

Sylvie GIBET, Pierre-François MARTEAU

Modèle sensori-moteur pour le contrôle et la commande de mouvements du bras

A sensori-motor model for the controlling and planning of arm movements

Abstract : A perceptuo-motor approach is presented for synthesizing skilled gestures which keep the main invariants of human gestures. In particular we develop a control model of an artificial arm according to the Synergetics principles which state that movement patterns are not explicitly programmed but are rather emergent properties of a dynamical system constrained by physical laws in space and time. The model automatically translates a high-level command specification into a complete movement trajectory. The understanding of mechanisms underlying the sensori-motor behavior is highlighted in this model by control theories in Automatics and Psychomotricity: a feedback loop uses the perceptual information of the movement to calculate the dynamical variables updating the current state of the system. The proposed method is based on an optimization strategy : the dynamical system evolves towards a stable equilibrium position with a minimal displacement strategy, according to the minimization of a potential function. The application to reaching gestures in the 3-dimensional space is developed. We show then how the model can be exploited for more complex gestures, as periodical gestures or repetitive gestures, involving planning strategies of the movement.

INTRODUCTION

La problématique du contrôle sensori-moteur et de la planification est abordée sous l'angle de la théorie du contrôle, bien formalisée par les disciplines Automatiques et sous l'angle de la modélisation de systèmes auto-organisés. La première partie de cet article concerne l'étude des mouvements du bras et plus particulièrement, des gestes de pointage de cibles se déroulant dans l'espace tridimensionnel. Le système bras-main est modélisé par un ensemble de segments articulés et le contrôle s'effectue au niveau des positions angulaires de chacun des segments. La

seconde partie traite du comportement dynamique du bras, notamment des efforts mis en jeu lors de l'impact du bras sur un objet plus ou moins déformable. On étudie ainsi l'interaction du geste avec l'environnement extérieur et la manière dont cette interaction affecte la planification du mouvement. L'étude de mouvements finalisés plus complexes, en particulier de mouvements cycliques et répétitifs permet ensuite d'aborder le problème de la planification et de l'enchaînement de séquences motrices élémentaires. Enfin, nous évoquons le problème du contrôle de systèmes non-linéaires biologiques dont on ignore *a priori* la structure et les paramètres. Des mécanismes de contrôle basés sur l'identification de la structure interne de ces systèmes sont proposés, à partir de l'observation conjointe des entrées et des sorties. Une représentation sous la forme de modèles parallèles et distribués est utilisée.

1. Théories du contrôle moteur

Les théories des modes de contrôle du mouvement sont confrontées à deux types de difficultés. La première est relative à l'excès de degrés de liberté qui traduit la difficulté d'inférer les mouvements effecteurs impliqués dans une tâche perceptuo-motrice à partir des retours perceptifs (Bernstein, 1967). La seconde se rapporte à la dépendance des mouvements vis à vis du contexte, autrement dit à la nécessité d'adapter le plan d'action en fonction des réactions de l'environnement. À partir de l'énoncé de ces deux difficultés, deux principales classes de théories du contrôle moteur émergent :

La première suppose l'existence d'une instance de contrôle de haut niveau qui contient une représentation interne du mouvement et qui utilise l'information stockée en mémoire pour calculer explicitement la trajectoire du mouvement. La notion de programme moteur généralisé est sous-jacente à cette approche (Schmidt, 1982). Le programme en question est constitué d'une série de commandes motrices qui spécifient explicitement des messages pour sélectionner les muscles et contrôler leurs contractions et leurs relaxations aux moments appropriés. Pour ce type d'approche, le temps est également une grandeur explicite.

La seconde classe de théories englobe les modèles pour lesquels la trajectoire du mouvement est une structure émergente caractérisée par des propriétés globales invariantes (Kelso & Holt, 1980). Cette trajectoire apparaît comme le résultat de phénomènes distribués à travers une multitude de systèmes sensoriels, neuronaux et musculaires interagissants. Cette perspective donne lieu à des schémas structurels où le temps est exprimé de manière implicite.

L'approche que nous proposons s'appuie en partie sur le travail réalisé par Michael Jordan (Jordan, 1989), qui a développé une théorie caractérisée par la mise en oeuvre des deux modes de contrôle distingués précédemment, et ceci dans le cadre de problèmes d'apprentissage de tâches motrices spécifiques. Nous suggérons une alternative de contrôle hiérarchisé, dans laquelle cohabitent également la notion de commande discrète et celle de système continu adaptatif.

La commande est transférée vers un niveau symbolique qui tend à se rapprocher des modes de représentation mentale des gestes et exprime ainsi une forme d'intentionnalité du mouvement. Cela consiste en des ordres explicites relatifs, par exemple, à des messages spatio-temporels. Le système continu adaptatif a pour fonction principale de calculer implicitement les paramètres qui gouvernent le système musculo-squelettique. Le passage du symbolique au continu est réalisé par une boucle sensori-motrice qui transforme automatiquement la commande discrète en signaux continus évoluant plus rapidement au cours du temps. Le bras est représenté par un modèle géométrique ou mécanique qui contient implicitement des contraintes liées en partie à la limitation de l'évolution respective des différentes articulations.

Les généralités étant posées, nous décrivons de manière détaillée notre approche dans les paragraphes qui suivent.

2. FONDEMENTS DU MODELE

2.1. Le paradigme synergétique

La phénoménologie sensori-motrice est ici considérée sous l'angle des systèmes auto-organisés. Pour de tels systèmes, les causalités et les processus de la régulation sont inhérents à l'organisation dynamique du système lui-même, et ne dépendent pas de lois qui lui seraient *a priori* étrangères. En adoptant des principes développés par la Synergétique (Haken, 1988), on supposera que les mouvements ne sont pas explicitement programmés mais qu'ils sont au contraire la trace de propriétés émergentes d'un système dynamique contraint dans l'espace et dans le temps par des lois physiques. Plutôt que de chercher à représenter de manière exacte le fonctionnement du système neuro-musculaire, on cherche à intégrer les caractéristiques du comportement biomécanique dans un schéma fonctionnel de l'organisation motrice. Ce système peut être décrit de manière générale par un ensemble d'équations différentielles connues sous le nom d'équations de Langevin (Haken, 1988) :

$$dq/dt = N(a, a_T, t) + h(t) \quad (1)$$

où N est une fonction non linéaire ; h représente l'ensemble des informations non structurelles (bruit interne au système) ; q est un vecteur d'état qui contient toutes les variables nécessaires pour décrire de manière unique le système ; a_T est le vecteur des paramètres de contrôle de la tâche motrice à réaliser ; a est le vecteur de contrôle courant qui est utilisé pour réajuster à chaque pas le vecteur d'état.

2.2. Formalisme utilisé pour décrire le système dynamique bouclé.

Une tâche motrice met en oeuvre un ensemble d'effecteurs responsables de l'exécution d'un mouvement, mais également des récepteurs sensoriels dont l'information captée à chaque instant est exploitée afin de contrôler la coordination spatio-temporelle des effecteurs. Ce mécanisme peut être décrit en utilisant le formalisme des systèmes de contrôle bouclés. Un dispositif sensitif détecte les variations du système en cours d'exécution d'un mouvement et fournit en retour une information qui, par comparaison avec une valeur de référence (commande), va déterminer un signal d'erreur. La mesure de ce signal d'erreur permet le réajustement de l'état du système à contrôler à chaque instant.

L'importance des indices sensoriels lors de l'exécution d'un mouvement a été largement mise en évidence. En particulier, le rôle de la vision est de permettre le contrôle et la précision finale du mouvement. Jeannerod a montré que toute vision partielle du mouvement (par exemple la vision de la trajectoire de l'extrémité du bras ou des cibles à atteindre) suffisait pour obtenir des performances correctes (Jeannerod, 1984).

L'adaptation du formalisme contenu dans l'équation (1) au problème de la description d'une tâche sensori-motrice peut être formulée de la manière suivante : le vecteur d'état q caractérise l'état du système effecteur à chaque instant. Les signaux observables, mesurés dans l'espace sensoriel, sont les sorties du système qui sont utilisées en retour pour contrôler l'exécution du mouvement. On note a le vecteur des données observables. Ces signaux sont l'expression d'une information visuelle, auditive ou tactilo-kinesthésique. Dans le cas particulier de mouvements du bras et de la main contrôlés par la vision, on pourra distinguer la vision du membre en mouvement et la vision du cadre spatial caractérisant la partie de l'environnement visible par le sujet. Enfin l'espace des tâches contient des informations qui évoluent plus lentement et qui sont comparées aux données observables pour modifier à chaque instant l'état des effecteurs. On notera a_T le vecteur de tâche. L'évolution dans le temps de ce vecteur peut représenter une succession de cibles à atteindre dans

l'espace et dans le temps. On considère dans une première approche que ces cibles spatio-temporelles sont plus proches et plus significatives d'une représentation interne du mouvement que n'importe quel signal prélevé en cours d'exécution du mouvement. *Dans l'hypothèse où le vecteur-tâche constitue une sorte de trace "perceptive" construite à partir de performances précédentes, l'exécution du mouvement pourra être considérée comme reposant sur une opération de confrontation continue entre les indices sensoriels de la réponse en cours et cette trace.*

Dans le formalisme développé ici, on se place dans la situation où l'espace de tâche est une partie de l'espace d'observation. Il est alors possible de définir une quantité scalaire $E(a, a_T)$, fonction du vecteur-tâche a_T et du vecteur d'observation a . Cette quantité est calculée à chaque instant pour ajuster l'état du système des articulateurs à travers une boucle rétroactive. La figure 1 schématise les relations ainsi définies entre un espace-tâche, un espace d'observation et un espace d'états.

On appelle M la transformation qui relie le vecteur des coordonnées d'état au vecteur des coordonnées d'observation :

$$a = M(q).$$

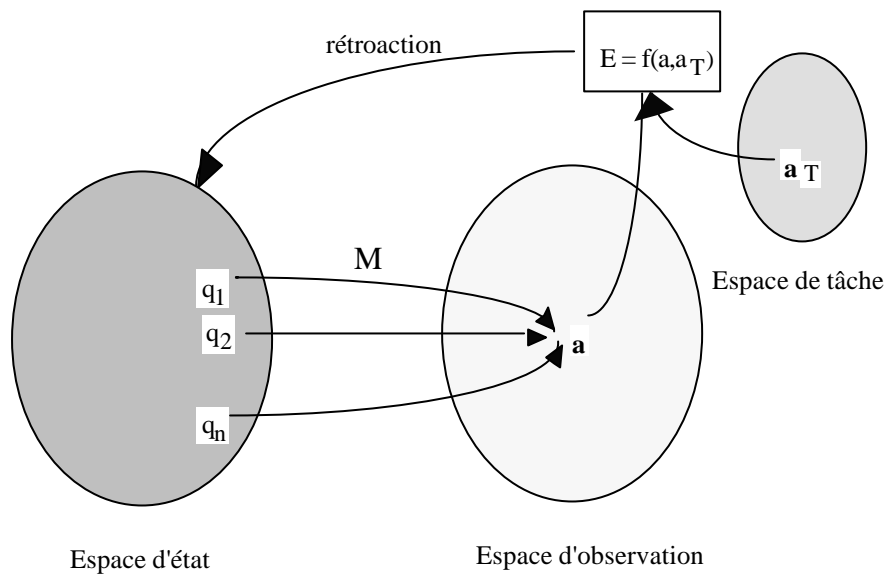


Figure 1: Système sensori-moteur

$\mathbf{q}^T = [q_1, q_2, \dots, q_n]$: vecteur d'état (coordonnées angulaires)
 $\mathbf{a}^T = [a_1, \dots, a_p]$: position observée de l'extrémité de la main
 M : transformation non linéaire entre \mathbf{q} et \mathbf{a}
 \mathbf{a}_T : vecteur cible (commande)

Lorsque le système physique considéré présente un excès de degrés de liberté, M est une fonction non linéaire et projective : à un vecteur d'observables donné, correspondent plusieurs configurations possibles des effecteurs. La détermination des coordonnées du vecteur d'état q s'effectue donc à partir d'une transformation inverse.

Des considérations systémiques nous amènent à décrire l'évolution naturelle du système physique considéré à partir d'une fonction potentielle dont les minima définissent les zones de stabilité. L'activation d'une tâche correspond à une modification des paramètres de contrôle du système d'équations différentielles (1), et donc à une modification des positions d'équilibre qui le caractérisent. Par conséquent, cette activation "déstabilise" le système qui évolue spontanément vers un autre état d'équilibre. Les lois de passage d'un état d'équilibre à un autre sont décrites à partir d'une stratégie de minimisation de la fonction potentielle.

2.3. Explicitation du modèle de contrôle

Le mode de contrôle utilise, en guise d'indices sensoriels, des variables d'observation homogènes aux variables qui permettent de spécifier la

tâche. Autrement dit, l'espace des tâches est homomorphique à l'espace sensoriel. Si l'on considère une fonction erreur comme mesurant l'écart entre la position d'observation en cours et la position de la cible à atteindre, les coordonnées d'état (positions angulaires) sont réajustées à partir du gradient de cette erreur, ce qui signifie que la boucle rétroactive tend à réduire l'écart à chaque instant. Ce fonctionnement sensori-moteur est décrit par le système d'équations différentielles suivant :

$$\frac{dq}{dt} = -g(E(a, a_T)) \cdot \text{grad}(E(a, a_T)) = -g(E(a, a_T)) \cdot (M(q) - a_T) \quad (2)$$

où $g(E)$ est une fonction gain,

et $\left(\frac{\partial M}{\partial q} \right)$ est la matrice jacobienne de l'opérateur M .

Le modèle représenté par l'équation (2) produit des variations angulaires dq qui tendent à minimiser l'écart entre la position courante et la cible à atteindre. Notons que le vecteur a_T affecte directement le couplage entre les équations différentielles à travers l'opérateur M .

Les principales caractéristiques de ce modèle sont les suivantes :

- (i) Il permet une représentation économique du contrôle sensori-moteur : en effet, la commande discrète est caractérisée par des constantes de temps plus grandes que celles du contrôle continu effectué dans la boucle rétroactive,
- (ii) Il réalise automatiquement la transformation inverse décrite à la section précédente en évitant de calculer explicitement l'inverse (ou pseudo-inverse) de l'opérateur M .
- (iii) Ce système, lorsqu'il converge vers un état stable, atteint sa cible en suivant une stratégie de déplacement minimum des articulateurs.
- (iv) L'ouverture de la boucle rétroactive permet d'agir directement sur l'organisation macroscopique des mouvements, et donc de se rapprocher d'une forme d'intentionnalité des gestes.

Cependant, le modèle décrit par (2) réalise un bouclage rétroactif direct et ne comporte aucun élément permettant d'amortir des variations angulaires trop importantes. Par conséquent, les transitions réalisées par la boucle adaptative peuvent être, dans des cas extrêmes, très brutales (atteinte d'une cible et programmation d'une autre cible très éloignée) et provoquer, dans certaines configurations, des instabilités. C'est pourquoi un tel système ne génère pas nécessairement des mouvements naturels.

L'introduction dans la boucle d'une fonction non-linéaire et d'un filtre du second ordre, représentés respectivement par N et L sur le schéma de la figure 2, sont nécessaires pour assurer la stabilité, tout en générant des transitions plus douces (Bullock & Grossberg, 1988). La fonction non linéaire en question a la forme d'une sigmoïde : le gain de cette fonction est grand lorsque la distance entre la position observée et la position cible est grande. Il devient faible lorsque la position observée s'approche de la cible. On peut noter dès à présent l'importance de cette fonction de transition dans les caractéristiques temporelles propres à l'exécution d'un mouvement : elle peut être paramétrée, (en particulier le gain et l'instant de départ) de manière à ce que la loi de Fitts, reliant la durée totale du mouvement à l'amplitude et à la précision du mouvement soit satisfaite (Fitts, 1954).

Au cours d'un mouvement élémentaire, la position courante a est remise à jour de manière à minimiser la fonction-coût exprimée comme une distance entre la cible et la position courante. Le point d'équilibre du système est atteint lorsque la position actuelle est confondue avec la cible, empêchant ainsi toute variation ultérieure et permettant au système de rester dans sa position de repos.

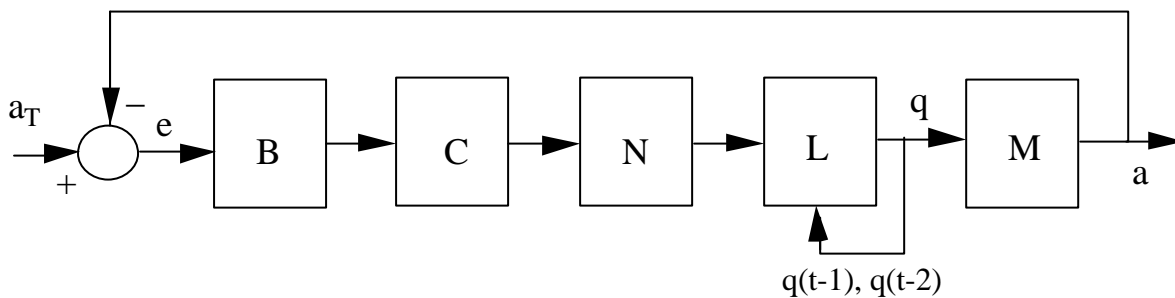


Figure 2 : Contrôle en position

$B(a, a_T) = -\text{grad}\{E(a, a_T)\}$, a étant la position courante d'observation,

a_T le vecteur-tâche (cible) et E est la norme au carré de l'erreur :

$$E(a, a_T) = \frac{1}{2} \cdot (a_T - M(q))^T \cdot (a_T - M(q))$$

$e = a - a_T$ est l'erreur entre le vecteur d'observation et la vecteur-tâche

C est une fonction pondération qui permet d'ajouter des contraintes articulaires au système,

N est une fonction gain nonlinéaire (sigmoïde),

L est un filtre du second ordre,

M est une fonction cinématique directe qui calcule les composantes du bouclage rétroactif à partir des coordonnées d'état : $a = M(q)$.

Les fondements du modèle sensori-moteur étant posés, nous cherchons maintenant à l'appliquer au contrôle du membre supérieur. Celui-ci sera représenté dans un premier temps par un modèle géométrique constitué de plusieurs segments articulés, puis dans un second temps par un modèle physique faisant intervenir des caractéristiques mécaniques du bras.

3. MODÈLE GÉOMÉTRIQUE DU BRAS ARTICULÉ

3.1. Description du bras

Soit la tâche de pointage qui consiste à déplacer un bras articulé caractérisé par plusieurs segments de façon à ce que l'extrémité de ce bras atteigne une cible dans l'espace cartésien. (D'autres mouvements plus complexes découleront directement de cette tâche élémentaire : en programmant au niveau de la commande une séquence de cibles statiques ou une cible se déplaçant lentement dans le temps). Le bras est représenté par un système articulé comportant plusieurs segments reliés entre eux par des articulations, chacune comportant plusieurs degrés de liberté. Par analogie avec un bras réel, on ne prend en compte que les rotations permettant de simuler des mouvements réels. La fonction M est dans cette application la loi de transformation entre les coordonnées d'état q (coordonnées angulaires) et les coordonnées d'observation \underline{a} (position de l'extrémité du bras). Pour contrôler la position du bras à tout instant, on peut agir :

- soit sur les angles aux articulations des segments,
- soit sur les coordonnées cartésiennes de l'extrémité du bras par rapport au repère absolu constitué par la base du bras.

L'évolution au cours du temps du vecteur d'état $q(t)$ n'est pas connue *a priori*. A partir de la trajectoire décrivant l'évolution du vecteur d'observation $a(t)$, il serait possible de calculer q si la transformation inverse de M était connue. Or M étant caractérisée par un excès de degré de liberté, son inversion n'est pas déterminée. Nous proposons de résoudre ce problème inverse par le modèle explicite au paragraphe précédent. La fonction potentielle peut s'exprimer ici comme une distance entre l'extrémité du bras et la position de la cible à atteindre :

$$V(q) = (a - a_T)^T \cdot (a - a_T) \quad (3)$$

Le système d'équations différentielles (2) permet de calculer les variations angulaires dq à partir de la position observée $a = M(q)$. En effet, si l'on connaît la matrice Jacobienne J_q au pas temporel t , on a :

$$dq(t+dt) = -g(t+dt) \cdot grad V = -g(t+dt) J_q(t) \cdot (a(t+dt) - a_T(t+dt)) \quad (4)$$

$$\text{avec } g(t) = G_0 \cdot t^a / (a + t^a) \quad (5)$$

Le vecteur dq est ensuite filtré par un filtre du second ordre et intégré suivant la loi :

$$q(t+dt) = q(t) + dq(t+dt) \quad (6)$$

Dans le cas d'un bras à sept degrés de liberté, les angles qui entrent en jeu sont indiqués sur la figure 3. La fonction M résultante peut être calculée analytiquement.

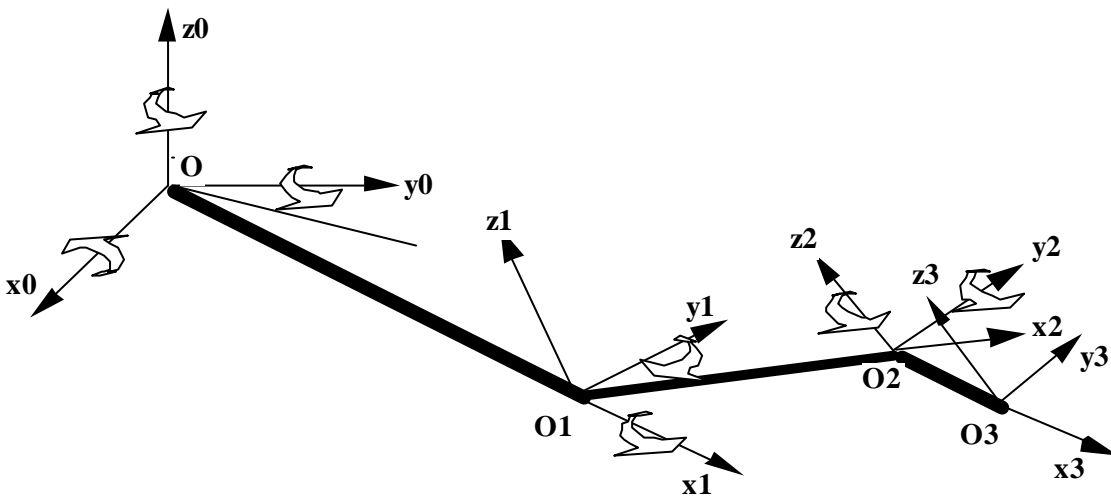


Figure 3 : Modèle géométrique du bras

- (O, x_0 , y_0 , z_0) représente le repère absolu lié à l'épaule (3 degrés de liberté)
- (O₁, x_1 , y_1 , z_1) est le repère relatif lié au coude (2 degrés de liberté)
- (O₂, x_2 , y_2 , z_2) est le repère relatif lié au poignet (2 degrés de liberté)
- (O₃, x_3 , y_3 , z_3) est le repère relatif lié au centre de gravité de la main

Pour des systèmes articulés plus complexes, la méthode consiste à associer à chaque articulation un repère affine local et à exprimer les rotations des différents segments relativement à ces repères locaux. Si

l'on considère que le premier repère constitue le repère absolu, la position et l'orientation du point extrémité du dernier segment peuvent alors être calculées dans le repère affine associé au repère absolu au moyen de la matrice de passage homogène.

Le modèle du bras géométrique à quatre degrés de liberté a été testé avec différents types de tâches. En particulier, pour des gestes discrets de pointage de cible, les résultats des simulations effectuées ont mis en évidence des lois naturelles sur le mouvement.

3.2. Simulations

Les paramètres du filtre du second ordre, de la "sigmoïde" et du gain de boucle sont ajustés de telle sorte que la boucle de contrôle reste stable et que les mouvements générés soient suffisamment rapides et correctement amortis. On remarque en particulier que le gain de boucle est directement corrélé à la vitesse moyenne d'exécution d'un mouvement. Pour valider le modèle ainsi paramétré, on s'intéresse à la cinématique des signaux produits en sortie du modèle. En effet, des signaux issus de mouvements réels vérifient sous certaines conditions des lois caractérisant des propriétés invariantes de la performance motrice, c'est-à-dire des propriétés du mouvement qui sont indépendantes des conditions d'exécution. Ces invariants sont l'expression de lois générales sous-jacentes à l'organisation spatio-temporelle de la motricité.

File Name : fitts.eps

Creator : gnuplot

Pages : (atend)

Figure 4 : Loi de Fitts :

MT fonction de $\log(D/W)$ avec MT : durée du mouvement en s.

D : distance à la cible en m.

W : précision en m.

Cette loi est obtenue à partir de données de sortie extraites de la simulation (durée du mouvement, distance à la cible, précision exprimée dans le référentiel du bras)

Nous avons retenu essentiellement trois types de lois cinématiques propres à des mouvements rapides chez l'Homme :

- la loi de Fitts (Fitts, 1954) : celle-ci exprime la relation qui existe entre d'une part la durée du mouvement MT et d'autre part la distance D à parcourir et la précision du mouvement W :

$$MT = a + b \cdot \log_2(2.D/W), \quad a \text{ et } b \text{ étant des constantes.} \quad (7)$$

- le principe d'isochronie (Viviani & Terzuolo, 1982) traduit l'invariance de la durée d'exécution du mouvement en fonction de l'amplitude de ce mouvement. Lorsque l'on n'impose pas de consigne sur la vitesse moyenne du geste, il existe en effet une tendance spontanée à accroître cette vitesse en fonction de la distance à parcourir.

- les profils de vitesse mesurés à partir de gestes de pointage présentent des caractéristiques invariantes. Pour des mouvements de pointage notamment, la forme de ces profils est approximativement celle d'une gaussienne (Abend, Bizzi et Morasso, 1982 ; Atkeson et Hollerbach, 1985 ; Beggs et Howarth, 1972). De plus, elle présente une asymétrie, le degré d'asymétrie dépendant de la vitesse du mouvement. Plus la vitesse augmente, et plus la courbe se symétrise, jusqu'à ce que la direction de la symétrie soit inversée (Zelaznik, Schmidt et Gielen, 1987).

Ces phénomènes d'invariance semblent traduire des propriétés intrinsèques du système de contrôle moteur. Ils sont relativement généraux, car ils caractérisent une large variété de mouvements de la main et du bras : en particulier ils sont vérifiés pour des mouvements de pointage du bras, mais aussi pour des mouvements d'écriture, de dessins ou de gribouillage.

Figure 5 : Profils de vitesse

Vitesse instantanée $da(t)/dt$ (en $\alpha.m/s$) en fonction du temps (en s).

Le gain de boucle de bas en haut vaut : 0.03, 0.06, 0.09, 0.12, 0.5

Les simulations que nous avons réalisées (Gibet et Lebourque, 1994) conduisent à des résultats satisfaisants. La loi de Fitts est vérifiée pour des gestes de pointage de cibles, comme le montre la droite approximée sur la figure 4. Les profils de vitesse obtenus en sortie du modèle ont globalement la forme attendue (Figure 5). On peut noter de plus qu'en modifiant l'échelle temporelle sur ces courbes, on obtient des profils de courbes superposables, ce qui révèle une propriété intéressante des programmes moteurs généralisés (Atkeson et Hollerbach, 1985). Par ailleurs, la vitesse moyenne d'un mouvement de pointage peut être modulée par le gain de la fonction "sigmoïde", et fournir ainsi un paramètre de contrôle de la durée du mouvement. De la même façon, la pente de la transition est ajustée au moyen des paramètres a et α de cette même fonction gain.

4. MODÈLE MECANIQUE DU BRAS ARTICULÉ

4.1. Modèle du bras

Le bras est modélisé par un pendule triple composé de trois segments sans masse, connectés les uns aux autres par des masses ponctuelles (Fig. 6).

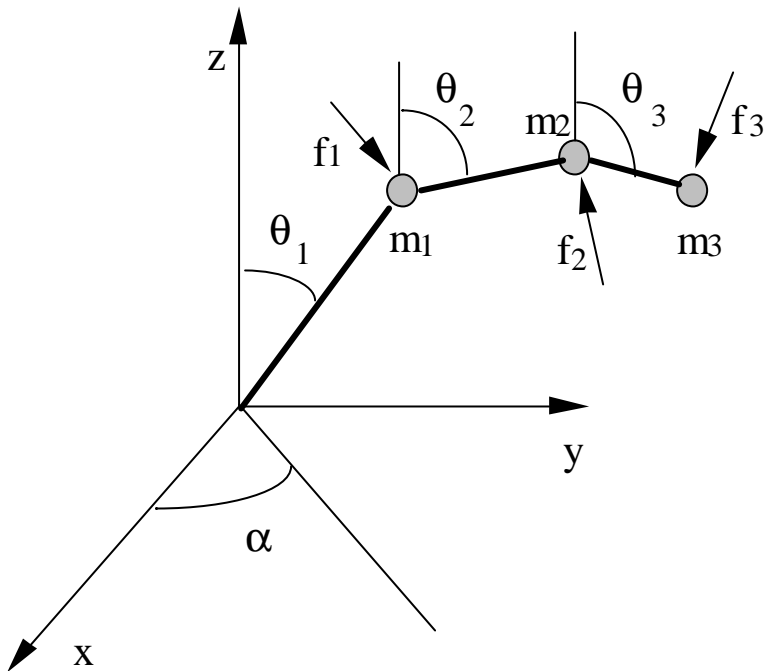


Figure 6 : Modèle mécanique du bras

Le déplacement de la i ème articulation est décrit par la coordonnée angulaire qui représente l'angle entre les deux segments adjacents, ainsi que par les vitesses et accélérations locales. Chaque articulation est soumise à des forces de commande externes ainsi qu'à des forces de gravité. Le mouvement de chaque articulation est ainsi fortement dépendant de toutes les autres articulations, et les forces affectent toutes les inerties du mécanisme.

Pour déterminer les lois du mouvement de ce système non linéaire à quatre degrés de liberté, on utilise le principe de Hamilton. Les équations différentielles décrivant le mouvement, ou équations de Lagrange, dérivent directement de ce principe (Landau & Lifshitz, 1976).

La fonction M , qui est ici l'expression analytique du point extrémité du bras en fonction des paramètres de contrôle (forces ou couples constituant le vecteur d'état) ne peut pas être obtenue directement. Il faut utiliser des méthodes numériques de résolution d'équations différentielles. Nous avons opté pour la méthode Range-Kutta appliquée au pendule triple.

4.2. Boucle adaptative de contrôle

La boucle adaptative du modèle géométrique est modifiée de manière à ce que de petits déplacements du bras résultent de l'application de forces à chaque articulation. On utilise la même fonction erreur entre la position de l'extrémité du bras et de la cible pour calculer la valeur du déplacement angulaire de chaque segment : les forces externes sont ensuite calculées en appliquant une fonction non linéaire aux dérivées successives des variables angulaires (Fig. 7).

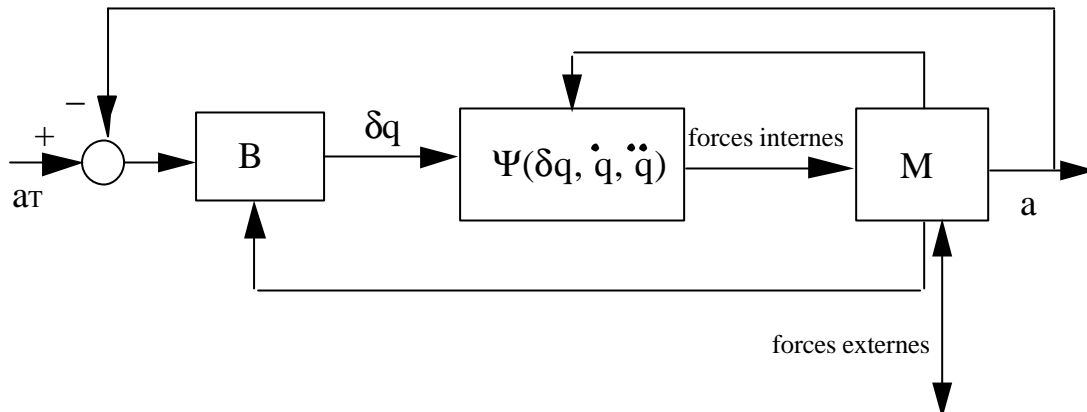


Figure 7 : Contrôle en force

B: fonction gradient

Ψ : fonction non-linéaire dépendant du vecteur angulaire q et de ses dérivées première et seconde.

a : vecteur d'observation et a_T : vecteur cible

Une solution pour réaliser des mouvements précis et assurer en même temps un comportement stable du système bouclé est d'appliquer à chaque articulation des impulsions de force, dépendant à chaque pas temporel des directions relatives du mouvement et du gradient du signal d'erreur. Il est intéressant de noter que l'on retrouve ces deux types de signaux d'erreur au niveau de deux mécanismes distincts dans la perception visuelle du geste : la vision centrale est sensible aux erreurs de position intervenant dans la phase d'ajustement terminale ; la vision périphérique est plus particulièrement impliquée dans le contrôle de la direction de la trajectoire par rapport à l'axe du regard (Jeannerod, 1984). De plus, ce mécanisme correctif dans lequel on réalise une succession d'impulsions de force est observé sur des données humaines (Gordon & Ghez, 1987 ; Freund & Büdingen, 1978).

Lorsque l'extrémité de la main se rapproche de la cible, les incréments angulaires et les vitesses angulaires décroissent simultanément, permettant aux forces d'atteindre de manière asymptotique des valeurs constantes qui compensent les forces inertielles.

Ce type de modèle permet de prendre en compte l'interaction du système avec l'environnement : en particulier il permet d'étudier le couplage mécanique fin entre la main et un objet extérieur. Par exemple si le système main-bras heurte un obstacle, la dynamique de l'impact est matérialisée par une force additionnelle agissant à la fois sur la dernière inertie du bras et en sens opposé sur l'objet percuté. Les résultats des simulations réalisées sont présentés dans le cadre de la synthèse de gestes de percussion appliqués à une membrane vibratoire également simulée.

5. PLANIFICATION DE MOUVEMENTS

L'organisation de séquences motrices plus complexes nécessite la caractérisation structurelle et paramétrique de l'appareil moteur à contrôler, mais également le couplage de la boucle de contrôle adaptatif à une commande symbolique de plus haut niveau. Ces deux fonctionnalités, commande et contrôle sont indissociables.

Dans le cadre des modèles développés précédemment, la partie inhérente à l'appareil moteur est représentée par la boucle de contrôle adaptatif. Le lien avec les niveaux supérieurs de planification est réalisé grâce à l'ouverture du modèle sur une consigne de commande. Le débit d'information propre à cette commande est bien plus faible que celui circulant à travers les signaux physiques de la boucle de contrôle. Cela permet d'accéder à un niveau de contrôle hiérarchiquement plus élevé et plus significatif par rapport à la tâche à réaliser.

Dans l'optique de la planification, nous avons étudié des gestes naturels plus complexes, notamment des gestes finalisés enchaînés et des gestes cycliques se déroulant dans l'espace cartésien. Ces gestes sont caractérisés par plusieurs points clé à atteindre séquentiellement. L'approche la plus immédiate consiste à gérer directement la commande en spécifiant une séquence de cibles spatio-temporelles.

La fonction potentielle à minimiser est modifiée par rapport à celle décrite précédemment en situation de pointage : c'est la somme pondérée de fonctions coût élémentaires, chacun des coûts correspondant à l'apparition d'une cible appartenant à la séquence initiale :

$$E(a, a_T) = \sum_{i=1}^n I_i(t) \cdot \|a - a_i^t\| \quad (8)$$

Les facteurs de pondération $I_i(t)$ sont des fonctions temporelles qui ont la forme de gaussiennes. Ils permettent de tenir compte de l'influence mutuelle de plusieurs cibles successives, et en particulier des phénomènes d'anticipation ou de co-articulation. Ces derniers caractérisent le fait que les articulateurs participant au geste sont prépositionnés en vue de l'atteinte de la (ou les) cible(s) ultérieure(s). Pour réaliser cette anticipation dans le cadre de cibles successives suffisamment "proches", il est possible de spécifier des fonctions $I_i(t)$ qui s'enchevêtrent, c'est-à-dire dont l'intersection durant un certain laps de temps n'est pas nulle. Cette méthode permet donc de fusionner une séquence de gestes simples de pointage, et fournit ainsi un moyen de passage de gestes discrets à des gestes continus et quasi-harmoniques. Notons la nécessité pour des mouvements cycliques de réduire la précision au niveau de l'atteinte de chaque cible prise séparément.

Remarque

Dans quelle mesure le phénomène d'anticipation peut-il générer des effets contextuels ? C'est immédiat et peut se montrer très facilement sur un exemple. Considérons les séquences de cibles suivantes : $\{c_1, c_2, c_3\}$ et $\{c'_1, c'_2, c'_3\}$ les c_i et c'_i étant respectivement distinctes. Il est évident que les vecteurs d'observation au niveau de la cible c_2 dans le contexte $[c_1 c_2 c_3]$ et dans le contexte $[c'_1 c_2 c'_3]$ sont différents. Ces phénomènes sont bien identifiés en production de la parole (co-articulation), où le système phonatoire est un autre type de système sensori-moteur.

Résultats

Nous avons spécifié quatre cibles placées sur un rectangle pour un même geste et réduit la précision associée à chacune des cibles. La commande est constituée ici d'une répétition de ces quatre cibles pondérées par des fonctions gaussiennes. Les gestes simulés sont des gestes répétitifs qui suivent approximativement une ellipse inscrite dans le rectangle. En jouant sur la précision d'atteinte des cibles, on fait varier la taille de l'ellipse. Sur ces gestes simulés, l'existence d'une relation analytique simple qui caractérise une dépendance forme-mouvement peut être montrée (Gibet & Marteau, 1994). Cette relation, mise en évidence par Viviani and Cenzato (1985) relie à tout instant le rayon de courbure à la vitesse instantanée du mouvement :

$$V(t) = K \cdot R(t)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

Les résultats des simulations (Gibet et Lebourque, 1994) sont mis en évidence sur les courbes de la figure 8. Il apparaît en effet une droite approximative reliant $\log(V(t))$ à $\log(R(t))$.

File Name : courbure.eps

Creator : gnuplot

Pages : (attend)

Figure 8 : Loi Puissance "un-tiers" : $V(t) = K \cdot R(t)^{1/3}$

Fonctions vitesse, rayon de courbure et coefficient K fonctions du temps (en s)

V(t) (---) en α .m/s, R(t) (—) en β .m et K (...) sans dimension

6. BILAN ET PERSPECTIVES

La complexité des différents mécanismes sensori-moteurs nous a amené à proposer un modèle comportemental qui rend compte à la fois de caractéristiques d'Automatisme et d'Intentionnalité observés dans les mouvements humains. L'automatisme traduit la faculté de produire de manière aisée et flexible des gestes sans avoir à calculer explicitement les paramètres qui gouvernent le système musculo-squelettique. L'intentionnalité peut être représentée par un niveau de commande plus symbolique qui tend à se rapprocher des modes de représentation mentale des gestes.

Le modèle présenté comporte deux niveaux de traitement associés à ces deux caractéristiques. Les traitements de bas niveaux mettent en jeu les données de retour sensoriel dans un processus continu d'ajustement de la dynamique physique du système effecteur. Les traitements de plus haut niveau peuvent être caractérisés en terme de programmation de cibles spatio-temporelles. Ces cibles évoluent plus lentement dans le temps que les signaux intervenant dans les boucles de régulation sensorielles. Elles traduisent un premier niveau de représentation symbolique du mouvement.

Dans le cadre des mouvements de pointage du bras, nous nous sommes particulièrement intéressé à l'intégration des rétroactions visuelles. Le modèle est constitué d'une boucle adaptative qui exploite les signaux d'erreurs entre la position de la cible à atteindre et la position de l'extrémité du bras pour corriger les variables d'état caractérisant le système dynamique.

En faisant interagir les deux modes de contrôle, on réalise donc un système autonome, capable de générer automatiquement des trajectoires naturelles du mouvement à partir de la spécification de commandes cibles dans un espace de représentation visuel. Les intérêts de ce type d'approche sont multiples :

Un mode de contrôle minimaliste : les mouvements des articulateurs ainsi que le séquençage temporel ne sont pas explicitement programmés ; ils sont le résultat de propriétés émergentes d'un système dynamique, contraint par un environnement physique dans l'espace et dans le temps. C'est pour cette dernière raison que le modèle est qualifié de synergétique.

Le débit d'information reste faible au niveau de la commande, comparativement à celui que l'on peut observer au niveau des organes effecteurs. Cette propriété permet de faire jouer à ce modèle le rôle d'interface entre les organes moteurs et les niveaux supérieurs de planification, où les symboles remplacent les signaux physiques.

Les mouvements générés présentent un caractère "naturel". Ceci est principalement dû à l'adjonction dans la boucle de contrôle d'une fonction gain non linéaire. Ce comportement induit par la fonction sigmoïde est conforme à celui de mécanismes neurophysiologiques. Par ailleurs cette fonction assure la stabilité de la boucle de contrôle et permet d'améliorer la précision lors de la phase terminale du mouvement.

En outre, on retrouve des propriétés caractéristiques de la cinématique des gestes humains de pointage de cibles : la loi de Fitts, l'isochronie, l'invariance des profils de vitesse et la "loi Puissance un-tiers" ont principalement été mises en évidence.

Les mêmes principes de contrôle ont été appliqués à deux modèles du bras articulé :

- un modèle géométrique du bras : les variables angulaires caractérisant chacune des articulations sont directement contrôlées par la boucle adaptative suivant une stratégie de descente du gradient.

- un modèle dynamique : les forces motrices sont calculées à partir du même signal d'erreur et suivant la même stratégie.

Le mode de contrôle restant indépendant des modèles d'application (modèles géométriques, dynamiques), on peut en déduire que les principes développés sont relativement généraux et permettent de résoudre un problème de contrôle non linéaire et multi-dimensionnel.

Les modèles développés sont applicables à la synthèse de mouvements humains nécessitant des stratégies de planification plus complexes. En particulier des mouvements finalisés complexes du membre supérieur ainsi que des mouvements quasi-harmoniques ont été simulés. L'étude s'oriente actuellement vers la génération de gestes comportant une structure sémantique tels que par exemple les gestes de la Langue des Signes Française, afin d'étudier plus finement les niveaux symboliques de la commande.

Enfin, certains éléments projectifs et non linéaires de la boucle de contrôle sensori-motrice pourront être remplacés par des modèles neuromimétiques. Ceci permettra d'identifier qualitativement et quantitativement les éléments non linéaires dont on ignore *a priori* la structure interne, et d'enrichir la représentation du système de fonctions d'apprentissage.

Sylvie GIBET
LIMSI-CNRS, BP 33
91403 ORSAY Cedex

Pierre-François MARTEAU
IRP, 1, rue des Peupliers
78370 PLAISIR

Bibliographie

- ABEND, W., BIZZI, E., MORASSO, P. (1982). Human arm trajectory formation, *Brain*, 105, pp. 331-348.
- ATKESON, C.G., HOLLERBACH, J.M. (1985). Kinematic features of unrestrained vertical arm movements, *Journal of Neuroscience*, 5(9), pp. 2318-2330.
- BEGGS, W.D.A., HOWARTH, C.I. (1972). The movement of the hand towards a target, *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 24, pp. 448-453.
- BERNSTEIN, N.A. (1967). *The coordination and regulation of movements*, Pergamon Press, London.

- BULLOCK, D., GROSSBERG, S. (1988). *Neural dynamics of planned-arm movements : emergent invariants and speed accuracy properties during trajectory formation*, *Neural Networks and Natural Intelligence*, Ed S. Grossberg, MIT Press.
- FITTS, P.M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement, *Journal of Experimental Psychology*, 47(6), pp. 381-391.
- FREUND, H.J. & BÜDINGEN, H.J.(1978). The relationship between speed and amplitude of the fastest voluntary contractions of human arm muscles, *Experimental Brain Research*, 31, pp. 1-12.
- GIBET, S., MARTEAU, P.F. (1994). A Self-Organized Model for the Control, Planning and Learning of Nonlinear Multi-Dimensional Systems Using a Sensory Feedback, *Journal of Applied Intelligence*, 4, pp. 337-349.
- GIBET S., LEBOURQUE T.(1994). Automatic motion control, Fifth Eurographics Workshop on Animation and Simulation, Oslo, Norway.
- GORDON, J., GHEZ, C. (1987). Trajectory control in targeted force impulses, III: Compensatory adjustments for initial errors", *Experimental brain research*, 67, 253-269.
- HAKEN, H. (1988). *Information and Self-Organization. A Macroscopic Approach to Complex Systems*, Ed. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- JEANNEROD, M. (1984). The timing of natural prehension movements, *Journal of Motor Behavior*, 16(3), pp. 235-254.
- JORDAN, M. (1989). Indeterminate motor skill learning problems, *in Attention and Performance XIII*, Ed. Jeannerod M., MIT Press, Cambridge.
- KELSO, J.A.S., HOLT, K.G. (1980). Exploring a vibratory systems analysis of human movement production, *Journal of Neurophysiology*, 43, pp. 1183-1196.
- LANDAU, L.D., LIFSHITZ, E.M. (1976). *Mechanics. A course of theoretical physics*, Vol. 1, Pergamon Press.
- SCHMIDT, R.A. (1982), *Motor control and learning*, Champaign, IL, Human Kinetics Press.
- VIVIANI, P., TERZUOLO, C. (1982), Trajectory determines movement dynamics, *Neuroscience* , 7, pp. 431-437.
- VIVIANI, P., CENZATO, M. (1985). Segmentation and coupling in complex movements. *Journal of Experimental Psychology*, 11, pp. 828-845.
- ZELAZNIK, H.N., SCHMIDT, R.A., GIELEN, S.C.A.M. (1987), Kinematic properties of rapid aimed head movements, *Journal of Motor Behavior*, 18, pp. 353-372.