiser le nombre de points discriminants pour que la phase d'analyse de scène soit la plus rapide possible.

Le critère de sélection des points discriminants consiste à rechercher dans l'image des points qui permettent de dissocier une ou plusieurs positions des autres, et par conséquent, à classifier les points de l'image.

Les données qui permettent de classifier les points de l'image sont constituées par les images des p positions d'équilibre possibles, c'est-à-dire par p matrices d'intensités lumineuses. Nous décomposons notre problème global sur l'image en n sous-problèmes locaux sur les différents points de l'image.

A chaque point j de l'image est donc associé, en fonction des différentes positions d'équilibre, un ensemble de valeurs d'intensités lumineuses quantifiées :

$$L_j = \{ I_{jk}, 1 \leq k \leq p \}$$



Discrimination des positions d'équilibre de pièces industrielles.

Determination of stable rest positions for machined parts. 5. JACOMART

Nous analysons la structure de cet ensemble par des techniques de classification hiérarchique. Nous partons d'une partition initiale \mathcal{F}_{0j} où les classes sont réduites à un seul élément

$$I_{jk} \quad \mathcal{F}_{0j} = \bigoplus_{k=1}^p \{ I_{jk} \}$$

Puis, nous construisons des partitions emboîtées par réunions successives de deux classes à l'aide d'un critère d'agrégation. Faisant cela, nous obtenons une hiérarchie ascendante, indicée par la valeur de la distance interclasse lors de l'agrégation de deux classes.

Il s'agit donc de définir une distance entre les positions d'équilibre au point j et un critère d'agrégation de classes.

Nous mesurerons la proximité entre les positions d'équilibre par la métrique définie par :

$$I_{jk} \in L_j, I_{j\ell} \in L_j \quad d(I_{jk}, I_{j\ell}) = |I_{jk} - I_{j\ell}|$$

Cette distance s'interprète physiquement comme le contraste lumineux au point j entre les positions d'équilibre k et ℓ .

D'autre part, nous prendrons comme critère d'agrégation, le critère du minimum car physiquement, il permet de mesurer les plages de niveaux de gris non utilisées par les différentes positions d'équilibre au point j . De telles plages sont nécessaires si nous voulons placer un seuil S_j dans une telle zone de niveaux de gris non occupée de façon à séparer les positions d'équilibre en deux groupes. En outre, la mesure de la taille de la zone est indispensable pour déterminer la qualité de la séparation des positions d'équilibre en deux groupes. Une zone de grande taille permet de s'affranchir des variations des images, suite à des variations d'éclairage ou plus simplement à la quantification des pixels de l'image discrétisée.

Aussi, en considérant deux classes C_1 et C_2 d'une même partition, la distance interclasse pour le critère du minimum est définie par :

$$\delta(C_1, C_2) = \min \left\{ d(I_{jk}, I_{j\ell}), I_{jk} \in C_1, I_{j\ell} \in C_2 \right\}$$

Or, en fait l'arbre de classification doit nous servir à déterminer si le point j peut être discriminant, c'est-à-dire s'il peut

séparer les positions d'équilibre en au moins deux classes bien "distinctes".

Ainsi, nous caractériserons le point j par :

- le nombre de plages de niveaux de gris non utilisées entre le plus petit et le plus grand élément de L_j .
- la taille de ces plages, exprimée en nombre de niveaux de gris vides et déterminée par $t = \delta(C_k, C_\ell) - 1$ où C_k et C_ℓ sont deux classes disjointes.

Remarque : Une taille nulle signifie que les deux classes C_k et C_ℓ sont adjacentes.

Nous appellerons point discriminant d'ordre m , un point P présentant m plages de niveaux de gris non occupées entre le plus petit et le plus grand élément de L_P , et dont la taille est supérieure ou égale à t_{\min} déterminée expérimentalement pour s'affranchir des variations des images ($t_{\min}=4$).

Ces paramètres caractéristiques du point j peuvent être déterminés en un seul balayage de l'ensemble L_j .

En effet, si nous ordonnons les éléments de l'ensemble L_j avec la relation d'ordre "inférieur à", le critère d'agrégation peut se mettre sous la forme :

$$\delta(C_k, C_\ell) = \inf \left\{ I_{j\ell} \in C_\ell \right\} - \sup \left\{ I_{jk} \in C_k \right\}$$

où

$$\forall I_{jk} \in C_k, \forall I_{j\ell} \in C_\ell \quad I_{jk} \leq I_{j\ell}$$

Le critère d'agrégation est donc ramené à la distance entre deux positions d'équilibre particulières, le plus grand élément de la classe C_k et le plus petit de la classe C_ℓ .

Et si de plus, à une étape i de l'algorithme nous n'agrégeons plus seulement les deux classes qui minimisent le critère d'agrégation, mais toutes celles pour lesquelles le critère est inférieur à un seuil s_i , alors en un balayage de L_j nous déterminons la partition en classes où le critère d'agrégation sera supérieur ou égal à $s_t = t_{\min} + 1$. m sera égal au nombre de classes de la partition moins 1. La taille des plages sera fournie par la distance inter-classe moins 1.



Discrimination des positions d'équilibre de pièces industrielles.

Determination of stablest positions for machined parts. S. JACQMART

L'algorithme de détermination des caractéristiques du point j s'écrit alors :

étape 1 : on ordonne les éléments de L_j par ordre croissant, ce qui donne après rénumérotation $I_1 \leq I_2 \leq \dots \leq I_k \leq \dots \leq I_p$.

étape 2 : on considère les classes $D_1 = \{I_1\}$ et $C_k = \{I_k\}$ pour $2 \leq k \leq p$.

étape 3 : pour k variant de 2 à p :

on calcule $\delta(D_{k-1}, C_k) = I_k - I_{k-1}$ si $\delta(D_{k+1}, C_k)$ est inférieur strictement à s_t alors on agrège D_{k-1} avec C_k en D_k sinon D_{k-1} représente une classe de la partition cherchée, et on pose $D_k = C_k$ pour pouvoir continuer les itérations sur cette nouvelle classe.

étape 4 : on détermine le nombre m de zones de gris vides et la taille de ces zones.

Cet algorithme permet de classer les points de l'image en fonction de leur ordre m de discrimination.

4.3. Algorithme d'apprentissage :

Le nombre de points discriminants varie selon les pièces, selon leurs positions et selon le pas de discrétisation de la scène.

Aussi, pour minimiser le temps nécessaire à l'identification de la position, l'algorithme d'apprentissage doit-il réduire le nombre de points qui formeront les modèles de référence des positions. Le vecteur V_k peut s'interpréter comme un mot binaire codant la $k^{\text{ième}}$ position. Aussi, la recherche de l'ensemble minimal de points discriminants permettant de dissocier les différentes positions consiste-t-elle à minimiser la longueur du codage des positions. Le nombre minimal théorique q_t de points nécessaires au codage binaire de p positions est tel que :

$$2^{q_t-1} < p \leq 2^{q_t}$$

Ce principe de codage minimal est utilisé dans le périphérique d'alimentation de Hitachi⁽²⁾. Le manque de redondance n'en fait sans doute pas un système très sûr, d'autant moins sûr que ce principe est appliqué à des images binarisées par un seuil unique, sans souci de ce que nous appellerons la qualité des points.

Nous définissons la qualité d'un point discriminant par la taille de la zone de niveaux de gris non occupée dans laquelle se situe le seuil local. Plus la taille de cette zone est grande, plus les valeurs des intensités peuvent varier sans dépasser le seuil local, c'est-à-dire sans modifier les vecteurs V_k et par conséquent, meilleure est la discrimination des positions en deux groupes.

Nous utilisons ce critère de qualité pour sélectionner les points qui formeront les prototypes. De plus, nous introduisons une redondance pour assurer la fiabilité de l'identification. Cette redondance est mesurée par la distance de Hamming, qui détermine le nombre de différences entre les vecteurs V_k pris deux à deux.

L'algorithme d'apprentissage s'énonce ainsi :

Dans une première étape, nous associons à chaque point de l'image son ordre m .

Dans une seconde étape, nous considérons l'ensemble \mathcal{D}_1 des points discriminants qui réalisent une partition à deux classes de l'ensemble des positions d'équilibre, c'est-à-dire l'ensemble des points discriminants d'ordre 1. Parmi ces points, nous ne retenons que l'ensemble \mathcal{D}_{1m} des points discriminants de \mathcal{D}_1 de meilleure qualité. Nous déterminons alors les vecteurs V_k et recherchons la distance minimale de Hamming qui existe entre deux prototypes, représentés chacun par un point dans l'espace des points discriminants.

Aussi, tant que cette distance minimale sera inférieure à un seuil DM fixé empiriquement et correspondant à la fiabilité minimale désirée, nous effectuerons la troisième étape. Celle-ci consiste d'abord à déterminer les positions k_1 et k_2 dont les prototypes sont situés à la distance minimale. Puis nous considérons l'ensemble $\overline{\mathcal{D}}_{1m}$ complémentaire de \mathcal{D}_{1m} dans l'ensemble total des points discriminants. Nous recherchons alors le sous-ensemble \mathcal{A} de $\overline{\mathcal{D}}_{1m}$, formé par les points où les positions k_1 et k_2 ne sont pas dans la même classe, c'est-à-dire les points P qui présentent une ou plusieurs zones de niveaux de gris non occupées entre $I_{k_1}(P)$ et $I_{k_2}(P)$.

Et, pour minimiser le nombre de points que nous allons ajouter à l'ensemble de base \mathcal{D}_{1m} , nous ne retenons que le sous-ensemble \mathcal{A}_m de \mathcal{A} , formé par les points les plus fiables de \mathcal{A} c'est-à-dire dont la qualité est maximale sur \mathcal{A} .



Discrimination des positions d'équilibre de pièces industrielles.

Determination of stable rest positions for machined parts. S. JACQMART

Ainsi, nous obtenons un nouvel ensemble $\mathcal{D}_{2m} = \mathcal{D}_{1m} \cup \mathcal{A}_m$, où les positions k_1 et k_2 sont plus différenciées que dans \mathcal{D}_{1m} . Enfin, nous redéterminons les vecteurs de référence et les distances entre ces vecteurs pour comparer la nouvelle distance minimale au seuil DM et éventuellement itérer cette étape jusqu'à ce que les prototypes des positions soient suffisamment éloignés les uns des autres.

Remarque : Si au cours d'une itération l'ensemble \mathcal{A} reste vide alors les positions k_1 et k_2 ne pourront pas être différenciées jusqu'au seuil DM que nous nous sommes fixés. Il faudra alors diminuer la valeur de ce seuil si nous voulons dissocier toutes les positions.

La quatrième étape consiste à synthétiser les résultats pour la phase d'identification en déterminant les adresses des points discriminants du dernier ensemble \mathcal{D}_{im} obtenu, en prenant les seuils locaux qui sont associés à ces points et enfin en indiquant les vecteurs de référence de chaque position.

5 - PHASE DE RECONNAISSANCE DE POSITIONS

Lorsque la pièce est dans une position d'équilibre stable dans le trièdre, une image de la pièce est prise, digitalisée en temps réel sur 256 niveaux de gris par un convertisseur analogique numérique et enfin mémorisée.

La première étape de l'identification consiste à acquérir le modèle de la position à identifier, c'est-à-dire :

- à extraire de l'image numérisée sur 256 niveaux de gris, les intensités quantifiées observées aux points discriminants sélectionnés,
- à binariser leurs valeurs à l'aide des seuils locaux associés à ces points,
- à comprimer les résultats à raison de huit réponses binaires par octets, de façon à constituer le vecteur V_x de la position à identifier.

Elle peut être facilement câblée.

La seconde étape consiste à comparer le modèle V_x aux prototypes V_ℓ des différentes positions, en calculant la distance de Hamming, c'est-à-dire le nombre de composantes différentes entre les vecteurs V_x et V_ℓ . La durée de cette étape est

minimisée en traitant simultanément huit composantes des vecteurs V_ℓ (puisque les résultats ont été comprimés à l'étape précédente).

La troisième étape consiste à appliquer le critère de décision. Ainsi, comme dans la méthode du plus proche voisin, la position inconnue sera identifiée à la $k^{\text{ième}}$ position si la distance de Hamming entre les vecteurs V_x et V_k est minimale. Cependant, nous imposons deux conditions supplémentaires :

$$(1) \forall \ell \in \{1, \dots, p\} \quad d_H(V_x, V_\ell) > d_H(V_x, V_k) + M$$

$$(2) \quad d_H(V_k, V_x) \leq SD$$

où M représente une marge de sécurité,

SD représente un seuil de rejet.

La condition (1) traduit que le minimum de la distance de Hamming est unique et est bien isolé des autres distances entre les vecteurs V_x et V_ℓ ($\ell \neq k$). Ceci nous assure que la position inconnue ne peut être que la position k.

La condition (2) traduit la dispersion maximale des modèles autour du prototype, vis-à-vis des tolérances dimensionnelles sur les pièces ou des divers "bruits" de mesure.

Pour que la condition (1) ne soit pas toujours vérifiée, il faut que le seuil SD soit choisi de telle façon que :

$$\frac{\min_{k, \ell} d_H(V_k, V_\ell) - M}{2} < SD < \frac{\min_{k, \ell} d_H(V_k, V_\ell)}{2}$$

Un tel choix permet de reconnaître la position prise par la pièce tout en admettant des variations dimensionnelles des cotes non fonctionnelles.

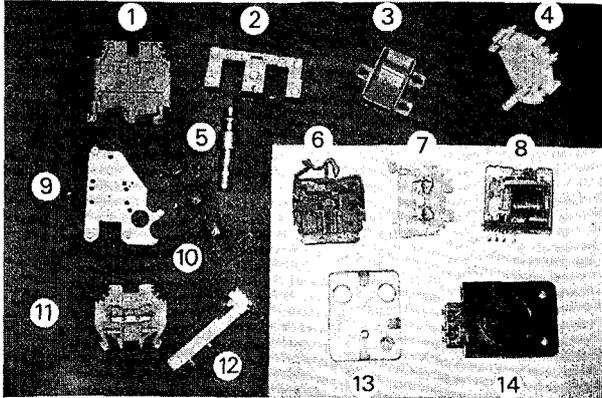
6 - EXPERIMENTATION

Un exemple des pièces qui peuvent être traitées par notre système de vision est donné par la figure 1. Il s'agit de pièces métalliques ou en matière plastique, translucides ou opaques, de n'importe quelle couleur.

Nous supposons que la pièce 5 ne prend que 2 positions dans le trièdre, que les pièces 1, 2, 3, 6, 8, 9, 11, 13, 14 n'en prennent que 4 et que les pièces 4, 7, 10, 12 n'en prennent que 8.

Discrimination des positions d'équilibre de pièces industrielles.

Determination of stable rest positions for machined parts. S. JACOMART



échelle : 5 cm

FIGURE 1 : Spectre des pièces.

Aussi, pour un pas de discrétisation de la scène de 1,2 mm, nous observons en moyenne 350 points discriminants sur cet échantillon de pièces (soit 8,6 % de l'image), avec des valeurs extrêmes de 100 et 700 points. Un exemple de répartition des points discriminants est donné sur la figure 2, pour la pièce 13 ; les 4 positions de la pièce ont été choisies de telle façon que les contours externes soient superposables.

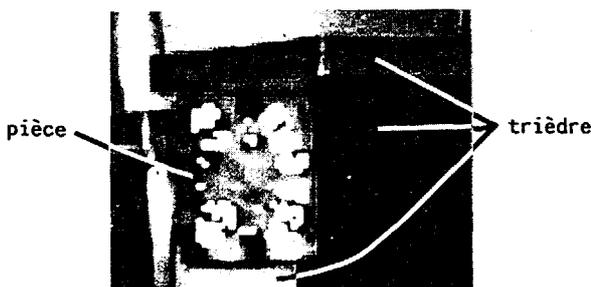


FIGURE 2 : Visualisation en surbrillance des points discriminants de la pièce 13.

Une étude statistique sur plusieurs pièces a mis en évidence une insensibilité des prototypes des positions aux variations des images dues au bruit de quantification, à certaines dispersions dimensionnelles de pièces et à une fluctuation de l'éclairage ambiant ± 1 niveaux de gris par pixel. Pour de plus grandes variations de lumière, il conviendrait de réaliser une adaptation

automatique des prototypes par une simple translation des seuils locaux.

7 - CONCLUSIONS - PERFORMANCES

Ce système de vision peut être employé par un personnel non informaticien (dialogue par un menu) et n'utilise pas l'interprétation humaine (auto-apprentissage). Par sa nature, la méthode d'apprentissage prend en compte les défauts du capteur puisqu'ils apparaissent sur toutes les images.

La phase d'apprentissage n'excède pas 15 minutes, ce qui est compatible avec les temps de reprogrammation des autres éléments du système d'assemblage flexible.

La phase d'identification est très rapide, puisqu'elle ne met que 138 ms pour reconnaître une position parmi huit avec 512 points, ce temps pouvant être amené à 76 ms en câblant le prétraitement de l'image. La figure 3 donne l'évolution des temps de prétraitement T_1 et de traitement T_2 en fonction du nombre p de positions et du nombre q de points discriminants, pour un microprocesseur Z80 dont le temps de cycle machine est de 400 ns.

Cependant, dans sa configuration actuelle de mémoire, ce système se limite à des pièces présentant au maximum douze positions d'équilibre dans le trièdre. Cet inconvénient est facilement levé en implantant notre méthode sur un microprocesseur 16 bits, dont l'adressage mémoire est plus étendu.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) W.B. HEGINBOTHAM, D.F. BARNES, D.R. PURDUE, D.J. LAW - "Flexible assembly module with vision controlled placement device" - Proceedings of the 11th International Symposium on Industrial Robots, Tokyo, October 1981, pp.479-488.
- (2) T. SUZUKI, M. KOHNO - "The flexible parts feeder which helps a robot assemble automatically", Vol. 1, N°2, February 1981, pp. 86-92.
- (3) S. JACOMART - "Système Flexible d'Alimentation pour Robot d'Assemblage" - Thèse de Docteur-Ingénieur - Besançon (Avril 1984).

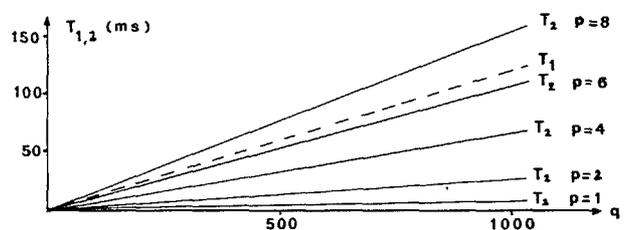


FIGURE 3 : Durée $T = T_1 + T_2$ de l'identification.