

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



E46206

การควบคุมแบบสัมพัทธ์เป็นฟังก์ชันอันดับสามโดยใช้นิพจน์ไอโรสโปล

นายสมพล สุนทรศานติก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



E46206

การควบคุมแบบสัมพรรคเป็นช่วงสำหรับจักรยานอัตโนมัติโดยใช้ผลของไอโรสโคป



นาย สมพล สุนทรสถานติก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



5 2 7 0 7 0 0 7 2 1

PIECEWISE AFFINE CONTROL FOR AUTONOMOUS BICYCLE
USING GYROSCOPIC EFFECT



Mr. Sompol Suntharasantic

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 2010
Copyright of Chulalongkorn University

Thesis Title PIECEWISE AFFINE CONTROL FOR AUTONOMOUS BICYCLE
 USING GYROSCOPIC EFFECT

By Mr. Sompol Suntharasantic

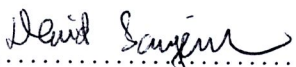
Field of Study Electrical Engineering

Thesis Advisor Assistant Professor Manop Wongsaisuwan, Ph.D.

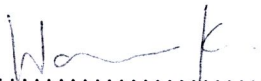
Accepted by the Faculty of Engineering, Chulalongkorn University in Partial
Fulfillment of the Requirements for the Master’s Degree


..... Dean of the Faculty of Engineering
(Associate Professor Boonsom Lerdhirunwong, Dr. Ing.)

THESIS COMMITTEE


..... Chairman
(Associate Professor David Banjerdpongchai, Ph.D.)


..... Thesis Advisor
(Assistant Professor Manop Wongsaisuwan, Ph.D.)

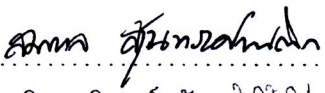
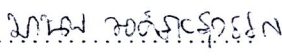

..... External Examiner
(Associate Professor Waree Kongprawechanon, Ph.D.)

สมพล สุนทรศานติก : การควบคุมแบบสัมพรรคเป็นช่วงสำหรับจักรยานอัตโนมัติโดยใช้ผลของไจโร-
สโคป (PIECEWISE AFFINE CONTROL FOR AUTONOMOUS BICYCLE USING
GYROSCOPIC EFFECT) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. มานพ วงศ์สายสุวรรณ, 64
หน้า

E46206

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอแนวคิดใหม่ในการควบคุมจักรยานอัตโนมัติโดยใช้ผลของไจโรสโคปด้วยวิธี
การควบคุมแบบสัมพรรคเป็นช่วง เราพิจารณาแบบจำลองจักรยานอัตโนมัติที่ไม่มีเสถียรภาพโดยธรรมชาติที่ความเร็ว
ไปข้างหน้าและความเร็วในการหมุนคงที่ จักรยานประกอบติดกับจานหมุนไจโรสโคปที่ใช้เป็นตัวขับเคลื่อนสำหรับสร้าง
เสถียรภาพให้กับมุมลื่นของจักรยาน ตัวแปรต่างๆ ในระบบวัดมาจากตัวจักรยานขนาดใหญ่และบางตัวแปรหา
ได้โดยอ้อมจากโปรแกรมช่วยออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์ แบบจำลองไม่เชิงเส้นของระบบจักรยานถูกประมาณด้วย
ชุดของแบบจำลองเชิงเส้นหรือแบบจำลองสัมพรรคเป็นช่วงซึ่งทำให้ค่าผิดพลาดของแบบจำลองมีค่าลดลงแม้กระทั่ง
อยู่นอกย่านการทำงานก็ตาม เพื่อที่จะสร้างเสถียรภาพให้กับระบบไม่เชิงเส้นนี้เราใช้แบบจำลองสัมพรรคเป็นช่วง
ในการออกแบบตัวควบคุมป้อนกลับ ปัญหาการสังเคราะห์ตัวควบคุมได้เปลี่ยนให้เป็นปัญหาสมการเมทริกซ์เชิง
เส้น อัตราขยายป้อนกลับที่เป็นไปได้หาได้โดยอาศัยฟังก์ชันเลียบอนุพันธ์กำลังสองครอบคลุมเป็นพื้นฐานเพื่อรับประกัน
เสถียรภาพสำหรับทุกย่าน ผลการจำลองยืนยันประสิทธิภาพของวิธีการนี้

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2553

ลายมือชื่อนิสิต 
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก 

5270700721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

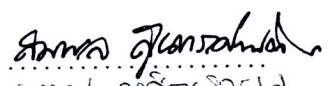
KEYWORDS : BICYCLE ROBOT / GYROSCOPIC STABILIZATION / PIECEWISE AFFINE SYSTEM / SINGLE TRACK VEHICLE / LINEAR MATRIX INEQUALITIES

SOMPOL SUNTHARASANTIC : PIECEWISE AFFINE CONTROL FOR AUTONOMOUS BICYCLE USING GYROSCOPIC EFFECT. ADVISOR : ASST. PROF. MANOP WONGSAISUWAN, Ph.D., 64 pp.

E46206

This thesis proposes the new idea of autonomous bicycle control using gyroscopic effect by piecewise affine control method. We considers the naturally unstable autonomous bicycle system at constant forward and rotational speeds. The bicycle is attached with a gyroscopic flywheel acting as an actuator for roll angle stabilization. The system parameters are measured from the adult size bicycle body and some parameters are obtained indirectly from CAD program. The nonlinear model of the bicycle system is approximated by a set of linear model or piecewise affine models which minimizes the model error even outside the operating regions. To stabilize this nonlinear system, we use the piecewise affine model to design the feedback controller. The controller synthesis problem is cast as a Linear Matrix Inequalities problem. The feasible feedback control gain is derived based on a globally quadratic Lyapunov function to guarantee the system stability for all regions. The simulation confirms the effectiveness of this approach.

Department Electrical Engineering ..
 Field of Study Electrical Engineering ..
 Academic Year 2010

Student's Signature 
 Advisor's Signature 

Acknowledgments

I would like to express my profound gratitude to my principal advisor, Assistant Professor Manop Wongsaisuwan, for his kind guidance, helpful advice, and constructive suggestions on the piecewise affine control used in my research.

I would like to thank to all the committee members of my research. Associate Professor David Banjerdpongchai who provides me with the necessary background on control system theory and kindly served on the thesis committee as a chairman. I am also grateful to Dr. Waree Kongprawechanon for her intuitive questions and comments which help me a lot for the improvement in the research.

I gratefully acknowledge the Scholarship from Electrical Engineering Department for the financial support throughout my Master's Degree study. Many thanks to colleague, Prachya Rungtweesuk, a Bachelor's student who was hard-working and made a well support in technical problem while this research was ongoing. In particular, I would like to thank to the people who works hard on the optimization software running on MATLAB "YALMIP" toolbox package, the solver "SDPT3" for efficiently solving the formulations. Also, the prior CSRL members who created and developed the $\LaTeX$ Class for this Thesis.

Finally, I would like to thank my family for their understanding and support during my study. Thanks are also given to all members of Control Systems Research Laboratory, Chulalongkorn University for their encouragement and friendship.

Contents

	Page
Abstract (Thai)	iv
Abstract (English)	v
Acknowledgments	vi
Contents	vii
List of Tables	ix
List of Figures	x
CHAPTER	
I INTRODUCTION	1
1.1 Research Motivation	1
1.2 Literature Review	2
1.3 Thesis Objective	3
1.4 Scope of Thesis	3
1.5 Methodology	4
1.6 Contributions	4
1.7 Structure of Thesis	4
II RELATED THEORIES	5
2.1 Bicycle Properties	5
2.1.1 Nature of the Bicycle	5
2.1.2 The Trail	5
2.1.3 Self-stability	6
2.1.4 Gyroscopic Effect at the Front Wheel	7
2.2 Lagrangian Mechanics	9
2.3 Piecewise Affine System	9
2.3.1 Model Representation	10
2.3.2 Quadratic Stability	10
2.3.3 Piecewise Quadratic Stability	11
2.3.4 Piecewise Quadratic Stabilization of PWA system	12
III EXPERIMENTAL BICYCLE	14
3.1 Bicycle	14
3.2 Gyroscopic Flywheel	15

Figure	Page
IV BICYCLE DYNAMIC MODEL	19
4.1 Bicycle Geometry	19
4.2 Model Assumptions	20
4.2.1 Nonlinear Dynamic Model	21
4.3 Linearized Dynamic Model	22
V PIECEWISE AFFINE MODEL FOR BICYCLE ROBOT	24
5.1 Trigonometric Terms Approximation	24
5.2 Least-Square Error Approximation without Boundary Constraints	27
5.3 Least-Square Error Approximation with Boundary Constraints	28
5.4 Comparison of Model Error	33
VI PIECEWISE AFFINE CONTROL FOR BICYCLE ROBOT	39
6.1 Problem Formulation	39
6.2 Main Result	39
VII CONCLUSIONS	48
7.1 Summary	48
7.2 Future Work Guideline	49
REFERENCES	50
APPENDICES	55
APPENDIX A	56
APPENDIX B	58
Biography	64

List of Tables

Table	Page
2.1 Parameters of the Experimental Bicycle for Self-stability Analysis.	8
3.1 Parameters for Gyroscopic Flywheel Design Calculation.	17
3.2 Summary of Flywheel Moment of Inertia.	18
4.1 Parameters for Bicycle Gyroscopic Flywheel Dynamic Model.	20
5.1 Approximated trigonometric functions in each polyhedral cell.	27
5.2 Summary of the root-mean-square error of the approximated PWA model.	33
5.3 Summary of the maximum absolute error of the approximated PWA model.	34

List of Figures

Figure	Page
2.1 The position of the trail distance of the bicycle [48].	5
2.2 Eigenvalues from the linearized self-stability analysis.	7
2.3 Gyroscopic effect at the front wheel coordinate and notation.	7
3.1 The selected bicycle before modifying.	14
3.2 The 3D CAD drawing of the bicycle before modifying.	15
3.3 Bicycle robot attached with gyroscopic flywheel.	15
3.4 The bicycle configuration for sizing the flywheel (mass and dimension).	16
3.5 Side View Cross-section of Flywheel configuration.	18
4.1 The Bicycle Geometry.	19
4.2 The bicycle curvature path.	20
5.1 Polyhedral partition of the PWA bicycle state space model.	25
5.2 Affine approximation of functions sin and cos.	26
5.3 The roll angle error plane of the linearized model.	35
5.4 The precession angle error plane of the linearized model.	35
5.5 The roll angle error plane of the trigonometric terms approximation PWA model.	36
5.6 The precession angle error plane of the trigonometric terms approximation PWA model.	36
5.7 The roll angle error plane of the discontinuous PWA model.	37
5.8 The precession angle error plane of the discontinuous PWA model.	37
5.9 The roll angle error plane of the continuous PWA model.	38
5.10 The precession angle error plane of the continuous PWA model.	38
6.1 Polyhedral partition with its outer minimum volume ellipsoid approximation.	40
6.2 Simulink model of nonlinear bicycle model.	41
6.3 Simulink model - PWA bicycle model.	42
6.4 The response of roll angle, roll velocity, precession angle, and precession velocity of Nonlinear and PWA model with the initial condition $(\varphi(0), \alpha(0), \dot{\varphi}(0), \dot{\alpha}(0)) = (0.3, 0.3, 0, 0)$	43
6.5 The response of roll angle, roll velocity, precession angle, and precession velocity of Nonlinear and PWA model with the initial condition $(\varphi(0), \alpha(0), \dot{\varphi}(0), \dot{\alpha}(0)) = (-0.3, 0.3, 0, 0)$	43
6.6 The response of roll angle, roll velocity, precession angle, and precession velocity of Nonlinear and PWA model with the initial condition $(\varphi(0), \alpha(0), \dot{\varphi}(0), \dot{\alpha}(0)) = (-0.3, -0.3, 0, 0)$	44

Figure	Page
6.7 The response of roll angle, roll velocity, precession angle, and precession velocity of Nonlinear and PWA model with the initial condition $(\varphi(0), \alpha(0), \dot{\varphi}(0), \dot{\alpha}(0)) = (0.3, -0.3, 0, 0)$	44
6.8 The response of roll angle, roll velocity, precession angle, and precession velocity of Nonlinear and PWA model with the initial condition $(\varphi(0), \alpha(0), \dot{\varphi}(0), \dot{\alpha}(0)) = (0, 0.3, 0, 0)$	45
6.9 The response of roll angle, roll velocity, precession angle, and precession velocity of Nonlinear and PWA model with the initial condition $(\varphi(0), \alpha(0), \dot{\varphi}(0), \dot{\alpha}(0)) = (0, -0.3, 0, 0)$	45
6.10 The trajectory of bike roll angle vs flywheel precession angle with 4 sets of initial conditions $(\varphi(0), \alpha(0), \dot{\varphi}(0), \dot{\alpha}(0))$	46
6.11 The trajectory of bike roll velocity vs flywheel precession velocity with 4 sets of initial conditions $(\varphi(0), \alpha(0), \dot{\varphi}(0), \dot{\alpha}(0))$	46
6.12 Lyapunov function plot of the bicycle dynamic system.	47