

A Microprocessor-Based Controller For the MA 23 Robot Arm

Mayez Al-Mouhamed

**Department of Electronics and Nuclear Instrumentation
Nuclear Research Center (CEA-CEN Saclay)
91940 Saclay, Essonne, France**

Abstract:

This paper presents a microprocessor based-controller for the MA 23 robot arm, a nuclear manipulator developed at the French Nuclear Research Center (CEA-CEN Saclay). The controller is based on a Cartesian Motion Coordination system using the geometric model of the six dof arm. The inverse geometric model is used to implement the Cartesian Motion Coordination system. A flexible set of motion functions is also developed to support programming the arm motion. This is useful to implement automation mechanism (sense-and-act) based on sensing and correcting the motion of the arm. The motion functions allow the corrections to be made using well defined motion functions within the Cartesian Motion Coordination system. This results in a highly coordinated mechanism such as Cartesian-based compliance control. The hardware components of a microprocessor based-controller are described. A force sensor composed of two sensing fingers used as the arm gripper is also presented. Evaluation shows the timing of various modules and some features of the force sensor.

Key words: manipulator, robot, motion coordination, microprocessor control Cartesian motion.

commande rapide implantée sur microprocesseur pour manipulateur MA 23

Mayez al Mouhamed*

Cette étude est relative à l'analyse et la synthèse d'un système de commande général pour les robots manipulateurs dans le cadre de la programmation automatique des tâches. Ce problème, traité par ailleurs, a été souvent limité à celui de la génération des trajectoires sur minicalculateurs. A ce point de vue, notre démarche, théorique et fonctionnelle, a conduit à généraliser et appliquer le principe de la coordination en visant à atteindre trois objectifs : faire coïncider référentiel effecteur et centre de prise, étendre la commande vers la régulation de l'effort et réaliser une application sur configuration micro.

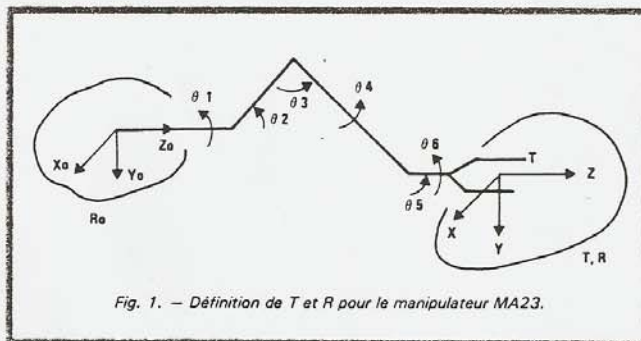


Fig. 1. — Définition de T et R pour le manipulateur MA23.

Faire coïncider centre de prise et référentiel effecteur

Contrairement à certaines démarches qui ont conduit à placer le référentiel de l'effecteur loin du centre de prise, nous avons laissé flottant l'emplacement et l'orientation du centre d'action. A défaut d'une spécification de l'utilisateur, l'emplacement de ce dernier est confondu avec le centre de prise. Le problème de la coordination est donc posé en entier.

Etendre les commandes vers la régulation de l'effort

Les fonctions de base, du système de commande synthétisé, s'étendent de par leur nature et leur structure au-delà des fonctions de mouvements classiques vers des mécanismes de régulation de l'effort indispensables pour les tâches du type « assemblage ». Pour cela nous proposons deux approches dont une nous a con-

duits à réaliser un capteur d'effort spécialisé.

Appliquer la commande sur du matériel micro

Le système de commande synthétisé (pour le manipulateur MA 23 développé au CEA/STEP) est particulièrement étudié pour des implantations à base de microprocesseurs. L'unité de coordination (un microprocesseur Intel 8086 avec son coprocesseur flottant 8087) en position et en effort réalise des performances de précision, de coût, et de rapidité qui ne peuvent être obtenues avec les calculateurs classiques utilisés jusqu'à présent. En effet, le cycle de coordination, pour un manipulateur à 6 degrés de liberté, est de 8 ms contre une durée de 25-40 ms courante sur un mini-calculateur.

Coordination des mouvements

Un manipulateur est un système mécanique composé de plusieurs articulations interconnectées. La commande du manipulateur consiste à assigner un comportement précis à son organe terminal. Pour cela, les paramètres de la commande doivent être liés au positionnement et à l'orientation de ce dernier. Un référentiel fixe R_0 est placé à l'origine du manipulateur.

L'organe terminal est lié à un référentiel déterminé par les coordonnées T de son origine, par rapport à R_0 , et par les composantes de ses vecteurs orthonormés R (figure 1).

* Centre d'études nucléaires de Saclay, DEIN/SIR 91191 Gif-sur-Yvette Cedex.

Les relations cinématiques d'un manipulateur lient les grandeurs T et R à la configuration angulaire θ_1, θ_6 du manipulateur. Les coordonnées du nœud N^{i+1} du manipulateur dépendent de celles du nœud N^i et de la matrice de rotation générale en ce point. Cette relation a la forme suivante :

$$OO_{i+1} = OO_i + R(i).L$$

Nous avons établi un programme général (en APL) pour engendrer ces relations sous forme littérale. Les relations obtenues sont de la forme :

$$O_i = f_i(\theta_1, \theta_n) \quad i : X, Y, Z$$

Ordonnées d'une origine

$$V_i = g_{vi}(\theta_1, \theta_n) \quad V : X, Y, Z$$

Composantes d'un vecteur

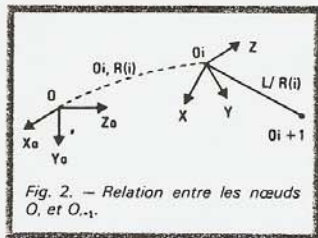


Fig. 2. — Relation entre les nœuds O_i et O_{i+1} .

Pour le référentiel R de l'organe terminal, nous avons :

$$T = (O_x, O_y, O_z) \text{ et } R = \{X, Y, Z\}$$

Le but de la commande est d'amener le manipulateur à une position particulière dans son espace de travail, de saisir un objet, de le transporter et d'agir sur lui d'une certaine manière. La position à laquelle le manipulateur doit se rendre, permet de connaître T et R. Il est donc nécessaire de disposer d'un module permettant d'associer à ces grandeurs la configuration du manipulateur θ_1, θ_n que doivent prendre les articulations dans cette situation. Pour cela, nous avons développé un module de changement de coordonnées adéquat.

Les fonctions de coordination

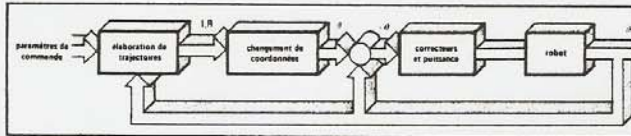
Les éléments de la commande doivent être simples et liés autant que possible à l'objet pris par le robot. Le but de la manipulation est, en fin de compte, d'agir sur l'objet et non sur le manipulateur qui n'est qu'un intermédiaire. Ainsi, les fonctions de mouvements doivent avoir pour conséquences de translater et d'orienter l'objet tenu par l'organe terminal.

Une classification de ces moyens met en évidence deux types de mouvements :

- des mouvements d'initialisation du positionnement absolu avec translation et orientation (transport de l'objet sur le lieu de travail),

Le changement de coordonnées

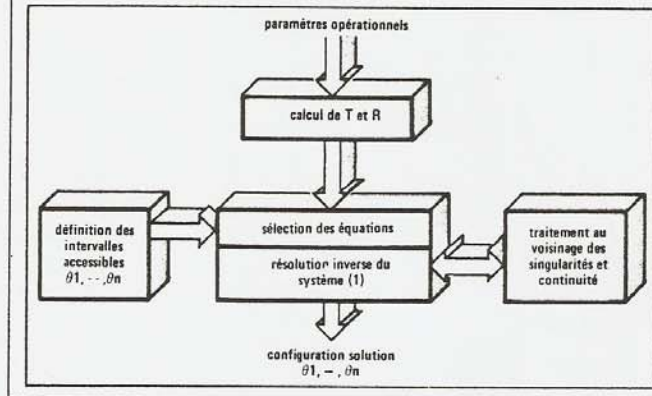
Le schéma de principe d'une coordination faisant intervenir le changement de coordonnées est le suivant :



Dans ce schéma, le changement de coordonnées est appelé à agir en temps réel; par conséquent, une optimisation des opérations de calcul est nécessaire. Le calcul des lignes trigonométriques est plus rapide si l'on utilise des tables ayant des dimensions raisonnables. Les domaines angulaires accessibles par le manipulateur (limités par les butées mécaniques) permettent de faire un choix au sujet des lignes trigonométriques. Ainsi, la généralité de ce module se traduit par la possibilité de choisir, de façon automatique, les formules à utiliser dans le cas d'une définition quelconque des domaines accessibles. C'est un point important car cela permet de multiplier les tâches qu'un robot peut faire.

Des singularités peuvent exister (plusieurs dans le cas du MA 23); elles se traduisent par l'impossibilité de trouver des solutions uniques θ_1, θ_n . Des équations particulières sont alors appliquées. Elles doivent permettre une traversée continue (par extrapolation sur l'état initial) de ces points sans que cela provoque des incréments importants sur un degré de liberté particulier.

Pour résumer, le schéma de ce module est le suivant :



- des mouvements incrémentaux relatifs (par rapport à l'orientation actuelle de l'organe terminal) pour la programmation des tâches constituées par des mécanismes rebouclés.

L'évaluation des besoins nous a conduits à la définition et l'expérimentation de trois groupes de mouvements généraux et l'élaboration des fonctions correspondantes.

Groupe d'initialisation du positionnement

- Translater l'objet en maintenant son orientation fixe.
- Orienter l'objet en maintenant le centre de prise fixe.
- Translater et orienter l'objet.

Groupe des mouvements incrémentaux relatifs

- Faire un mouvement incrémental dans le sens d'axe particulier.
- Faire des rotations élémentaires autour d'axe particulier.

Groupe des rotations autour d'axes extérieurs

- Tourner l'effecteur autour d'un

cylindre extérieur connaissant l'orientation de son axe de symétrie.

- Faire pivoter un objet tenu par le manipulateur en laissant fixe un point particulier de cet objet.

Des lois de filtrage sont retenues pour assigner les évolutions temporelles des positions, vitesses et accélérations du manipulateur. La caractéristique importante de ces lois est d'avoir une évolution continue des accélérations consignées (adaptation à une prochaine commande dynamique).

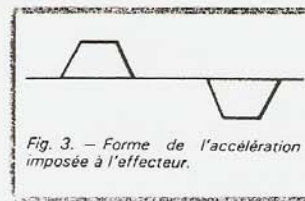
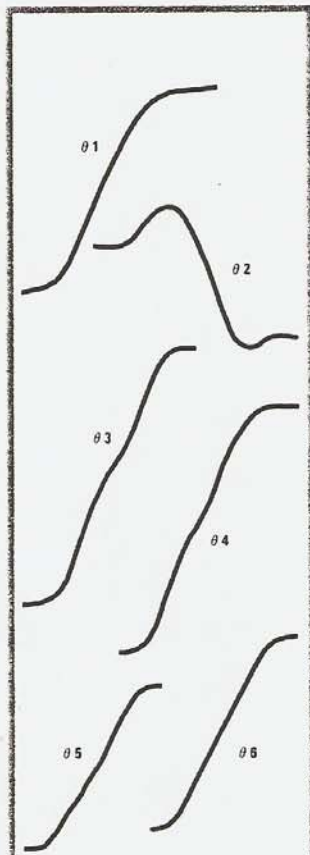


Fig. 3. — Forme de l'accélération imposée à l'effecteur.

Des courbes sont présentées pour illustrer l'évolution temporelle des angles réels du manipulateur MA 23, dans le cas d'un mouvement du premier groupe.

Analyse de la coordination de l'effort

L'information d'effort est largement utilisée en téléopération. L'opérateur humain (qui est alors dans la boucle de régulation) s'adapte de façon très performante à la sensation de l'effort qui s'exerce au niveau de l'organe esclave. L'utilisation de cette information, dans le cadre des tâches programmées, résulte en partie du succès obtenu en téléopération, et d'une nécessité manifeste d'une régulation



Evolution réelle des angles $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ lors d'un déplacement de 1 m de l'organe terminal à la vitesse de 2 m/s.

Caractéristiques :

- Système de commande implanté sur le microprocesseur Intel 8086.
- Arithmétique avec un coprocesseur flottant Intel 8087.
- Changement de coordonnées complet en 8 ms.

Table des fonctions de coordination en position

Nom de la fonction	Arguments	Description de l'action
DE PLG	X, Y, Z, $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$	Mouvement vers l'état général Ed de l'effecteur
DE PL	X, Y, Z	Translation du réf. de l'effecteur/orientation fixe
DROTG	$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$	Rotation du réf. de l'effecteur/origine fixe
DMPX	ΔX	Mouvement de ΔX selon l'axe OX
DMPY	ΔY	Mouvement de ΔY selon l'axe OY
DMPZ	ΔZ	Mouvement de ΔZ selon l'axe OZ
DROTX	$\Delta \varphi_1$	Rotation de $\Delta \varphi_1$ autour de l'axe OX
DROTY	$\Delta \varphi_2$	Rotation de $\Delta \varphi_2$ autour de l'axe OY
DROTZ	$\Delta \varphi_3$	Rotation de $\Delta \varphi_3$ autour de l'axe OZ
MEPX	δx	Mouvement élémentaire de δx selon l'axe OX
MEPY	δy	Mouvement élémentaire de δy selon l'axe OY
MEPZ	δz	Mouvement élémentaire de δz selon l'axe OZ
REPX	$\delta \varphi_1$	Rotation élémentaire de $\delta \varphi_1$ autour de OX
REPY	$\delta \varphi_2$	Rotation élémentaire de $\delta \varphi_2$ autour de OY
REPZ	$\delta \varphi_3$	Rotation élémentaire de $\delta \varphi_3$ autour de OZ
TRANSLAT	T_x, T_y, T_z	Déclaration de translation du réf. de l'effecteur (avec (1))
REPXTZ	$\delta \varphi_1, T_x$	Rotation élémentaire de $\delta \varphi_1/OX$, réf. translaté de T_x/OZ
REPYTZ	$\delta \varphi_2, T_y$	Rotation élémentaire de $\delta \varphi_2/OY$, réf. translaté de T_y/OZ
REPXTY	$\delta \varphi_1, T_y$	Rotation élémentaire de $\delta \varphi_1/OX$, réf. translaté de T_y/OY
REPZTY	$\delta \varphi_3, T_z$	Rotation élémentaire de $\delta \varphi_3/OZ$, réf. translaté de T_z/OY
ROTATION	$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$	Déclaration de rotation du réf. de l'effecteur (avec (2))
MEPXRZ	φ_1, φ_2	Translation élémentaire de $\delta X/OX$, réf. tourné φ_1/OZ
MEPYRZ	φ_1, φ_2	Translation élémentaire de $\delta Y/OY$, réf. tourné φ_1/OZ
MEPXRY	φ_1, φ_2	Translation élémentaire de $\delta X/OX$, réf. tourné φ_1/OY
MEPZRY	φ_1, φ_2	Translation élémentaire de $\delta Z/OZ$, réf. tourné φ_1/OY
MEPXYZ(1)	$\delta x, \delta y, \delta z$	Mouvement élémentaire de $\delta X, \delta Y, \delta Z$ selon OX, OY, OZ
REPXYZ (2)	$\delta \varphi_1, \delta \varphi_2, \delta \varphi_3$	Rotation élémentaire $\delta \varphi_1, \delta \varphi_2, \delta \varphi_3$ autour de OX, OY, OZ

en effort dans l'assemblage automatique des pièces mécaniques. Ainsi, nous rechercherons des fonctions pour estimer ces efforts et les découpler. Ces informations sont ensuite utilisées dans la construction de primitives de régulation des forces, dans le cadre d'un langage au niveau de l'effecteur.

Dans le référentiel de l'organe terminal, ces efforts sont caractérisés par six grandeurs indépendantes : trois composantes de forces et trois composantes de couples. Lorsque les organes moteurs du robot exercent les couples $\Gamma_{\theta_1}, \dots, \Gamma_{\theta_6}$, au niveau des articulations respectives, il apparaît, au niveau du référentiel de l'effecteur, une force F et des couples C_x, C_y et C_z .

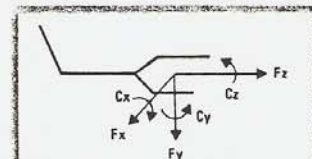


Fig. 4. — Forces et couples au niveau du référentiel relatif de la pince.

Ces grandeurs sont liées à ceux des couples moteurs par le principe de l'égalité des travaux :

$$F \cdot \Delta X = \Gamma \cdot \Delta \theta$$

avec

$$F = (F_x, F_y, F_z, C_x, C_y, C_z)$$

$$X = (\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \varphi_x, \Delta \varphi_y, \Delta \varphi_z)$$

$$\Gamma = (\Gamma_1, \Gamma_6)$$

$$\Delta \theta = (\Delta \theta_1, \Delta \theta_6)$$

La méthode généralement utilisée consiste à lier les incréments X et en faisant intervenir le Jacobien des équations (1); nous avons :

$$\Delta X = J \cdot \Delta \theta$$

où J est le Jacobien de la fonction $X = f(\theta)$ obtenu du système (1). Nous avons ainsi l'expression de F en fonction des couples par la relation matricielle :

$$F = J^{-1} \Gamma$$

Le calcul en ligne de J est long; de plus, se pose le problème de l'existence de son inverse J^{-1} . Nous rechercherons d'autres méthodes moins rigides que cette dernière. Deux voies sont possibles :

- utiliser une méthode faisant intervenir des approximations en tenant compte autant que possible du problème réel (élasticité variable selon les articulations, frottements secs et jeux),
- réaliser un capteur d'effort spécialisé qui prendra place au lieu des deux doigts de l'organe terminal. Il doit être, d'une part, aussi simple que possible et d'autre part adaptable à tout organe de préhension.

Dans le cadre de la première voie, nous considérons que le robot est composé de deux sous-systèmes articulés S1 et S2. S1 comprend les trois premiers degrés de liberté et S2 les

trois derniers. Dans de nombreux cas, on peut admettre, pour le calcul des déformations, que le système S2 est rigide. La procédure est ainsi réduite aux trois degrés de liberté de S1. L'observation montre, qu'au contraire, les degrés de liberté les plus proches de la pince (donc S2) sont ceux qui encaissent le plus les déformations. Deux raisons sont à l'origine de ce phénomène :

- la présence de frottements secs importants sur le système S1 en raison des charges qu'il supporte,
- l'élasticité généralisée (électrique et mécanique) est moins importante sur S1 que sur S2.

En d'autres termes, S2 se déforme plus que S1. Par exemple, une déformation Δx selon OX agissant sur l'extrémité O6 de la dernière articulation (voir figure) induit sur O5 (donc sur S1) le vecteur de déformation $(\Delta O5_x, 0, \Delta O5_z)$ et, d'autre part, S2 subit une déformation $\Delta \varphi y$ autour de l'axe OY en O5. Vu, dans le plan (OX,OY), les deux sous-systèmes S1 et S2 sont liés par une transmission élastique de coefficient μ . La décomposition du problème sur deux sous-systèmes, aboutit au calcul du Jacobien pour S1 et S2 séparément. Un modèle de transmission élastique entre S1 et S2 est retenu. Il en résulte une nette simplification de la procédure du calcul.



Capteur d'effort.

souvent deux types de régulations :

- régulation autour des forces consignées F_x, F_y et F_z avec une condition de fin d'action,
- des régulations élémentaires (effectuant une seule correction) de forces ou de couples.

Ainsi, nous avons synthétisé une fonction générale Force (F, L) permettant de réguler l'effort exercé au niveau de l'effecteur, selon le vecteur de force consigne $F = (F_x, F_y, F_z)$. L'action prend fin lorsque l'organe terminal aura avancé de $L = (L_x, L_y, L_z)$. Elle permet l'assemblage ou le démontage de deux pièces dont la surface de séparation est cylindrique. La partie régulation de cette action est représentée par la figure ci-dessous.

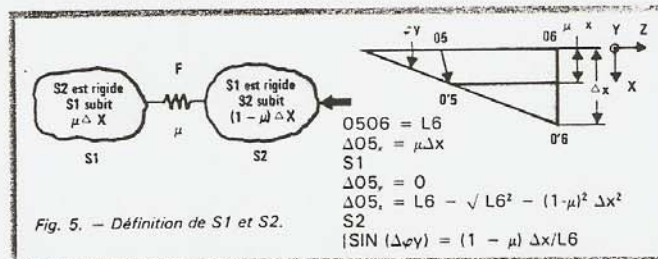
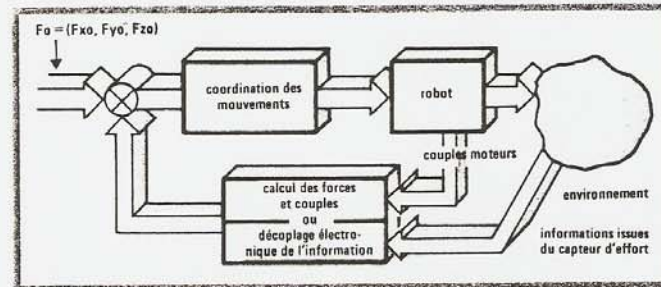


Fig. 5. - Définition de S1 et S2.

La seconde voie consiste à concevoir un capteur d'effort approprié. Ce dernier répond à deux nécessités :

a) fournir une information simple (structure mécanique permettant le découplage de l'information) sur les déformations imposées au niveau de l'effecteur,

b) permettre la simulation d'une compliance électrique dont les performances soient au moins comparables à celles obtenues à partir des couples moteurs.

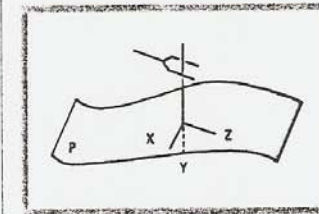
Le capteur que nous avons conçu répond à ces deux objectifs. La fonctionnalité de ce dernier impose une limitation en degrés de liberté. On s'intéresse donc à certaines composantes de forces et de couples. Ces composantes permettent de reconnaître la force F qui s'exerce sur le bout d'un objet tenu par le manipulateur. Le capteur prend la place des deux doigts de la pince qui sont changeables. Nous avons expérimenté, à ce sujet, deux types de détecteur de

déformation : les jauges de contraintes et le caoutchouc conducteur. Pour des raisons de fragilité et d'encombrement, le caoutchouc conducteur semble être plus commode (mais sensible au rayonnement). La linéarité des signaux de réponses dans le domaine des faibles déformations est assez bonne.

Synthèse de primitives pour la régulation de l'effort

Les tâches d'assemblage doivent être programmées au niveau d'un langage comprenant, outre une coordination des mouvements, des mécanismes évolués de régulation de l'effort. En effet, ces derniers sont largement utilisés dans les fonctions de haut niveau, que nous avons expérimentées, telles que : poser, insérer, extraire, etc. Nous utilisons le plus

D'autres fonctions permettent une régulation élémentaire de l'effort selon un axe particulier du référentiel de la pince. Elles concernent une composante particulière de F . Le contrôle du mouvement, selon les axes restants, est laissé sous une commande en position. Par exemple, pour parcourir une surface non plane le mouvement est effectué selon OX et OZ; le contact est maintenu en régulant l'effort selon F_y .



Implantation du système de commande sur microprocesseur 16 bits

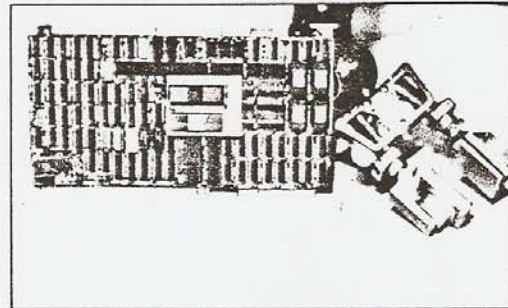
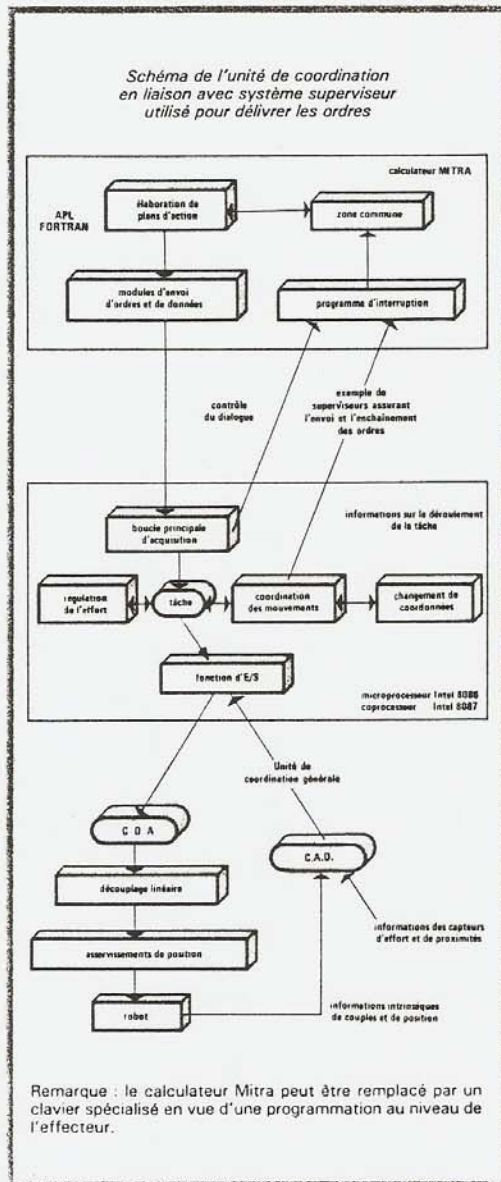
L'ensemble des fonctions décrites plus haut a été testé d'abord sur un minicalculateur (Mitra 105) pilotant le manipulateur MA 23 (développé au

Table des fonctions de coordination en effort

Nom de la fonction	Arguments	Description de l'action
REGFXYZG	F., F., F., L	Régulation générale autour des forces de consignes F., F., et F., avec fin d'action après parcours de L.
REGCXYZG	C., C., C., φ	Régulation générale autour des couples de consignes C., C., et C., avec fin d'action après rotation de φ .
REGFXYZ	F., F., F.	Régulation élémentaire par rapport aux consignes F., F., et F.
REGFX	F.	Régulation élémentaire par rapport aux consignes F.
REGFY	F.	Régulation élémentaire par rapport aux consignes F.
REGFZ	F.	Régulation élémentaire par rapport aux consignes F.
REGCX	C.	Régulation élémentaire par rapport aux consignes C.
REGCY	C.	Régulation élémentaire par rapport aux consignes C.
REGCZ	C.	Régulation élémentaire par rapport aux consignes C.

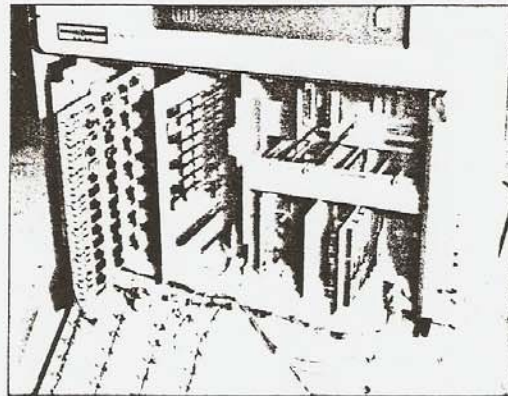
STEP/EMH/CEA). Nous avons implanté ensuite ces fonctions sur la carte standard Intel-86-12. L'unité centrale est constituée d'un microprocesseur 16 bits Intel 8086. Pour cela nous disposons d'un langage (PLM-86-Intel) dont les instructions sont proches de celles du Fortran. Afin de conserver la généralité de cette démarche et éviter des structures particulières (vis-à-vis de l'opérateur de calcul), nous avons opté pour l'utilisation d'un coprocesseur flottant. Le circuit réalisant cet opérateur (Intel-8087) n'existe que depuis peu et a été utilisé ici avec succès.

Schéma de l'unité de coordination en liaison avec système superviseur utilisé pour délivrer les ordres



Carte Intel muni d'un microprocesseur 8086 avec un coprocesseur 8087.

Châssis comprenant les asservissements et les CDA/CAD.

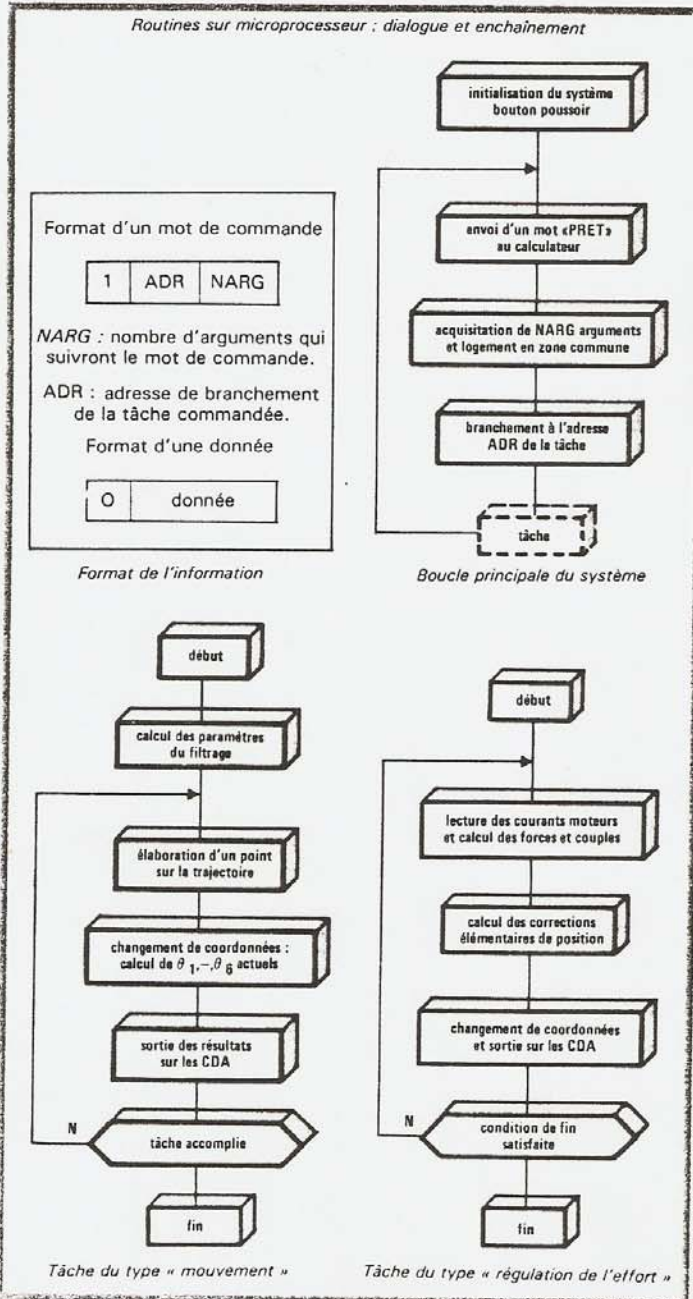


Le module de changement de coordonnées utilise la technique des tables pour le calcul des lignes trigonométriques (temps de calcul avec interpolation linéaire 50 μ s). L'encombrement en mémoire morte de ces tables est de 800 octets. Le cycle de commande comprenant le changement de coordonnées, la détermination des paramètres de l'effecteur et le filtrage qui dure 8 ms (valeur difficilement atteignable avec les structures classiques).

Régulations en effort et position : indispensable pour l'assemblage

Nous avons présenté dans cette étude les éléments de base d'un système de commande de robots comprenant une unité de coordination en position et en effort. Nous pensons que ces deux types de régulations sont indispensables pour permettre la

programmation des tâches d'assemblage. La structuration et la diversité de ces éléments conduisent à les situer au même niveau de programmation. Les mécanismes de régulation de l'effort sont souvent oubliés (ou laissés à la charge de l'utilisateur) dans les langages actuels de robotique. Notre système de commande est donc caractérisé par une meilleure structuration des éléments d'action qui interviennent souvent dans la programmation automatique d'opérations d'assemblage.



Bibliographie

- (1) R. Paul — Cartesian coordinate control of robots in joint coordinates. Third Cism-iftomm international symposium on theory and practice of robots and manipulators. Sept. 12-15/1979, Udine, Italy.
- (2) W. Khalil — Thèse de doctorat d'Etat. Université de Montpellier (1978).
- (3) D.E. Whitney — The mathematics of coordination and purposeful motions. Journal of Cybernetics and Informations Sciences, 1976, tome 1, n° 1.
- (4) J.L. Nevins, D.E. Whitney — The force vector assembler concept. Int. conf. on robots and manipulator systems, Udine, Sept. 1973.
- (5) D. Falek, M. Parent — Un langage évolutif pour un robot intelligent. Séminaire international « Langages et méthodes de programmation des robots industriels », 27-29 juin 1979, Iria.
- (6) A. Fournier — Thèse de doctorat d'Etat. Université de Montpellier (1980).
- (7) A. Liégeois, A. Fournier, M.J. Aldon — Logiciel utilisé pour la manipulation et l'assemblage automatisé au moyen d'un manipulateur flexible. Proc. 11th CIRP, Nancy, 1979.

L'unité de coordination synthétisée est particulièrement orientée vers des implantations à base de microprocesseurs performants tels que le 8086 d'Intel avec son coprocesseur flottant (8087). Les performances obtenues, dans le cadre de notre application au manipulateur MA 23 (6 degrés de liberté), s'évaluent par la précision du calcul, la rapidité du cycle de commande (125 HZ) et le faible coût du matériel informatique de base par rapport à celui du robot (1/25 pour ce même robot).

Les applications en perspective de ce système vont de la robotique générale à la téléopération.

Pour la première, les fonctions décrites plus haut constituent les primitives d'un langage non gestuel adapté au niveau de l'objet. Les tâches de haut niveau telles que : poser, insérer, extraire et prendre ont été engendrées et expérimentées avec ces primitives. Pour la seconde, il y a la possibilité de reproduire les mouvements par rapport aux coordonnées de la tâche. Cela permet de réduire la dimension du bras-maître et éventuellement d'adapter son architecture. Les gestes difficiles à reproduire (à cause de leur complexité ou leur rapidité) se trouvent programmés et actionnés par l'opérateur, lui permettant de diminuer son attention au cours de mouvements fréquents. Ce système présente donc un pas en avant vers la recherche d'une meilleure ergonomie en téléopération.

Mayez al Mouhamed