

LEARNING FEED-FORWARD CONTROL

– THEORY, DESIGN AND APPLICATIONS –



This dissertation has been completed in partial fulfillment of the requirements of the Dutch Institute of Systems and Control DISC for graduate study.

ISBN 90-36514126

Printed by Drukkerij Twente Hengelo B.V.

Copyright © 2000 by Wubbe Jan Roelf Velthuis.

LEARNING FEED-FORWARD CONTROL

– THEORY, DESIGN AND APPLICATIONS –

PROEFSCHRIFT

ter verkrijging van
de graad van doctor aan de Universiteit Twente,
op gezag van de rector magnificus,
prof. dr. F.A. van Vught,
volgens besluit van het College voor Promoties
in het openbaar te verdedigen
op vrijdag 25 februari 2000 te 15.00 uur.

door

Wubbe Jan Roelf Velthuis

geboren op 1 december 1970
te Stadskanaal

Dit proefschrift is goedgekeurd door
prof. dr. ir. J. van Amerongen, promotor
dr. ir. T.J.A. de Vries, assistent-promotor.

Voor Femke en Job

Table of Contents

Voorwoord	xi
1. Introduction	1
1.1 Why Learning Control?	1
1.2 What is Learning Control?	2
1.3 Feedback Error Learning	6
1.4 Learning Feed-Forward Control	11
1.5 Illustrative Application: a Linear Motor Motion System	15
1.6 Outline of the Thesis	17
2. Repetitive Motions	19
2.1 Introduction	19
2.2 Iterative Learning Control	20
2.2.1 Original ILC Scheme	20
2.2.2 Current Cycle Feedback	23
2.2.3 Robustness Measures	26
2.2.4 Design Procedures	30
2.2.5 Extension of the Field of Application	30
2.3 Repetitive Control	31
2.4 LFFC for Repetitive Motions	34
2.5 Stability Analysis of Time-Indexed LFFC	37
2.5.1 Assumptions	37
2.5.2 B-Spline Width	43

2.5.3 Learning Rate.....	48
2.6 Simulations	51
2.6.1 Mass Spring Mass Plant.....	52
2.6.2 LiMMS	56
2.7 Discussion	61
3. Non-Repetitive Motions: Input Selection and Convergence	65
3.1 Introduction	65
3.2 Input Selection.....	66
3.2.1 Example 1: LiMMS	70
3.2.2 Example 2: MSM Plant.....	72
3.3 Stability Issues.....	73
3.4 Stability Measures	77
3.4.1 Regularisation.....	77
3.4.2 Regularisation in LFFC.....	78
3.4.3 Simulations.....	87
3.5 Discussion	93
4. Non-Repetitive Motions: Parsimonious LFFC	95
4.1 Introduction	95
4.2 Curse of Dimensionality in LFFC.....	96
4.2.1 Illustrative Example: Rigid Robot Manipulator.....	96
4.2.2 Curse of Dimensionality	99
4.3 Parsimonious LFFC.....	100
4.3.1 Relations with Neuro-Fuzzy Modelling	100
4.3.2 ANOVA based LFFC.....	102
4.3.3 Parsimony by Means of Prior Knowledge	103
4.3.4 Parsimony by Iterative Empirical Modelling.....	106
4.3.5 Empirical Modelling: ASMOD.....	107
4.3.6 Empirical Modelling: Fuzzy Product Space Clustering	110
4.4 Training the Parsimonious LFFC.....	114
4.5 Discussion	118
5. Design & Applications	121
5.1 Introduction	121
5.2 LiMMS.....	123
5.2.1 Set-up.....	123

5.2.2 Design Procedure for a Time-Indexed LFFC	124
5.2.3 Validation Experiments of the Time-Indexed LFFC.....	126
5.2.4 Design of a Parsimonious LFFC	133
5.2.5 Evaluation Experiments	140
5.2.6 Discussion.....	144
5.3 Control Loading System	144
5.3.1 Introduction	144
5.3.2 Motivation for LFFC.....	146
5.3.3 Design Procedure for a Parsimonious LFFC.....	147
5.3.4 Evaluation Experiments	154
5.3.5 Discussion.....	157
6. Discussion	159
6.1 Review	159
6.2 Conclusions	162
A. Neural Networks & Fuzzy Logic	169
A.1 Multi Layer Perceptron Neural Network.....	169
A.1.1 Neurons	169
A.1.2 MLP Network.....	170
A.1.3 Training the MLP Neural Network.....	172
A.2 B-spline Network	174
A.2.1 B-splines	174
A.2.2 B-spline Network.....	176
A.2.3 Training the BSN	177
A.3 Fuzzy Logic.....	179
A.3.1 Introduction.....	179
A.3.2 Fuzzy Sets	180
A.3.3 Operations on Fuzzy Sets.....	181
A.3.4 Mamdani Fuzzy Controller.....	182
A.3.5 Takagi-Sugeno Fuzzy Controller	187
References	189
Summary	197
Samenvatting	199

Voorwoord

Een promotie is als een puzzel. Door de hulp van anderen kom je tot oplossingen die je in je eentje niet gevonden zou hebben. Allen die geholpen hebben mijn puzzel op te lossen wil ik daarvoor danken.

Je naaste collega's bepalen in grote mate het plezier dat je hebt in je werk. Erik, met jou had ik mij geen betere collega kunnen wensen.

Naast leuke collega's, is een begeleider bij wie je elk ogenblik van de dag kunt aankloppen voor raad, één van de meest belangrijke zaken voor een AIO. Theo, je was er altijd en ik heb je hulp als erg waardevol ervaren. Jij hebt me geleerd dat een opgeruimde kamer je werk ten goede komt. Ik hoop dat we onze samenwerking in de toekomst kunnen voortzetten.

Voor zijn goede aanwijzingen voor het schrijven van dit proefschrift wil ik graag Job bedanken.

Zonder de bijdragen van de volgende studenten zou dit onderzoek er anders uit hebben gezien. Bas, Douwe, Jaap, Jacques, Koen, Lars, Levi, Menno, Patrick, Pieter, Rene, Roy, Tom en Toon, bedankt.

Dit onderzoek werd mede mogelijk gemaakt door de volgende bedrijven: Philips CFT, Fokker Control Systems en Nefit-Fasto. Hun hulp en uitdagingen heb ik zeer op prijs gesteld.

Werk is meer dan werk alleen. De gezelligheid en de ondersteuning van alle (oud-) medewerkers van het lab en CLP hebben de afgelopen 4 jaar tot een erg leuke periode gemaakt.

Als laatste bedank ik mijn ouders, schoonouders en bovenal Femke en mijn *eigen* Job.

Wubbe Jan

