Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 76 (1985)

Heft: 15

Artikel: Algorithmes de commande adaptive pour machines

Autor: Hulliger, P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904651

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Algorithmes de commande adaptative pour machines

P. Hulliger

Le but de cet article est de présenter le concept de «commande adaptative» appliqué à la commande des machines et d'en montrer les avantages. En premier lieu l'aspect de la commande proprement dite est développé en faisant ressortir les deux objectifs de poursuite et de régulation; cette distinction permet d'éliminer le phénomène de traînée. Le caractère autoajustable de cette commande est ensuite abordé. Les paramètres du système n'ont pas besoin d'être connus à l'avance, l'algorithme s'adaptant de lui-même à la machine, même dans le cas où ses paramètres ainsi que les perturbations agissant sur elle varient dans le temps. Des simulations de ces algorithmes appliqués à une commande d'axe de machine-outil sont présentées.

Im vorliegenden Aufsatz wird die Anwendung des Konzeptes der «adaptiven Regelung» auf Maschinensteuerungen behandelt, und deren Vorteile werden aufgezeigt. Zuerst wird die eigentliche Steuerung diskutiert, wobei zwischen Nachlauf und Regelung unterschieden wird. Dies ermöglicht es, den sogenannten Schleppfehler auszuschalten. Anschliessend wird das Adaptionsvermögen der Steuerung behandelt. Die Systemparameter müssen nicht im voraus bekannt sein, da sich der Algorithmus der Maschine anpasst, selbst wenn die Systemparameter und die Störungen sich zeitlich verändern. Die Simulation dieser Algorithmen im Falle der Steuerung einer Werkzeugmaschine wird gezeigt.

Conférence présentée lors de la journée ASE/ASSPA «Commande numérique des machines», le 19 mars 1985 à Lausanne. Le recueil complet des conférences de la journée peut être obtenu à l'ASE, Gestion de l'Association.

Adresse de l'auteur
M. *Pascal Hulliger*, Institut d'Automatique, EPFL, 1015 Lausanne.

1. Introduction

L'utilisation de nouvelles techniques de commande connaît aujourd'hui un essor certain. Ceci est dû aux développements spectaculaires dans le domaine de la micro-informatique et des grands progrès sur le plan théorique. D'une part, certains microprocesseurs se trouvant sur le marché actuellement voient leur rapidité de calcul fortement augmentée et sont très bien conditionnés pour les opérations étant à effectuer dans les algorithmes modernes. D'autre part, des études théoriques ont permis de réduire la complexité de calcul de ces algorithmes. Il découle de ces deux facteurs que les nouvelles techniques de commande ne sont plus exclusivement réservées à des processus lents (p.ex. thermiques), mais commencent à pouvoir être mises en œuvre sur des processus rapides, ces derniers nous intéressant plus particulièrement dans cet article. Pour que de telles méthodes soient crédibles, il est indispensable de montrer les possibilités et les avantages qu'elles offrent dans le cas où elles sont appliquées sur un système réel.

2. Description schématique de la commande

Le cas d'un asservissement est traité car c'est un cas plus général. En fait, il y a deux objectifs bien distincts: la *poursuite* d'une trajectoire définie à l'avance et la *régulation* autour de celle-ci.

Lorsque l'on veut suivre une trajectoire de consigne, on peut distinguer quatre souces d'erreurs:

1) la dynamique du système,
2) les perturbations d'état connues,
3) les perturbations d'état inconnues,
4) les perturbations paramétriques.

La première provoque les erreurs de traînée, bien connues dans le domaine de la machine-outil, lorsque l'on utilise un régulateur conventionnel pour délivrer la commande. Cette erreur peut être très importante suivant la trajectoire que l'on essaie de suivre. En imposant une vitesse à un système asservi, il faut lui fournir une certaine commande. Un régulateur conventionnel (p.ex. PD proportionnel-différentiel) ne peut fournir cette commande que s'il y a une erreur. Cette erreur s'appelle erreur statique du premier ordre. Il en est de même si l'on impose une accélération, une erreur statique du deuxième ordre viendra s'ajouter. En mettant un intégrateur dans le régulateur, on ne résout pas tous les problèmes puisque son effet ne se produit qu'après un certain temps, et une erreur de traînée pourra subsister.

Les deuxième et troisième sources d'erreurs agissent sur les variables à régler du système. Diverses causes en sont les forces de gravité, les forces parasites, les forces d'usinage, les frottements secs, etc.

Les perturbations agissant sur la dynamique du système sont la quatrième source d'erreurs. Un exemple souvent rencontré dans la pratique est la variation de la température, celle-ci pouvant provoquer d'importantes variations sur certains paramètres d'un système. Un autre exemple rencontré aussi souvent est le cas où les paramètres du système dépendent de son point de fonctionnement (non-linéarités). L'application d'une loi de commande linéaire, comme par exemple le régulateur PID, permet de contrer les perturbations d'état mais ses performances se dégradent lorsque des perturbations paramétriques agissent sur le système. Si ces perturbations sont suffisamment grandes, elles peuvent même provoquer l'instabilité.

Une commande performante est celle qui réalise l'objectif qu'on lui assigne. Pour atteindre les deux objectifs de poursuite et de régulation, il faut avoir une commande qui permette d'éliminer aux mieux et rapidement

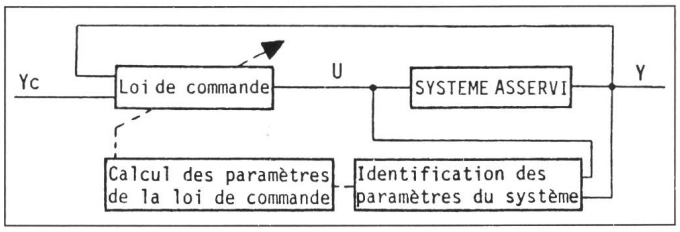


Fig. 1 Schéma de commande adaptive

toutes les erreurs citées ci-dessus. En premier lieu, il faut avoir une très bonne connaissance du système asservi. Pour cela, on le représente par un modèle paramétrique linéaire qui réalise un bon compromis entre sa simplicité et les erreurs de modélisation. Un algorithme d'identification permet, sous certaines conditions, d'estimer les paramètres de ce modèle en temps réel de manière à ce qu'il soit le plus représentatif du système. L'algorithme utilise uniquement les couples entrées-sorties du système. L'effet des perturbations paramétriques peut être éliminé en ajustant en temps réel les paramètres de la loi de commande en fonction de ceux du modèle. Ainsi apparaît le concept de *commande adaptative* dont un des schémas possibles est représenté par la figure 1. Le modèle identifié établit en fait une relation de cause à effet entre la commande appliquée au système et sa sortie. Il est donc possible de prédire la commande qu'il faut fournir au système pour que sa sortie suive une trajectoire désirée à l'avance.

Pour atteindre l'objectif de poursuite, une commande en boucle ouverte, que l'on peut appeler commande a priori, est superposée à la commande délivrée par le régulateur, cette dernière servant à atteindre l'objectif de régulation, c'est-à-dire les perturbations d'état. L'effet de traînée est donc annulé. D'autre part, avoir un modèle représentant bien le système permet d'avoir un régulateur plus performant comme: placement des valeurs propres, minimum de variance généralisé ou horizon fuyant. La figure 2 décrit plus précisément le bloc loi de commande de la figure 1.

En supprimant les erreurs de traînée, on supprime les erreurs de forme des pièces usinées en contournage, ce qui facilite grandement la synchronisation des axes d'une machine-outil multi-axes. Une structure modulaire et hiérarchisée peut donc être obtenue pour les algorithmes de commande d'une telle machine, si bien que ce genre d'algorithme peut être implanté sans modification sur une machine à 1, 2 ou n axes. Chaque axe comportera son propre microprocesseur dans lequel sera implanté un algorithme de commande dont la représentation schématique se trouve sur la figure 1. La seule liaison entre les axes sera la synchronisation des trajectoires respectives. Un microprocesseur se situant à un niveau supérieur s'en chargera. La figure 3 représente l'architecture algorithmique d'une machine-outil multi-axes.

3. Loi de commande

Dans ce paragraphe, une stratégie de commande est présentée pour des systèmes caractérisés par un modèle linéaire dans une certaine plage de fonctionnement. Cette commande peut être assimilée à un placement des valeurs propres du système bouclé avec compensation des erreurs de traînée.

Dans un environnement déterministe, on peut représenter, dans le domaine temporel, le comportement des entrées-sorties d'un tel système par l'équation récurrente

$$A(q^{-1})\cdot y(t+d) = B(q^{-1})\cdot u(t) + c_1 \qquad (1)$$

t	temps discret normalisé par rapport à la période d'échantillonnage,
d	retard pur du système (nombre entier de périodes d'échantillonnage $\geqslant 1$),
q^{-1}	opétateur retard ($y(t-1) = q^{-1}\cdot y(t)$),
$A(q^{-1})$	polynôme de degré n où n est l'ordre du modèle,
$B(q^{-1})$	polynôme de degré m,
c_1	constante pouvant être due à une perturbation constante,
$y(t+d)$	sortie du système au temps $(t+d)$,
$u(t)$	commande imposée au système au temps t.

Une loi générale linéaire de commande conciliant contre-réaction et commande a priori est donnée par l'équation

$$R(q^{-1})\cdot u(t) = T(q^{-1})\cdot y_c(t+d) - S(q^{-1})\cdot y(t) + c_2 \qquad (2)$$

$R(q^{-1})$, $T(q^{-1})$ et $S(q^{-1})$ polynômes de degré r, t et s.

$y_c(t+d)$ consigne que le système devra atteindre au temps $(t+d)$.

Fig. 2 Description de la commande

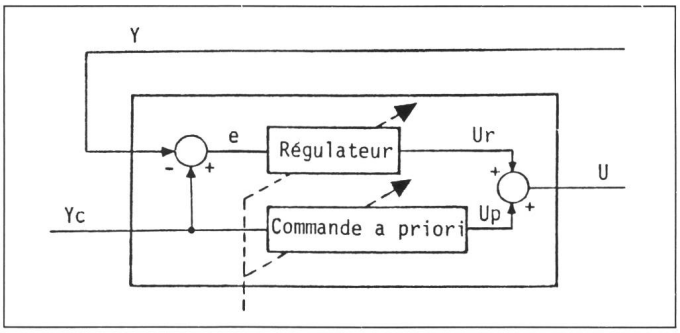
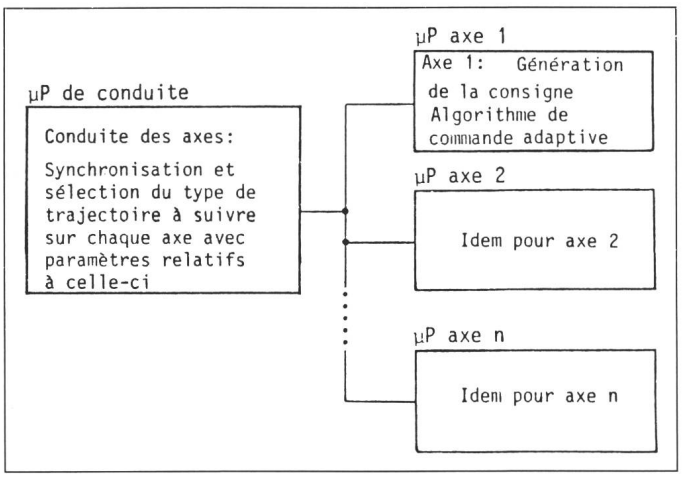


Fig. 3 Architecture d'une machine-outil multi-axes



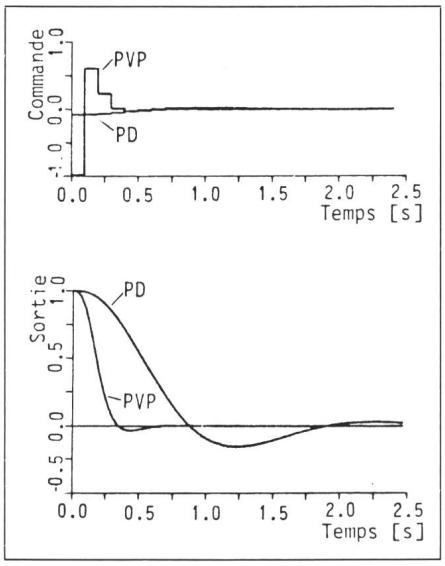


Fig. 4 Comparaison d'un régulateur PD avec un régulateur par placement des valeurs propres PVP sur un système du 3e ordre

Les deux objectifs de poursuite et de régulation peuvent être résumés dans l'équation

$$A_m(q^{-1})\cdot[y_c(t+d)-y(t+d)] = 0 \qquad (3)$$

A_m est le polynôme caractéristique définissant la dynamique de la réponse aux perturbations. Il doit être choisi à l'avance suivant le type de réponse que l'on veut obtenir, ses zéros correspondant aux valeurs propres du système bouclé. On peut montrer que pour satisfaire (3) les polynômes R et S doivent satisfaire l'identité polynomiale

$$A_m = S\cdot q^{-d} + R'\cdot A \qquad (4)$$

avec: $R = R'\cdot B$ (5)

Le polynôme T et la constante c_2 doivent satisfaire les équations

$$T = A_m \qquad (6)$$

$$c_2 = -R'(1)\cdot c_1 \qquad (7)$$

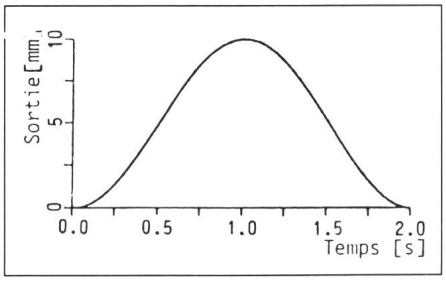


Fig. 5 Trajectoire à suivre sur un des axes pour décrire un cercle

Diamètre du cercle 10 mm
Vitesse tangentielle 1 m/min

Il est à noter que ce type de commande peut s'appliquer seulement sur des systèmes à minimum de phase (le polynôme B à tous ses zéros à l'intérieur du cercle unité). Un choix correct du degré de B et du retard pur d du modèle d'identification permet de satisfaire cette hypothèse.

4. Identification des paramètres du système

Il existe plusieurs méthodes d'identification en temps réel. Celle qui réalise un bon compromis entre sa simplicité et les résultats qu'elle donne est la méthode des moindres carrés récurrents avec facteur d'oubli. Il s'agit en fait de minimiser l'erreur de prédiction de la sortie du système, dont le modèle est donné sous (1), en ajustant les paramètres de A et B, étant connues les entrées-sorties du système au cours du temps. Les équations peuvent facilement être trouvées dans la littérature.

5. Mise en œuvre du schéma de commande adaptative

L'algorithme d'identification est sûrement la partie la plus délicate à mettre en œuvre dans un schéma de commande adaptative. Pour que le bon fonctionnement d'un tel algorithme soit assuré, il faut que la commande délivrée au système soit suffisamment excitante. Pour cette raison, il faudra soit prévoir une procédure d'identification fonctionnant d'une manière périodique, soit déconnecter l'algorithme en maintenant les paramètres identifiés constants, lorsqu'un critère jugera les entrées non existantes. D'autre part, le nombre de paramètres à identifier ne doit pas être trop élevé, ceci pour deux raisons. Le temps de calcul augmente avec le carré du nombre de paramètres identifiés et la stabilité de ce genre d'algorithmes est meilleure avec un nombre restreint de paramètres. Un modèle d'ordre réduit est donc en général utilisé.

La constante c_1 du modèle (équ. 1), qui peut être représentative d'un frottement sec et d'une force d'usinage par exemple, peut, quant à elle, être estimée en permanence même si l'algorithme d'identification est déconnecté.

Chronologiquement, le calcul de la commande à chaque période d'échantillonnage se déroule selon les étapes suivantes:

1) Adaptation des paramètres de A et B si l'algorithme d'identification est connecté.
2) Estimation de c_1 du modèle (1).
3) Calcul des paramètres de la loi de commande avec les équations (4), (5) et (7).
4) Calcul de la commande $u(t)$ avec l'équation (2).

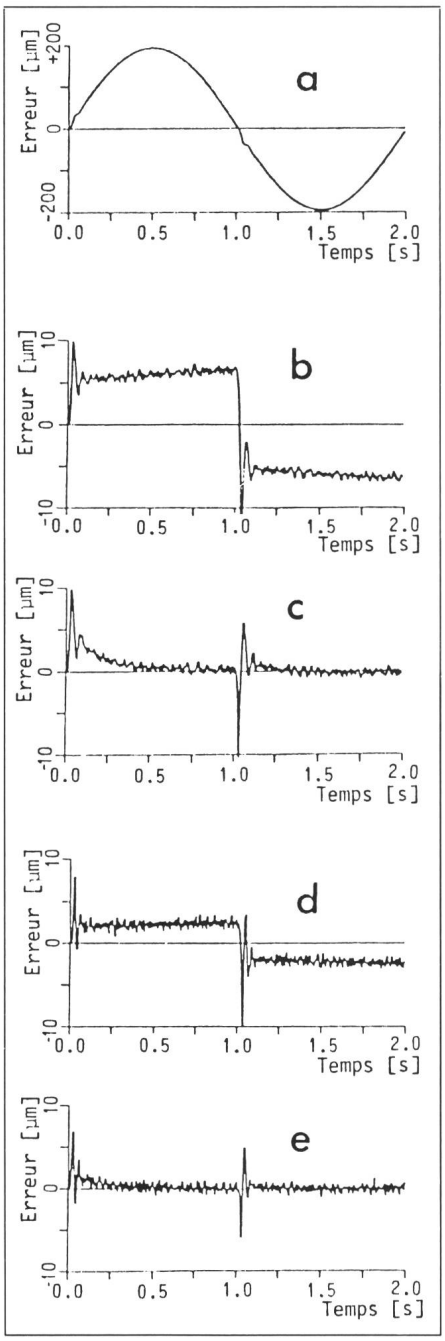


Fig. 6 Erreurs par rapport à la trajectoire désirée. Comparaison de plusieurs lois de commande

a PD (proportionnel/différentiel)
b PD avec commande a priori
c PD avec commande a priori + estimation des perturbations constantes
d PVP (placement des valeurs propres) avec commande a priori
e PVP avec commande a priori + estimation des perturbations constantes

6. Résultats obtenus en simulation

La figure 4 montre l'amélioration qu'une commande par placement des valeurs propres peut apporter. Un écart de la sortie d'un système par rapport à sa valeur de consigne est simulé. Le système est du 3e ordre avec des constantes de temps de 0.1, 0.5 [s] et une intégration pure. La période d'échantillonnage est de 0.1 [s].

Les figures suivantes montrent la simulation d'un axe de machine-outil moderne composé d'un moteur électrique à courant continu, d'une vis à bille et d'une table montée sur des glissières. La position de la table est mesurée par un capteur incrémental dont la résolution est de 1 μm. Le modèle de simulation est du 5e ordre. Il tient compte des inerties et rigidités des divers éléments, des frottements secs agissant sur eux, et de la résolution du capteur. La simulation d'un des deux axes de la machine est représentée dans une opération de contournage où la trajectoire à suivre est un cercle (fig. 5). Cette opération est assez representative des difficultés que l'on peut rencontrer au point de vue du réglage, le système devant subir des accélérations et voir son déplacement changer de sens (inversion des frottements secs). Dans ces essais, la vitesse d'avance tangentielle de contournage simulée est de 0,017 m/s (1 m/min). C'est une vitesse élevée pour une opération de ce genre; mais le but est de montrer les performances de ces algorithmes.

La figure 6 montre les erreurs obtenues par rapport à la trajectoire voulue durant cette opération avec différentes lois de commande. La période d'échantillonnage pour les cinq essais est de 5 ms. L'essai a est fait avec un simple régulateur PD dont les paramètres ont été ajustés par la méthode de Ziegler-Nichols. On voit que les erreurs de traînée sont assez importantes (jusqu'à 2/10 mm). Dans les autres essais, on utilise une commande à priori pour éliminer ce genre d'erreurs. Un modèle du système (équation 1) est alors nécessaire, ce qui requiert une identification de paramètres. Un modèle d'ordre réduit est utilisé (ordre 3), ceci pour restreindre le nombre de paramètres à identifier. Les essais b et c utilisent le même régulateur PD mais avec commande a priori; les essais d et e une commande par placement des valeurs propres avec commande a priori. Une estimation des frottements secs est faite dans les essais c et e sans connaissance de celui-ci à $t = 0$. On voit que l'erreur statique due aux frottements secs est plus petite dans l'essai d (PVP) que dans le b (PD); ~ 2 μm contre ~ 6 μm. La perturbation engendrée par l'inversion des frottements secs à $t = 1$ s est mieux rejetée dans l'essai e (PVP) que dans l'essai c (PD).

7. Conclusion

Les avantages d'une commande de type adaptatif ont été montrés. Une meilleure connaissance du système par identification de ses paramètres permet l'annulation des erreurs de traînée et une meilleure réponse dynamique aux perturbations de tout genre. D'autre part, la structure modulaire de ces algorithmes facilite leur adaptation sur n'importe quel type de machine. Les résultats prometteurs obtenus en simulation devront être confirmés par des essais pratiques des algorithmes sur des installations existantes. C'est dans ce sens que les recherches sont poursuivies.

Bibliographie

[1] *K.J. Aström* and *B. Wittenmark:* Computer Controlled Systems, Prentice-Hall 1984.

[2] *G. Goodwin* and *K.S. Sin:* Adaptative Filtering Prediction and Control, Prentice-Hall 1984.

[3] *L Ljung* and *T. Söderström:* Theory and Practice of Recursive Identification, The MIT Press 1983.

[4] *K. Najim* et *G. Muratet:* Pratique de la régulation numérique des processus industriels, Masson 1983.

[5] *G. Rigamonti:* Einsatz von Mikroprozessoren in der Antriebstechnik. Bull. SEV/VSE 76(1985)11, S. 637...640.

[6] *J. Ulrich:* Hinweise zur Anwendung des diskreten Zustandsreglers. Bull. SEV/VSE 76(1985)11, S. 631...636.