ADAPTIVE–ROBUST CONTROL OF A CLASS OF UNCERTAIN EULER-LAGRANGE SYSTEMS

SPANDAN ROY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
SEPTEMBER 2018

© Indian Institute of Technology Delhi (IITD), New Delhi, 2018

ADAPTIVE–ROBUST CONTROL OF A CLASS OF UNCERTAIN EULER-LAGRANGE SYSTEMS

by

SPANDAN ROY
Department of Electrical Engineering

Submitted
in fulfilment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
SEPTEMBER 2018

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled **Adaptive-Robust Control of a Class of Uncertain Euler-Lagrange Systems** submitted by **Spandan Roy** to the Indian Institute of Technology Delhi, for the award of the Degree of **Doctor of Philosophy**, is a record of the bona fide research work carried out by him under my supervision and guidance. The thesis has reached the standards fulfilling the requirements of the regulations relating to the degree.

The results contained in this thesis have not been submitted either in part or in full to any other University or Institute for the award of any degree or diploma to the best of my knowledge.

Prof. Indra Narayan Kar

Department of Electrical Engineering,

Indian Institute of Technology Delhi.

(Supervisor)

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to begin by thanking my thesis supervisor, Prof. I. N. Kar for all his guidance, advice, support, encouragement, patience and enthusiasm over the years during the period of my Ph.D. study here at IIT Delhi. I would also like to give special thanks to my SRC members for their support and valuable comments: Dr. S. Janardhanan, Dr. Shubhendu Bhasin, and Prof. Subir Kumar Saha. I would always be grateful to the other faculty and staff members of the Control and Automation group of IIT Delhi for their help and support.

A Ph.D. is not all about writing a thesis; rather it involves learning new things and, polishing and strengthening the existing knowledge base. In this respect, particularly, I would like to thank Sayan, Abhishek and Abhilash for the frequent discussions we had on various topics. Further, I thank Joyjit, Nalin and Madan for making me a part of their ongoing research which generated new learning avenues for me. Nevertheless, this journey would not have been pleasant without the warm receptions of all my lab mates and friends from Nilgiri hostel. On a personal note, I would like to thank my family for their constant support and encouragement, especially in the difficult times.

Finally, I thank the almighty for the blessings which have made this thesis possible.

Spandan Roy

ABSTRACT

Euler-Lagrange (EL) systems encompass a colossal amount of real world systems ranging from simple robotic manipulator, mobile robot, pneumatic muscles to complex systems such as humanoids, ship dynamics, aircraft systems etc. These systems have found enormous applications over the years in multitude of domains such as industry automation, planetary mission, surveillance etc. to name a few. Therefore, achieving autonomy while accomplishing a specified task has always attracted the control systems research community and tracking problem of EL systems is one such task. Broadly, researchers have applied two different class of control strategies, namely, adaptive control and robust control, to negotiate the inevitable parametric uncertainties of system and external disturbances. However, conventional adaptive control requires structural knowledge of the system as well as it is computationally intensive compared to a robust control strategy. On the other side, unlike an adaptive controller, a conventional robust controller requires predefined bound on the uncertainties. Therefore, the recent advancements are focused on developing a class of adaptive-robust control (ARC) law that can address the issues of both the adaptive and robust controllers while retaining their individual advantages. Nevertheless, the existing works on ARC still require complete knowledge of system model to either satisfy certain assumptions or develop the control law; moreover, the switching law based ARCs suffer from the over- and under-estimation problems of switching gain.

In the quest to reduce modelling dependency while designing controller, researchers have applied black-box techniques like neural-network (NN); however, such schemes require expertise knowledge apart from being computationally expensive. In view of such scenario, an alternate literature is growing where time delay is invoked intentionally into a delay-free system to approximate the unknown dynamics, accordingly called time-delayed estimation (TDE). Compared to a NN-based controller, time-delayed control (TDC), a TDE-based strategy, is easier to implement as well as does not require any expertise knowledge. Nonetheless, there exist un-

solved design issues of TDC which, apart from restricting its flexibility in practical applications, even may cause serious impediment to system stability. Hence, the aforementioned prevailing issues foster the aim of the thesis as *to develop an ARC framework for a class of uncertain EL systems with minimal or no knowledge of system dynamics parameters*. Detailed discussions regarding the issues of the conventional TDE-based controllers as well as the ARCs are given in Chapter 1. This thesis has four major contributions as briefly enumerated below, which also constitute the core essence of Chapters 2-5 respectively:

- A new stability analysis, based on the Lyapunov-Razumikhin theorem, is carried out for a TDE-based controller to bring out the solutions of its design issues. Accordingly, the study establishes a relation between controller gains and time delay; provides analytical measure to the impact of the selection of time delay on system stability and allows the continuous-time system to assimilate discrete-time feedback used for TDE process.

- A TDE-based ARC framework is proposed which can alleviate the over- and under-estimation problems of switching gain by avoiding any explicit usage of threshold value in the adaptive evaluation of switching gain.

- To reduce the effect of measurement error in absence of state-derivatives, a new TDE-based controller as well as an ARC are derived for a class of EL systems with merely position feedback. The proposed controllers utilize past position data to estimate the state-derivative terms.

- A novel ARC strategy is derived for a class of EL systems which, in contrast to a TDE-based law, does not require *any knowledge of system dynamics parameters*. Furthermore, the proposed ARC avoids any separate module for the uncertainty approximation and hence, simplifies the controller structure.

All the controllers in this thesis are specifically developed for a class of EL systems and ac-

cordingly suitable experimental validations are provided using a wheeled mobile robot, which serves as an appropriate exemplar of EL systems. At the end, concluding remarks and some future directions of this thesis are provided in Chapter 6.

सार

यूलर-लैग्रेज (ईएल) प्रणालियों में सरल रोबोट मैनिपुलेटर, मोबाइल रोबोट, वायवीय मांसपेशियों जैसे हनोनोइड, जहाज गतिशीलता, विमान प्रणाली इत्यादि जैसी जटिल दुनिया प्रणालियों की विशाल मात्रा में शामिल हैं। इन प्रणालियों में वर्षों से भारी आवेदन हुए हैं कुछ लोगों के नाम पर उद्योग स्वचालन, ग्रह मिशन, निगरानी इत्यादि जैसे डोमेन की भीड़। इसलिए, एक निर्दिष्ट कार्य को पूरा करते समय स्वायत्तता प्राप्त करना हमेशा नियंत्रण प्रणाली अनुसंधान समुदाय को आकर्षित करता है और ईएल सिस्टम की समस्या को ट्रैक करना एक ऐसा कार्य है। व्यापक रूप से, शोधकर्ताओं ने सिस्टम और बाहरी गड़बड़ी की अपरिहार्य पैरामीट्रिक अनिश्चितताओं पर बातचीत करने के लिए कंट्रोल रणनीतियों, अर्थात् अडॅप्टिव कंट्रोल और रोबस्ट कंट्रोल के दो अलग-अलग वर्गों को लागू किया है। हालांकि, परंपरागत अडॅप्टिव कंट्रोल के लिए प्रणाली के संरचनात्मक ज्ञान की आवश्यकता होती है और साथ ही यह एक रोबस्ट कंट्रोल रणनीति की तुलना में कम्प्यूटेशनल रूप से गहन है। दूसरी तरफ, अडॅप्टिव कंट्रोल के विपरीत, एक पारंपरिक रोबस्ट कंट्रोल को अनिश्चितताओं पर पूर्वनिर्धारित सीमा की आवश्यकता होती है। इसलिए, हालिया प्रगति अडॅप्टिव-रोबस्ट कंट्रोल (एआरसी) कानून की एक श्रेणी विकसित करने पर केंद्रित है जो अपने व्यक्तिगत फायदे बनाए रखते हुए अडॅप्टिव और रोबस्ट कंट्रोल दोनों के मुद्दों को संबोधित कर सकती है। फिर भी, एआरसी पर मौजूदा कार्यों को अभी भी सिस्टम मॉडल के पूर्ण ज्ञान की आवश्यकता है ताकि वे कुछ मान्यताओं को पूरा कर सकें या नियंत्रण कानून विकसित कर सकें; इसके अलावा, स्विचिंग लॉजिक आधारित एआरसी स्विचिंग लाभ की ओवर-एंड-अनुमानित समस्याओं से ग्रस्त हैं।

नियंत्रक डिजाइन करते समय मॉडलिंग निर्भरता को कम करने के लिए शोध में, शोधकर्ताओं ने नुरल नेटवर्क (एनएन) जैसे ब्लैक-बॉक्स तकनीकों को लागू किया है; हालांकि, ऐसी योजनाओं को कम्प्यूटेशनल रूप से महंगा होने के अलावा विशेषज्ञता ज्ञान की आवश्यकता होती है। इस तरह के परिदृश्य को ध्यान में रखते हुए, वैकल्पिक साहित्य बढ़ रहा है, जहां समय विलंब अज्ञात डाइनमिक्स अनुमानित करने के लिए देरी मुक्त प्रणाली में जानबूझकर शुरू किया जाता है, तदनुसार टाइम-डिलेड एस्टिमेशन (टीडीई) कहा जाता है। एक एनएन-आधारित नियंत्रक की तुलना में, टाइम-डिलेड कंट्रोल (टीडीसी), एक टीडीई-आधारित रणनीति, कार्यान्वित करना आसान

है और साथ ही किसी भी विशेषज्ञता ज्ञान की आवश्यकता नहीं है। फिर भी, टीडीसी के अनसुलझा डिजाइन मुद्दों मौजूद हैं, जो व्यावहारिक अनुप्रयोगों में अपनी लचीलापन को सीमित करने के अलावा, सिस्टम स्टेबिलिटी में गंभीर बाधा उत्पन्न कर सकते हैं। इसलिए, उपरोक्त प्रचलित मुद्दों थीसिस के उद्देश्य को कम से कम ईएल सिस्टम के एक वर्ग के लिए एआरसी ढांचे को विकसित करने के लिए प्रोत्साहित करते हैं, जिसमें सिस्टम डाइनमिक्स पैरामीटर के न्यूनतम या कोई ज्ञान नहीं है। परंपरागत टीडीई-आधारित कंट्रोलर्स के साथ-साथ एआरसी के मुद्दों के बारे में विस्तृत चर्चा अध्याय 1 में दी गई है। इस थीसिस में संक्षेप में नीचे वर्णित चार प्रमुख योगदान हैं, जो क्रमशः अध्याय 2-5 का मुख्य सार भी बनाते हैं:

- लाइपुनोव-रज़ुमिखिन प्रमेय के आधार पर एक नया स्टेबिलिटी विश्लेषण, टीडीई-आधारित कंट्रोल के लिए अपने डिजाइन मुद्दों के समाधान लाने के लिए किया जाता है। तदनुसार, अध्ययन कंट्रोलर गईं और टाइम डेले के बीच संबंध स्थापित करता है; सिस्टम स्टेबिलिटी पर टाइम डेले के चयन के प्रभाव के लिए विश्लेषणात्मक उपाय प्रदान करता है और कंटिन्युवस-टाइम सिस्टम को टीडीई प्रक्रिया के लिए उपयोग की जाने वाली अलग-अलग प्रतिक्रिया को पूरा करने की अनुमति देता है।
- एक टीडीई-आधारित एआरसी ढांचा प्रस्तावित किया जाता है जो स्विचिंग गईं के अडॅप्टिव मूल्यांकन में थ्रेशोल्ड वॅल्यू के किसी भी स्पष्ट उपयोग से बचकर स्विचिंग गईं की ओवर-एंड- अंडर एस्टिमेशन समस्याओं को कम कर सकता है।
- स्टेट-डेरिवेटिव्स की अनुपस्थिति में माप त्रुटि के प्रभाव को कम करने के लिए, एक नया टीडीई-आधारित नियंत्रक के साथ-साथ एआरसी केवल ईएल सिस्टम की कक्षा के लिए ली गई है। प्रस्तावित नियंत्रक स्टेट-डेरिवेटिव्स का अनुमान लगाने के लिए पिछले स्टेट डेटा का उपयोग करते हैं।
- एक नई एआरसी रणनीति ईएल सिस्टम की एक कक्षा के लिए ली गई है, जो कि टीडीई-आधारित लॉजिक के विपरीत, सिस्टम डाइनमिक्स पैरामीटर के किसी भी ज्ञान की आवश्यकता नहीं है। इसके अलावा, प्रस्तावित एआरसी अनिश्चितता अनुमान के लिए किसी भी अलग मॉड्यूल से बचाता है और इसलिए, नियंत्रक संरचना को सरल बनाता है।

इस थीसिस के सभी कंट्रोलर विशेष रूप से ईएल सिस्टम की कक्षा के लिए विकसित किए जाते हैं और तदनुसार उचित प्रयोगात्मक सत्यापन एक व्हील वाले मोबाइल रोबोट का उपयोग करके प्रदान किए जाते हैं, जो ईएल

सिस्टम के उपयुक्त उदाहरण के रूप में कार्य करता है। अंत में, टिप्पणियों का निष्कर्ष निकालना और इस थीसिस के कुछ भविष्य के निर्देश अध्याय 6 में उपलब्ध कराए गए हैं।

Contents

List of Figures **xvii**

List of Tables **xix**

1 Introduction **1**

1.1 Why Euler-Lagrange (EL) Systems? 3

1.2 Motivation 5

1.2.1 Time-Delayed Control (TDC): Artificial Delay for Uncertainty Approximation 5

1.2.2 The Overestimation and Underestimation Issues of The Existing ARC Laws 12

1.3 Lyapunov-Razumikhin Theorem: A Brief Note 17

1.4 Contributions of The Thesis 20

1.5 Organization of the Thesis 22

2 Time-Delayed Control of a Class of EL System: Design Issues and Solutions 25

2.1 Introduction 25

2.2 Time-Delayed Control (TDC): Framework 27

2.3 Summary of The Key Issues of a Conventional TDE-based Controller 30

2.4 New Stability Analysis of TDC: A Razumikhin based Approach 30

2.5 Solutions of the Issues of TDE-Based Controllers 35

2.6 Experimental Results: Nonholonomic Wheeled Mobile Robot 38
2.6.1 Experimental Scenario and Results 41
2.7 Summary 43

3 Adaptive Robust Time-Delayed Control for a Class of Uncertain EL Systems 45

3.1 Introduction 45
3.2 Controller Design: Adaptive-Robust Time-Delayed Control (ARTDC) 47
3.3 Comparison with The Existing ARC Laws 50
3.4 Stability Analysis of ARTDC 51
3.5 Simulation Results and Analysis 59
3.6 Experimental Results and Discussion 63
3.6.1 Experimental Scenario 63
3.6.2 Results and Analysis 65
3.7 Summary 68

4 Time-Delayed Control of a Class of EL Systems with only Position Feedback 71

4.1 Introduction 71
4.2 Time-Delayed Estimation Framework with Position Feedback 73
4.2.1 Time-Delayed Control (TDC): A Brief Review 73
4.2.2 Proposed Position-Only Time-Delayed Control (POTDC) 74
4.3 Stability Results and Controller Parameter Selections of POTDC 78
4.3.1 Stability Analysis of POTDC 78
4.3.2 Selection of Controller Parameters 81
4.4 Adaptive Robust Position-Only Time-Delayed Control (ARPOTDC) 82
4.5 Stability Analysis of ARPOTDC 84
4.6 Application to a WMR System 91

4.6.1 Experiment Scenarios 91
4.6.2 Experimental Results and Analysis for Scenario 1 (S1) 94
4.6.3 Comparative Experimental Results under Scenario 2 (S2) 94
4.6.4 Comparative Experimental Results under Scenario 3 (S3) 95
4.7 Summary 97

5 Adaptive-Robust Control of a Class of EL Systems with Unknown System Dynamics 99

5.1 Introduction 99
5.2 Problem Formulation 102
5.3 Adaptive Switching-gain Based Robust Control (ASRC) 105
5.4 Stability Analysis of ASRC 109
5.5 Comparison with Existing Adaptive-Robust Law and Some Design Aspects . . . 115
5.6 Experimental Validation: Application to a WMR 117
5.6.1 Experimental Scenario 118
5.6.2 Experimental Results and Comparison 119
5.7 Summary 123

6 Conclusions and Future Directions 125

6.1 Summary 125
6.2 Future Work 128

Bibliography 131

Appendix 143

A Proof of Lemma 2.1 143

B Proof of Lemma 4.1 146

List of Figures

1.1 Tracking performance of TDC with $h = 0.001$. 9

1.2 Tracking performance of TDC with $h = 0.02$. 9

1.3 Switching gain evaluation of ASMC [1]. 15

1.4 The Razumikhin conditions. 18

1.5 Flow of the thesis and its salient contributions. 24

2.1 Input delay profile for continuous-time sampled-data sytem. 37

2.2 Schematic of a WMR. 38

2.3 Circular path tracking performance of TDC with $h = 20$ms. 41

2.4 Tracking performance of TDC with various sampling intervals. 42

3.1 The profiles of external disturbance $\mathbf{d}$ used in the simulation. 60

3.2 Tracking performance comparison of various controllers for Joint 1. 61

3.3 Tracking performance comparison of various controllers for Joint 2. 61

3.4 The plot of total errors of various controllers. 62

3.5 The responses of the switching gain κ of ASMC (here threshold value is $4\kappa T_s$ with $T_s = h = 0.001$). 63

3.6 The responses of the switching gain $\hat{c}$ of ARTDC. 64

3.7 Control architecture for ARTDC while employing on PIONEER-3. 65

3.8 Circular path tracking performance of ARTDC. 66

3.9 Performance comparison of ARTDC with TDC and ASMC. 66

3.10 Switching gain evaluation of ASMC. 67

3.11 Switching gain evaluation of ARTDC. 68

4.1 A generalized block diagram of the proposed POTDC/ARPOTDC with WMR PIONEER-3. 92

4.2 Tracking performance comparison of TDC and POTDC for $h = 20$ ms. 93

4.3 Tracking performance comparison of TDC for various sampling intervals. 95

4.4 Tracking performance comparison of POTDC for various sampling intervals. . . 96

4.5 Circular path tracking performance of ARPOTDC. 97

4.6 Path error of various controllers. 97

4.7 The responses of the switching gain $\hat{c}$ of ARPOTDC. 98

5.1 $f_p(||\boldsymbol{\xi}||)$ with (a) one positive real root and three negative real roots (b) one positive real root, one negative real root and a pair of complex conjugate roots. . 112

5.2 Circular path tracking performance of ASRC1. 119

5.3 Tracking performance comparison of ASRC1, ASRC2 and ASMC. 120

5.4 The response of the switching gain K of ASMC. 121

5.5 The response of the switching gains of ASRC1. 122

5.6 The response of the switching gains of ASRC2. 123

List of Tables

2.1 Various parametric values of PIONEER-3 WMR 40

5.1 ASRC Algorithm for Various System Structures 115

List of Abbreviations

ARC: Adaptive-Robust Control

ARPOTDC: Adaptive-Robust Position Only Time-Delayed Control

ASRC: Adaptive Switching gain-based Robust Control

EL: Euler-Lagrange

LIP: Linear in parameters

NLIP: Nonlinear in parameters

POTDC: Position Only Time-Delayed Control

ROC: Robust Outer-loop Control

SMC: Sliding Mode Control

TDC: Time-Delayed Control

TDE: Time-Delayed Estimation

UUB: Uniformly ultimately Bounded

WMR: Wheeled Mobile Robots

List of Symbols

$\mathbb{R}$	Real line
$\mathbb{R}^+$	Real line of positive numbers
$\mathbb{R}^n$	Real space of dimension n
$\mathbb{R}^{n\times n}$	Real matrix of dimension $n \times n$
$\mathcal{C}$	Set of continuous functions
$\exists$	there exists
$\forall$	for all
$\mathbf{I}$	Identity matrix with appropriate dimension
$\mathbf{\Xi} > \mathbf{0} (< \mathbf{0})$	Positive (Negative) Definite matrix
$\lambda_{\min}(\mathbf{\Xi})$	minimum eigenvalue of the matrix $\mathbf{\Xi}$
$\lambda_{\max}(\mathbf{\Xi})$	maximum eigenvalue of the matrix $\mathbf{\Xi}$
$\|\|\mathbf{\Xi}\|\|$	Euclidean norm of the matrix $\mathbf{\Xi}$
φ_h	The variable φ is delayed by an amount h as $\varphi(t-h)$ where $h > 0$