

MODELISATION ARMAX DE LA REPONSE REFLEXE A LONGUE LATENCE DE L'AVANT-BRAS CHEZ L'HOMME

M. GUGLIELMI - B. DEVAUCHELLE

Laboratoire d'Automatique de NANTES URA 823 Ecole Nationale de Mécanique
1 Rue de la Noë 44072 NANTES Cedex 03

Membre du GRECO Traitement du Signal et des Images

RESUME:

La réponse à l'étirement mécanique brusque d'un muscle (biceps ou triceps) laisse apparaître une réponse précoce du type réflexe. La partie correspondante de l'électromyogramme recueilli est analysé. Nous présentons, ici, un modèle de comportement constitué par la sortie d'un filtre linéaire dont l'entrée est une impulsion. L'identification des paramètres de la forme d'état correspondante est réalisée par la minimisation d'un critère quadratique J élaboré à partir de l'erreur entre la sortie du modèle ARMAX et le signal mesuré. La méthode de minimisation employée est celle du gradient conjugué avec évaluation explicite du gradient de J . En ce qui concerne l'ordre du système ainsi que l'initialisation de l'algorithme d'optimisation, nous utilisons une procédure de détection du rang de la matrice de HANKEL associée au signal enregistré.

La méthode proposée a été testée avec succès sur un échantillon de signaux enregistrés correspondants à différentes conditions d'expérience sur plusieurs personnes.

SUMMARY:

The muscular response from a stretched muscle (biceps or triceps) shows a first component which is probably due to a reflex reaction. The electromyogram measured may be analysed. We present, here, a "black box" model defined by a linear filter which input is an impulse. The corresponding state model is identified by the means of a minimization of a criterion J computed with the error between the model output and the signal. The method used is a conjugate gradient one with an explicit formula of the gradient of J . The model order and the initial point of the minimisation algorithm are obtained from the HANKEL matrix of the signal.

Our method has been successfully used on several trials at different persons with several experimental conditions.

I-INTRODUCTION:

L'objectif global de cette étude consiste à essayer de préciser, chez l'homme sain, le rôle des informations sensitives périphériques, en particulier proprioceptives, dans la régulation d'un mouvement.

Après avoir défini, dans le paragraphe II, les moyens d'investigation ainsi que le protocole employés, nous rappelons, au paragraphe III, la méthode que nous utilisons pour obtenir les paramètres d'une fonction de transfert à partir d'une séquence de pondération. Le paragraphe IV est consacré aux résultats concernant les premiers enregistrements traités. Enfin, en conclusion, nous proposons une suite au travail présenté ici.

II- PRINCIPE et MOYENS d'INVESTIGATIONS:

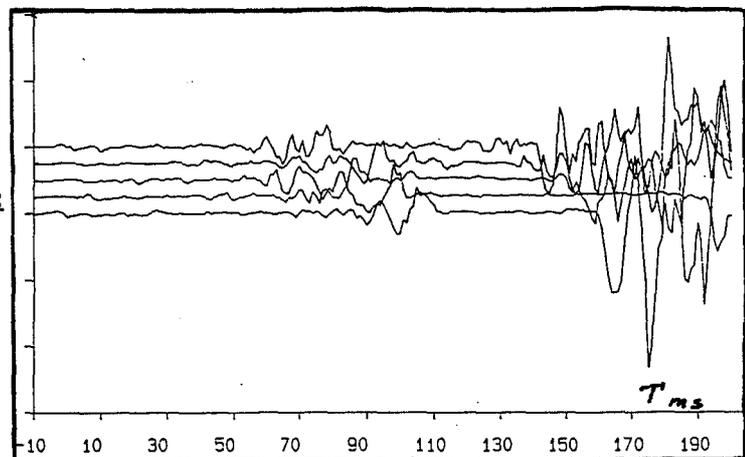
La méthodologie que nous avons retenue consiste à effectuer, à l'insu du sujet expérimenté (auquel il est demandé de réaliser une tâche motrice précise) des perturbations plus ou moins importantes. Le mouvement étudié est celui de l'avant-bras en rotation horizontale dont la régulation est assuré par le couple agoniste-antagoniste biceps/triceps (cf [1] pour un récapitulatif)

Dans un premier temps, nous avons développé un "capteur" permettant d'enregistrer tous les paramètres cinématiques et dynamiques intervenant au cours du mouvement [2]. L'activité

musculaire est mesurée par des électrodes de surface collées sur les muscles concernés.

Le premier protocole d'enregistrement utilisé est très simple: le sujet adopte une position de l'avant-bras qui sert de référence. Il garde cette position. Au bout d'un temps aléatoire, il lui est appliqué un échelon de couple dont la valeur est inconnu du sujet. Celui-ci doit, alors que le couple reste maintenu, revenir le plus vite possible à sa position d'origine.

Les résultats obtenus [3] présentent une similitude quant à l'électromyogramme recueilli.

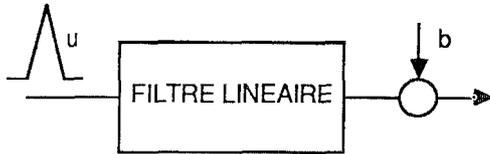


Nous avons décidé de nous intéresser, en premier lieu, à la partie précoce de cette réponse (entre 40ms et 100ms). La caractérisation de ce



signal dans un but de discrimination a été entreprise sur la base de quelques paramètres [1].

Mais, en examinant l'origine de ce signal, et en tenant compte du fait qu'il n'y a que peu d'unités motrices mises en œuvre [4], on peut envisager de le modéliser sous la forme de la sortie d'un filtre linéaire linéaire, excité par une impulsion, sur laquelle vient s'ajouter un bruit:



Le problème revient donc à déterminer l'ordre et à identifier les coefficients de la fonction de transfert.

II-MODELISATION et IDENTIFICATION:

Soit un système discret déterministe (Σ) linéaire stationnaire monovarié. Celui-ci peut être représenté de façon équivalente par les trois formes mathématiques:

1) Externe (transfert)

$$Y(z) = H(z) U(z) = \frac{B(z)}{A(z)} U(z)$$

(B(z) et A(z) premiers)

2) Séquence de pondération

$$\{\dots, h_k, \dots\} \quad u_k = \delta_k$$

3) Modèle interne:

$$\begin{cases} X_k = \Phi X_{k-1} + \Gamma u_k \\ Y_k = H x_k \end{cases}$$

Si le passage de 3) vers 1) ou/et 2) ne pose aucune difficulté théorique, il n'en est pas de même du passage de 1) ou 2) vers 3). Ce problème classiquement appelé **réalisation** met en évidence une double infinité de solutions. En effet, la fonction de transfert $H(z)$ et la séquence de pondération correspondantes à un modèle d'état sont déjà invariantes par rapport à un changement de base. En outre, il est possible d'introduire artificiellement des états dans un modèle interne sans en modifier les deux autres représentations. Aussi, dans le cas où le point de départ est supposé être 1) ou 2), on s'attache à obtenir un modèle d'état de dimension la plus petite possible. On montre qu'il est possible de résoudre le problème complet en deux étapes successives:

a) détermination de la dimension minimale de l'état

b) obtention d'un modèle d'état, de cette dimension, ayant une certaine structure.

Pour l'étude présentée ici, nous supposons que le point de départ connu est la séquence de pondération et que le but recherché est un modèle d'état dont la structure est telle qu'il y ait une relation simple entre les paramètres du triplet $\{\Phi, \Gamma, H\}$ et les coefficients de la fonction de transfert.

En ce qui concerne la première étape, les méthodes de résolution se basent toutes sur la recherche du rang de la matrice de HANKEL formée avec les éléments de la séquence de pondération. Quant à la deuxième étape, les solutions diffèrent

en fonction des hypothèses faites a priori.

III-1: Détermination d'une réalisation minimale:

Le résultat fondamental utilisable est que la dimension minimale de l'état associé à une séquence de pondération $\{\dots, h_k, \dots\}$ correspond au rang de la matrice de HANKEL de dimension infinie:

$$H_\infty = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 & \dots \\ h_2 & h_3 & h_4 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

Dans le cas idéal (sans bruit), le rang de H_∞ peut être obtenu à partir d'une sous-matrice H_N ($N \gg n$), en appliquant tout simplement une technique d'analyse numérique basée sur les transformations orthogonales de HOUSEHOLDER qui assurent une très bonne stabilité numérique.

Ensuite, le calcul d'un triplet $\{\Phi, \Gamma, H\}$ de cette dimension peut être fait en imposant la structure arbitraire suivante sur le modèle d'état:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_1 & a_2 & \dots & \dots & a_n \end{bmatrix} \quad \Gamma = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \dots \\ h_n \end{bmatrix}$$

$$H = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

Cette forme compagnon, correspondante à un choix d'une base particulière dans l'espace des états est par structure observable et correspond à un nombre minimal de paramètres $2n$. En outre, la relation de ses paramètres avec les coefficients de la fonction de transfert est très simple.

II-2: Détermination d'un modèle d'état en cas de bruit:

Dans le cas idéal présenté ci-dessus, l'algorithme n'est fonction que de la précision numérique du calculateur utilisé ainsi que de l'erreur de quantification sur la séquence de pondération. Dans le cas réel, cette séquence est entachée d'un bruit, certains auteurs se sont alors intéressés à la recherche d'un modèle stochastique de l'environnement. Mais la résolution nécessite de nouvelles hypothèses de travail qui sont quelquefois toutes aussi difficiles à vérifier dans un contexte réel. Nous avons choisi de conserver le point de vue déterministe. Cela conduit alors à représenter le système réel (Σ) par un modèle réduit d'ordre n . La valeur de n qui est obtenue dépend alors d'un critère mesurant le degré d'indépendance des colonnes de la matrice de HANKEL. Il suffit donc de remplacer dans l'algorithme initial, la grandeur représentative de l'erreur machine par une quantité plus importante. La différence qu'il existe alors entre l'objet, défini par $\{\Phi, \Gamma, H\}$, et le modèle d'état obtenu est exprimé en termes d'erreurs d'équation n'ayant pas de signification physique. Nous sommes donc amenés à définir un critère "d'erreur de sortie" que l'on peut minimiser.

IV: DETERMINATION d'un MODELE D'ETAT OPTIMAL:

Le problème se pose alors en ces termes: étant donné une séquence de pondération d'un processus, quel est, pour une dimension donnée n , le modèle d'état qui minimise une fonctionnelle de l'écart entre la séquence initiale et la suite des paramètres de MARKOV du modèle.

Le critère retenu est:

$$J = \sum_{k=1}^{k=N} (h_k - \hat{h}_k)^2$$

où h_k est la séquence de pondération donnée et \hat{h}_k la suite des paramètres de MARKOV associée au modèle d'état.

$$\text{On a : } \hat{h}_k = H \Phi^{k-1} \Gamma$$

et on cherche $\{\Phi^*, \Gamma^*\}$ de forme compagnon observable qui minimise J . La recherche du modèle optimal est donc transformé en un problème d'optimisation non linéaire. Il est ici possible d'appliquer le principe de séparation des variables introduit par GOLUB, ce qui conduit au critère

projeté \bar{J} . En effet, le critère est quadratique par rapport aux paramètres de Γ : ce qui rend la solution explicite. D'où l'algorithme suivant:

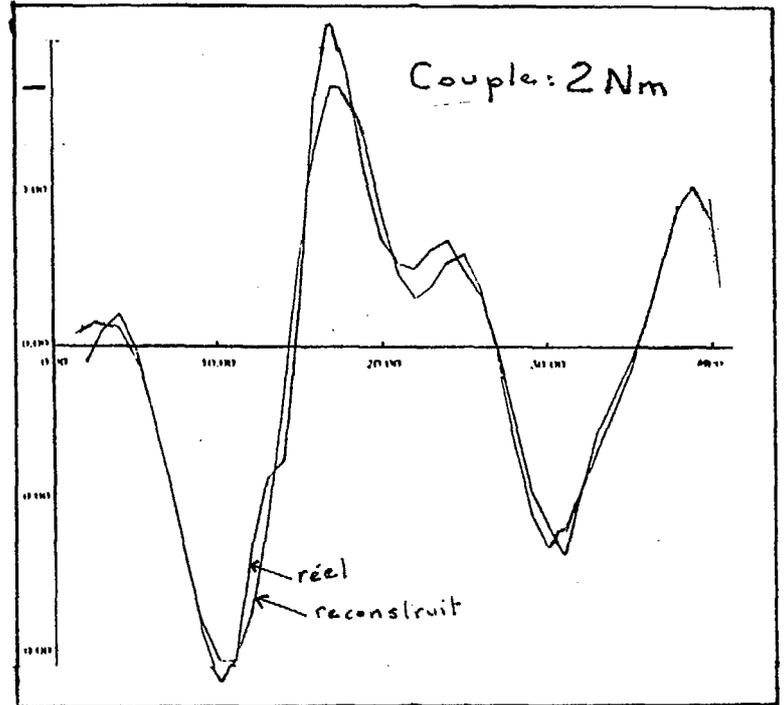
$$J^* = \min_{x(\Phi)} \bar{J} \text{ où}$$

$$\bar{J} = \min_{x(\Gamma)} \{J(x(\Gamma), x(\Phi))\}$$

Il est possible, en outre, dans ce cas, de calculer explicitement le gradient de $J(x(\Phi))$ par rapport à ses paramètres. Enfin, pour initialiser l'algorithme d'optimisation, on applique la procédure définie en III-1.

V-RESULTATS:

La méthode a été appliquée sur plusieurs réalisations d'E.M.G. enregistrés sur différentes expériences identiques [5]. Les couples perturbateurs sont en échelon d'une amplitude de 1Nm ou de 2Nm. Préalablement à l'identification, les signaux ont été lissés en appliquant un filtre du premier ordre de constante 0.7. Les figures suivantes montrent le type de résultat obtenu:



Les fonctions de transfert obtenues sont, en général, d'un degré 3 sur un degré 8. Cependant, on doit y retrouver le pôle dû au pré-filtrage des signaux. Nous avons donc calculé les pôles et zéros des transmittances obtenues afin de l'éliminer. Sur les éléments restants, nous essaierons de classer les modèles obtenus.

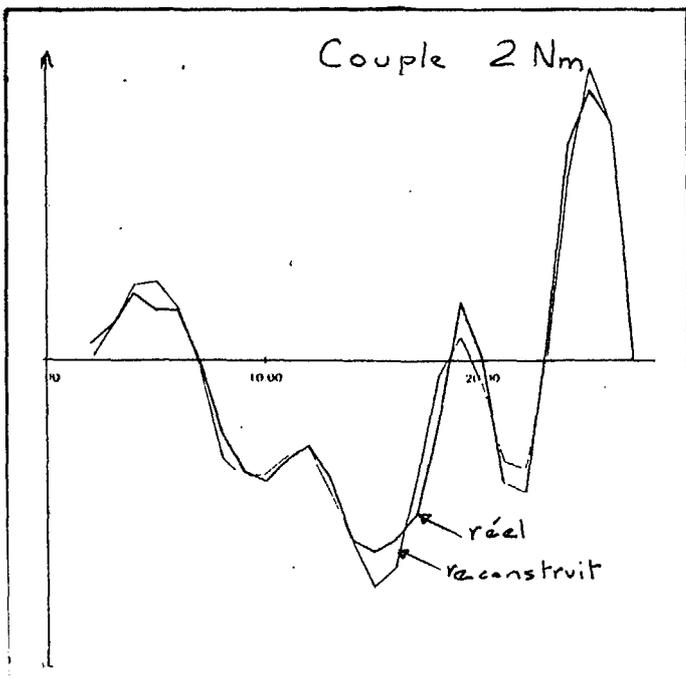
VI-CONCLUSION ET PERSPECTIVES:

La méthode présentée ici semble apte à modéliser la réponse réflexe correspondante à l'étirement mécanique brusque d'un muscle. Les premiers résultats encourageants obtenus demandent à être confirmés par des essais systématiques. Les réponses espérées sont que la modélisation et l'identification obtenues soient peu sensibles à divers paramètres expérimentaux (emplacement des électrodes, taille et poids du sujet, amplitude du couple perturbateur...).

Parallèlement, les recherches vont s'orienter dans deux directions: la première consiste à déterminer le "meilleur" protocole d'obtention des E.M.G. (forme et amplitude du couple, objectif du sujet...). Le deuxième axe consiste à essayer d'établir une "norme" avant d'étudier la réponse réflexe de sujets pathologiques. Là, se situera l'utilisation de méthodes de classification au pouvoir discriminant suffisant.

BIBLIOGRAPHIE:

- 1- **I-CREMIEUX-RICHARD:** Mise au point du prototype d'un dispositif d'étude du mouvement de l'avant-bras: première application à l'étude des réponses à l'étirement
D.E.A. Sciences et techniques du handicap et de la rééducation
Université de bourgogne Oct 88
- 2- **R-BOISLIVEAU:** Contribution à l'analyse du mouvement de l'avant-bras chez l'homme: étude et réalisation d'un dispositif d'acquisitions et de traitement de l'E.M.G.
Mémoire C.N.A.M. NANTES déc 88





- 3- M.GUGLIELMI and al:** Modélisation et identification d'E.M.G. de surface obtenus lors d'un mouvement perturbé de l'avant-bras
Rapport de contrat G.B.M.
Nov88
- 4: B. DEVAUCHELLE:** Caractérisation de la réponse musculaire précoce.
D.E.A. E.N. S.M. NANTES Oct 88
- 5- M.GUGLIELMI and al:** First results concerning early motor reaction during perturbed forearm movement.
10ème Congrès IEEE/EMBS
New-Orleans Nov 88
- 6- R.E. KALMAN - ARBIB:** Topics in mathematical system theory
Mac Graw Hill 1969
- 7- R.S. BUCY - R.E. ACKERMANN:** Canonical minimal realizations of impulse response sequences.
Information and control Vol 19
- 8- G.H. GOLUB - V. PEREYRA:** Differentiation of pseudoinverse, separable non linear least square problems and other tales.
Note personnelle
- 9- M.GUGLIELMI:** Contribution à la détermination et à la mise en œuvre d'algorithmes de réalisation minimale
Thèse D.I. E.N.S.M. NANTES
4 Nov 76
- 10-A.PEUS:** Modélisation de signaux acoustiques
D.E.A. E.N. S.M. NANTES Oct 88

Ce travail a obtenu des soutiens financiers du pôle régional G.B.M. grand Ouest et de la Fondation de France.