การพัฒนาการทดลองระบบควบคุมผ่านอินเตอร์เน็ต

นายปุปุส อาดิวาลุโย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-4936-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF CONTROL SYSTEM EXPERIMENTS VIA THE INTERNET

Mr. Pupus Adiwaluyo

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2005
ISBN 974-17-4936-8

481641

Thesis Title	DEVELOPMENT OF CONTROL SYSTEM EXPERIMENTS VIA THE INTERNET
By	Mr. Pupus Adiwaluyo
Field of Study	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Associate Professor David Banjerdpongchai, Ph.D.

Accepted by the Faculty of Engineering, Chulalongkorn University in Partial Fulfillment of Requirements for Master's Degree

..... Dean of the Faculty of Engineering
(Professor Direk Lavansiri, Ph.D.)

THESIS COMMITTEE

..... Chairman
(Assistant Professor Manop Wongsaisuwan, D. Eng)

..... Thesis Advisor
(Associate Professor David Banjerdpongchai, Ph.D.)

..... Member
(Naebboon Hoonchareon, Ph.D.)

ปุปุส อาดิวาลุโย: การพัฒนาการทดลองระบบควบคุมผ่านอินเตอร์เน็ต (DEVELOPMENT OF CONTROL SYSTEM EXPERIMENTS VIA THE INTERNET), อ. ที่ปรึกษา: รศ. ดร. เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย, 77 หน้า, ISBN 974-17-4936-8

สถาบันการศึกษาหลายแห่งได้ประยุกต์ใช้เครือข่ายอินเตอร์เน็ตกันอย่างกว้างขวาง เพื่อนำเสนอสื่อการสอนให้กับผู้เรียนผ่านทางกระบวนการซึ่งเรียกว่าระบบการเรียนรู้อิเล็กทรอนิกส์ ในปัจจุบันนี้ห้องปฏิบัติการวิจัยในมหาวิทยาลัยต่างๆ จัดให้มีระบบห้องปฏิบัติการเสมือนจริงและห้องปฏิบัติการทางไกลอยู่บนเวปบ้างแล้ว ในงานวิจัยนี้ เราต้องการพัฒนาระบบการทดลองทางไกลในด้านระบบควบคุมผ่านทางอินเตอเน็ต โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถจำลองระบบและเข้าถึงระบบกายภาพผ่านทางอินเตอร์เน็ตผู้ใช้งานสามารถจำลองระบบและทำการทดลองทางไกล แล้วดาวน์โหลดข้อมูลและผลการทดลองเชิงรูปภาพ เพื่อนำไปวิเคราะห์แบบออฟไลน์ ระบบหลักในการทดลองประกอบด้วยสามระบบ ได้แก่แขนกลแบบอ่อนตัว สายพานลำเลียง และเพนดูลัมผกผันแบบหมุน เราเรียกการประยุกต์นี้ว่าห้องปฏิบัติการระบบควบคุมผ่านสื่ออิเล็กทรอนิกส์ ระบบนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นบนแก่นสภาพแวดล้อมของโปรแกรม MATLAB และเปิดโอกาสให้ทดลองวิเคราะห์ระบบ หาเอกลักษณ์ของระบบ และออกแบบตัวควบคุมการทดลองวิเคราะห์ระบบทำให้ผู้ใช้สามารถศึกษาพฤติกรรมของระบบทั้งในโดเมนเวลาและความถี่ ส่วนในการทดลองการหาเอกลักษณ์ของระบบ ให้คู่สัญญาณเข้าและสัญญาณออกที่ได้จากการวัดและเทคนิคการสร้างแบบจำลองเชิงเส้น ในการทดลองการออกแบบตัวควบคุม ผู้ใช้สามารถออกแบบตัวควบคุมที่ต้องการและประยุกต์ใช้กับระบบที่ต้องการควบคุม ในงานวิจัยนี้เราได้ใช้ระบบแขนกลแบบอ่อนตัวเป็นระบบตัวอย่างในการทดลองจริง

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา.....2548.....

##4770575521: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD: CONTROL EDUCATION/ THE INTERNET/ REMOTE EXPERIMENT/ ROTARY INVERTED PENDULUM/ BELT CONVEYOR/ FLEXIBLE LINK

PUPUS ADIWALUYO: DEVELOPMENT OF CONTROL SYSTEM EXPERIMENTS VIA THE INTERNET. THESIS ADVISOR: DAVID BANJERDPONGCHAI, Ph.D., 77 pp., ISBN 974-17-4936-8

The Internet has been widely used by many educational institutions to present course materials to the learners using an application, namely E-learning. Currently, there are several virtual and remote laboratories on the web, mainly developed in university research labs. In this research, we want to develop a remote conducted control experiment via internet which in turn will enable users to run the simulation and access the physical system via the Internet. The users can run the remote simulation and experiments, download the data and graphic results and analyze them offline. Three plants, namely rotary flexible link, belt conveyor and rotary inverted pendulum, are used as the experiment platform. We name our application as E- laboratory. Developed using MATLAB as its core environment, E-laboratory provides system analysis, identification and control design experiments. System analysis experiments will enable users to study the behavior of the plants and its predefined controller. System identification experiments offer an input-output pair of measurement that used in identification system. Control design experiments allow users to design their controller and apply it to the respective plants. As an example, those three types of experiments are applied to the flexible link plant.

Department .....Electrical Engineering.....
Field of study.....Electrical Engineering.....
Academic year .....2005.....

Student's signature .....
Advisor's signature .....

Acknowledgments

Praise the Lord for His faithfullness on me which last forever

The LORD is my shepherd; I shall not want. He maketh me to lie down in green pastures; he leadeth me beside the still waters. He restoreth my soul; he leadeth me in the paths of righteousness for his name's sake. Yea, though I walk through the valley of the shadow of death, I will fear no evil; for thou art with me; thy rod and thy staff they comfort me. Thou preparest a table before me in the presence of mine enemies; thou anointest my head with oil; my cup runneth over. Surely goodness and mercy shall follow me all the days of my life; and I will dwell in the house of the LORD forever... **(KJV, Psalm 23:1-6)**

And also I would never forget these people who contribute to my thesis completion.

1. Professor David Banjerdpongchai, for his endless assistance, patience and advice during my study.
2. Professor Manop Wongsaisuwan and Professor Naebboon Hoonchareon for being my orals and reading committee.
3. Lecturers at Electrical Engineering Department, Chulalongkorn University for giving me food of thought and insights.
4. Professor Lukito Edi Nugroho and Professor Teguh Bharata Adji in the Department of Electrical Engineering at Gadjah Mada University who had kindly helped me come to study in Chulalongkorn University.
5. AUN/SEED-NET which financially supported my study at Chulalongkorn University.
6. My parents, Sutrisno and Nyatirah, my sister Budi Hartati and brothers, Kristian Budi Pranoto and Kodrat Adi Sucipto, for their years of unfailing love, caring and support.
7. CSRL members for their never ending helps.
8. All of Indonesian students who study in Thailand for always give me support to keep my spirit during my study.
9. BIC Bangkok members, my new family.
10. Bangkok for teaching me lessons of life.

Contents

Abstract (Thai) iv

Abstract (English) v

Acknowledgments vi

Contents vii

List of Tables ix

List of Figures x

1 Introduction 1

1.1 Motivation 1

1.2 Literature Review 2

1.3 Objective 5

1.4 Scope of Thesis 5

1.5 Methodology 5

1.6 Contributions 6

2 E-LABORATORY ARCHITECTURE 7

2.1 Hardware 8

2.1.1 Flexible Link 8

2.1.2 Rotary Inverted Pendulum 9

2.1.3 Belt Conveyor 10

2.2 Software 11

2.2.1 MATLAB 11

2.2.2 Linux Operating System 12

2.2.3 Apache Web Server 14

2.2.4 Wincon 15

3 BASIC KNOWLEDGE 16

3.1 Mathematical Models 16

3.1.1 Flexible Link 16

3.1.2 Rotary Inverted Pendulum 17

3.1.3 Belt Conveyor 21
3.2 Identification 22
3.2.1 Non Parametric Methods 23
3.2.2 Parametric Methods 25
3.3 Controller Design 28
3.3.1 PID Controller 28
3.3.2 Linear Quadratic Regulator Controller 30

4 SIMULATION EXPERIMENTS 32
4.1 Flexible Link 33
4.1.1 System Analysis 33
4.1.2 Identification 41
4.1.3 Controller Design 50
4.2 Rotary Inverted Pendulum 53
4.2.1 System Analysis 53
4.2.2 Identification 58
4.2.3 Controller Design 59
4.3 Belt Conveyor 60
4.3.1 System Analysis 60
4.3.2 Identification 61
4.3.3 Controller Design 64

5 REAL EXPERIMENTS 67
5.1 System Analysis 67
5.2 Identification 68
5.3 Controller Design 69
5.4 Problem and Obstacles 71

6 CONCLUSIONS 73
6.1 Summary of Results 73
6.2 Recommendation for Future Works 74

REFERENCES 76

BIOGRAPHY 78

List of Tables

2.1 List of software. 11

3.1 Flexible link parameters. 18
3.2 Rotary inverted pendulum parameters. 20
3.3 Belt conveyor parameters. 21
3.4 K_P, K_I, and K_D effect on closed-loop system. 30

4.1 Identification result of belt conveyor using parametric method. 64

5.1 Identification result using parametric method at flexible link plant. 69

List of Figures

2.1 E-laboratory architecture. 7
2.2 Physical appearance of flexible link. 8
2.3 Flexible link hardware structure. 9
2.4 Physical appearance of rotary inverted pendulum. 10
2.5 Physical appearance of belt conveyor. 10
2.6 Matlabserver on the web. 13

3.1 Schematic picture of flexible link. 16
3.2 Diagram of rotary inverted pendulum used in e-laboratory system. 19
3.3 Block diagram of belt conveyor. 21
3.4 Nominal model of belt conveyor. 22
3.5 Step response with transient analysis. 23
3.6 Output and input of the plant. 24
3.7 PID control of plant. 28
3.8 PID controller. 29

4.1 Main page of the experiments. 32
4.2 System analysis control design. 33
4.3 Flow chart of system analysis. 34
4.4 Step response of flexible link 34
4.5 Frequency response of theta. 36
4.6 Frequency response of alpha. 36
4.7 Closed-loop condition. 37
4.8 Closed-loop step response using simple gain. 37
4.9 Closed-loop response using simple gain to the reference of 30^o. 38
4.10 Arm deflection to the reference of 30^o. 38
4.11 Web page for flexible link system analysis. 39
4.12 Simulation result of the flexible link system analysis. 40
4.13 Simulation result of the flexible link system analysis in text file. 40
4.14 Procedure to obtain data for identification. 42
4.15 Model data plot. 43
4.16 Impulse response obtained from correlation analysis. 44
4.17 Bode plot for spectral analysis in rad/s. 45
4.18 Ffplot for spectral analysis in frequency (Hz). 45

4.19 Output and input of the plant with f = 1 rad/sec 46
4.20 Comparison of different order of state space. 47
4.21 Comparison between measured output and simulated model output of state space (m1), ARX model (m2) and ARMAX model (m3). 49
4.22 Web page for flexible link identification. 49
4.23 Simulation result of flexible link identification. 50
4.24 Switching the controller. 51
4.25 Web interface to upload user controller. 52
4.26 Template model file. 52
4.27 Simulation result using MATLAB. 53
4.28 Step response of the measured variables of rotary inverted pendulum. 54
4.29 Frequency response. 55
4.30 Web page for rotary inverted pendulum system analysis. 56
4.31 Simulation of double inverted pendulum result using arbitrary gain. 57
4.32 Simulation result of the rotary inverted pendulum system analysis. 57
4.33 Simulation of double inverted pendulum result using MATLAB. 58
4.34 Web page for rotary inverted pendulum control design. 59
4.35 Step response of closed-loop system. 60
4.36 Closed-loop frequency response. 61
4.37 Web page for belt conveyor system analysis. 62
4.38 Step response of belt conveyor. 62
4.39 Web page for belt conveyor identification. 63
4.40 Simulation result of belt conveyor identification using prbs input. 63
4.41 Comparison between state space(m1), ARX(m2), and ARMAX(m3) model. . 64
4.42 Web page for belt conveyor control design. 65
4.43 Web page presentation of PID controller simulation. 65
4.44 PID controller simulation using MATLAB. 66

5.1 Wincon server. 67
5.2 Wincon client. 68
5.3 Experiment result of arm deflection, α. 68
5.4 Experiment result of link position, θ. 69
5.5 Comparison of the model type from identification. 70
5.6 Real control design experiment page. 70
5.7 Simulation of link position, θ. 71