



LABORATOIRE D'INFORMATIQUE DE PARIS 6

Apprentissage et Acquisition de Connaissances

**Méthodes Connexionnistes pour la
Commande des Systèmes Non
Linéaires:
Application à la Régulation des
Rivières**

A. Toudeft

THÈSE de DOCTORAT de l'UNIVERSITÉ PARIS 6
LIP6 1999 / 017 décembre 1998

Résumé

Cette thèse traite du problème de la commande connexionniste de procédés non linéaires. La difficulté d'établir des preuves de stabilité et de convergence a empêché le développement de méthodes fiables de résolution de ce problème.

Pour exploiter les caractéristiques des réseaux de neurones sans compliquer l'étude de la stabilité du système, nous avons proposé une approche neuro-adaptative utilisant un réseau de neurones comme contrôleur en boucle ouverte pour compenser les non linéarités du procédé et un contrôleur adaptatif linéaire en boucle fermée pour traiter les perturbations.

L'approche a été développée graduellement et mise en oeuvre sur un modèle de simulation d'une rivière constituant un système non linéaire, à phase non minimale, soumis à des perturbations et ayant un temps de retard variant avec son état. Cependant, l'approche peut être appliquée dans un cadre général.

Nous avons d'abord proposé un système de commande adaptatif avec un neurone linéaire à une entrée et un biais. La formulation sous forme de fonctions de transfert de la règle de Widrow-Hoff nous a permis de déterminer une règle d'ajustement en ligne du pas d'adaptation et de réaliser une linéarisation par adaptation du système de commande, permettant ainsi un traitement adéquat des perturbations agissant sur un procédé linéaire correspondant à une rivière en régime permanent.

La capacité des réseaux de neurones à capter la nature des variations du temps de retard du procédé a été mise en évidence dans une étape préalable à sa commande.

Nous avons ensuite procédé à l'apprentissage d'un réseau de neurones pour commander le procédé en boucle ouverte. Ce dernier ayant une phase non minimale, nous avons du proposer et comparer plusieurs méthodes pour aboutir à un contrôleur adéquat.

Pour traiter les perturbations, nous avons ajouté, en parallèle avec le réseau de neurones, un contrôleur adaptatif linéaire en boucle fermée. Nous avons montré expérimentalement la faisabilité de l'approche et avons proposé une première étude de la stabilité du système. Les hypothèses restrictives posées gagneraient à être assouplies et la robustesse du système reste à évaluer.

Finalement, nous avons proposé plusieurs variantes de l'approche d'apprentissage du réseau de neurones contrôleur et avons mis en évidence leurs apports par des analyses théoriques.

Mots-Clés

Réseaux de Neurones, Commande Non Linéaire, Commande par Apprentissage Connexionniste, Commande Adaptative, Modélisation Connexionniste, Systèmes à Temps de Retard Variable, Systèmes à Phase Non Minimale, Régulation des Cours d'eau.

Sommaire

Notations	0
INTRODUCTION	2
<hr/>	
PARTIE 1: ETAT DE L'ART	6
<hr/>	
1. GENERALITES ET DEFINITIONS PRELIMINAIRES	8
Introduction	8
1.1. Système.....	8
1.1.1. Définition	8
1.1.2. Procédé	10
1.1.3. Système linéaire	10
1.2. Transformée en z	11
1.2.1. Définition	11
1.2.2. Propriétés.....	11
1.2.3. Fonction de transfert.....	11
1.3. Commande ou contrôle de procédés.....	12
1.3.1. Commande en boucle ouverte- en boucle fermée	13
1.3.2. Boucle d'adaptation- boucle d'apprentissage.....	13
1.3.3. Système de commande	14
2. LES RESEAUX CONNEXIONNISTES	16
Introduction	16
2.1. Historique	16
2.1.1. Le neurone biologique.....	16
2.1.2. Le neurone formel	17
2.2. Principes fondamentaux	19
2.2.1. Différents types d'unités	19
2.2.2. Règle d'apprentissage	20
2.2.3. Réseaux de neurones	21
2.2.4. Types d'apprentissage.....	22
2.2.4.1. Apprentissage supervisé.....	22
2.2.4.2. Apprentissage non supervisé.....	22
2.2.4.3. Apprentissage par renforcement.....	22
2.2.5. Généralisation.....	22
2.3. Algorithmes d'apprentissage supervisé.....	22
2.3.1. Les méthodes du gradient.....	23
2.3.1.1. La descente du gradient.....	24
2.3.1.2. La méthode de Newton	25
2.3.1.3. L'approximation de Levenberg-Marquardt	26
2.3.1.4. Le gradient conjugué.....	26
2.3.2. La rétropropagation du gradient- version de base	27

2.4. Approximateurs universels	29
2.5. Conclusion.....	29
3. LE CONTRÔLE CONNEXIONNISTE	30
Introduction	30
3.1. Le contrôle intelligent.....	30
3.2. Contrôle adaptatif et contrôle évolutif.....	31
3.3. Des réseaux de neurones pour le contrôle intelligent	33
3.4. Contrôle adaptatif par réseaux de neurones ou contrôle évolutif?.....	33
3.5. Conclusion.....	34
4. MODELISATION DE PROCEDES	36
Introduction	36
4.1. Observabilité.....	36
4.1.1. Observabilité des systèmes linéaires	36
4.1.2. Observabilité des systèmes non linéaires	37
4.2. Conception de modèles.....	38
4.2.1. Modélisation des systèmes linéaires.....	39
4.2.1.1. Le modèle ARX (<i>Auto-Regressive eXogeneous</i>)	41
4.2.1.2. Le modèle OE (<i>Output Error</i>).....	41
4.2.2. Le processus de modélisation.....	41
4.2.2.1. Récolte des données de modélisation.....	41
4.3. Des réseaux de neurones pour la modélisation.....	44
4.3.1. Des réseaux récurrents ou non?.....	44
4.3.2. Modèles d'identification	45
4.3.2.1. Le modèle NARX.....	45
4.3.2.2. Le modèle NOE.....	45
4.3.3. Apprentissage spatialement localisé.....	46
4.4. Conclusion:.....	46
5. CONTROLE EVOLUTIF A BASE D'APPRENTISSAGE SUPERVISE.....	48
Introduction	48
5.1. La problématique du contrôle connexionniste.....	49
5.2. Méthodes exploitant un contrôleur existant.....	50
5.2.1. Copie d'un contrôleur existant	50
5.2.2. Amélioration d'un contrôleur existant	51
5.2.3. Le 'Feedback Error Learning'	54
5.3. Méthodes directes	55
5.3.1. Contrôle inverse direct	55
5.3.2. Contrôle direct.....	57

5.4. Méthodes indirectes.....	59
5.4.1. L'approche d'apprentissage distant.....	59
5.4.2. La rétropropagation à travers le temps:.....	60
5.5. Conclusion.....	61
6. STABILITE ET CONVERGENCE.....	62
Introduction.....	62
6.1. Convergence et stabilité.....	63
6.2. Quelques études de stabilité.....	65
6.2.1. L'approche de Suykens et al.	65
6.2.1.1. Un réseau de neurones pour imiter un contrôleur linéaire.....	65
6.2.1.2. Transition entre les points d'équilibre.....	67
6.2.2. L'approche de Cheng & Wen.....	68
6.2.3. L'approche de Levin & Narendra.....	68
6.2.4. L'approche de Ciliz & Isik.....	69
6.2.4.1. Méthode d'apprentissage.....	69
6.2.4.2. Analyse de stabilité.....	70
6.2.5. L'approche de Tanaka.....	70
6.3. Conclusion.....	72
<hr/>	
PARTIE 2: MISE EN OEUVRE.....	74
<hr/>	
7. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS.....	78
Introduction.....	78
7.1. Le procédé.....	79
7.1.1. Définition.....	79
7.1.2. Simulation.....	81
7.2. Le problème de contrôle.....	81
7.3. Gestion de la distribution d'eau.....	82
7.4. Critères de comparaison et d'évaluation.....	82
7.5. Un contrôleur de référence: un régulateur linéaire avec prédicteur de Smith.....	84
7.6. Le contrôle des systèmes à phase non minimale.....	87
7.7. Conclusion.....	88
8. CONTRÔLE ADAPTATIF D'UN SYSTEME LINEAIRE AVEC RETARD ET SOUMIS A DES PERTURBATIONS.....	90
Introduction.....	90
8.1. Le problème.....	90
8.2. Le prédicteur de Smith.....	91

8.2.1. Cas de procédés linéaires	91
8.2.2. Extension au cas de procédés non linéaires.....	92
8.3. Architecture de contrôle	93
8.3.1. Modélisation du procédé	93
8.3.2. Traitement des perturbations	94
8.4. Conclusion.....	99
9. MODELISATION CONNEXIONNISTE D'UN PROCEDE A RETARD VARIABLE.....	100
Introduction	100
9.1. Choix de la structure du modèle	100
9.1.1. Estimations sur le temps de retard.....	100
9.2. Identification d'un modèle NOE	102
9.2.1. Architecture du modèle	102
9.2.2. Algorithme d'apprentissage	102
9.2.3. Un premier modèle NOE: le modèle MP1	102
9.2.3.1. Génération des données d'apprentissage	102
9.2.3.2. Résultats	103
9.2.3.3. Généralisation.....	103
9.2.4. Un deuxième modèle NOE: le modèle MP2	107
9.2.4.1. Signaux d'apprentissage	107
9.2.4.2. Résultats	107
9.2.4.3. Généralisation.....	107
9.3. Identification d'un modèle NARX.....	108
9.4. Identification de modèles de dimension réduite	110
9.5. Comparaison MP2-ML1	111
9.6. Conclusion.....	112
10. CONTRÔLE CONNEXIONNISTE D'UN PROCEDE A PHASE NON MINIMALE ET A RETARD VARIABLE	114
Introduction	114
10.1. Apprentissage d'un contrôleur sur la base du modèle MP1	114
10.1.1. Méthode.....	114
10.1.2. Signal d'apprentissage	115
10.1.3. Algorithme d'apprentissage	116
10.1.4. Une première structure pour le contrôleur.....	116
10.1.5. Utilisation de l'erreur sur le procédé.....	117
10.1.6. Utilisation de l'erreur sur le modèle	123
10.1.7. Choix de l'algorithme d'apprentissage.....	126
10.1.8. Apprentissage avec contrainte sur les oscillations de la commande	128
10.1.9. Une deuxième structure pour le contrôleur	129
10.2. Apprentissage de contrôleur sur la base du modèle MP2.....	130
10.2.1. Contrôleur à Structure Etendue (CSE)	131
10.2.2. Apprentissage avec contrainte sur les oscillations de la commande	132
10.2.3. Filtrage linéaire du signal de commande.....	132

Filtre transverse externe au contrôleur	133
Filtre récursif externe au contrôleur	133
Filtre transverse interne au contrôleur	133
Filtre récursif interne au contrôleur	134
10.2.4. Commande Non Récursive (CNR)	134
10.2.5. Contrôle en boucle ouverte (CBO)	134
10.2.6. Interprétation des résultats	135
10.2.6.1. Résultats obtenus en apprentissage:	135
10.2.6.2. Résultats obtenus en test	136
10.3. Conclusion	138
11. CONTRÔLE NEURO-ADAPTATIF	
Traitement des perturbations	140
Introduction	140
11.1. Approche de contrôle neuro-adaptatif	141
11.2. Système de contrôle neuro-adaptatif	142
11.2.1. Architecture de contrôle	142
11.2.2. Mise en oeuvre du système	144
11.3. Analyse de stabilité	147
11.3.1. Analyse	147
11.3.2. Domaine de validité	150
11.3.3. Considérations pratiques	151
11.4. Conclusion	152
12. ANALYSE DE L'APPROCHE DE L'APPRENTISSAGE DISTANT	154
Introduction	154
12.1. Présentation générale	154
12.2. Analyse de l'approche dans le cas linéaire	156
12.2.1. Rétropropagations statiques pour l'apprentissage distant	157
12.2.2. Apprentissage distant avec normalisation partielle du jacobien	158
12.2.3. Méthodes récurrentes	160
12.2.4. Comparaison des méthodes	160
12.3. Analyse de l'approche dans le cas non linéaire	162
12.4. Analyse théorique	164
12.4.1. Conditions de convergence	164
12.4.2. Comparaison normalisé/non normalisé	166
12.4.3. Comparaison simple/multiple	167
12.4.4. Comparaison récurrent/non récurrent	167
12.5. Conclusion	168
PERSPECTIVES	170
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	172
Annexe du Chapitre 10	180