



afcet

**CONGRES
AUTOMATIQUE
1981**

Nantes 27-29 octobre 81

**COMMANDE AUTOMATIQUE ET COMMANDE ASSISTEE
DE MANIPULATEURS**

M.LLIBRE

J.P.CHRETIEN

RÉSUMÉ - Nous présentons dans cette communication l'organisation générale d'un logiciel de commande d'un manipulateur. Ce logiciel est hiérarchisé en trois niveaux : stratégie, coordination, exécution. Nous détaillons dans la première partie les algorithmes utilisés pour la commande des déplacements. La deuxième partie est consacrée à la description d'un interpréteur orienté vers la téléopération assistée.

MOTS CLES - Robotique - Téléopération - Logiciel de commande -

Centre d'Etudes et de Recherches de Toulouse (CERT) Département
d'Etudes et de Recherches en Automatique (DERA) BP 40 25
31055 TOULOUSE Cedex (France)

PREMIÈRE PARTIE : ALGORITHMES DE COMMANDE

I - ORGANISATION FONCTIONNELLE

L'objectif considéré dans cette partie est le contrôle et la commande des mouvements de l'organe terminal (O.T.) d'un manipulateur. Le logiciel de commande conçu au CERT/DERA est structuré en trois niveaux hiérarchiques /1/ qui assurent une grande indépendance entre ce logiciel et les structures matérielles, mécaniques et informatiques. L'organisation fonctionnelle de la commande est représenté fig. 1. Au niveau le plus élevé, appelé *niveau stratégie* ou bien *niveau commande*, les algorithmes sont indépendants du manipulateur et de la structure informatique. Ils réalisent le guidage dans l'espace physique, d'un repère \mathcal{R}_A lié à l'OT (organe terminal) en ignorant la structure transportant ce repère.

Au niveau intermédiaire, appelé *niveau de coordination* le logiciel qui doit être le plus indépendant possible de la structure informatique, prend en compte la mécanique du manipulateur, afin de réaliser la coordination de ses articulations qui produit le mouvement désiré de l'organe terminal. Au dernier niveau, appelé *niveau d'exécution*, le logiciel décrit les tâches d'acquisition de données et les asservissements. Il est donc très dépendant de la structure informatique, du manipulateur, des capteurs et des actionneurs.

L'interpréteur figurant au niveau stratégie fait l'objet de la deuxième partie de cette communication. Nous décrivons ci après les algorithmes de base utilisés pour effectuer le guidage dans l'espace physique puis la coordination des articulations du manipulateur.

II - COMMANDE OPÉRATIONNELLE

Le module de commande opérationnelle contient un ensemble d'algorithmes spécifiques des diverses tâches exécutables : suivi automatique, saisie, effort contrôlé, déplacement, modification d'orientation. Le guidage que doit effectuer ce module comporte deux opérations élémentaires fondamentales à la base de toutes ces tâches :

- le contrôle en position de l'OT
- le contrôle en orientation de l'OT

Le couplage introduit par la structure mécanique du manipulateur entre ces deux opérations est traité au niveau coordination par le module de commande configurationnelle.

II.1 - CONTROLE EN POSITION DE L'ORGANE TERMINAL

Appelons : $\overline{\mathcal{R}}_0$ le repère orthonormé d'origine O de l'espace physique
 \mathcal{R}_A le repère orthonormé lié à l'organe terminal d'origine P
P point particulier de l'OT choisi pour origine
A point particulier quelconque de l'OT

Notons : $\overline{W}/_0$ le vecteur des composantes par rapport à \mathcal{R}_0
 $\overline{W}/_A$ le vecteur des composantes par rapport à \mathcal{R}_A
 W^* la valeur désirée de W.

L'algorithme de base utilisé pour le contrôle de position est simplement un guidage en vitesse de translation proportionnel à l'é-

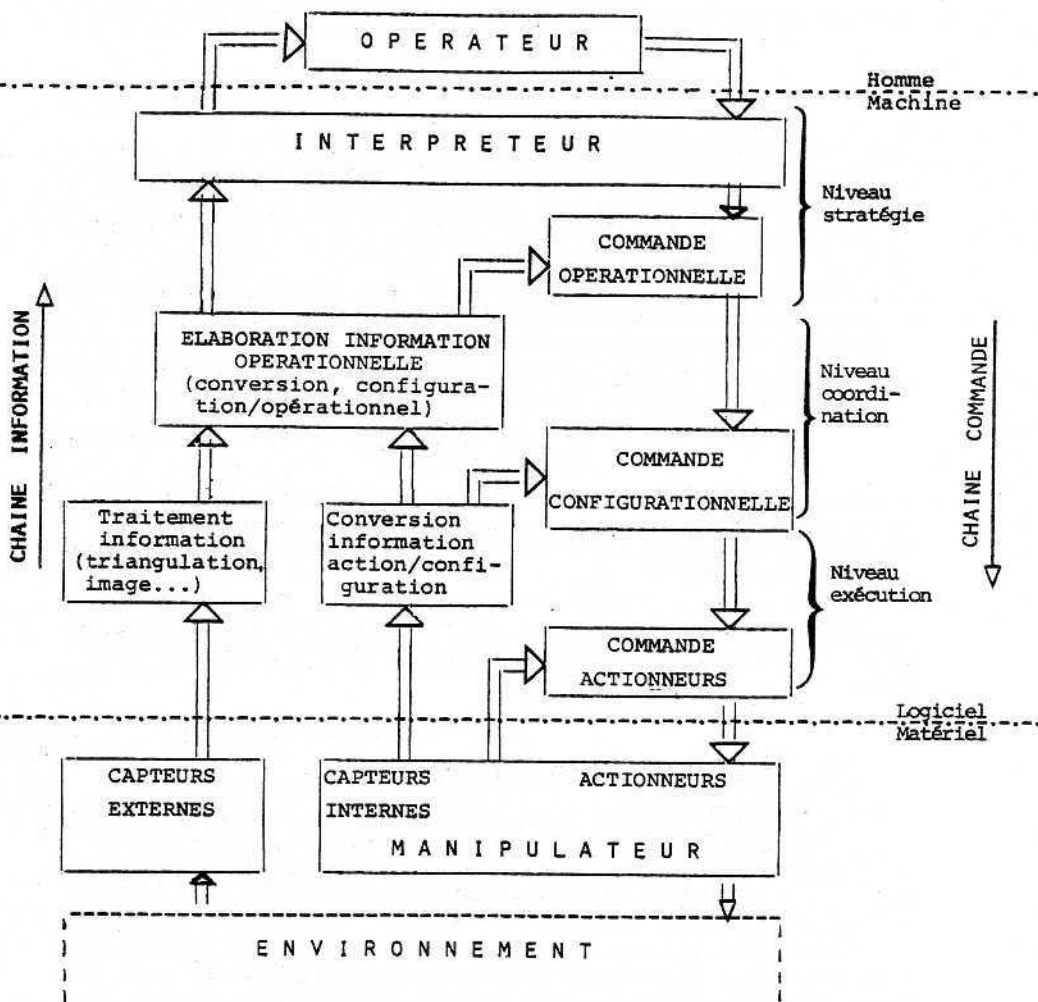


FIGURE 1 : Organisation de la commande

cart de position. Soient :

- $\overline{OA^*}/o$ la consigne de position du point A
- \overline{OA}/o la position actuelle de A fournie par le niveau coordination

La consigne de vitesse de translation destinée au module suivant sera proportionnelle à l'écart de position :

$$\overline{AA^*}/o = \overline{OA}/o - \overline{OA}/o$$

soit
$$\vec{V}_{A/o}^* = k \cdot \overline{AA^*}/o$$

II.2 - CONTROLE EN ORIENTATION DE L'ORGANE TERMINAL

Le contrôle en position permet de déplacer ou de maintenir immobile un point quelconque A de l'organe terminal. Le contrôle en orientation permet de faire varier ou de maintenir fixe l'attitude de l'organe terminal indépendamment du contrôle précédent. Appelons :

- [OA] la matrice de passage du repère \mathcal{R}_A au repère \mathcal{R}_o . Les vecteurs colonne sont les composantes dans \mathcal{R}_o des vecteurs de base de \mathcal{R}_A . Cette matrice est fournie par le niveau coordination
- [OA*] la matrice correspondant à l'orientation désirée de \mathcal{R}_A^* . La matrice caractérisant dans \mathcal{R}_o l'écart d'orientation entre \mathcal{R}_A et \mathcal{R}_A^* est donnée par :

$$[AA^*] = [OA^*][OA]^t$$

Une rotation d'angle α autour du vecteur propre \vec{u} de [AA*] permet d'amener le repère \mathcal{R}_A en coïncidence avec \mathcal{R}_A^* . α et \vec{u} sont obtenus à partir des éléments de [AA*] par les relations classiques sur les quaternions /2/, /3/. En appelant :

$$\overline{AA^*}/o = \alpha \cdot \vec{u}/o$$

le vecteur écart d'orientation entre \mathcal{R}_A et \mathcal{R}_A^* , on effectue un guidage en vitesse de rotation proportionnelle à l'écart d'orientation par :

$$\Omega^*/o = k \overline{AA^*}/o$$

III - COMMANDE CONFIGURATIONNELLE

Le module de commande configurationnelle est chargé de réaliser la coordination des articulations du manipulateur afin d'obtenir pour l'organe terminal le mouvement découplé calculé au niveau précédent. La commande cinématique est particulièrement bien adaptée à cette structure délivrant des consignes de vitesses.

Afin d'explicitier plus simplement le principe de la commande cinématique nous décrivons son schéma directeur dans le cas du RV 80 (Robot RENAULT vertical 80, ACMA CRIBIER). Ce schéma est valable pour toutes les manipulateurs à 6 axes de rotation dont les trois derniers sont concourants en un point P. Dans ce cas, en appelant I_i un point quelconque de l'axe de rotation i , animée d'une vitesse de rotation $\dot{\theta}_i$, on peut mettre le modèle cinématique sous la forme :

$$\vec{\Omega} = \sum_{i=1}^6 \dot{\theta}_i \vec{e}_i \quad (1) \quad \vec{V}_A = \sum_{i=1}^3 (\dot{\theta}_i \wedge \vec{I}_i \vec{P}) + \vec{\Omega} \wedge \vec{PA} \quad (2)$$

Etant donné les vitesses désirées \vec{V}_A^* et $\vec{\Omega}^*$ l'expression (2) mise sous la forme :

$$\sum_{i=1}^3 \dot{\theta}_i \wedge \vec{I}_i \vec{P} = \vec{V}_A^* - \vec{\Omega}_A^* \wedge \vec{PA}$$

permet de calculer $\dot{\theta}_1^*$, $\dot{\theta}_2^*$, $\dot{\theta}_3^*$. L'expression (1) mise sous la forme :

$$\sum_{i=4}^6 \dot{\theta}_i^* = \dot{\Omega}^* - \sum_{i=1}^3 \dot{\theta}_i^*$$

permet alors de calculer les trois derniers $\dot{\theta}_i^*$. Les vitesses $\dot{\theta}_i^*$ sont délivrées en consigne au niveau exécution.

V - IMPLANTATION

Nous avons effectué la mise en oeuvre sur un calculateur T1600 d'un logiciel de commande du robot RV80 organisé selon la structure décrite fig.1. La boucle d'asservissement se fait avec une période d'échantillonnage de 5ms. La commande configurationnelle utilise l'algorithme d'inversion du modèle cinématique. Il n'y a pas de boucle de commande à ce niveau. La commande opérationnelle est utilisée pour effectuer diverses tâches spécifiées dans l'espace de l'opérateur. La boucle de commande se fait à ce niveau avec une période de récurrence de 20 ms. On peut l'augmenter sans problème jusqu'à 50ms pour des tâches complexes demandant de nombreux calculs.

DEUXIÈME PARTIE : INTERPRÉTEUR

Nous décrivons dans cette seconde partie un interpréteur tel qu'il apparaît dans le schéma de l'organisation fonctionnelle de la commande, notre but étant plus d'illustrer les articulations avec ce qui a été précédemment exposé et les besoins en matière d'assistance à l'opérateur que de présenter un langage figé et achevé. Après une description des moyens de mémorisation de l'espace et des commandes actuellement mises en oeuvre, nous nous pencherons sur les développements envisagés à court terme.

I - MÉMORISATION DE L'ESPACE

La base indispensable à l'établissement d'un langage conversationnel permettant un travail partiellement automatique et partiellement manuel est un moyen de mémorisation de l'espace opérationnel. Il est en effet hors de question de redésigner à chaque instant les éléments géométriques de l'espace par leurs coordonnées dans le cadre d'un dialogue constant entre l'opérateur et le système de commande d'un manipulateur. La mémorisation de l'espace se fait donc en enregistrant le numéro d'un élément géométrique et la mémoire peut se réduire à deux tables contenant respectivement les éléments ponctuels et les éléments directionnels. Les éléments ponctuels sont des points idéalisés de l'espace opérationnel, défini comme l'espace cartésien usuel de la salle de travail du manipulateur. Les éléments directionnels peuvent être définis de diverses façons, la plus simple étant les cosinus directeurs ; cette information, suffisante pour définir les éléments géométriques de l'espace (droites, plans), est incomplète si l'on travaille sur des orientations qui sont indispensables dès que l'organe terminal n'est pas de révolution autour d'un axe et il faut mémoriser des trièdres. Comme on l'a indiqué plus haut, la méthode utilisée au niveau inférieur pour représenter les trièdres est la matrice de passage d'un trièdre de référence au trièdre considéré,

soit 9 paramètres redondants. Cette représentation est peu parlante pour l'opérateur ; par contre, la représentation classique par trois rotations se heurte à une singularité gênante au niveau du dialogue chaque fois que le travail se produira au voisinage de l'indétermination inévitable de chaque système d'angles.

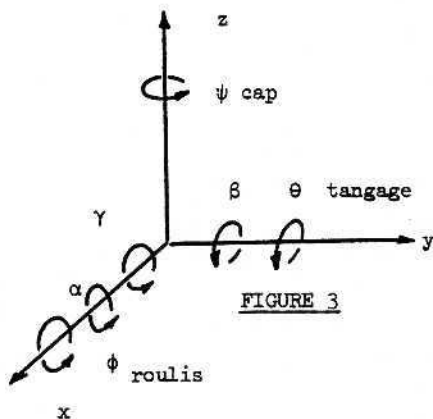


FIGURE 3

A titre d'illustration, le système angulaire des avionneurs (fig.3) que nous avons choisi comme système de représentation angulaire de base, présente une singularité pour $|\theta|=90^\circ$: la donnée de ψ, θ, ϕ , permet de calculer la matrice de passage, mais par contre, la donnée de la matrice de passage ne permet de déterminer que $\psi + \phi$ puisque $|\theta|=90^\circ$ fait coïncider les deux axes. La solution retenue pour pallier cette difficulté consiste à faire coexister (au prix de la mémorisation d'un paramètre supplémentaire) deux systèmes d'angles ayant leur singularités en quadrature : on complète le système 1 ($\psi \theta \phi$) par le système 2 ($\alpha \beta \gamma$)

lorsque $|\theta| > 60^\circ$. En résumé, les éléments de l'espace opérationnel sont les points et les trièdres, ces derniers ayant l'avantage non négligeable de mémoriser simultanément trois directions orthogonales, l'importance en est évidente dès que l'on est conduit à manipuler des objets (déplacement parallèlement à un axe, puis saisie suivant une direction perpendiculaire à celui-ci). Du point de vue pratique on aura donc deux tables, appelées table de points de \mathcal{R}_0 et table des trièdres de \mathcal{R}_0 . Ces tables contiennent au départ les éléments caractéristiques de ces espaces (points particuliers, trièdres alignés suivant les directions canoniques).

Si la donnée de ces deux tables est théoriquement suffisante pour mémoriser et restituer toutes les configurations possibles du manipulateur, cette minimalité des informations mémorisées conduit à une gymnastique inacceptable pratiquement et on est conduit à créer au moins une table des points liés à l'organe terminal (coordonnées dans le repère \mathcal{R}_A centré au poignet P, par exemple coordonnées au centre de la pince) ; nous avons introduit de plus une table des trièdres liés à l'organe terminal, celui-ci pouvant porter des objets ou des outils ne s'alignant pas sur les directions canoniques de l'organe.

II - GESTION DE LA MÉMOIRE DE L'ESPACE

Ces quatre tables de mémorisation sont gérées à travers quatre fonctions de base auxquelles l'opérateur n'a pas accès en tant que telles et qui sont : ajouter, supprimer, modifier et extraire les paramètres d'un élément.

L'opérateur dispose de primitives plus élaborées de gestion des tables que nous décrirons brièvement¹ :

¹ suivant une pratique usuelle, { } désigne un choix entre plusieurs possibilités et [] un terme facultatif

EDITAB $\left\{ \begin{array}{l} \text{PT} \\ \text{TR} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{AB} \\ \text{PI} \end{array} \right\}$ commande l'édition de la table des points (PT) ou des trièdres (TR) de l'espace absolu (AB) ou lié à l'organe terminal (PI)

SUPTAB $\left\{ \begin{array}{l} \text{M} \\ \text{T} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{A} \\ \text{P} \end{array} \right\} ij$ supprime l'élément ij dans la table des points (M) ou des trièdres (T) absolus (A) ou relatif à l'organe terminal (P)

DEFIPT $\left\{ \begin{array}{l} \text{AB} \\ \text{PI} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{CC} \\ \text{AP} \end{array} \right\} \left[\begin{array}{l} \text{M} \\ \text{P} \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{l} \text{A} \\ \text{P} \end{array} \right\} kl$ est une commande de création d'éléments dans les tables des points. A la manière naturelle par coordonnées (DEFIPT $\left\{ \begin{array}{l} \text{AB} \\ \text{PI} \end{array} \right\} \text{CO}$ qui entraîne l'impression COORDONNEE ? et l'entrée de trois paramètres) vient s'ajouter :

. la création d'un point de l'espace absolu (AB) ou lié à l'organe terminal (PI) par apprentissage (AP) à partir de la position courante du manipulateur. Il faut pour cela préciser de quel point de l'espace lié à l'organe terminal (MPkl) dans le cas de l'apprentissage dans le sens repère de l'OT - repère absolu, ou de quel point de l'espace absolu (MAkl) dans l'autre sens, on désire les coordonnées. Cette possibilité est fondamentale pour le balisage de l'espace absolu sans recours à l'arpentage ; elle se distingue de l'apprentissage traditionnel du manipulateur industriel RV 80 par la mémorisation de coordonnées cartésiennes et non point des positions des actionneurs.

. la création d'un point de l'espace absolu (A) ou lié à l'organe terminal (P) par modification des coordonnées d'un point déjà existant $\left\{ \begin{array}{l} \text{A} \\ \text{P} \end{array} \right\} ij$, la coordonnée modifiée étant $\left\{ \begin{array}{l} \text{X} \\ \text{Y} \\ \text{Z} \end{array} \right\}$ de la valeur +uvw. Cette fonction permet le balisage de l'espace de $\left\{ \begin{array}{l} \text{X} \\ \text{Y} \\ \text{Z} \end{array} \right\}$ proche en proche.

DEFITR $\left\{ \begin{array}{l} \text{AB} \\ \text{PI} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{CO} \\ \text{AP} \end{array} \right\} \left[\begin{array}{l} \text{T} \\ \text{P} \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{l} \text{A} \\ \text{P} \end{array} \right\} kl$ est semblable à la précédente, mais travaille sur les trièdres

MODIPT $\left\{ \begin{array}{l} \text{X} \\ \text{Y} \\ \text{Z} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{A} \\ \text{P} \end{array} \right\} ij$ obéit à la même syntaxe que dans les commandes précédentes mais le point désigné lui-même est modifié.

III - COMMANDES DU MANIPULATEUR

III.1 - COINCIDENCE

La première fonction de base, indépendante de toute téléopération (mode automatique complet) permet d'amener le manipulateur dans une configuration déterminée ; pour cela il faut fixer 6 paramètres : trois paramètres de position et trois paramètres d'orientation. La commande se présente comme suit :

COINCI $\left\{ \begin{array}{l} \text{MP} \\ \text{TP} \end{array} \right\} ij \left\{ \begin{array}{l} \text{MA} \\ \text{TA} \end{array} \right\} kl \quad V \quad uu \quad TP \quad mm \quad TA \quad op$

Elle demande aux niveaux inférieurs de faire coïncider un point lié à l'organe terminal (MPj) avec un point lié à l'espace absolu (MAkl) et un trièdre lié à l'organe terminal (TPij) avec un trièdre absolu (TAkl) ceci à une vitesse uu en pourcentage de la vitesse maximum autorisée. La commande peut ne spécifier que la coïncidence de points ou la coïncidence de trièdres. La dernière coïncidence demandée pour les éléments non redéfinis est alors prise en compte ceci revient à conserver l'attitude de l'organe terminal ou le cen-

tre de rotation. Il est à noter que la coïncidence entre trièdres pourrait être obtenue par coïncidence entre le repère canonique de la pince et un repère absolu convenable ; c'est uniquement dans un but d'assistance que le choix est laissé à l'opérateur.

Cette commande ne spécifie que le point terminal à atteindre dans l'espace à 6 dimensions des points et des trièdres ; si la loi de commande mise en oeuvre vise à rejoindre ce point "en ligne droite", il n'en sera ainsi que si les imperfections mécaniques et les perturbations dynamiques sont négligeables.

III.2 - TELEMANIPULATION "1 AXE"

Il s'agit du mode manuel le plus simple puisque l'opérateur dispose d'un moyen d'entrée analogique à un seul degré de liberté, qu'il peut attribuer à partir de la console à la commande de tel paramètre ou combinaison de paramètres. Les deux coordinations de base qui viennent naturellement à l'esprit sont la translation le long d'une droite quelconque à attitude donnée et la rotation autour d'un point fixé quelconque.

a) - *Translation suivant une droite*

Une droite étant définie par un point et une direction, la forme de la commande se présente comme suit :

$$\text{TRADRO} \quad \left[\begin{array}{cc} \text{MA} & \text{ij} \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \text{X} \\ \text{Y} \\ \text{Z} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{c} \text{A} \\ \text{P} \end{array} \right\} \text{kl} \left\{ \begin{array}{c} \text{V} \\ \text{P} \\ \text{A} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{c} + \\ - \end{array} \right\} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \text{tuvw}$$

L'attitude est conservée identique à l'attitude initiale au début de la commande qui peut s'opérer suivant trois modes : vitesses (V) position (P) ou automatique (A) ; le signe permet d'inverser le sens du déplacement, l'option positive étant prise par défaut. La direction du déplacement est spécifiée par l'intermédiaire du second argument : l'option $\left\{ \begin{array}{c} \text{A} \\ \text{P} \end{array} \right\}$ permet de définir les translations parallèlement à des direction

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{X} \\ \text{Y} \\ \text{Z} \end{array} \right\}$$

définies soit dans le repère absolu, soit dans le repère lié à l'organe terminal, ce qui permet toutes les possibilités (mouvement de la pince par rapport à elle-même). Le premier argument optionnel est introduit pour permettre de suivre des droites absolues. Afin d'éviter une dérive gênante, la directions liées à l'organe terminal sont apprises dans le repère absolu pour la durée d'effet de la commande. La commande en vitesse génère une vitesse de translation dans la direction spécifiée proportionnelle à l'amplitude de la commande du manche. Par contre, la commande en position adapte automatiquement le gain de la commande de façon que le débattement maximum de la commande décrive le domaine atteignable sur la droite. Le mode automatique génère un déplacement relatif le long de la droite, il est introduit pour permettre l'enchaînement des primitives en mode complètement automatique avec contrôle précis des trajectoires. En résumé, cette commande permet d'asservir l'organe terminal à se déplacer en translation parallèlement à lui même, le déplacement étant contrôlé manuellement.

b) - Rotation autour d'un axe

La commande se présente identiquement à la précédente :

ROTAXE MP ij $\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix}$ $\begin{Bmatrix} A \\ P \end{Bmatrix}$ kl $\begin{Bmatrix} V \\ P \\ A \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} + \\ - \end{Bmatrix}$ tuvw }

Le centre de rotation doit cependant être spécifié : l'indication MPij conduit à l'apprentissage pour la durée d'exécution de la commande de la position absolue de ce point ; par défaut le dernier centre de rotation est considéré.

IV - DÉVELOPPEMENTS ENVISAGÉS

IV.1 - COMMANDES PLUSIEURS AXES

Il est envisagé de généraliser les principes de coordination précédents en introduisant progressivement de plus en plus de "degrés de liberté", jusqu'à retrouver le mode manuel pur en mettant à la disposition de l'opérateur deux commandes trois axes (manches à trois degrés de liberté) ; on peut ainsi retrouver une commande où l'assistance se borne à la transformation des coordonnées opérationnelles en coordonnées de configuration et réciproquement. On peut envisager, dans le cas deux axes :

- une commande où un manche à deux degrés de liberté commande les translations dans un plan défini par un point et deux directions distinctes, l'attitude de l'organe terminal étant conservé

- une commande où un manche à deux degrés de liberté commande la direction de l'organe terminal (par deux angles ψ et θ par exemple), un point de cet organe étant fixé dans l'espace absolu.

Une combinaison d'une commande un axe et d'une commande deux axes conduit alors pour chacun des groupes de trois degrés de liberté (position et attitude) à une commande trois axes complète : commande de la position du plan suivant une droite quelconque et commande dans le plan suivant deux directions quelconques pour la position ; commande de l'orientation d'une direction et d'une rotation autour de cette direction. La première possibilité en particulier permet d'introduire un espace de travail non-orthonormé, ce qui peut être important dans le cas de téléopération autour d'objets de forme compliquée.

IV.2 - SYSTEME DE TELEOPERATION ASSISTEE

Plus généralement, il est envisagé de mettre à la disposition de l'opérateur un système d'assistance complet. Il serait organisé autour des éléments suivants :

- une console alphanumérique pour l'entrée des commande à l'interpréteur
- une console de visualisation qui permette une mémorisation graphique de l'état des espaces absolu et lié à l'organe terminal
- un ensemble de moyens d'entrée analogiques (boules, mini-manches)
- un moyen d'entrée à retour de sensations.

Le système permettrait au niveau de l'interpréteur d'affecter les moyens d'entrée à telle ou telle coordination (axe x du moyen d'entrée i affecté à l'abscisse sur la droite définie par tel point et telle direction...) les moyens d'entrée pourraient en outre être utilisés en désignation sur la mémoire graphique. Enfin, l'introduction d'un moyen d'entrée à retour de sensation, celle-ci étant la conversion en couple des informations issues de divers capteurs (proximité, effort...) paraît essentiel lors de tâches d'assemblage ou dans un milieu où la vision est restreinte.

RÉFÉRENCES

- /1/ M.LLIBRE : Modélisation et commande des robots manipulateurs
Rapport intermédiaire CNES/CER n° 1/7271 - Janvier 1981
- /2/ J.Y.S.LUH, M.W.WALKER and R.P.C. PAUL : Resolved acceleration control of mechanical manipulators
IEEE Transact. on Automatic Control, AC 25, n°3, June 1980
- /3/ M.LLIBRE, R.MAMPEY : Etude comparative sur la commande des robots manipulateurs
Rapport DGRST/DERA n° 7709-01, Mars 1981