

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความเสียหายที่แสดงผลของสัญญาณความถี่สูง



นายสิริณัฐ ชันธจิรวัดน์

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-3877-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Development of a Mathematical Model of Friction to Represent Dither Effects

Mr. Sianat Kantacheerawat

ศูนย์วิทยพัชกร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-3877-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแรงเสียดทานที่แสดงผลของ
สัญญาณความถี่สูง

โดย

นายสิรณัฐ ชันฉวีวัฒน์

ภาควิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

อาจารย์ ดร.สิติมา จินตนาวัน

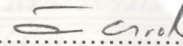
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต



..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ)



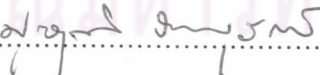
..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ดร.สิติมา จินตนาวัน)



..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ศุภวุฒิ จันทรานูวัฒน์)



..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์)

สิรินธร ชันวีวัฒน์ การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแรงเสียดทานที่แสดงผลของ
สัญญาณความถี่สูง. (DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF FRICTION TO
REPRESENT DITHER EFFECTS) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. รัชทิน จันทร์เจริญ , อ. ที่ปรึกษาร่วม : ดร.
จิตติมา จินตนาวัน , 141 หน้า. ISBN 974-17-3877-3.

วิทยานิพนธ์นี้ เสนองงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษา พัฒนาระเบียบวิธีหาแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระบบ
ทางกล และทำการพัฒนาแบบจำลองความเสียดทานที่แสดงผลของสัญญาณความถี่สูงที่มีต่อระบบทางกล
การศึกษาและวิเคราะห์หาแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระบบทางกล ได้นำหุ่นยนต์ CRS Robotics มา
ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของแรงเสียดทาน และเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เกิดจากเปลี่ยนแปลงแรงโน้มถ่วง
จึงศึกษาพฤติกรรมของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในแกนหมุนที่ 1 เนื่องจากสัญญาณตำแหน่งที่วัดได้จาก
Encoder เป็นข้อมูลที่มีความไม่ต่อเนื่อง การหาค่าความเร็วและความเร่งจากสัญญาณตำแหน่งใช้ระเบียบวิธี
เชิงตัวเลขที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อหาค่าอนุพันธ์จากข้อมูลที่มีความไม่ต่อเนื่อง และนำไปใช้ในการหาค่าแรงเสียด
ทานของระบบพร้อมๆ กับการหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อย

จากการศึกษาโดยใช้สัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันได สัญญาณอ้างอิงรูปไซน์ ในระบบควบคุมแบบ
ปิด พบว่าสัญญาณความถี่สูงสามารถทำให้ค่าความผิดพลาดสุดท้ายลดลง และเมื่อทำการจำลองระบบโดย
ใช้แบบจำลองความเสียดทานแบบ Coulomb, Dahl, LuGre, Seven Parameter and State variable พบว่า
ผลที่ได้จากการจำลอง สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองจึงกล่าวได้ว่าแบบจำลองความเสียดทานที่
กล่าวถึงสามารถแสดงผลของสัญญาณความถี่สูง

ผลการศึกษาพฤติกรรมของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระบบหุ่นยนต์ CRS Robotics พบว่าพฤติกรรม
มีลักษณะ Coulomb Viscous Friction และมีค่าโมเมนต์ความเฉื่อย $27.68 \text{ Nm} \cdot \text{s}^2$ เมื่อเพิ่มสัญญาณ
ความถี่สูงเข้าสู่ระบบจะทำให้พฤติกรรมของแรงเสียดทานในหุ่นยนต์ CRS Robotics ซึ่งมีลักษณะเป็นค่าไม่
ต่อเนื่องที่ความเร็วเป็นศูนย์ เปลี่ยนแปลงเป็นรูปแบบที่ต่อเนื่อง และได้พัฒนาแบบจำลองความเสียดที่
สามารถแสดงผลของสัญญาณความถี่สูงเพื่อใช้ในการศึกษาต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2546

ลายมือชื่อนิสิต 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม 

4370558821 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: FRICTION MODEL / DITHER / STICK-SLIP / FRICTION DETERMINATION

SIRANAT KANTACHEERAWAT: DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF FRICTION TO REPRESENT DITHER EFFECTS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. RATCHATIN CHANCHAROEN, Ph.D., THESIS COADVISOR : THITIMA JINTANAWAN, Ph.D., 141 pp. ISBN 974-17-3877-3

This thesis aims to develop a technique to determine friction characteristic in real mechanical plants and also develop a friction model that can effectively demonstrate the effect of dither.

The waist joint of the CRS Robotics is used in the study since the motion of this joint is free to the gravity. The joint position, sensed by an incremental encoder, is a discrete signal. Thus, a practical differentiation technique is proposed to determine joint velocity and acceleration which are first and second derivative of the position respectively. The friction characteristic should be determined in conjunction with joint inertia since both are unknown. This study also proposed a practical technique to determine both friction and plant inertia simultaneously based on the sinusoidal input, joint position, velocity and acceleration

In the study, it is shown that the dither can reduce the steady state error in the feedback system when the command references are step and sinusoidal. All friction models, including Coulomb, Dahl, Luge, Seven Parameter and State variable models show their response to the dither and the responses from the simulation with any of these friction models agree with the result from the experiment. Thus, these friction models can be used to study the effect of dither.


The friction in the CRS Robotics, determined by the proposed technique, is closed to the Coulomb viscous friction, and the joint inertia is found to be $27.68 \text{ Nm} \cdot \text{s}^2$. When the dither is applied to the systems, the friction characteristic changes, especially at zero velocity. The discontinuous friction at the zero velocity is transformed to a continuous function. Thus, the mathematical model that can effectively display the effect of dither is proposed

Department Mechanical Engineering

Field of study Mechanical Engineering

Academic year 2003

Student's signature 

Advisor's signature 

Co-advisor's signature 

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผศ.ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.ฐิติมา จินตนาวัน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งท่านทั้งสองได้กรุณาสละเวลาอันมีค่าของท่านเพื่อให้คำแนะนำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยครั้งนี้ พร้อมทั้งจัดหาทุน และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้มาให้โดยตลอด ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.วัชระ เลิศพิริยะสุวัฒน ที่ให้คำแนะนำด้านเอกสารงานวิจัย

วิทยานิพนธ์และงานวิจัยนี้คงจะไม่มีทางประสบความสำเร็จลงได้ ถ้าหากขาดความช่วยเหลือจากบิดามารดาในทุกๆ ด้านไม่ว่าจะเป็นทางด้านเงินทุน ข้อคิดเห็นต่างๆ รวมทั้งกำลังใจและความห่วงใยที่อบอุ่นยิ่งที่มีให้แก่ผู้เขียนเสมอมา และคุณณลินี ชันธิจักรวัฒน ผู้ที่คอยช่วยเหลือสนับสนุน ให้คำแนะนำและชักนำให้มาศึกษาต่อในระดับปริญญาบัณฑิตทำให้ผู้เขียนได้มีโอกาสมาทำงานวิจัยและได้รับประสบการณ์ที่ล้ำค่านี้

ในที่นี้ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบคุณอาจารย์ ดร.วิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์ อาจารย์ ดร.ศุภวุฒิ จันทร์านุวัฒน ผศ.ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ และ อาจารย์ ดร.วัชระ เลิศพิริยะสุวัฒน สำหรับโอกาสในการร่วมทำงานในโครงการวิจัยของ M-Tec ที่นำมาซึ่งประสบการณ์และทุนการศึกษาแก่ผู้เขียน ขอขอบคุณ รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธ์ศิริ ที่ได้ให้ความรู้และเงินสนับสนุนการศึกษามาตลอด และขอขอบคุณสำหรับทุกๆ ท่านที่อยู่แวดล้อมผู้เขียนไม่ว่าจะเป็นคณาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิที่เคยถ่ายทอดความรู้และให้คำแนะนำ รวมไปถึงเพื่อนนักศึกษา รุ่นพี่ รุ่นน้อง ทั้งในระดับปริญญาเอกและปริญญาโท ที่ได้ร่วมกันให้ข้อคิดเห็น และข้อเสนอแนะต่างๆ พร้อมทั้งยังได้ให้กำลังใจที่ดี แก่กันเสมอมา

ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 ขั้นตอนการวิจัย.....	4
1.6 ตารางการดำเนินงาน.....	5
1.7 สิ่งริเริ่มในงานวิจัย.....	5
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 นำเรื่อง.....	7
2.2 ทฤษฎีและปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดจากความเสียดทาน.....	7
2.2.1 แรงเสียดทานจลน์.....	8
2.2.2 แรงเสียดทานหนืด.....	10
2.2.3 แรงเสียดทานสถิตและการเคลื่อนที่แบบ stick-slip.....	12
2.2.4 ระยะเวลาจัดก่อนการเคลื่อนที่.....	14
2.2.5 แรงเสียดทานสถิตแปรตามเวลาหยุดนิ่ง.....	16
2.2.6 แรงเสียดทานที่แปรตามความเร็ว.....	17
2.2.7 ความหน่วงของการเปลี่ยนแปลงแรงเสียดทาน.....	18

	หน้า
2.3 แบบจำลองของแรงเสียดทาน.....	19
2.3.1 Coulomb Friction Model.....	19
2.3.2 Dahl's Model.....	21
2.3.3 The LuGre Model.....	21
2.3.4 State Variable Friction Model.....	23
2.3.5 The Seven Parameter Friction Model.....	24
2.4 ความสามารถในการจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดจากความเสียดทาน ของแบบจำลองความเสียดทานแต่ละชนิด.....	26
3. การศึกษาพฤติกรรมของแบบจำลองความเสียดทาน.....	28
3.1 นำเรื่อง.....	28
3.2 พฤติกรรมของแบบจำลองความเสียดทานชนิดต่างๆ.....	28
3.2.1 แบบจำลองความเสียดทานแบบ Coulomb.....	28
3.2.2 แบบจำลองความเสียดทานของ Dahl.....	29
3.2.3 แบบจำลองความเสียดทานของ LuGre.....	30
3.2.4 แบบจำลองความเสียดทานแบบ Seven Parameter.....	31
3.2.5 แบบจำลองความเสียดทานแบบ State Variable.....	32
3.2.6 การเปรียบเทียบพฤติกรรมของแบบจำลองความเสียดทาน ชนิดต่างๆ.....	33
4. การศึกษาพฤติกรรมของแรงเสียดทานในหุ่นยนต์ CRS Robotics.....	34
4.1 นำเรื่อง.....	34
4.2 แนวทางในการศึกษาพฤติกรรมของแรงเสียดทาน.....	36
4.2.1 นำเรื่อง.....	36
4.2.2 การหาค่าตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งของระบบ.....	37
4.2.3 การหาความเฉื่อยของระบบ.....	40
4.2.4 การหาแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระบบ.....	41

4.3 ชุดทดลองและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	41
4.3.1 แชนหุ่นยนต์ CRS Robotics.....	42
4.3.2 Analog Computer.....	44
4.3.3 Function Generator.....	44
4.3.4 Host and Target PC.....	44
4.3.5 D/A Card.....	44
4.3.6 ETT 8255 Digital Input Card.....	44
4.3.7 Accton Ethernet Card.....	46
4.4 ระบบควบคุมที่ใช้ในการทดลอง.....	46
4.5 การหารูปแบบความเสียหายและความเฉื่อยในหุ่นยนต์ CRS Robotics	51
4.5.1 การหา ค่าตำแหน่ง ความเร็วและความเร่งใน หุ่นยนต์ CRS Robotics.....	51
4.5.2 การหาค่าความถี่ใช้งานของระบบหุ่นยนต์ CRS Robotics....	60
4.5.3 การหาค่าความเฉื่อยและพฤติกรรมของแรงเสียดทาน.....	64
4.6 สรุปผล.....	72
5. แบบจำลองความเสียหายที่แสดงผลของสัญญาณความถี่สูง.....	73
5.1 นำเรื่อง.....	73
5.2 ผลของสัญญาณความถี่สูงที่มีต่อระบบ.....	73
ก.6.1 รูปแบบของสัญญาณความถี่สูง.....	74
ก.6.2 การศึกษาผลของสัญญาณความถี่สูงที่มีต่อระบบควบคุม....	74
5.3 แบบจำลองความเสียหายที่มีผลต่อสัญญาณความถี่สูง.....	81
5.4 สรุปผล.....	88
6. บทสรุป.....	89
6.1 วิเคราะห์และสรุปผล.....	89
6.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยต่อเนื่อง.....	90

	หน้า
รายการอ้างอิง.....	92
ภาคผนวก.....	94
ก. Matlab®-Simulink® xPC target.....	95
ก.1 นำเรื่อง.....	95
ก.2 ความรู้เบื้องต้นก่อนการใช้งาน.....	96
ก.3 คุณสมบัติหลักของ xPC.....	99
ก.4 การใช้งาน xPC target.....	100
ก.5 การเชื่อมต่อระหว่าง Host และ Target PC.....	102
ก.6 โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมระบบหุ่นยนต์ CRS Robotics.....	102
ก.6.1 โปรแกรมควบคุมระบบปิด.....	102
ก.6.2 โปรแกรมควบคุมระบบเปิด.....	107
ข. Numerical Differential Method.....	109
ข.1 นำเรื่อง.....	109
ข.2 Finite Divided Difference.....	109
ข.2.1 Forward Finite Differential.....	109
ข.2.2 Central Finite Differential.....	109
ข.2.3 Backward Finite Differential.....	110
ข.3 Richardson's Extrapolation.....	110
ข.4 2 nd Order Polynomial Fitting.....	112
ค. Non-Linear Least Square Method.....	113
ค.1 นำเรื่อง.....	113
ค.2 Least Square Curve Fitting.....	113
ง. รายละเอียดเกี่ยวกับหุ่นยนต์ CRS Robotics.....	116
จ. โปรแกรมที่ใช้ในการหาค่าตัวแปรของแบบจำลองความเสียดทาน.....	120
จ.1 นำเรื่อง.....	120
จ.2 โปรแกรมที่ใช้ในการหาความเร็วความเร่งจากข้อมูลตำแหน่ง.....	120
จ.3 โปรแกรมที่ใช้ในการหาค่าตัวแปรจำแบบจำลองความเสียดทาน.....	123
จ.4 โปรแกรมที่ใช้ในการหาค่าตัวแปรจากแบบจำลองความเสียดทาน ที่แสดงผลของสัญญาณความถี่สูง.....	125
ฉ. บทความวิจัย.....	128

สารบัญ

	หน้า
จ.1 การประชุมวิชาการเครือข่ายเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 16.....	129
จ.2 The Third Asian Conference on Industrial Automation and Robotics..	135
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	141



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ความเสียหายที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรกลเป็นอุปสรรคที่สำคัญอย่างหนึ่งในการพัฒนาประสิทธิภาพของระบบอัตโนมัติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบที่ต้องการความแม่นยำสูงทั้งในการควบคุมตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ เครื่องมือกลในระบบระบบไฮดรอลิกและระบบนิวเมติก

คุณลักษณะของความเสียหายมีการศึกษาอย่างแพร่หลายในวิชา Tribology ซึ่งเป็นศาสตร์ที่ว่าด้วยการเสียดสีและผิวสัมผัส ความเสียหายยังเป็นต้นเหตุสำคัญของปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนหลายๆ อย่าง (Brian and Pierre, 1993) โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเร็วสัมพัทธ์ต่ำมากๆ และในช่วงที่มีการกลับทิศทางของความเร็ว (Pierre and Eric, 1993) ปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทานเช่น Coulomb and viscous friction, stibek effect, memory effect pre-sliding displacement, hysteresis loop, stick-slip motion และ varying break-away force (Canudas al et.,1995) เหล่านี้เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ขาดเสถียรภาพ และลดประสิทธิภาพในระบบควบคุม ด้วยเหตุดังกล่าวจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับวิศวกรควบคุมที่จะต้องเข้าใจถึงคุณลักษณะของความเสียหายเพื่อนำไปสู่การลดผลของความเสียหาย และการนำคุณสมบัติของความเสียหายไปใช้

ในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงความเสียหายที่เกิดจากการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างสองผิวสัมผัส (Sliding Friction) ทำให้เกิดความเร็วสัมพัทธ์ต่อกัน ซึ่งเกิดขึ้นในเครื่องจักรกลหลายๆ ชนิดเช่น ในการขบกันระหว่างฟันเกียร์ ความเสียหายที่เกิดขึ้นในแบริ่งแบบร่องลึก หรือความเสียหายที่เกิดจากลากวัตถุบนพื้นผิวที่มีความหยาบ

ความเสียหายที่เกิดขึ้นในระบบทางกลทั่วไปเป็นปรากฏการณ์ไม่เชิงเส้นที่มีปัจจัยเกี่ยวข้องหลายปัจจัยเช่น ขนาดของภาระ (load) ที่กระทำต่อวัตถุและพื้นผิวเสียดทาน ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างพื้นผิวเสียดทาน ชนิดของสารหล่อลื่นระหว่างพื้นผิวเสียดทาน รวมไปถึงอุณหภูมิของสารหล่อลื่น

ระบบควบคุมโดยทั่วไปจะพิจารณาความเสียหายเพียงส่วนที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้นเช่น Coulomb Friction และ Viscous Friction ซึ่งในความเป็นจริงแล้วการละเลยคุณสมบัติหรือปรากฏการณ์หลายๆ อย่างของความเสียหาย เป็นเหตุให้การควบคุมระบบที่ต้องการความ

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 1.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	5
ตารางที่ 2.1	ความสามารถในการจำลองปรากฏการณ์ของแบบจำลอง ความเสียดทานแต่ละชนิด.....	26
ตารางที่ 4.1	ค่าตัวแปรของแบบจำลองความเสียดทานที่ความถี่ต่างๆ.....	71
ตารางที่ 5.1	ค่าตัวแปรของแบบจำลองความเสียดทานที่แสดงผลของ สัญญาณความถี่สูงที่ความถี่ใช้งาน.....	86
ตารางที่ ข.1	การเพิ่มความแม่นยำด้วยวิธี Richardson's extrapolation.....	111
ตารางที่ ง.1	รายละเอียดเกี่ยวกับหุ่นยนต์ CRS.....	116



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1	แรงเสียดทานจลน์ที่เกิดขึ้นระหว่างมวลที่เคลื่อนที่..... 8
รูปที่ 2.2	รูปแบบของแรงเสียดทานจลน์..... 8
รูปที่ 2.3	รูปแบบของแรงเสียดทานจลน์ที่ไม่สมมาตร..... 9
รูปที่ 2.4	รูปแบบแรงเสียดทานหนืด..... 10
รูปที่ 2.5	รูปแบบของแรงเสียดทานที่เกิดจากแรงเสียดทานจลน์และ แรงเสียดทานหนืด..... 12
รูปที่ 2.6	รูปแบบของแรงเสียดทานที่เกิดจากแรงเสียดทานจลน์ แรงเสียดทานหนืด และแรงเสียดทานสถิต..... 13
รูปที่ 2.7	แบบจำลองการเกิดปรากฏการ Stick-Slip..... 13
รูปที่ 2.8	ปรากฏการณ์ Pre-sliding..... 15
รูปที่ 2.9	แรงเสียดทานสถิตที่ขึ้นกับเวลาอยู่นิ่ง..... 15
รูปที่ 2.10	การเปลี่ยนแปลงของแรงเสียดทานเมื่อเทียบกับความเร็ว..... 16
รูปที่ 2.11	Hysteresis Friction เนื่องจากเวลาล้าหลังของแรงเสียดทาน..... 18
รูปที่ 2.12	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเร็วที่ ของ Kinetic Friction model
รูปที่ 2.13	Lugre's model 22
รูปที่ 3.1	พฤติกรรมของแบบจำลองความเสียดทานแบบคูลอมบ์..... 28
รูปที่ 3.2	แผนภาพการจำลองที่ใช้ในการศึกษาแบบจำลองของ Dahl..... 29
รูปที่ 3.3	พฤติกรรมของแบบจำลองความเสียดทานของ Dahl..... 29
รูปที่ 3.4	แบบจำลองความเสียดทานของ Lugre..... 30
รูปที่ 3.5	พฤติกรรมของแบบจำลองความเสียดทานของ Lugre..... 30
รูปที่ 3.6	แบบจำลองความเสียดทานแบบ Seven parameter..... 31
รูปที่ 3.7	รูปแบบพฤติกรรมของแบบจำลองความเสียดทานแบบ Seven Parameter..... 31
รูปที่ 3.8	แบบจำลองความเสียดทานแบบ State Variable..... 32
รูปที่ 3.9	รูปแบบพฤติกรรมของแบบจำลองความเสียดทานแบบ State Variable..... 33
รูปที่ 3.10	รูปแบบพฤติกรรมของแบบจำลองความเสียดทานชนิดต่างๆ..... 33
รูปที่ 4.1	หุ่นยนต์ CRS Robotics..... 35
รูปที่ 4.2	Potentiometer..... 38
รูปที่ 4.3	ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของแรงเสียดทาน..... 42

		หน้า
รูปที่ 4.4	อนาลอกคอมพิวเตอรืที่ใช้ในการทดลอง.....	43
รูปที่ 4.5	Function Generator G-305.....	43
รูปที่ 4.6	การ์ด D/A รุ่น PCL 726.....	45
รูปที่ 4.7	การ์ดรับสัญญาณ Digital รุ่น ETT 8255.....	45
รูปที่ 4.8	การ์ดเครือข่ายของบริษัท Accton Technology รุ่น EN 165X.....	46
รูปที่ 4.9	Simulink Block Diagram ที่ใช้ในการควบคุมแขนหุ่นยนต์.....	47
รูปที่ 4.10	ระบบควบคุมที่ใช้ในการวิจัย.....	50
รูปที่ 4.11	สัญญาณตำแหน่งที่วัดได้จาก Encoder.....	50
รูปที่ 4.12	Block Diagram สำหรับการแสดงผลสัญญาณรบกวนที่มีต่อ การหาอนุพันธ์.....	52
รูปที่ 4.13	ข้อมูลตำแหน่งที่มีสัญญาณรบกวนขนาด 1 % ของขนาดข้อมูล.....	52
รูปที่ 4.14	ผลการหาค่าอนุพันธ์โดยวิธี Finite Divided Difference.....	53
รูปที่ 4.15	ผลการหาค่าอนุพันธ์และเพิ่มความแม่นยำด้วยวิธี Richardson's Extrapolation.....	53
รูปที่ 4.16	ผลการหาค่าอนุพันธ์โดยใช้วิธี 2 nd Polynomial Fitting.....	54
รูปที่ 4.17	ผลการหาค่าอนุพันธ์โดยใช้วิธี 2 nd Polynomial Fitting เมื่อเปลี่ยน แปลงความถี่ของสัญญาณคำสั่ง.....	57
รูปที่ 4.18	ผลการหาอนุพันธ์โดยใช้วิธีแบ่งช่วงข้อมูลตำแหน่งเท่าๆ กันเมื่อเปลี่ยน แปลงความถี่ของสัญญาณคำสั่ง.....	59
รูปที่ 4.19	แผนภาพระบบควบคุมแบบปิดที่ใช้การควบคุมหุ่นยนต์ CRS Robotics.....	60
รูปที่ 4.20	ผลการควบคุมหุ่นยนต์ CRS Robotics โดยใช้สัญญาณคำสั่ง แบบขั้นบันได.....	61
รูปที่ 4.21	ผลการควบคุมหุ่นยนต์ CRS Robotics โดยใช้สัญญาณคำสั่งรูปซายน์ ความถี่ 1 Hz.....	61
รูปที่ 4.22	ผลการควบคุมหุ่นยนต์ CRS Robotics โดยใช้สัญญาณคำสั่งรูปซายน์ ความถี่ 5 Hz.....	62
รูปที่ 4.23	การตอบสนองเชิงความถี่ของสัญญาณคำสั่ง ในระบบควบคุมแบบปิด เมื่อสัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณขั้นบันได.....	62

รูปที่ 4.24	การตอบสนองเชิงความถี่ของสัญญาณคำสั่ง ในระบบควบคุมแบบปิด เมื่อสัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณรูปไซน์ ความถี่ 1 Hz.....	63
รูปที่ 4.25	การตอบสนองเชิงความถี่ของสัญญาณคำสั่ง ในระบบควบคุมแบบปิด เมื่อสัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณรูปไซน์ ความถี่ 5 Hz.....	63
รูปที่ 4.26	ข้อมูลตำแหน่งที่วัดได้จาก Encoder และความเร็วและความเร่งจากการหาค่าอนุพันธ์.....	64
รูปที่ 4.27	ค่าความเร็วเทียบกับสัญญาณคำสั่งที่สัญญาณคำสั่งความถี่ 0.25 Hz.	67
รูปที่ 4.28	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับความเร็วที่ความถี่ 0.25 Hz....	67
รูปที่ 4.29	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับความเร็วที่ความถี่ 0.5 Hz.....	68
รูปที่ 4.30	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับความเร็วที่ความถี่ 1.0 Hz.....	68
รูปที่ 4.31	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับความเร็วที่ความถี่ 3.0 Hz.....	69
รูปที่ 4.32	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับความเร็วที่ความถี่ 5.0 Hz.....	69
รูปที่ 5.1	แผนภาพการจำลองระบบควบคุมแบบปิดเพื่อศึกษาผลของสัญญาณความถี่สูง.....	76
รูปที่ 5.2	ผลของสัญญาณความถี่สูงที่มีต่อระบบควบคุมแบบปิด.....	77
รูปที่ 5.3	ผลการควบคุมหุ่นยนต์ CRS Robotics ในระบบควบคุมแบบปิดเมื่อเพิ่มสัญญาณความถี่สูง.....	79
รูปที่ 5.4	การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของเสียดทานเมื่อเพิ่มสัญญาณความถี่สูง.	80
รูปที่ 5.5	พฤติกรรมของแรงเสียดทาน เมื่อเพิ่มสัญญาณความถี่สูงที่ความถี่ของสัญญาณคำสั่ง 0.25 Hz.....	83
รูปที่ 5.6	พฤติกรรมของแรงเสียดทาน เมื่อเพิ่มสัญญาณความถี่สูงที่ความถี่ของสัญญาณคำสั่ง 0.5 Hz.....	83
รูปที่ 5.7	พฤติกรรมของแรงเสียดทาน เมื่อเพิ่มสัญญาณความถี่สูงที่ความถี่ของสัญญาณคำสั่ง 1.0 Hz.....	84
รูปที่ 5.8	พฤติกรรมของแรงเสียดทาน เมื่อเพิ่มสัญญาณความถี่สูงที่ความถี่ของสัญญาณคำสั่ง 3.0 Hz.....	84
รูปที่ 5.9	พฤติกรรมของแรงเสียดทาน เมื่อเพิ่มสัญญาณความถี่สูงที่ความถี่ของสัญญาณคำสั่ง 5.0 Hz.....	85
รูปที่ 5.10	ผลการจำลองระบบควบคุม โดยใช้แบบจำลองความเสียดทานชนิดต่างเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง.....	87

รูปที่ 5.11	ผลการจำลองระบบควบคุม โดยใช้แบบจำลองความเสียดทาน ชนิดต่างๆ เปรียบเทียบ กับผลที่ได้จากการทดลอง.....	81
รูปที่ ก.1	ระบบพลศาสตร์ ที่ต้องการควบคุม.....	97
รูปที่ ก.2	การจำลองระบบการควบคุมระดับน้ำด้วย Simulink Block Diagram.	97
รูปที่ ก.3	หน้าต่างแสดงการควบคุมการทำงานของ xPC บน Host PC.....	98
รูปที่ ก.4	IO Block Library ที่มีใช้อยู่ใน Simulink Library.....	98
รูปที่ ก.5	การแปลงข้อมูลจากรูปแบบของ Block Diagram ไปสู่ข้อมูล ที่ใช้ใน xPC Target.....	99
รูปที่ ก.6	การเชื่อมต่อระหว่าง Host PC และ Target PC ผ่านทาง RS232 และ TCP/IP Protocol.....	100
รูปที่ ก.7	หน้าต่างการติดตั้งค่าตัวแปรในการใช้ xPC Target.....	101
รูปที่ ก.8	หน้าจอแสดงผลของ Target PC.....	101
รูปที่ ก.9	Block Diagram ที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์แบบปิด.....	103
รูปที่ ก.10	ส่วนควบคุมที่ใช้ในการติดต่อกับการ์ด A/D.....	103
รูปที่ ก.11	การจัดเรียงข้อมูลในตำแหน่ง high byte.....	104
รูปที่ ก.12	การจัดเรียงข้อมูลในตำแหน่ง Low byte.....	104
รูปที่ ก.13	ส่วนควบคุมที่ใช้ในการติดต่อกับการ์ด Digital Input.....	105
รูปที่ ก.14	การจัดเรียงข้อมูลทีใน ETT 8255 Card.....	105
รูปที่ ก.15	ส่วนควบคุม IC 8255	107
รูปที่ ก.16	Block Diagram ที่ใช้ในระบบควบคุมแบบเปิด.....	107
รูปที่ ง.1	การแสดงผลหุ่นยนต์แบบ articulated ของบริษัท CRS Robotics รุ่น 255 ด้านข้าง.....	119
รูปที่ ง.2	การแสดงผลหุ่นยนต์แบบ Articulated ของบริษัท CRS Robotics รุ่น 255 ด้านบน.....	119