

1. AUTOMATIQUE

CONTROL



1.1 Systèmes non linéaires Nonlinear systems

L'exigence croissante des secteurs applicatifs en termes d'objectifs et de performances, liée aux possibilités accrues des moyens de calcul, stimule la recherche fondamentale vers les cas difficiles. Prendre en compte les aspects non linéaires et autres complexités du comportement dynamique devient incontournable pour le succès du contrôle. De telles problématiques sont étudiées au sein de la Division « Systèmes » du L2S. Quelques aspects sont indiqués ci-dessous.

Sujets

1. Systèmes embarqués et en réseau

Prise en compte de la topologie du réseau (plusieurs niveaux, de différentes tailles et échelles de temps) et des contraintes de communication. Développement de nouvelles méthodologies (modélisation, contrôle, commande, estimation d'états) afin d'assurer de bonnes performances, être robuste aux perturbations et fiable.

2. Synchronisation dynamique

Il s'agit de faire en sorte que deux ou plusieurs systèmes dynamiques se comportent de façon coordonnée, que les trajectoires de l'un suivent asymptotiquement celles de l'autre. On s'intéresse à la synchronisation de systèmes mécaniques ou de systèmes en formation (vaisseaux marins, automobiles).

3. Systèmes à retards

Parmi les objectifs scientifiques, on cite une meilleure compréhension des effets induits par les retards sur les dynamiques des systèmes interconnectés afin d'améliorer les comportements dynamiques avec des stratégies adaptées aux cas. Les « stratégies » peuvent être des lois de commande locales (réseaux de distribution), des traitements (leucémies) ou des algorithmes (synchronisation des mouvements à travers des réseaux).

4. Systèmes discrets et échantillonnés

Comprendre la transposition sous échantillonnage des propriétés structurelles et de commande d'un système dynamique continu est fondamental au développement de stratégies échantillonnées maintenant ou améliorant les objectifs et performances d'un schéma continu en termes de stabilité interne, robustesse,

5. Contrôle robuste via la passivité, l'immersion, l'invariance

La « commande via la passivité », introduite par Ortega et Spong il y a 20 ans, est devenue une méthode standard exploitant la propriété physique fondamentale de passivité. Combinée aux techniques d'immersion et d'invariance, elle a récemment suscité plusieurs avancées intéressantes.

The increasing request of the applicative sector regarding goals and performances linked to new computing facilities stimulates fundamental research oriented to challenging cases. As a consequence, nonlinear and many other complexities of the dynamical behaviour have to be taken into account for a successful control. Such problems are studied by the team "Systems" at the L2S. Some aspects are described below.

Topics

1. Embedded and networked systems

Taking into account the network topology (multiple levels, different sizes and time scales) and constraints of communication. Development of new methodologies (modeling, control, state estimation of parameters) to ensure good performances, be robust to disturbances and reliable.

2. Dynamical synchronization

Synchronisation of dynamical systems consists in making two or more dynamical systems to behave in a coordinated way and, in particular, making the trajectories of one system follow asymptotically, the trajectories of another system. We are interested in the synchronisation of mechanical systems and formation of physical systems (marine, automotive).

3. Time-delay systems

Among the scientific objectives we cite a better comprehension of the effects induced by the delays on the dynamics of interconnected systems for improving the dynamical behaviors by using appropriate strategies. The "strategies" can be local control laws (supply networks), treatment methods (leukemia) or algorithms (motion synchronization over networks).

4. Discrete-time and sampled-data systems

To understand the preservation of structural and control properties of a given continuous-time control system is basic to provide digital control strategies maintaining, even improving, the objectives and performances of a continuous design in terms of internal stability or robustness,....

5. Robust control via passivity, immersion, invariance

« Passivity-based control », introduced by Ortega and Spong, 20 years ago, is now a standard technique for controller design, that effectively exploits the fundamental physical property of passivity. Combining this with the classical techniques of system immersion and manifold invariance has given rise to a series of interesting results in the last few years.

Pour tout renseignement s'adresser à :

Antoine CHAILLET,
Francoise LAMNABHI-LAGARRIGUE,
Antonio LORIA,
Elena PANTELEY,
William PASILLAS-LEPINE
Sujets 1, 2 / Topics 1, 2
L2S - Division Systèmes
Tél. : 33 (0) 1 69 85 12 12
prenom.nom@lss.supelec.fr

Silviu NICULESCU
Sujet 3 / Topic 3
L2S - Division Systèmes
Campus de Gif
Tél. : 33 (0) 1 69 85 17 15
niculescu@lss.supelec.fr

**Dorothée
NORMAND-CYROT**
Sujet 4 / Topic 4
L2S - Division Systèmes
Campus de Gif
Tél. : 33 (0) 1 69 85 17 48
cyrot@lss.supelec.fr

Romeo ORTEGA
Sujet 5 / Topic 5
L2S - Division Systèmes
Campus de Gif
Tél. : 33 (0) 1 69 85 17 66
ortega@lss.supelec.f

For further information, please contact:

Contrôle intégré d'un système PAC et ses auxiliaires par une approche dynamique

Romeo Ortega
Françoise Lamnabhi-Lagarrigue

A dynamic approach for energy management of a fuel cell-based system

Abstract Efficient transfer of electric energy between various generating sources, storing devices and loads is a problem that arises in many practical applications, including electric cars and isolated generating utilities. Energy transfer is currently achieved translating the power demand of the components into current (or voltage) references that are, subsequently, tracked with standard controllers - usually proportional plus integral. According to the physical characteristics of the components, in particular, their time responses, linear (low or high-pass) filters are then introduced to discriminate fast and low changing power demand profiles. This "steady-state" approach will clearly behave below par during the transients, or when fast responses are required. In this research a new approach to dynamically control energy flow is proposed. The main ingredient is the inclusion of a dynamic energy router, which is a nonlinear device that instantaneously transfers the energy among the units. The flow direction and the rate of change of the energy transfer are regulated with a single scalar parameter. A power electronic implementation of the device, and its corresponding nonlinear controller, for application in a fuel cell-based system are then proposed.

Enjeux économiques

La pile à combustible (PAC) à membrane polymère est une solution extrêmement prometteuse pour un véhicule tout électrique. Cette technologie offre plusieurs avantages, dont une excellente efficacité énergétique, une densité de puissance élevée, un fonctionnement silencieux et l'absence d'émissions d'échappement nocives. Les piles à combustible convertissent en électricité un mélange d'oxygène et de gaz riche en hydrogène; cette électricité est transmise à des moteurs électriques pour propulser le véhicule. Dans un système optimal, fonctionnant à l'hydrogène pur, la vapeur d'eau est le seul sous-produit de la pile à combustible. Il n'y a aucune pollution atmosphérique. Toutefois, de nombreuses questions techniques restent en suspens, au niveau de la durée de vie des systèmes à pile à combustible, de leur autonomie (problème du stockage de l'hydrogène) et aussi du coût, pour l'instant prohibitif. Il est à ce jour bien connu que ces verrous technologiques ne trouveront pas de solutions plausibles sans l'appui d'une recherche fondamentale forte et multidisciplinaire. C'est dans cet esprit que s'inscrit notre collaboration SUPELEC-LGEP-L2S, en partant d'une modélisation du système complet pile et auxiliaires et en développant des commandes basées sur une approche structurée et formalisée s'appuyant sur de solides méthodologies qui répondront aux exigences d'un cahier des charges.

Objectifs de recherche

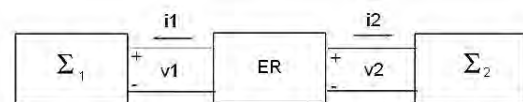
- i) Développement d'une base théorique pour la modélisation, l'analyse, la conception et le diagnostic de contrôles intégrés pour une gestion optimale de la production et du stockage de l'énergie d'une pile à combustible et
- ii) Validation des résultats sur un banc d'essais récemment mis en place au LGEP grâce à des fonds notamment de la communauté européenne (par le Réseau d'Excellence HYCON), du RTRA DIGITEO et du CNRS.

Spécificités de notre approche

Les principales spécificités de notre approche, qui la distingue des techniques existantes, sont :

- i) L'incorporation explicite, dans le modèle, des dynamiques (non-linéaires et commutées) des divers composants du système de génération de puissance.
- ii) La formulation de l'objectif de contrôle comme un problème intégré qui, tenant compte des couplages entre les différents composants du système, vise à l'établissement des interconnexions exigées qui réalisent les transferts d'énergie/masse désirés.

Les commandes ainsi développées visent à assurer des performances importantes en termes de fiabilité et de robustesse, permettant ainsi, une meilleure optimisation de la production d'énergie et une plus grande durée de vie de la pile. La technique utilisée se base sur le développement d'un dispositif qui peut transmettre l'énergie dans les deux sens une fois placé entre deux composants du système. Son intérêt majeur est le fait qu'il permet un transfert instantané d'énergie sans dissiper de l'énergie. Ce dispositif, comme un convertisseur ordinaire, est constitué des composants d'électronique de puissance. Le schéma ci-contre représente deux composants interconnectés par le dispositif proposé



Σ_1 et Σ_2 sont des systèmes vérifiant la balance d'énergie,

$$\dot{H}_i = v_i^T i_i$$

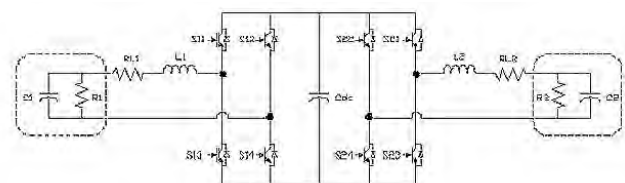
où H_i est la fonction d'énergie (électrique + magnétique). D'autre part, ER (Energy Router) est un dispositif d'électronique de puissance qui interconnecte deux systèmes électriques et assure le transfert d'énergie entre eux. Ceci est réalisé en imposant au dispositif le comportement suivant,

$$ER \begin{bmatrix} \dot{i}_1 \\ \dot{i}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\alpha v_1 v_2^T \\ \alpha v_2 v_1^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}, \quad \alpha \in [-1, 1]$$

Par suite,

$$\dot{H}_1 = -\alpha |v_1|^2 |v_2|^2, \quad \dot{H}_2 = \alpha |v_1|^2 |v_2|^2$$

Selon le signe de α , l'énergie est transmise d'un système à l'autre. De plus, le taux de transfert peut aussi être choisi en sélectionnant l'amplitude de α . Dans notre application, les systèmes Σ_1 et Σ_2 vont être des composants du système en étude (pile à combustible, super-condensateurs, batteries, charges, etc...), et le ER est le convertisseur à développer et à commander pour assurer le bon transfert d'énergie.



Cette approche permet également une utilisation rationnelle et limitée du nombre de capteurs du système pile et, lorsque c'est nécessaire, la conception d'observateurs [3].

Références

- [1] R. Ortega, A. van der Schaft, F. Castaños et A. Astolfi, Control by state-modulated interconnection of port-hamiltonian systems, IEEE Transactions on Automatic Control (Regular Paper), Vol. 53, No. 11, pp. 2527-2542, 2008.
- [2] M. Hernandez-Gomez, R. Ortega, F. Lamnabhi-Lagarrigue et G. Escobar, Adaptive PI Stabilization of Switched Power Converters, IEEE Transactions on Control System Technology, 2009 (à paraître).
- [3] T. Ahmed-Ali, G. Kenne et F. Lamnabhi-Lagarrigue, Identification of nonlinear systems with time-varying parameters using a sliding-neural network observer, Neurocomputing, Vol. 72, No. 7-9, pp. 1611-1620, 2009.

1.2 Automatique des systèmes hybrides *Hybrid systems control*

Les contraintes économiques et environnementales induisent des exigences de plus en plus importantes sur la maîtrise du comportement des systèmes. Alors même que ces systèmes sont de plus en plus complexes, la satisfaction de ces exigences demande de prendre en compte globalement leur comportement. D'autre part, cette complexité favorise le développement de systèmes de commande distribués en réseaux qui, d'un point de vue pratique, permettent de la maîtriser.

Il est donc nécessaire d'intégrer dans la conception de la commande les évolutions de modèles (en fonction des modes de fonctionnement et des changements d'objectif), les incertitudes de modélisation et les limitations d'échange d'information entre les composants de commande. Les modèles et les approches hybrides intégrant les dynamiques continues et événementielles des systèmes sont des outils puissants pour permettre cette prise en compte.

Nos objectifs sont d'étudier et de développer un ensemble de formalismes et de méthodes prenant en compte la spécificité des systèmes hybrides pour permettre leur modélisation, l'analyse et la vérification de leur comportement, ainsi que la synthèse de leur commande (dans ses composantes algorithmiques et méthodologiques).

Ces travaux contribuent aux avancées dans différents domaines tels que l'automobile, le contrôle industriel, l'énergie... mais aussi le bio-médical. Ils s'intègrent dans diverses actions européennes telles que le réseau HYCON, ou les projets HDMPC et ISiPADAS.

Economic and environmental constraints lead to increasing requirements for controlling the behavior of systems. While systems are more and more complex, it is necessary to fulfill these requirements to consider their global behavior. Moreover this complexity often leads to use distributed control that makes it possible to control bigger systems.

It is then mandatory to take into account in the control design the modeling uncertainties, the changes in models (with modes and objectives switching) and the communication limitations. The hybrid models and approaches that take into account continuous and discrete dynamics are powerful tools that allow this integration.

The aim of this research is to develop a set of formalisms and methods that could take into account the specificity of hybrid systems, enabling their modeling, analysis and behavior checking, as well as the synthesis of their control (taking into account algorithmic and methodological aspects).

This work can be successfully applied to various application domains such as automotive, industrial control, energy management... but also bio-medical systems. It is partly integrated within various European frameworks such as the HYCON network or the HDMPC and ISiPADAS projects.

Sujets

1. Systèmes physiques en commutations

Modélisation et analyse en électronique de puissance.
Commande stabilisante des systèmes physiques en commutation.

2. Commande distribuée et hiérarchisée

Commande prédictive distribuée des systèmes hybrides incertains.
Application à l'efficacité énergétique des bâtiments et des installations industrielles.

3. Sécurité fonctionnelle

Vérifications de propriétés.
Calculs sûrs d'atteignabilité et abstraction.

4. Système bio-médicaux

Régulation de la glycémie pour les patients atteints de diabète.

Topics

1. Switching physical systems

*Modeling and analysis in power electronics.
Stabilizing control of switching physical systems.*

2. Distributed and hierarchical control

*Predictive distributed control of uncertain hybrid systems.
Distributed optimization.
Energetic efficiency of buildings and industrial plants.*

3. Functional safety

*Safety verification.
Reachability computations.
Abstractions of dynamical systems.*

4. Bio-medical systems

Glycaemia control for diabetic patients.

Pour tout renseignement s'adresser à :

Hervé GUÉGUEN
Équipe ASH - IETR
Campus de Rennes
Tél. : 33 (0) 2 99 84 45 04
E-mail : herve.gueguen@supelec.fr

For further information, please contact:

Distributed predictive control of a Supermarket Refrigeration System

Commande prédictive distribuée d'un système de réfrigération de supermarché

Hervé Guéguen
Romain Bourdais

Résumé Nous appliquons une commande prédictive distribuée au cas test de système de réfrigération de supermarchés défini dans le cadre du réseau HYCON. Ce système est en effet un exemple de système non-linéaire commandé par des variables tout ou rien pour lequel des objectifs d'optimisation dans le respect de contraintes de fonctionnement ont été définis. L'objectif de notre approche est de dépasser les limitations liées à la complexité de calcul des précédentes propositions de commande prédictive en distribuant la commande. Pour ce faire nous utilisons un mécanisme de prix afin de permettre la synchronisation des différents contrôleurs.

Introduction

Supermarket Refrigeration Systems are an example of non-linear hybrid systems where components that are controlled by logical switched inputs interact by means of continuous variables. Within the HYCON network a benchmark based on these systems has been specified by an industrial partner. The system considered in this study is made of three display cases and three compressors and the aim is to control the inlet valves of the display cases and the switch on and off of the compressors in order to fulfil the constraints on the temperature inside the cases and on the pressure of the suction manifold. The classical control of these systems is a distributed control where each display case is locally controlled according to its temperature. This non-coordinated control leads to the synchronization of the display cases and frequent switch on and off of the compressors. In order to overcome these drawbacks different Model Predictive Control scheme have been proposed [1, 2]. However they are based on a global view of the system that leads to an exponential complexity when the number of display cases increases. We have proposed a decentralised model predictive control of this system in order to make it possible to efficiently control the system while dealing with this complexity.

Control structure

The control structure is given in figure 1. One controller is associated with each display case and one with the rack of compressors. These controllers interact by means of the value of the pressure predicted by the controller of the compressors and a so-called price mechanism for the consumption of refrigerant flow.

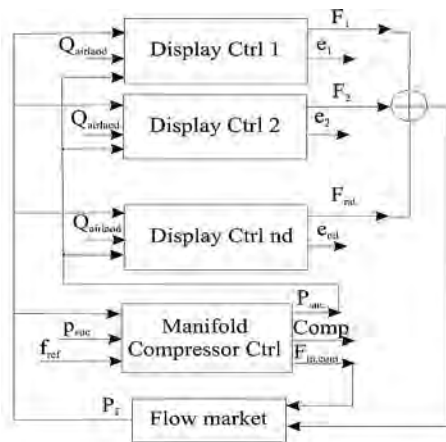


Figure 1: Distributed control structure

The global aim of the predictive control is to determine, on the prediction horizon, the control that minimizes the following criteria:

$$J = \sum_1^{nd} J_d(i) + J_c$$

where $J_d(i)$ is a criterion for a display case and J_c is a criterion for the compressors. In order to solve this problem in a distributed way auxiliary variables are introduced [3] and the following local criteria are considered for each display case:

$$\tilde{J}_d(i) = J_d(i) + P_f F_i$$

where P_f is an auxiliary price variable and F_i the predicted consumption of refrigerant flow and for the compressor rack:

$$\tilde{J}_c = J_c - P_f F$$

where F is the optimum value of the flow from the point of view of the compressors according to the value of the price.

The global optimization is performed by a first step where the local criterion of the compressors rack is minimized. Then in a second step the criteria for all display cases are minimized and in a third one the new value of the price is computed according to:

$$P_f = P_f - \gamma_c \left(F - \sum_1^{nd} F_i \right)$$

These steps are iterated until the various components agree on the value of the flow and the price does not evolve any more. At each sampling time the price is initialized with its final value at the previous time in order to favor the convergence of the iteration. However the aim is to implement the controller in a real-time framework, so we have limited the number of iterations to reach the agreement and assessed the performances of the control with these limitations.

Control	Dcst	Dsw	Dpw
Classic	177	0.11	1.40E4
DMPC1	4.6E-6	0.065	1.38E4
DMPC2	2.4E-6	0.058	1.39E4
DMPC8	7.8E-6	0.069	1.36E4

Table 1: Performance measure variables

Results and open points

The performances are considered according to three variables expressed as mean on the experiment time, the first one (Dcst) measures the constraints violation, the second one (Dsw) the number of switching and the last (Dpw) the power consumption. The results for controllers with 1 iteration (DMPC1), 2 iterations (DMPC2) and 8 iterations (DMPC8) are summed up in table 3. It can be noticed that the results are better with the predictive approach but that there are no significant differences between the 3 limitations of iteration. A precise analysis of the number of iterations at each step (when the maximum number is 8) shows that the average number of iterations for the experiment is 2.2, and that in most cases the value is 1. This work achieves interesting results as for example it has been easily extended to the case with ten display cases but it also opens very important questions about the approach. The main one is that, as hybrid systems are considered, it is possible that the agreement phase does not converge. It is then important to characterize these cases in order to specify strategies to avoid them.

References

- [1] D. Sarabia, F. Capraro, L.F. Larsen and C. de Prada, (2009), "Hybrid NMPC of supermarket display cases", Control Engineering Practice, 17(4), 428 - 441.
- [2] C. Sonntag, A. Devanathan and S. Engell (2008), "Hybrid NMPC of a supermarket refrigeration system using sequential optimization", in IFAC World Congress, 13901-13906.
- [3] A. Rantzer (2009). "Dynamic dual decomposition for distributed control", in American Control Conference 09.

1.3 Robustification et retouche de lois de commande *Robustification and retuning of control laws*

Pour résoudre les problèmes de plus en plus complexes qui relèvent de l'Automatique, les modèles mis en œuvre sont suffisamment simples pour être utilisables mais dès lors sujets à des incertitudes. On est donc conduit à exiger la robustesse de la commande, de sorte que les propriétés de l'asservissement puissent être garanties en dépit des différentes sources d'incertitudes de modèle.

La puissance accrue des moyens de calcul permet désormais d'envisager soit la robustification de lois de commande existantes, soit la synthèse de la commande sous l'angle d'un problème d'optimisation, en général multicritères. Parallèlement se fait sentir le besoin de méthodes d'analyse puissantes et précises des performances et de la robustesse, et d'une évaluation du potentiel de ces approches dans le cadre non-linéaire. Dès lors, il s'avère important de développer des approches globales et systématiques pour poser les divers problèmes d'analyse, de robustification et de retouche de correcteurs, et de mettre en place dans tous les cas des procédures pratiques, simples et efficaces.

Sujets

1. Analyse de robustesse

Développement d'outils méthodologiques pour les systèmes non-linéaires et les systèmes linéaires à paramètres variants.

Développement de procédures par inégalités matricielles pour l'étude des performances et de la robustesse d'une commande.

Recherche de propriétés caractérisant la robustesse d'un système dynamique non-linéaire.

2. Robustification hors-ligne de lois de commande sans contrainte

Prise en compte d'incertitudes de modèles.

Robustification par la paramétrisation de Youla, afin de définir la classe de régulateurs garantissant stabilité et performances pour un niveau d'incertitudes donné.

Application à la commande d'axes de machine-outil et en mécatronique.

Extension aux systèmes multivariables.

3. Retouche de lois de commande en temps réel

Retouche de correcteurs par optimisation en ligne via des techniques d'apprentissage locales, combinées avec un réseau de neurones RBF (Radial Basis Function).

Mise à jour de lois de commande par des techniques d'identification en ligne, application dans le domaine sidérurgique à la régulation de niveau en coulée continue.

To solve increasingly complex control problems, models considered during the design of control laws must be simple enough for use but are unavoidably subject to uncertainties. Robustness of the control law is therefore required in order to guarantee the properties of the controlled system despite different modelling uncertainties.

Recent improvement in computer capabilities allows us to consider either robustification of existing control structures, either the design of a control law as an optimisation problem, which in general is more precisely a multi-objective one. Meanwhile, new requirements are emerging concerning powerful and efficient analysis methods, capable of providing useful insight on performance and robustness, and evaluating the possibilities of such strategies in a non-linear context. Therefore, global and systematic approaches are to be developed for expressing different control problems, such as analysis, robustification and retuning of control laws.

Topics

1. Robustness analysis

Methodology for the development of design tools for nonlinear systems and linear parameter varying systems.

Development of matrix inequality based procedure for performance and robustness analysis.

Properties investigations for characterization of the robustness of dynamic nonlinear systems.

2. Off-line robustification of unconstrained control laws

Inclusion of model uncertainties.

Robustification via Youla parametrization, in order to define a complete set of controllers ensuring stability and performance for a given level of uncertainties (e.g. model uncertainties).

Application to axis control of machine tools and mechatronics.

Extension to multivariable systems.

3. On-line retuning of control laws

Retuning of control laws by means of on-line optimization techniques, based on local learning techniques, combined with RBF neural network (Radial Basis Function).

Update of control laws by means of on-line identification techniques, application in the iron and steel industry to the level control in continuous casting.

Pour tout renseignement s'adresser à :

Gilles DUC
Département Automatique
Campus de Gif
Tél. : 33 (0) 1 69 85 13 88
E-mail : gilles.duc@supelec.fr

Pedro RODRIGUEZ
Département Automatique
Campus de Gif
Tél. : 33 (0) 1 69 85 13 74
E-mail : pedro.rodriguez@supelec.fr

For further information, please contact:

Retuning control for a thermal power plant

Retouche de régulateur pour une centrale thermique

Pedro Rodriguez
 Sihem Tebbani, Gilles Duc
 En collaboration avec EDF R&D

Résumé Deux approches ont été mises en œuvre pour retoucher les lois de commande avancées développées par EDF pour une centrale thermique, processus complexe où plusieurs sorties doivent être contrôlées pour faire face à différentes demandes et perturbations. Dans la première, le régulateur est restructuré et complété de façon à améliorer le comportement en poursuite et en régulation. Dans la seconde des commandes additionnelles sont générées en utilisant un modèle inverse du processus.

Introduction

Electricité de France (EDF) has developed advanced coordinated control laws for its coal-fired power plants. However such processes are difficult to model and their dynamics may vary due to plant ageing or operational conditions. Thus the aim of this study was to improve the plant behavior by tuning the control law. However the new controller must not disturb the designed structure and should be easily removable. Two methods have been tested: the first modifies the controller using the Youla parameterization, the second is based on an inverse model of the plant.

Coal fired power plant control

EDF has three Q600 coal-fired power plant (figure 1). The control law has to control electrical load P_{eb} , superheat pressure P_s and low temperature superheater output temperature $TSBT$, by means of coal flow setpoint $ref Q_c$, high pressure throttle valves opening setpoint $ref OHP$ and feed-water flow setpoint $ref Q_{ea}$. Two main disturbances, which are also measured, are burner tilting $ref I_b$ and desuperheater water flow setpoint $ref Q_{is}$. Another measure is pressure at separator P_{sep} .

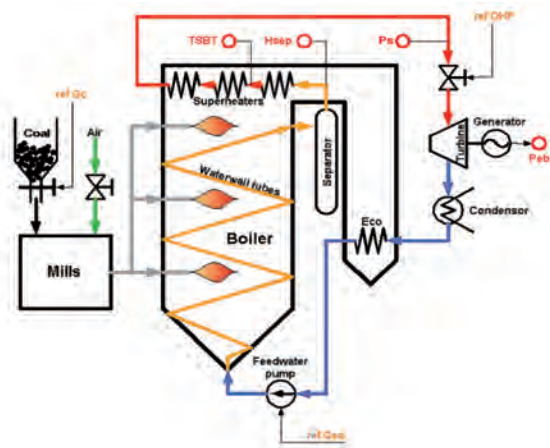


Figure 1: Schematic representation of the process.

Tuning by Youla parameterization

In this approach the existing controller is first restructured in order to split the regulation (disturbance rejection) and the input/output (tracking) behaviors. Two dynamic systems Q_1 , Q_2 are then introduced in this new structure (figure 2).

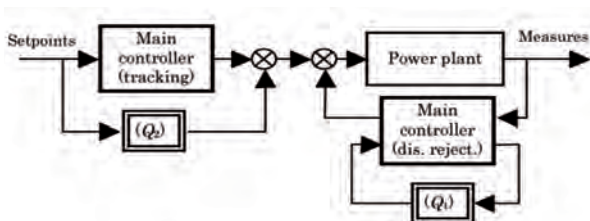


Figure 2: Closed loop structure with the Youla parameters

Known as Youla or Q -parameters, they can parameterize all stabilizing controllers of the plant, and allow deriving convex closed-loop specifications. Q_1 -parameter modifies the closed-loop features keeping the input/output transfer unchanged while Q_2 -parameter modifies the

input/output behavior. The closed-loop specifications being convex in Q_1 - Q_2 , these parameters are solution of a convex optimization problem. Q_1 has been synthesized in order to improve the disturbance rejection, namely to reduce the impact on temperature $TSBT$ of input Q_c . Q_2 has been calculated to reduce the overshoot in temperature $TSBT$ due to a set point change in the electrical load P_{eb} .

Tuning by inverse model

Another approach has been tested on the same problem (figure 3). An additional control law is designed following a kind of inverse control strategy: the idea is to compare the obtained outputs to a reference trajectory and to deduce the control inputs that compensate these errors, by applying an inverse model. Low-pass filters are added to eliminate too fast variations. In addition the gains of these filters are multiplied by 0.01 so that the additional control input is only 1% compared to the control input generated by the main controller. In fact, the new controller must not destroy the main closed-loop properties obtained when designing the main controller.

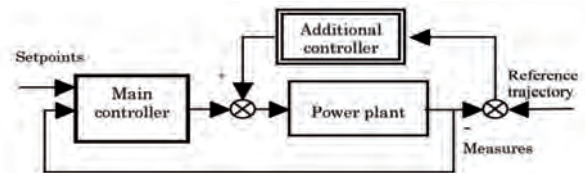


Figure 3: Closed-loop structure with additional controller

Experimental results

Both methods give very satisfying results. Figure 4 shows that the first one reduces the impact on temperature $TSBT$ of a disturbance on $ref Q_c$ (left); and that the second one greatly improves the tracking of a ramp on electrical load and rejection of a disturbance on $ref Q_c$ (right).

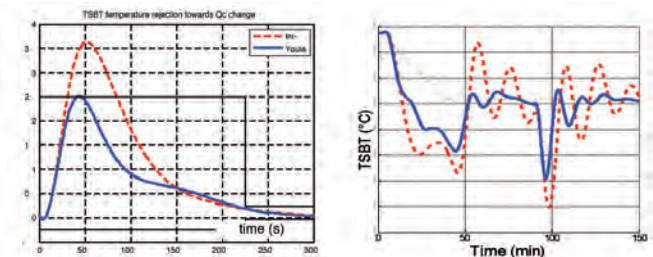


Figure 4: Experimental results

References

- [1] L. Deprugney, A. Girard, S. Maurin, H. Jestin, "New Advanced Coordinated Controller for Once-Through Boiler and Turbine of Coal-Fired Power Plant", 16th Annual Joint ISA/POWID/EPRI Instrumentation and Controls Conference, 2006.
- [2] S. Tebbani, M. Midou, L. Deprugney, A. Girard and G. Duc, "Inverse model approach to "online" performance enhancement for coal-fired power plant". IEEE Multi-conference on Systems and Control, Saint-Petersburg, 2009.
- [3] C. Stoica, P. Rodriguez-Ayerbe, D. Dumur, "Off-line improvement of multivariable model predictive control robustness", 46th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 2826-2831, New Orleans, USA, 2007.

1.4 Commande sous contraintes Constrained control laws

Les méthodes classiques de synthèse de lois de commande entraînent bien souvent une alternance de phases de synthèse et d'analyse permettant de vérifier a posteriori que les contraintes non prises en compte a priori sont effectivement satisfaites. Face au besoin toujours plus pressant d'optimiser le fonctionnement des systèmes, la prise en compte de toutes les contraintes apparaît comme un enjeu fondamental de la théorie des systèmes.

Dans ce contexte, ce thème de recherche s'attache à prendre en compte des contraintes intervenant sur le système dès la phase de synthèse des lois de commande. A cette fin, différentes approches sont développées : d'une part l'élaboration hors-ligne de solutions explicites, permettant ainsi de réduire le temps de calcul dans la phase temps réel pour des systèmes rapides ; d'autre part des approches basées sur des stratégies d'optimisation sous contraintes ; enfin des structures de commande non-linéaires permettant notamment une planification de la trajectoire à suivre.

Sujets

1. Recherche de solutions explicites

Développement d'outils méthodologiques basés sur les théories des systèmes incertains et de la commande robuste, permettant la prise en compte de contraintes en temps réel par détermination de solutions explicites.

2. Optimisation sous contraintes

Réduction du modèle du système à optimiser afin d'obtenir des problèmes d'optimisation approchés mais solvables.

Utilisation d'algorithmes approchés tels que les métaheuristiques pour la résolution générique de problèmes d'Automatique présentant des contraintes non différentiables ou non analytiques.

Prise en compte des contraintes de structure de la loi de commande dans la phase de synthèse.

3. Approche par la théorie de la viabilité

Construction d'ensembles invariants pour l'analyse de la viabilité des systèmes affectés par des incertitudes paramétriques, définition de trajectoires viables.

Etude des liens entre faisabilité et robustesse dans le cas de la commande prédictive.

4. Lois de commande non-linéaires et génération de trajectoires

Planification de trajectoires, conception de lois de commande prédictive non-linéaires à horizon fini et implantation temps réel.

Synthèse de commandes non-linéaires (par retour d'état statique ou dynamique, par backstepping ou par modes glissants) sur des systèmes dynamiques non-linéaires.

Stabilisation de systèmes dynamiques non-linéaires autour de trajectoires de référence.

Classical methods for the design of control laws lead most often to a combination of design and analysis phases, enabling to check a posteriori that the constraints which are not a priori considered are effectively fulfilled. Being faced to a more and more important need for optimization of the system behaviour, taking into account constraints appears to be a challenging issue for the system theory.

In this framework, this research theme aims at considering constraints appearing on the system at an early stage during the design of the control laws. For that purpose, several different approaches are developed: off-line elaboration of explicit solutions, which provide a significant reduction of the calculation time during the real-time phase, being of most interest for fast systems; approaches based on optimization strategies under constraints; finally nonlinear control structures which allows in particular trajectory planning.

Topics

1. Elaboration of explicit solutions

Development of methodologies combining theories that stem from systems subject to uncertainty and robust control, taking into account real-time constraints, followed by determination of explicit solutions.

2. Constrained optimization

Model reduction of the system that has to be optimized in order to obtain sub-optimal but feasible optimization problems.

Development of approximated algorithms, such as metaheuristics, for a generic resolution of problems with non differentiable and non analytic constraints.

Consideration of structural constraints of the control law during the design phase.

3. Approach based on the viability theory

Elaboration of invariant sets in order to perform a viability analysis of systems subject to parametric uncertainties, coupled with the definition of viable trajectories.

Study of the existing links between feasibility and robustness in the particular case of predictive control.

4. Design of nonlinear control laws and trajectory generation

Trajectory planning, design of nonlinear finite horizon predictive control laws and real-time implementation architecture.

Synthesis of non-linear control laws (by static or dynamic state feedback, by backstepping or sliding modes) for dynamic nonlinear systems. Stabilization of nonlinear dynamic systems along reference trajectories.

Pour tout renseignement s'adresser à :

Didier DUMUR

Département Automatique
Campus de Gif
Tél. : 33 (0) 1 69 85 13 75
E-mail : didier.dumur@supelec.fr

Guillaume SANDOU

Département Automatique
Campus de Gif
Tél. : 33 (0) 1 69 85 13 86
E-mail : guillaume.sandou@supelec.fr

Sorin OLARU

Département Automatique
Campus de Gif
Tél. : 33 (0) 1 69 85 13 86
E-mail : guillaume.sandou@supelec.fr

Houria SIGUERDIDJANE

Département Automatique
Campus de Gif
Tél. : 33 (0) 1 69 85 13 77
E-mail : houria.siguerdidjane@supelec.fr

For further information, please contact:

Particle Swarm Optimization for controller design

Optimisation par essaim particulaire pour la synthèse de correcteurs

Guillaume Sandou

Résumé L'optimisation est au cœur des méthodes de synthèse de correcteurs (commande LQG, commande H_∞ ...). La démarche classique consiste à utiliser un modèle simplifié (modèle linéaire avec des dynamiques négligées par exemple) et à utiliser des reformulations afin d'obtenir des problèmes d'optimisation résolubles de manière exacte. Cependant, les systèmes industriels devenant de plus en plus complexes, la détermination de modèles simplifiés devient difficile. En outre, il devient primordial de prendre en compte toutes les contraintes lors de la phase de synthèse. Enfin, il ne s'agit plus seulement pour les industriels de satisfaire un cahier des charges, mais plutôt d'optimiser le fonctionnement de leurs systèmes. Pour toutes ces raisons, les problèmes d'optimisation à résoudre deviennent éminemment complexes. Nous proposons ici d'utiliser l'optimisation par essaim particulaire pour la synthèse de correcteurs. La méthode est appliquée avec succès pour la synthèse de PID, pour l'optimisation des filtres de pondération de la synthèse H_∞ pour la synthèse d'ordre réduit, ou encore dans le cadre de la commande prédictive non linéaire.

Introduction

Optimization is widely used in Automatic Control for the design of control laws (LQG, H_∞ , predictive control...). However, the traditional approach is based on simplified and highly tractable models and constraints, allowing the use of exact optimization solvers (LMIs, SQP, Riccati solvers...). This efficient approach may fail for complex systems. Further, many constraints cannot be tractably expressed and have to be a posteriori checked.

The idea of the proposed approach is to consider all the constraints during the synthesis procedure. In other words, a difficult optimization problem has to be solved, encompassing some non linear, non convex and non analytical constraints and cost functions. For that purpose, a particle swarm optimization algorithm, belonging to the class of metaheuristic methods, has been chosen for the solution to those problems. The algorithm has been introduced by Kennedy and Eberhart in the mid 90s and is inspired by the social behavior of bird flocking or fish schooling [1]. Much than satisfactory results have been achieved, proving the viability and the versatility of the approach.

An example: reduced order H_∞ synthesis

The method has been tested for a well known problem: the reduced order H_∞ synthesis. Consider the closed loop of figure 1.

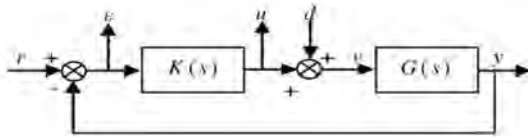


Figure 1: Classical closed loop structure

The problem refers to the solution to:

$$\begin{aligned} \min_{K(s)} & \| \mathbf{H}(s) \|_{\infty} \\ \text{s.t.} & \begin{bmatrix} \mathcal{E}(s) \\ \mathcal{U}(s) \end{bmatrix} = \mathbf{H}(s) \begin{bmatrix} r(s) \\ d(s) \end{bmatrix}, \quad \partial^{\circ} K(s) < n_c \end{aligned} \quad (1)$$

where $\partial^{\circ} K(s)$ denotes the order of $K(s)$.

In the traditional approach, specifications have to be reformulated as templates on the transfers of the closed loop system, leading to the definition of fictive filters in the synthesis procedure. This has not to be done in our approach. Indeed, any performance criterion (frequency or temporal templates on any transfer of the loop) is a function of the controller parameter and thus can be written as a constraint for the optimization problem (1). Note that these constraints have non differentiable or even non analytic expressions. Thus, the optimization problem will be solved by a Particle Swarm Optimization algorithm. The method has been tested for a pendulum in the cart depicted in figure 2.

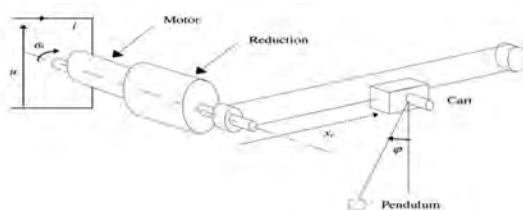


Figure 2: Case study - Pendulum in the cart

For that example, the full order H_∞ synthesis leads to a controller of order 6 with a H_∞ norm of the closed loop system 1.06; a classical Hankel singular values reduction of the controller to the order 2 leads to a H_∞ norm of 56.7. The results of the Particle Swarm Optimization are given in table 1 for the synthesis of an order 2 controller.

Worst	Best	Mean
$\ \cdot \ _{\infty} = 4.53$	$\ \cdot \ _{\infty} = 2.60$	$\ \cdot \ _{\infty} = 3.50$

Table 1: Results of the Particle Swarm Optimization algorithm

As the algorithm is a stochastic one, the validation can only be made by statistical data. That is why the algorithm has been performed 100 times leading to the results of table 1. Results show that the Particle Swarm Optimization algorithm outperforms the traditional a posteriori Hankel reduction. From a performance point of view, controllers that are computed by the PSO algorithm have quite similar performances than the Hankel reduction controller but are more robust especially against measurement noises, due to a decrease in controller high frequency gains. For more details on the method and the results, see [2].

Concluding remarks and related works

Some results on the use of Particle Swarm Optimization have been presented. The main advantage of the method is that it can take into account all constraints of the problem, whatever its mathematical structure (non differentiable, non analytical...). This is particularly interesting in an industrial context, as it avoids reformulating the constraints in a tractable way and performing several synthesis/analysis phases in the design process. The main drawback is that no guarantee can be given on the actual optimality of the solution. However, in a synthesis procedure, the goal is mainly to find a controller which satisfies the specifications, and so a satisfying near optimal solution is sufficient for that purpose.

The method is quite versatile and can be applied to many Automatic Control problems: synthesis and optimization of PID controllers [3], optimization of H_∞ controllers [4], non linear predictive control [5].

References

- [1] R. C. Eberhart, and J. Kennedy, "A new optimizer using particle swarm theory". In: Proc. of the 6th Int. Symposium on Micromachine and Human Science, Nagoya, Japan. pp. 39-43, 1995.
- [2] G. Sandou and G. Duc, "Using Particle Swarm Optimization for Reduced Order H_∞ Synthesis", 14th IFAC workshop on Control Applications of Optimisation, Finland, 2009.
- [3] G. Sandou and B. Lassami, "Optimisation par essaim particulaire pour la synthèse ou la retouche de correcteurs", MOSIM, France, 2008.
- [4] G. Sandou, G. Duc and D. Beauvois, "Optimisation par essaim particulaire du réglage d'un correcteur H_∞ ", Conférence Internationale Francophone d'Automatique, Romania, 2008.
- [5] G. Sandou and S. Oлару, "Particle Swarm Optimization based NMPC: An Application to District Heating Networks", Lecture Notes in Control and Information Sciences, Vol. 384, pp. 551-559, 2009.

1.5

Approche système et procédés industriels

System approach and industrial processes

Les sujets présentés dans cette thématique, organisés par domaines d'application, relèvent de l'application des travaux méthodologiques développés par l'équipe et essentiellement de la mise en œuvre des différents domaines de l'automatique nécessaire pour aborder les problématiques issues du monde industriel.

Ces sujets impliquent formalisation des problèmes industriels posés selon une approche fonctionnelle, développement et validation de modèles analytiques permettant la simulation d'un système, détermination, identification et validation de modèles simplifiés de commande, choix, sans a priori, synthèse et validation d'une loi de commande propre à remplir les objectifs fixés dans le cahier des charges.

Sujets

1. Domaine automobile

Pilotage en glissement d'un organe de friction pour le filtrage des acyclismes d'un groupe motopropulseur.
Estimation temps réel non-linéaire pour le contrôle de systèmes de suspensions pilotées.
Commande de véhicule à direction et freinage découplés.
Stratégie de commande d'un groupe motopropulseur hybride.
Gestion de l'énergie dans un véhicule électrique.

2. Systèmes d'énergie

Modélisation générique et optimisation de lois de commande pour convertisseurs de puissance.
Modélisation et optimisation robuste de réseaux d'énergie.
Manœuvre contrôlée de transformateurs HT avec flux rémanent.
Commande non-linéaire d'éolienne à vitesse variable équipée de génératrice double alimentation.
Commande non-linéaire et stabilisation de systèmes de transmission VSC HVDC.

3. Systèmes mécatroniques

Modélisation et commande de robots à architecture parallèle.
Conception d'un robot multiaxes pour le positionnement d'un appareil de radiographie cardiovasculaire.
Modèle ARMARKOV et algorithmes adaptatifs de commande d'actionneurs antivibratoires.

4. Systèmes biotechnologiques

Proposition de stratégies de commande pour la culture de microalgues dans un photo-bioréacteur continu.
Commande prédictive non-linéaire de culture de bactéries en mode fed-batch.
Estimation et commande robuste de la culture de microalgues pour la valorisation biologique du CO₂.

5. Domaine aéronautique et aérospatial

Guidage et pilotage robuste d'aéronefs autonomes en milieu turbulent.
Optimisation de trajectoires et analyse de mission pour voyages interplanétaires.

The topics presented in this thematic, organized owing to application domains, are characterized by application of methodological works studied by the team, and essentially the use of the various methods of Automatic Control necessary to deal with problems from the industrial world.

These topics involve formalization of industrial problems, according to a functional approach, development and validation of analytical models for simulation, determination, identification and validation of simplified control models, choice, without a priori, of a methodology to design and validate a control law in order to meet desired specifications.

Topics

1. Automotive industry

*Control of the slip of a friction process in order to filter the acyclisms of a vehicle power-train.
Real Time nonlinear state estimation of a vehicle in order to control it with active suspension.
Control of a vehicle with non interacting steering and braking systems
Strategy for the control law of an hybrid power-train.
Power management in an electrical vehicle.*

2. Power systems

*Generic modeling and optimization of control laws for power converters.
Modeling and robust optimization of energy networks.
Controlled switching of HT transformers with residual flux.
Nonlinear control of variable speed wind turbine equipped with doubly fed induction generators.
Nonlinear control and stabilization of VSC HVDC transmission lines.*

3. Mechatronics

*Modeling and control of robots with parallel architecture.
Modeling and control of a multi-axis actuator in a cardiovascular radiography system.
ARMARKOV model and adaptive algorithms for active vibration rejection.*

4. Biotechnological systems

*Propositions for control strategies of microalgae culture in a continuous photo-bioreactor.
Nonlinear predictive control of bacteria culture in a fed-batch mode bioreactor.
Estimation and robust control of microalgae culture for biologic valorization of CO₂.*

5. Human-Machine Interaction

*Guidance and control of autonomous aircrafts in a turbulent medium.
Trajectory Optimization and mission analysis for interplanetary travel.*

Pour tout renseignement s'adresser à :

Patrick BOUCHER

Département Automatique
Campus de Gif
Tél. : 33 (0) 1 69 85 13 71
E-mail : patrick.boucher@supelec.fr

Emmanuel GODOY

Département Automatique
Campus de Gif
Tél. : 33 (0) 1 69 85 13 73
E-mail : emmanuel.godoy@supelec.fr

Dominique BEAUVOIS

Département Automatique
Campus de Gif
Tél. : 33 (0) 1 69 85 13 87
E-mail : dominique.beauvois@supelec.fr

For further information, please contact:

Control of microalgae cultivation in a continuous photobioreactor Commande de la culture de microalgues dans un photobioréacteur continu

Sihem Tebbani
Didier Dumur
Arsène Isambert

Résumé La production de microalgues s'avère fondamentale pour de nombreuses applications industrielles et environnementales. De façon générale, afin d'obtenir un niveau élevé de production de microalgues, la stratégie de commande consiste à réguler la concentration en biomasse à une valeur donnée au sein d'un photobioréacteur continu, de façon à maintenir la culture à une densité de population optimale. Pour cela, la loi de commande proposée inclut au sein d'une structure cascade une boucle interne basée sur une stratégie de linéarisation entrée-sortie, et une boucle externe avec un régulateur de type P.I.D. et un dispositif d'anti-saturation afin d'annuler toute erreur statique. De plus, dès lors que la concentration en biomasse n'est pas disponible en temps réel, un filtre de Kalman étendu permet d'estimer cette concentration, à partir de la mesure du carbone inorganique total et des états physiques classiques (pH, intensité lumineuse, concentration en oxygène dissous...). Cette structure de commande validée en temps réel sur un photobioréacteur instrumenté montre l'efficacité et la robustesse de la structure par rapport à d'autres stratégies plus classiques.

Introduction

Microalgal biomass has many applications such as the production of high value compounds. This biomass is an excellent source of long-chain polyunsaturated fatty acids (PUFAs), polysaccharides, vitamins and pigments. Large-scale cultures also find applications in energy production (e.g. photobiological hydrogen, biofuel, methane) and environmental remediation (e.g. wastewater treatment, carbon dioxide fixation and greenhouse gas emissions reduction). Microalgae can also absorb heavy metals and sequester or degrade many different classes of toxic compounds. The microalgae culture is classically carried out in open ponds mode leading to several problems. Closed photobioreactor culture seems to be more efficient than the last one, especially when applying real-time control laws for microalgal culture. A general objective of process control is to guarantee that the process will operate in a constant biomass density mode, in order to maintain the culture at the optimal population density and sustain high biomass production levels.

Proposed control strategy

The biomass control is carried out in three steps. First, mathematical modeling and model parameters identification are assessed by fitting the experimental data acquired along the exponential phase of batch cultivation [1]. Since biomass concentration is one of the most valuable variables to control, but remains quite difficult to measure on-line, a software sensor for its estimation has to be elaborated. That is the reason why, in a second step, an extended Kalman filter (E.K.F.) is developed, based on total inorganic carbon (TIC) and physical states (pH, temperature, dissolved oxygen, light intensity) measurements [2]. Finally, the biomass concentration control is realized by appropriately changing the culture medium flow-rate to the photobioreactor.

Several control strategies have been successively investigated (linearized model based control, P.I.D., Generic Model Control, Nonlinear control, Nonlinear Model Predictive Control). Among them, the following designed control strategy consists of a linearizing state-feedback algorithm implemented in an inner loop [3]. A Proportional Integral Derivative (P.I.D.) controller with an anti-windup compensator in the outer loop offers the possibility to correct the deviations due to system disturbances and slight model/process mismatches.

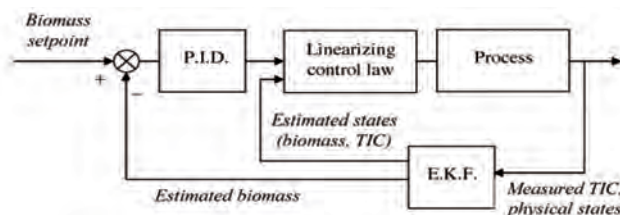


Figure 1: Control system architecture

Experimental results

The proposed control strategy is validated on the culture of red microalgae *Porphyridium purpureum* in an instrumented bubble column photobioreactor (figure 2), in collaboration with the "Laboratoire de Génie de Procédés et Matériaux" of Ecole Centrale Paris. Experiments in case of setpoint changes (figure 3) and significant disturbances acting on the system (figure 4) are considered, showing good performances in terms of accuracy, overshoot and robustness.

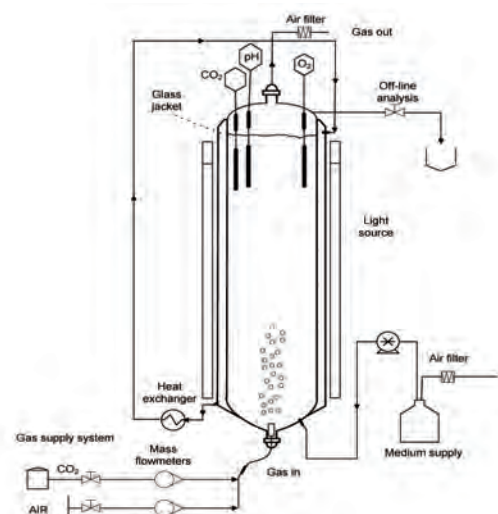


Figure 2: Schematic representation of the photobioreactor

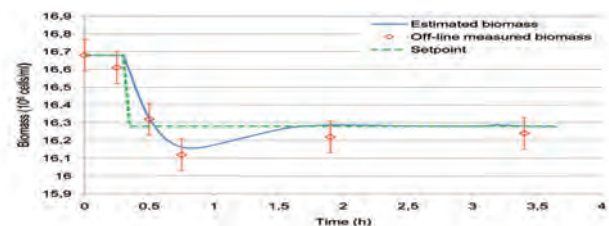


Figure 3: Experimental biomass step response.

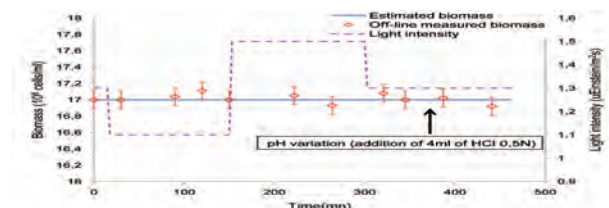


Figure 4: Experimental evolution of biomass under disturbances

References

- [1] D. Baquerisse, S. Nouals, A. Isambert, P. Ferreira dos Santos and G. Durand, "Modelling of a continuous pilot photobioreactor for microalgae production". *Journal of Biotechnology*, 70, 335-342, 1999.
- [2] G. Becerra-Celis, S. Tebbani, C. Joannis-Cassan, A. Isambert, P. Boucher, "Estimation of microalgal photobioreactor production based on total inorganic carbon in the medium". 17th IFAC World Congress, Seoul, 2008.
- [3] A. Isidori, "Nonlinear control systems". Berlin, Springer-Verlag, 1989.

1.6 Estimation et modélisation *Estimation and modeling*

Pour comprendre ou commander un système il est souvent très utile de le modéliser puis d'identifier les paramètres inconnus éventuels du modèle sur la base de mesures effectuées sur le système. Le modèle ainsi obtenu sert, pendant l'exploitation du système, à prévoir ou surveiller son comportement, voire à modifier ce dernier, auquel cas il faut souvent faire appel de nouveau à des techniques d'estimation. La complexité des modèles utilisés n'est pas en rapport nécessairement avec celle de la physique du système mais plutôt avec le degré de précision souhaité. Quant aux algorithmes d'estimation, parfois appelés capteurs logiciels, ce sont bien des compagnons des capteurs physiques, qu'ils peuvent d'ailleurs parfois remplacer de façon avantageuse du point de vue coût, encombrement, ou fiabilité.

Sujets

1. Modélisation de systèmes biologiques

Le domaine de la biologie est extrêmement actif, et présente de réels besoins d'organisation et de représentation des connaissances. Nous avons développé une activité de modélisation à base de connaissance, simplification de modèles et estimation sur données en épidémiologie et microbiologie, en collaboration avec l'INRA.

2. Modélisation boîte noire (ou grise) à l'aide du krigeage

Le krigeage est une méthodologie issue des géostatistiques, où elle s'est développée dans le contexte de l'exploration minière. Cette méthodologie est maintenant utilisée de plus en plus pour des applications en ingénierie. Elle permet de construire des modèles de prédiction simples soit à partir de données uniquement, soit en intégrant des connaissances a priori pour transformer le modèle boîte noire en un modèle boîte grise. Cette activité est conduite en collaboration avec le Département Signaux et Systèmes Electroniques.

3. Estimation par analyse par intervalle

L'analyse par intervalles permet d'effectuer d'une façon globale et garantie les tâches de base en estimation non linéaire de paramètres ou de variables d'état que sont la minimisation d'une fonction coût ou la caractérisation de l'ensemble des vecteurs de paramètres ou d'état qui sont compatibles avec des erreurs acceptables. Les résultats peuvent être rendus remarquablement robustes à des données aberrantes.

4. Techniques algébriques différentielles et numériques pour l'estimation

Nombre de questions rencontrées dans le domaine de l'estimation de systèmes dynamiques sont de nature structurelle et algébrique différentielle. Il en est ainsi des questions d'identifiabilité, d'observabilité, etc. Les algorithmes d'estimation eux relèvent plutôt de l'analyse numérique et font appel aux notions d'approximation de solutions de problèmes souvent mal conditionnés voire mal posés.

To understand or control a system it is often extremely useful to model it, and then to identify the unknown parameters of this model, if any, based on measurements carried out on the system. The model thus obtained may be used, during the operation of the system, to predict or monitor its behaviour, or to modify it. In the latter case, estimation techniques often need to be invoked again. The model complexity is not necessarily comparable to that of the knowledge-based description of the system; it is rather related to the degree of accuracy that is required. Estimation algorithms, sometimes called software sensors, are companions of physical sensors. They may even be used in lieu of some sensors for their lower price, smaller size, and durability.

Topics

1. Modeling of biological systems

Biology is a very active area, with acute needs in knowledge structuration and modeling. Our activity has been focused on knowledge-based modeling, model simplification and estimation from experimental data in the field of epidemics and microbiology in collaboration with partners from INRA (National Institute for Agronomic Research).

2. Black (ou grey) box modeling via Kriging

Kriging, a methodology initially developed by geostatisticians in the context of mining, is increasingly used in engineering applications. It makes it possible to build simple prediction models either uniquely from data (or simulations of complex knowledge-based models) or while incorporating some degree of prior knowledge, which transforms the black-box model into a grey box model. This activity is carried out in connection with the Signal and Electronic Systems Department.

3. Estimation via interval analysis

Interval analysis makes it possible to achieve, in a global and guaranteed way, basic tasks in nonlinear parameter or state estimation such as minimizing a cost function or characterizing the set of all parameter or state vectors that are consistent with acceptable errors. The results can be made remarkably robust to outliers.

4. Differential algebraic and numerical techniques for estimation

Many questions which are encountered in system estimation bear some structural and differential algebraic nature. That is the case of identifiability, observability, etc. Estimation algorithms rather stem from numerical analysis, and they appeal on notions of approximation of solutions of problems which are often ill-conditioned, or even ill-posed.

Pour tout renseignement s'adresser à :

Sette DIOP

L2S - Division Systèmes
Campus de Gif
Tél. : 33 (0) 1 69 85 17 30
E-mail : sette.diop@lss.supelec.fr

Béatrice LAROCHE

L2S - Division Systèmes
Campus de Gif
Tél. : 33 (0) 1 69 85 17 22
E-mail : beatrice.laroche@lss.supelec.fr

For further information, please contact:

Éric WALTER

L2S - Division Systèmes
Campus de Gif
Tél. : 33 (0) 1 69 85 17 11
E-mail : eric.walter@lss.supelec.fr

Une nouvelle structure d'observateur A new observer structure

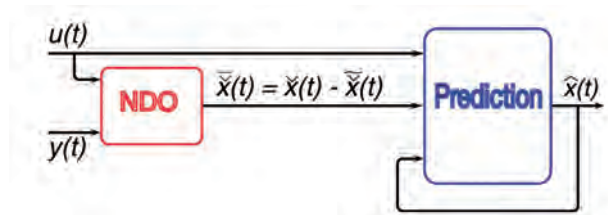
Abstract An observer structure has been proposed with features such as "nonpeaking", "bounded" and with quasi explicit algorithms for its design. These new potentialities are attributable to both the structure of the data feedback and the introduction of regularized numerical differentiation schemes of sampled data.

La question de l'estimation en temps réel d'une variable $x(t)$ d'un système dynamique $\dot{x} = f(t, x, u)$ est essentielle en automatique. En effet, les bonnes réponses à cette question rendent possibles l'implantation de commandes $u = u(t, x)$ par retour d'état, le diagnostic et la surveillance d'un système en exploitation, et parfois, un gain économique substantiel en remplaçant un capteur trop encombrant, trop cher, ou peu fiable par un simple algorithme programmé dans un processeur de calcul. D'ailleurs, n'est-ce pas le filtre de Kalman qui, par son succès dans l'aérospatial depuis les années 1960, a permis l'émergence de notre discipline, l'automatique. La preuve que le filtre de Kalman est une solution au problème de l'estimation suppose que le modèle $f(t, x, u)$ est linéaire $f(t, x, u) = F(t)x + G(t)u$. L'immense succès résulte de ce que cet estimateur temps réel a d'excellentes propriétés de convergence tout en tolérant quelques inévitables imprécisions à la fois du modèle lui-même et des mesures $y(t) = h(t, x) = H(t)x$ délivrées par les capteurs. Appliqué aux modèles non linéaires la validité du filtre de Kalman devient locale en ce que la convergence de l'estimateur $\hat{x}(t)$ n'est garantie que si ce dernier a été initialisé suffisamment près de $x(t_0)$. De combien $\hat{x}(t_0)$ doit être près de $x(t_0)$? Il est souvent difficile d'en donner une bonne estimation. De plus, le filtre de Kalman étendu n'a pas cette propriété essentielle d'un estimateur, à savoir la bornitude vis-à-vis des incertitudes de mesure. Une faiblesse notoire du filtre c'est la difficulté à vérifier a priori les hypothèses qui autorisent son utilisation. Enfin rappelons que la complexité en charge de calcul du filtre de Kalman peut également le rendre inutilisable dans certaines applications.

C'est ainsi que la recherche sur l'estimation temps réel non linéaire a continué d'occuper de très nombreux collègues dans le monde. Une nouvelle approche est explorée depuis le début des années 1990. Elle repose sur une analyse algébrique différentielle du problème d'estimation qui nous a conduit à une notion d'identifiabilité ou d'observabilité qui est explicite (et dont on peut confier la vérification à des systèmes de calcul symboliques) ainsi qu'à une nouvelle structure d'observateur dans laquelle la complexité du calcul du gain du filtre de Kalman étendu disparaît, mais apparaît la nécessité d'utiliser la différentiation numérique régularisée. De ce fait le caractère de problème inverse mal posé de la question de l'estimation fait surface à travers la différentiation numérique qui en est l'exemple type bien connu en analyse numérique. Le caractère de problème inverse de l'estimation est intuitivement clair puisqu'il s'agit d'extraire une information connue à travers un modèle qui se présente sous la forme d'une cause produisant un effet et où l'effet, $y(t)$ est connu ainsi qu'une partie de la cause, $u(t)$ l'autre partie de la cause $x(t)$, étant précisément l'inconnu à déterminer. Est-ce que ce problème inverse est mal posé au sens d'Hadamard? Formellement cela reste à être prouvé. Le génie du filtre de Kalman linéaire est sans doute d'en avoir trouvé une solution *dynamique* qui ne consiste pas en une inversion algébrique du problème mais en la construction d'un système dynamique qui se contente de produire une sortie qui converge *asymptotiquement* vers $x(t)$. La structure proposée, elle, inverse différentiellement algébriquement le problème. C'est là toute sa faiblesse, mais aussi sa force car elle a le mérite de produire une solution explicite contrairement au filtre de Kalman étendu.

La nouvelle structure d'observateur

Le schéma fonctionnel suivant montre les deux composantes de l'observateur ainsi que leur interaction.



Les données disponibles à l'utilisateur en temps réel, $u(t)$, $y(t)$, sont traitées d'abord dans un bloc notée NDO pour *numerical differentiation observer*; ce bloc fournit une estimation retardée, $\bar{x}(t) = \bar{x}(t) - \bar{x}(t)$, de l'état. Le retard τ , ($\bar{x}(t) = x(t-\tau)$) est en général *connu* de l'utilisateur; il est directement lié à la longueur de la fenêtre de données utilisée pour estimer les dérivées, et son choix résulte d'un compromis entre la précision de l'estimation des dérivées et la nécessité de filtrer le bruit sur ces données. Le symbole $\bar{x}(t)$ représente l'erreur d'estimation de $\bar{x}(t)$. Des exemples de différentiateurs numériques sont montrés dans les références ci-dessous. Le retard est alors compensé à l'aide du modèle du système dans le bloc noté *Prediction* dans le schéma précédent. La prédiction est décrite par les équations suivantes.

Initialisation : pour $t \leq t_0 + \tau$,

$$\dot{\bar{x}} = f(\bar{x}, u), \bar{x}(t_0) = \bar{x}_0$$

Prédiction de $t - \tau$ à t pour $t \geq t_0 + \tau$:

$$\frac{d}{ds} \bar{x}(s) = f(\bar{x}(s), u(s))$$

$$\bar{x}(t - \tau) = \bar{x}(t)$$

Filtrage pour $t \geq t_0 + \tau$:

$$\dot{\hat{x}}(t) = f(\bar{x}, u) + K(\bar{x} - \bar{x})$$

$$\hat{x}(t_0) = \bar{x}(t_0)$$

Le symbole K représente un gain. A l'inverse du filtre de Kalman où il serait calculé à travers la résolution en ligne d'une équation de Riccati, K est une matrice constante très facile à calculer. Le contenu du bloc NDO n'est pas explicité ici. Outre la différentiation numérique, il contient l'expression de l'état du système en fonction des données. Cette expression est donnée de façon explicite par l'approche algébrique de l'observabilité. La convergence de cet observateur est exponentielle sous des hypothèses mineures.

Pour plus de détails sur cette approche des observateurs non linéaires le lecteur pourra consulter les quelques publications ci-dessous ainsi que les références qu'elles contiennent.

Références

- [1] S. Diop, "Observers for sampled data nonlinear systems via numerical differentiation", Proceedings of the European Control Conference, Kos, Greece, 2007.
- [2] S. Diop, V. Fromion, J. W. Grizzle, "A global exponential observer based on numerical differentiation," Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, 2001.
- [3] S. Diop, J. W. Grizzle, P. E. Moraal, A. G. Stefanopoulou, "Interpolation and numerical differentiation for observer design," Proceedings of the American Control Conference, 1994.