

ผลของขนาดและความถี่ของสัญญาณอินพุตความถี่สูงที่มีต่อความเสียดทานในระบบทางกล



นายภิญโญ ศรีคำแหง

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

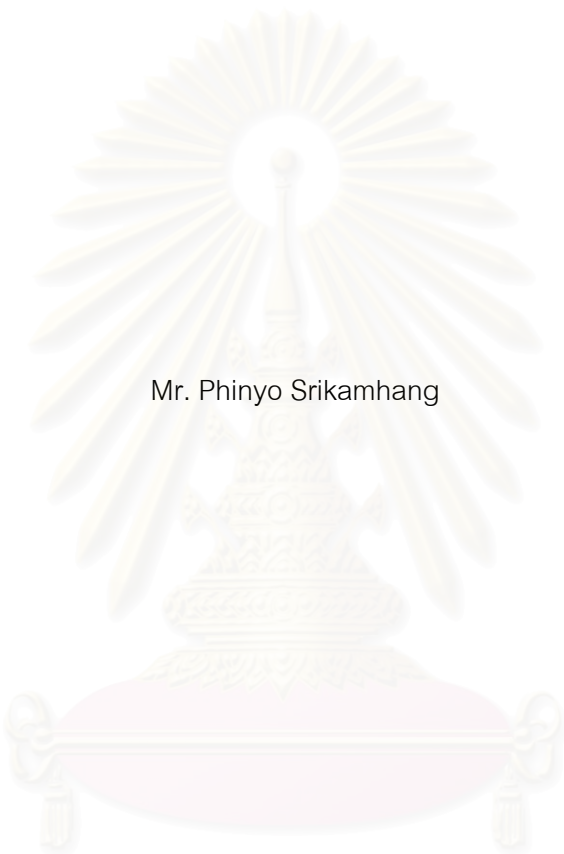
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2391-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effects of Amplitude and Frequency of Dither Input on Friction in Mechanical Systems



Mr. Phinyo Srikamhang

สถาบันวิทยบริการ
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 2002

ISBN 974-17-2391-1

ภิญโญ ศรีคำแหง : ผลของขนาดและความถี่ของสัญญาณอินพุตความถี่สูงที่มีต่อ
ความเสียดทานในระบบทางกล. (EFFECTS OF AMPLITUDE AND FREQUENCY OF DITHER
INPUT ON FRICTION IN MECHANICAL SYSTEMS) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. รัชทิน จันท์เจริญ ,
อ. ที่ปรึกษาร่วม : ดร. สุธิตา จินตนาวัน , 117 หน้า. ISBN 974-17-2391-1.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เสนองงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาถึงผลของขนาดและความถี่ของสัญญาณอินพุตความถี่สูง (Dither) ที่สามารถชดเชยแรงเสียดทานในเวลาจริงที่เกิดขึ้นในระบบทางกล โดยทำการเปรียบเทียบผลการควบคุมตำแหน่งของระบบ เนื่องจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น ณ บริเวณตำแหน่งอ้างอิงจะมีลักษณะไม่เชิงเส้น และมีความไม่ต่อเนื่องสูง ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาถึงวิธีการใช้สัญญาณ Dither เพื่อลดค่าผิดพลาดทางตำแหน่งในภาวะเสถียร (steady state error) ที่เกิดจากแรงเสียดทานในระบบ อีกทั้งสามารถนำสัญญาณ Dither ไปชดเชยแรงเสียดทาน พร้อมกับตัวชดเชยที่อ้างอิงแบบจำลอง เพื่อลดค่าผิดพลาดทางตำแหน่งได้อย่างสมบูรณ์

งานวิจัยนี้ได้จำลองการควบคุมมอเตอร์ที่มีความเสียดทาน พร้อมทั้งได้ทดลองในชุดทดลองระบบทางกลจำนวน 3 ชุดทดลอง ประกอบด้วย ระบบส่งกำลังของบริษัท ECP รุ่น 220 ชุดมอเตอร์รุ่น 767 และแขนหุ่น CRS Robotics โดยทำการวัดค่าผิดพลาดทางตำแหน่งของมอเตอร์ จากการสั่งให้มอเตอร์หมุนเป็นฟังก์ชันขั้น ซึ่งผลการทดลองสามารถแสดงให้เห็นว่า วิธีการชดเชยแรงเสียดทานด้วยการใส่สัญญาณ Dither สามารถลดค่าความผิดพลาดที่เป็นผลมาจากแรงเสียดทานลงได้ ในขณะที่การใช้ตัวชดเชยแรงเสียดทานที่อ้างอิงแบบจำลองจะสามารถลดช่วงเวลาขึ้น (Rise time) ของระบบควบคุม

ในการศึกษาถึงผลของขนาดและความถี่ของสัญญาณ Dither ในระบบแขนหุ่นยนต์ CRS Robotics พบว่าขนาดของสัญญาณ Dither ที่เหมาะสมควรมีค่าน้อยเท่ากับแรงเสียดทานสถิตย์สูงสุด และความถี่ที่เหมาะสม ควรมีค่าอยู่ในช่วงความถี่ใช้งาน (bandwidth) ของระบบควบคุม ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าขนาดของสัญญาณ Dither ที่ต่ำกว่าแรงเสียดทานสถิตย์สูงสุด และที่ความถี่สูงเกินกว่าความถี่ใช้งานของชุดทดลอง สัญญาณ Dither จะไม่สามารถชดเชยแรงเสียดทานได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้เกิดค่าผิดพลาดในการควบคุมตำแหน่งขึ้น

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

437044521 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: FRICTION COMPENSATION / DITHER / STICK-SLIP / PD CONTROLLER

PHINYO SRIKAMHANG : EFFECTS OF AMPLITUDE AND FREQUENCY OF DITHER INPUT ON FRICTION IN MECHANICAL SYSTEMS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. RATCHATIN CHANCHAROEN, Ph.D., THESIS COADVISOR : THITIMA JINTANAWAN, Ph.D., 117 pp. ISBN 974-17-2391-1.

The study investigates the effect of amplitude and frequency of dither for friction compensation in mechanical plant. The thesis focuses on the control of system positioning of which the friction is highly nonlinear and discontinuous around a reference point; in particular, the effects of dither on the friction-induced steady state error.

In addition, the model based friction compensation is incorporated into the dither based technique such that the friction effects are minimized.

The experiments on three different mechanical systems, i.e. ECP 220 plant, Comdyna 767 and CRS robotics system, are used to study the step response and the resulting steady state error. Additionally, the ECP 220 plant is also simulated. The results show that the dither signal significantly reduces the steady state error while the model based friction compensation reduces the response time constant. Both techniques can be integrated to simultaneously decrease both error and time constant.

The study on CRS robotics system demonstrates that the dither amplitude should exceed the maximum static friction while the dither frequency should fall within the bandwidth of the system. Otherwise, the dither may not effectively compensate the friction, yielding no reduction of the steady state error.

Department Mechanical Engineering

Student's signature

Field of study Mechanical Engineering

Advisor's signature

Academic year 2002

Co-advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทรเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.ฐิติมา จินตนาวัน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งท่านทั้งสองได้กรุณาสละเวลาอันมีค่าของท่าน เพื่อให้คำแนะนำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยครั้งนี้ พร้อมทั้งจัดหาทุน และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้มาให้โดยตลอด ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย และขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.วัชระ เลิศพิริยสุวัฒน์ ที่ให้คำแนะนำด้านเอกสารงานวิจัย ขอขอบคุณ คุณสิรณัฐ ชันฉวีวัฒน์ ที่ให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรม xPC Target และขอขอบคุณ เพื่อนนักศึกษา รุ่นพี่ รุ่นน้อง ทั้งในระดับปริญญาเอก และปริญญาโท ที่ได้ร่วมกันให้ข้อคิดเห็น และข้อเสนอแนะต่างๆ พร้อมทั้งยังได้ให้กำลังใจที่ดีๆ แก่กันเสมอมา

สุดท้ายนี้ วิทยานิพนธ์และงานวิจัยนี้คงจะไม่มีทางประสบความสำเร็จลงได้ ถ้าหากขาดความช่วยเหลือจากบิดามารดาในทุกๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นทางด้านเงินทุน ข้อคิดเห็นต่างๆ รวมทั้งกำลังใจและความห่วงใยที่อบอุ่นยิ่งที่มีให้แก่ผู้เขียนเสมอมา ในโอกาสนี้ผู้วิจัยจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ที่ได้อบรมเลี้ยงดู ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆ สิ่งให้แก่ผู้เขียนจนสามารถสำเร็จการศึกษาลงได้ด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญรูปภาพ	ฏ
บทที่	
1 .. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	1
1.3 ขอบเขตของงานวิทยานิพนธ์	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 การดำเนินการวิจัย.....	4
1.6 ลำดับเนื้อหาของวิทยานิพนธ์	5
1.7 สิ่งริเริ่มในวิทยานิพนธ์	5
2 การควบคุมระบบที่มีแรงเสียดทาน.....	7
2.1 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control System)	7
2.2 การพิจารณาระบบที่มีความเสียดทาน	8
2.2.1 หมวดควบคุมทั่วไป (Regulator)	9
2.2.2 หมวดการควบคุมที่ความเร็วผกผัน (Tracking with velocity reversal).....	9
2.2.3 หมวดการควบคุมที่ความเร็วต่ำ (Tracking at low velocity)	10
2.2.4 หมวดการควบคุมที่ความเร็วสูง (Tracking at high velocity)	10
2.3 การชดเชยแรงเสียดทาน (Friction compensation)	11
2.3.1 การชดเชยแรงเสียดทานที่ไม่อ้างอิงแบบจำลอง (Non-model-based compensation for friction)	11
2.3.1.1 วิธี Stiff PD control	11

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
2.3.1.2	วิธีการเพิ่มตัวควบคุมแบบอินทิกรัล	12
2.3.1.3	สัญญาณอินพุตความถี่สูง (Dither)	13
2.3.1.4	Impulsive control.....	14
2.3.1.5	วิธี Sensor-Based technique	15
2.3.2	การชดเชยแรงเสียดทานที่อ้างอิงแบบจำลอง (Model-based compensation for friction)	17
2.3.2.1	การชดเชยแรงเสียดทานแบบคงค่าพารามิเตอร์ (Fixed compensation)	17
2.3.2.2	การควบคุมแบบพารามิเตอร์ปรับเปลี่ยนได้ (Adaptive control).....	18
2.4	ตัวควบคุมที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.....	21
3	พฤติกรรมแรงเสียดทาน	22
3.1	กฎพื้นฐานของแรงเสียดทาน.....	22
3.2	แรงเสียดทานจลน์ (Kinetic Friction)	23
3.3	แรงเสียดทานหนืด (Viscous Friction)	26
3.4	แรงเสียดทานสถิตย (Static Friction) และปรากฏการณ์ Stick-Slip	28
3.5	การขจัดก่อนการไถล (Pre-sliding Displacement)	31
3.6	แรงเสียดทานสถิตยที่ขึ้นกับเวลาอยู่นิ่ง (Static Friction Dependence on Dwell Time).....	33
3.7	แรงเสียดทานที่แปรตามความเร็ว (Friction Variation with Velocity)	34
3.8	แรงเสียดทานล่าช้า (Friction Lag)	37
4	การจำลองการควบคุมมอเตอร์ที่มีแรงเสียดทาน.....	40
4.1	แบบจำลองของระบบมอเตอร์กระแสตรง.....	40
4.2	แบบจำลองระบบควบคุม.....	42
4.2.1	แบบจำลองตัวควบคุมเชิงเส้น	42
4.2.2	แบบจำลองตัวชดเชยแรงเสียดทาน.....	43
4.2.3	สัญญาณ Dither	44

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลการจำลองระบบควบคุม	45
4.3.1 การควบคุมแบบ PD Control	46
4.3.2 การควบคุมแบบ PI Control.....	47
4.3.3 การควบคุมแบบ PD และ ตัวชดเชยแรงเสียดทาน.....	48
4.3.4 การควบคุมแบบ PD และ Dither.....	49
4.3.5 การควบคุมแบบ PD พร้อมตัวชดเชยแรงเสียดทาน และ Dither	50
4.4 ผลของขนาดและความถี่ของ Dither ต่อค่าผิดพลาดทางตำแหน่ง.	54
5 การทดลองควบคุมมอเตอร์ที่มีแรงเสียดทาน	57
5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	58
5.2 การควบคุมชุดทดลองระบบส่งกำลังของบริษัท ECP รุ่น 220	59
5.3 การทดลองควบคุมชุดมอเตอร์ของบริษัท Comdyna, Inc. รุ่น 767	62
5.3.1 การควบคุมแบบ PD Control	64
5.3.2 การควบคุมแบบ PI Control.....	65
5.3.3 การควบคุมแบบ PD และ ตัวชดเชยแรงเสียดทาน.....	66
5.3.4 การควบคุมแบบ PD และ Dither.....	67
5.3.5 การควบคุมแบบ PD พร้อมตัวชดเชยแรงเสียดทาน และDither	69
5.4 ผลของสัญญาณ Dither ที่มีต่อค่าผิดพลาดทางตำแหน่งของ แขนหุ่นยนต์ CRS Robotics	71
6 บทสรุป	75
6.1 บทสรุป	75
6.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยต่อเนื่อง	76
รายการอ้างอิง.....	78
ภาคผนวก.....	81
ก. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	82
ก.1 ชุดอุปกรณ์ทดลองระบบส่งกำลังของบริษัท ECP รุ่น 220.....	82

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ก.2 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ของบริษัท Comdyna, Inc. รุ่น 767.....	85
ก.3 แขนหุ่นยนต์ CRS Robotics	87
ข. ตัวอย่างโปรแกรมควบคุม.....	93
ข.1 การจำลองการควบคุมมอเตอร์กระแตรง.....	93
ข.2 โปรแกรมการจำลองการวิเคราะห์ค่าผิดพลาดเมื่อขาดเซย์ด้วย สัญญาณ Dither.....	95
ข.3 โปรแกรมการควบคุมระบบมอเตอร์กระแตรง	96
ข.3.1 โปรแกรม xPC Target.....	96
ข.3.2 การใช้งานโปรแกรม xPC Target	98
ข.3.3 การควบคุมระบบทดลองผ่านโปรแกรม simulink/xPC Target	100
ค. ตารางผลการทดลอง	103
ง. บทความวิจัย	104
ง.1 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 16	105
ง.2 The Third Asian Conference on Industrial Automation and Robotics	111
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	117

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 การดำเนินการวิจัย.....	5
ตารางที่ 2.1 หมวดการควบคุมเพื่อชดเชยแรงเสียดทาน	11
ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่าผิดพลาดเนื่องจากการควบคุมแบบต่างๆ	52
ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบผลของค่าผิดพลาดเนื่องจากการควบคุมแบบชดเชยแรงเสียดทานและเปลี่ยนขนาดของสัญญาณ Dither ที่มีความถี่ 100 เฮิรตซ์	53
ตารางที่ 5.1 สรุปค่าความผิดพลาดและความเร็วในการตอบสนองของวิธีการชดเชยความเสียดทานแบบต่าง ๆ.....	61
ตารางที่ 5.2 ผลการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของบริษัท Comdyna รุ่น 767.....	70
ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบผลของค่าผิดพลาดเนื่องจากการควบคุมแบบชดเชยแรงเสียดทานและเปลี่ยนขนาดของสัญญาณ Dither ที่มีความถี่ 100 เฮิรตซ์	71
ตารางที่ ก.1 รายละเอียดแขนหุ่นยนต์ CRS Robotics.....	89
ตารางที่ ค.1 ค่าผิดพลาดทางตำแหน่งเมื่อใส่สัญญาณ Dither ที่ขนาดและความถี่ต่างๆลงในระบบ CRS Robotics	103

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1	บล็อกไดอะแกรมของระบบปิด 8
รูปที่ 2.2	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในระบบที่ใส่การสั่นสะเทือน 14
รูปที่ 2.3	การเพิ่มสัญญาณ Dither ลงในระบบควบคุม 14
รูปที่ 2.4	การเพิ่มแรงดลในระบบควบคุม 15
รูปที่ 2.5	บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแรงบิดในข้อต่อ 16
รูปที่ 2.6	บล็อกไดอะแกรมการชดเชยแรงเสียดทานแบบอ้างอิงแบบจำลอง 18
รูปที่ 2.7	ระบบควบคุมแบบปรับเปลี่ยนได้ 19
รูปที่ 3.1	แรงเสียดทานจลน์ที่เกิดขึ้นระหว่างมวลที่เคลื่อนที่ 24
รูปที่ 3.2	ภาพขยายของพื้นผิวสัมผัส 24
รูปที่ 3.3	แบบจำลองแรงเสียดทานจลน์ 25
รูปที่ 3.4	แรงเสียดทานจลน์ไม่สมมาตร 25
รูปที่ 3.5	แบบจำลองแรงเสียดทานหนืด 27
รูปที่ 3.6	แบบจำลองแรงเสียดทานจลน์บวกกับแรงเสียดทานหนืด 27
รูปที่ 3.7	แบบจำลองอย่างง่ายของแรงเสียดทาน 29
รูปที่ 3.8	ปรากฏการณ์ Stick – Slip 30
รูปที่ 3.9	ความสัมพันธ์ของการขจัดกับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 31
รูปที่ 3.10	Friction-Displacement Hysteresis Loop 32
รูปที่ 3.11	แรงเสียดทานสถิตย์ที่ขึ้นกับเวลาอยู่นิ่ง 34
รูปที่ 3.12	การเปลี่ยนแปลงของแรงเสียดทานเมื่อเทียบกับความเร็ว 35
รูปที่ 3.13	Hysteresis Friction เนื่องจากแรงเสียดทานล้าหลัง 38
รูปที่ 4.1	แบบจำลองแรงเสียดทาน 42
รูปที่ 4.2	แผนภาพการจำลองการควบคุม 43
รูปที่ 4.3	แบบจำลองแรงเสียดทานแบบ Stribeck's model ในตัวชดเชย 44
รูปที่ 4.4	สัญญาณ Dither ในระบบจำลอง 45
รูปที่ 4.5	ผลการจำลองการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PD .. 47
รูปที่ 4.6	ผลการจำลองการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI ... 48
รูปที่ 4.7	ผลการจำลองการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PD พร้อมทั้งตัวชดเชยแรงเสียดทาน 49

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.8 ผลการจำลองการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PD พร้อมทั้งสัญญาณ Dither	50
รูปที่ 4.9 ผลการจำลองการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PD พร้อมทั้งตัวชดเชยแรงเสียดทาน และสัญญาณ Dither.....	51
รูปที่ 4.10 ผลการจำลองด้วยวิธีการชดเชยแบบต่างๆ.....	51
รูปที่ 4.11 ผลการจำลองการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ เมื่อเปลี่ยนขนาด และความถี่ของสัญญาณ Dither	56
รูปที่ 5.1 แสดงชุดอุปกรณ์ทดลองระบบส่งกำลัง	59
รูปที่ 5.2 ผลการควบคุมชุดส่งกำลังของ ECP โดยการชดเชยแรงเสียดทานแบบต่างๆ	60
รูปที่ 5.3 ชุดการทดลองควบคุมระบบมอเตอร์กระแสตรง รุ่น 767	63
รูปที่ 5.4 ผลของการควบคุมมอเตอร์เป็นมุม 20 องศา เมื่อควบคุมโดย PD control	64
รูปที่ 5.5 ผลของการควบคุมมอเตอร์เป็นมุม 20 องศา เมื่อควบคุมโดย PI control	66
รูปที่ 5.6 ผลของการควบคุมมอเตอร์เป็นมุม 20 องศา เมื่อควบคุมโดย PD control พร้อมทั้งตัวชดเชย	67
รูปที่ 5.7 ผลของการควบคุมมอเตอร์เป็นมุม 20 องศา เมื่อควบคุมโดย PD control พร้อมทั้งสัญญาณ Dither	68
รูปที่ 5.8 ผลการควบคุมมอเตอร์โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PD พร้อมทั้งตัวชดเชยแรงเสียดทาน และสัญญาณ Dither	69
รูปที่ 5.9 ผลการควบคุมตำแหน่งของแขนหุ่น CRS Robotics เมื่อเปลี่ยนขนาด และความถี่ของสัญญาณ Dither	74
รูปที่ ก.1 ชุดอุปกรณ์ทดลองระบบส่งกำลังของบริษัท ECP รุ่น 220.....	82
รูปที่ ก.2 อุปกรณ์ส่วนของทางกลและไฟฟ้าของชุดทดลองระบบส่งกำลัง	84
รูปที่ ก.3 ชุดการทดลองควบคุมมอเตอร์รุ่น 767 ของบริษัท Comdyna, Inc.....	85
รูปที่ ก.4 ชุดขับมอเตอร์กระแสตรง	86
รูปที่ ก.5 การ์ดรับส่ง/แปลงสัญญาณ รุ่น PA-ST12(-H) ของบริษัท Acqutek Corporation	87
รูปที่ ก.6 ชุดการทดลองควบคุมแขนหุ่นยนต์ CRS Robotics	88
รูปที่ ก.7 แขนหุ่นยนต์ CRS Robotics	89
รูปที่ ข.1 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของการจำลอง.....	93
รูปที่ ข.2 ระบบจำลองการควบคุมมอเตอร์กระแสตรง.....	94

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ข.3	การเปรียบเทียบผลการจำลองด้วยตัวควบคุมชนิดต่างๆ 94
รูปที่ ข.4	การทำงานของโปรแกรม xPC Target 97
รูปที่ ข.5	การตั้งค่าพารามิเตอร์ของ xPC Target 99
รูปที่ ข.6	การเชื่อมต่อระหว่าง host PC และ target PC 100
รูปที่ ข.7	การตั้งค่าพารามิเตอร์ของการทดลอง 101
รูปที่ ข.8	ระบบควบคุมชุดมอเตอร์กระแสตรงของบริษัท Comdyna, Inc. รุ่น 767. 101
รูปที่ ข.9	เมนูคำสั่งการเชื่อมต่อระหว่าง host PC และ target PC..... 102



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เมื่อมีพื้นผิวสัมผัสกัน 2 ชนิดที่กำลังเคลื่อนที่หรือพยายามเคลื่อนที่สัมพัทธ์กัน จะเกิดแรงเสียดทานขึ้น ซึ่งแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระบบทางกลต่างๆ ไปจะประกอบด้วยแรงเสียดทานสถิตย์ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อไม่มีการเคลื่อนที่ระหว่างผิวสัมผัสทั้งสอง แรงเสียดทานจลน์ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมีความเร็วเกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสทั้งสอง และแรงเสียดทานหนืด (viscous friction) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากผลของสารหล่อลื่นระหว่างผิวสัมผัส นอกจากนี้ แรงเสียดทานยังขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอื่นนอกเหนือจากความเร็ว ตัวอย่าง เช่น ปรากฏการณ์ Rising Static Friction หรือ Friction Memory ที่เกิดจากการที่วัตถุหยุดการเคลื่อนที่ที่ตำแหน่งหนึ่งๆ เนื่องจากน้ำหนักที่กดทับและเวลา ซึ่งจะทำให้เกิดพันธะระหว่างผิวสัมผัส ทำให้แรงเสียดทานสถิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาที่วัตถุหยุดนิ่ง [1]

ในงานวิศวกรรมควบคุม แรงเสียดทานมีผลต่อความถูกต้องแม่นยำในการควบคุมตำแหน่ง เช่น แขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรม เครื่องวัดตำแหน่ง เครื่องกัดขึ้นงานอัตโนมัติ เครื่องมือกลที่ใช้ในระบบนิวเมติก หรือไฮดรอลิก เป็นต้น โดยทั่วไปแรงเสียดทานมักเกิดขึ้นในชิ้นส่วนทางกล เช่น ระบบเกียร์ในมอเตอร์ ตัววางเลื่อนในเครื่องมือตัด เป็นต้น ซึ่งในอดีตการจะออกแบบระบบควบคุมจะไม่คำนึงถึงผลของแรงเสียดทาน เนื่องจากในการออกแบบโครงสร้างของแรงเสียดทานที่ถูกต้องนั้นทำได้ยาก โดยเฉพาะที่ความเร็วของระบบต่างๆ (ใกล้ศูนย์) แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะมีคุณสมบัติความไม่ต่อเนื่อง (discontinuity) และ ความไม่เชิงเส้น (non-linearity) สูง ซึ่งเป็นสาเหตุของค่าผิดพลาด (steady-state error) ของตำแหน่งที่ต้องการควบคุม อีกทั้งยังทำให้สมรรถนะของระบบลดลงด้วย ดังนั้นความความเข้าใจในพฤติกรรมของแรงเสียดทานจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับงานวิศวกรรมควบคุมที่ต้องการความแม่นยำสูง โดยจะต้องเข้าใจถึงโครงสร้างและแบบจำลองที่ถูกต้องของแรงเสียดทาน เพื่อนำมาชดเชยในระบบควบคุม

การใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนผสมแบบอนุพันธ์ (PD control) [2,3] เพื่อควบคุมตำแหน่งของอุปกรณ์ทางกลเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากสร้างง่ายและมีราคาถูก แต่มีข้อเสียคือ ยังไม่สามารถชดเชยแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระบบได้สมบูรณ์ เพราะจะ

เกิดค่าผิดพลาดที่ตำแหน่งสุดท้าย เนื่องจากตัวควบคุมแบบ PD นี้จะทำงานควบคุมระบบได้ดีในช่วงการตอบสนองในภาวะชั่วคราว (Transient response) ซึ่งไม่สามารถแก้ปัญหาค่าผิดพลาดที่เกิดจากแรงเสียดทานในช่วงภาวะเสถียร (Steady-state response) ได้ สำหรับการเลือกใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral controller) ที่สามารถลดค่าผิดพลาดในช่วงภาวะเสถียรนั้นได้นั้น ไม่เหมาะสมสำหรับระบบที่มีความเสียดทาน โดยเฉพาะเมื่อระบบมีการเคลื่อนที่ด้วยหมวดทั่วไป (Regulator) และหมวดการควบคุมที่ความเร็วต่ำ (Tracking at low velocity) โดยแรงเสียดทานที่ปรากฏจะมีความไม่เชิงเส้นสูง ซึ่งทำให้ระบบเกิดปรากฏการณ์ limit cycles [4] ขึ้น สำหรับระบบที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วผกผัน (Tracking with velocity reversal) จำเป็นต้องมีการ reset ตัวควบคุมแบบอินทิกรัลในช่วงที่ความเร็วเท่ากับศูนย์ เพื่อป้องกันการลื่นตัวของมอเตอร์ และแอมพลิไฟเออร์ ดังนั้นจะเห็นว่าตัวควบคุมแบบอินทิกรัลไม่เหมาะสมที่จะนำมาควบคุมระบบที่มีการเคลื่อนที่ในช่วงความเร็วต่ำ

การจะลดขนาดของค่าผิดพลาดทางตำแหน่ง จะต้องทำการลดแรงเสียดทานลง โดยเฉพาะความเสียดทานในช่วงความเร็วต่ำซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้น แนวทางการชดเชยแรงเสียดทานแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีหลัก คือ การชดเชยด้วยตัวชดเชยที่อ้างอิงแบบจำลอง (model-based method) และการชดเชยด้วยตัวชดเชยที่ไม่อ้างอิงแบบจำลอง (non-model based method) ซึ่งการชดเชยที่อ้างอิงแบบจำลองนั้น จะต้องทราบค่าพารามิเตอร์ของแรงเสียดทานทุกตัวจึงจะสามารถชดเชยแรงเสียดทานได้สมบูรณ์ แต่การจะหาแบบจำลองของแรงเสียดทานที่ความเร็วต่ำให้ถูกต้องนั้นทำได้ยาก ดังนั้นการชดเชยที่ไม่อ้างอิงแบบจำลองด้วยการใส่สัญญาณอินพุตความถี่สูง หรือ Dither ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ย่างและมีประสิทธิภาพสูง โดยสัญญาณ Dither จะไปลดความไม่เชิงเส้น โดยสัญญาณ Dither จะทำให้ระบบมีการสั่นไปกลับด้วยความถี่ที่สูงตลอดเวลา ซึ่งสามารถลดความแตกต่างระหว่างแรงเสียดทานสถิตย์กับแรงเสียดทานจลน์ที่ก่อให้เกิดปัญหาต่อความแม่นยำของระบบ การลดค่าแรงเสียดทานโดยวิธีนี้ได้มีการทดลองใช้มานาน แต่ยังไม่มีการศึกษาถึงแนวทางในการเลือกใช้ขนาด และความถี่ของสัญญาณ Dither

ในงานวิจัยนี้จึงสนใจผลของขนาด และความถี่ของสัญญาณ Dither ที่มีต่อประสิทธิภาพในการควบคุมตำแหน่งของระบบทางกลที่มีแรงเสียดทานในช่วงความเร็วต่ำ อีกทั้งจะทำการศึกษาการลดแรงเสียดทานด้วยตัวชดเชยแบบอ้างอิงแบบจำลอง (model-based friction compensator) พร้อมทั้งศึกษาถึงประสิทธิภาพในการควบคุมเมื่อใช้วิธีชดเชยแรงเสียดทานทั้งสองพร้อม ๆ กัน

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาเปรียบเทียบการชดเชยแรงเสียดทานโดยวิธี 1) การใส่สัญญาณ Dither และ 2) การชดเชยแรงเสียดทานที่อ้างอิงแบบจำลอง รวมทั้งการชดเชยทั้งสองวิธีพร้อมกัน เพื่อลดค่าผิดพลาดทางตำแหน่งในภาวะเสถียร
2. ศึกษาถึงผลของค่าความถี่และขนาดของสัญญาณ Dither ที่ชดเชยแรงเสียดทานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถลดค่าผิดพลาดทางตำแหน่งในภาวะเสถียรให้มีค่าน้อยที่สุด

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

งานวิจัยนี้จะศึกษาถึงผลของแรงเสียดทานที่มีต่อระบบควบคุม โดยเฉพาะในหมวดการควบคุมแบบทั่วไป (Regulator) ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่งของระบบทางกลทั่วไป ซึ่ง จะทำการจำลองควบคุมมอเตอร์กระแสตรงด้วยตัวควบคุมแบบ PD และ PI โดยใช้ควบคู่ไปกับตัวชดเชยที่อ้างอิงแบบจำลอง หรือการใส่สัญญาณ Dither เพื่อลดค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบ หลังจากนั้นจะทำการควบคุมตำแหน่งของระบบมอเตอร์ในชุดทดลองจำนวน 2 ชุดด้วยตัวควบคุมดังกล่าว ซึ่งชุดทดลองประกอบด้วย ชุดทดลองระบบส่งกำลัง ECP รุ่น 220 และชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงรุ่น 767 ของบริษัท Comdyna, Inc. ทั้งนี้เพื่อศึกษาถึงผลของวิธีการชดเชยแรงเสียดทานด้วยตัวชดเชยที่อ้างอิงแบบจำลอง และวิธีสัญญาณ Dither ส่วนของการศึกษาถึงแนวทางการเลือกใช้ขนาดและความถี่ของสัญญาณ Dither ที่เหมาะสมนั้นจะทดสอบกับแขนหุ่นยนต์ CRS Robotics แล้วนำไปเทียบกับผลการจำลอง ซึ่งชุดการทดลองทั้งหมดเป็นชุดทดลองในห้องปฏิบัติการควบคุม ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถลดขนาดของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระบบมอเตอร์กระแสตรง
2. สามารถลดค่าผิดพลาดของตำแหน่ง จากการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงโดยใส่สัญญาณ Dither
3. เป็นพื้นฐานในการลดค่าแรงเสียดทานในงานควบคุมที่ต้องการความละเอียดสูง
4. สามารถทราบค่าขนาดและความถี่ของสัญญาณความถี่สูงที่เหมาะสมต่อการควบคุมมอเตอร์กระแสตรง

1.5 การดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการวิจัยมีดังต่อไปนี้

1. ศึกษาและรวบรวมผลการวิจัยและทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องในการใส่สัญญาณ Dither เพื่อลดแรงเสียดทานจากรายงานการวิจัย วารสาร หนังสือ และ website ที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาถึงผลของแรงเสียดทานที่มีต่อระบบควบคุมแบบ PD และ PI โดยการจำลองบนคอมพิวเตอร์
3. ศึกษาผลของสัญญาณ Dither ต่อระบบที่มีแรงเสียดทาน โดยการจำลองบนคอมพิวเตอร์
4. ติดตั้งและศึกษาชุดทดลอง
5. ศึกษาถึงผลของแรงเสียดทานที่มีต่อประสิทธิภาพในการควบคุม และตำแหน่งของระบบในชุดทดลองระบบส่งกำลัง ECP รุ่น 220 โดยใช้โปรแกรมควบคุมที่มาพร้อมกับชุดทดลอง
6. ออกแบบและสร้างตัวควบคุมแบบ PD และ PI สำหรับชุดทดลองขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงรุ่น 767 ของบริษัท Comdyna, Inc. ของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุมอัตโนมัติ
7. ทดลองควบคุมระบบปิดของชุดทดลองระบบส่งกำลัง ECP รุ่น 220 และ ชุดทดลองขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงรุ่น 767 ของบริษัท Comdyna, Inc. โดยการใส่สัญญาณ Dither และตัวชดเชยแรงเสียดทาน หลังจากนั้นจะสั่งให้มอเตอร์หมุนเป็นแบบขั้น และเก็บข้อมูลมาวิเคราะห์ผล
8. ศึกษาผลของขนาดและความถี่ของสัญญาณ Dither ในระบบแขนหุ่นยนต์ CRS Robotics
9. วิเคราะห์ สรุปผลการวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์

ตารางที่ 1.1 การดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัย	เดือนที่					
	1-6	7-12	13-18	19-24	25-30	31-36
ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา						
คิดและพัฒนาวิธีการ						
ออกแบบและทดสอบแบบจำลอง						
ศึกษาการทำงานของ xPC Target ของ matlab® /simulink™						
ศึกษาและทดสอบชุดทดลอง						
สรุปผล และ วิเคราะห์ผลการทดลอง						
เขียนวิทยานิพนธ์						

1.6 ลำดับเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

ในรายงานนี้จะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทโดยที่บทแรกจะกล่าวถึง ความสำคัญ ที่มา จุดประสงค์ ขอบเขต และความคิดริเริ่มของงานวิจัย ส่วนบทที่สองจะกล่าวถึงระบบควบคุมแบบเชิงเส้น และการชดเชยแบบต่างๆ ที่ใช้สำหรับการควบคุมระบบที่มีความเสียดทาน บทที่สามจะกล่าวถึงแบบจำลอง และคุณสมบัติของแรงเสียดทานที่ขึ้นกับปัจจัยหลายด้าน บทที่สี่เป็นการจำลองระบบควบคุมที่ใช้วิธีการชดเชยแรงเสียดทานแบบต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย PD Control PI Control PD+Dither PD+Compensator PD+Dither+Compensator ซึ่งได้ทำการจำลองบนโปรแกรม matlab® /simulink™ ในบทที่ห้าจะเป็นการทดลองควบคุมวิธีดังกล่าว กับระบบทางกล ประกอบด้วย ชุดทดลองระบบส่งกำลัง ECP รุ่น 220 และ ชุดทดลองขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงรุ่น 767 ของบริษัท Comdyna, Inc. เพื่อยืนยันผลการจำลอง อีกทั้งเราจะทำการวิเคราะห์ค่าผิดพลาดทางตำแหน่งโดยการเปลี่ยนขนาด และความถี่ของสัญญาณ Dither เพื่อควบคุมตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ CRS Robotics ในบทสุดท้ายจะสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

1.7 สิ่งริเริ่มในวิทยานิพนธ์

การควบคุมอุปกรณ์ทางกลในปัจจุบัน ส่วนใหญ่จะทำการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมพื้นฐานทั่วไปเช่น PD และ PID เป็นต้น ซึ่งในงานควบคุมทางตำแหน่งที่ต้องการความแม่นยำสูง

มักจะพบปัญหา คือในระบบควบคุมแบบ PD จะเกิดค่าผิดพลาดทางตำแหน่งขึ้นในระบบควบคุม เนื่องจากแรงเสียดทานในระบบมีความไม่เชิงเส้นสูง ส่วนการใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (PI หรือ PID) มาช่วยลดปัญหาค่าผิดพลาดในช่วงภาวะเสถียร (steady-state) นั้นจะทำให้ระบบเกิด limit cycles เนื่องจากความแตกต่างระหว่างแรงเสียดทานสถิตย์และแรงเสียดทานจลน์ในระบบ

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอแนวทางในการชดเชยแรงเสียดทานไว้ 2 วิธี คือการใช้ตัวชดเชยที่อ้างอิงแบบจำลอง และการเพิ่มสัญญาณ Dither ลงในระบบควบคุม โดยการชดเชยด้วยตัวชดเชยที่อ้างอิงแบบจำลองเป็นวิธีที่สามารถชดเชยแรงเสียดทานทั้งระบบได้อย่างสมบูรณ์ ถ้าแบบจำลองแรงเสียดทานสามารถหาได้อย่างถูกต้อง ซึ่งเป็นการยากมากที่จะหาแบบจำลองที่เหมาะสมต่อระบบใดระบบหนึ่ง ส่วนการใส่สัญญาณ Dither นั้นเป็นวิธีการที่ง่าย และราคาถูก โดยสัญญาณ Dither จะช่วยลดความไม่เชิงเส้นของแรงเสียดทาน โดยเฉพาะเมื่อระบบเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ เช่น บริเวณที่ใกล้ตำแหน่งอ้างอิง โดยสัญญาณ Dither ที่ใส่ลงไปในระบบจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และมีลักษณะสัญญาณรูปซายน์ อนึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ยังได้เสนอแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมตำแหน่ง โดยการใส่สัญญาณ Dither ลงในระบบที่มีการชดเชยแรงเสียดทานที่อ้างอิงแบบจำลอง เมื่อตัวชดเชยแรงเสียดทานไม่สามารถชดเชยแรงเสียดทานได้สมบูรณ์

เนื่องจากได้มีผู้ศึกษาและค้นคว้าเกี่ยวกับการชดเชยแรงเสียดทานโดยใช้วิธีนี้ไว้หลายท่าน แต่ยังไม่มียุติคุณท่านใดได้ศึกษาถึงขนาด และความถี่ของสัญญาณ Dither ที่เหมาะสม ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอแนวทางการเลือกใช้ที่เหมาะสม จากการทดลองในหุ่นยนต์ CRS Robotics งานส่วนนี้ได้นำเสนอในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 16 ที่จังหวัดภูเก็ต ในปี พ.ศ. 2545 เรื่อง “การชดเชยแรงเสียดทานในเวลาจริงในระบบทางกลโดยใช้วิธีการเพิ่มสัญญาณความถี่สูง” และได้รับการตอบรับให้นำเสนอในการประชุมนานาชาติ The Third Asian Conference on Industrial Automation and Robotics ที่ศูนย์ประชุมนานาชาติ BITECH ในปี พ.ศ. 2546 เรื่อง “Real-Time Friction Compensation of a DC Motor System Using Feedforward Dither-Based Technique”

บทที่ 2

การควบคุมระบบที่มีแรงเสียดทาน

ในบทนี้จะกล่าวถึง ตัวควบคุมเชิงเส้นพื้นฐานที่ใช้ในงานควบคุมระบบทางกลทั่วไป โดยเฉพาะในระบบมีแรงเสียดทานเกิดขึ้น เช่น แขนกลในโรงงานอุตสาหกรรม และ CNC machine tools เป็นต้น โดยตัวควบคุมเชิงเส้น ได้แก่ PD PI และ PID ซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นตัวควบคุมที่ง่ายต่อการออกแบบและมีราคาถูก แต่อย่างไรก็ตาม ตัวควบคุมดังกล่าวไม่สามารถที่จะควบคุมระบบที่มีความเสียดทานในช่วงความเร็วของระบบมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ได้ เหตุผลเพราะว่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในช่วงความเร็วต่ำจะมีความไม่เชิงเส้นสูง [1,5,6,7] ซึ่งจะทำให้เกิดค่าความผิดพลาดในการควบคุมตำแหน่งได้

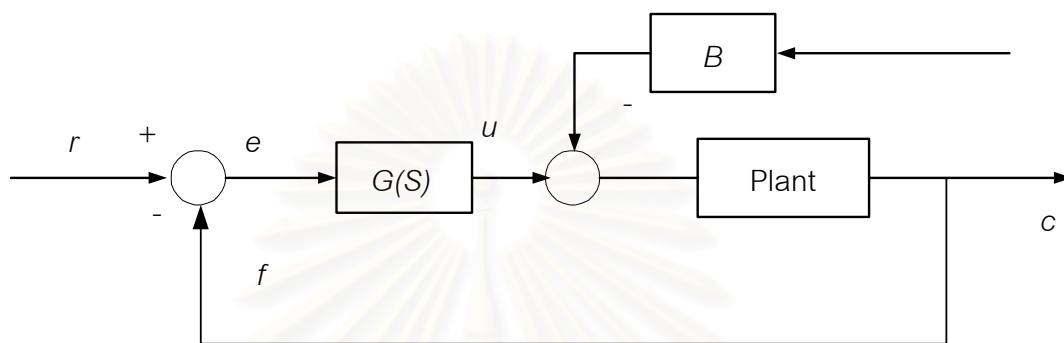
แม้ว่าการควบคุมด้วยตัวควบคุมเชิงเส้นจะเป็นที่นิยม แต่ก็มีนักวิจัยบางท่านพยายามที่จะเสนอวิธีการซึ่งมีความซับซ้อนมากขึ้น เช่น การใช้ตัวควบคุมแบบปรับเปลี่ยนได้ (adaptive control) มาใช้เพื่อประมาณค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น ทำให้สามารถลดค่าผิดพลาดในการควบคุมตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ลงได้ [8,9] แต่ข้อเสียของวิธีการนี้ก็คือความยุ่งยากในการออกแบบระบบเพื่อใช้ในอุตสาหกรรม และการประมาณค่าความเสียดทานในช่วงความเร็วต่ำให้ถูกต้องค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อน

ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลายท่านพยายามที่ควบคุมระบบที่มีแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นด้วยตัวควบคุมเชิงเส้น [4,7,10] โดยใช้วิธีการชดเชยแรงเสียดทานแบบต่างๆ เช่น การชดเชยแรงเสียดทานที่อ้างอิงแบบจำลอง [4,7,10] การใส่การสั่นสะเทือนทางกล [2,11] และการใส่สัญญาณอินพุตความถี่สูง (Dither) ลงในระบบควบคุม [3,12,13] ซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน โดยจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.1 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control System)

การควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback controller) จะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบพลศาสตร์ที่เราต้องการจะควบคุม โดยระบบควบคุมแบบป้อนกลับนี้จะทำการเปรียบเทียบสัญญาณที่วัดค่าตัวแปรสถานะ (state-variable) จริงจากระบบด้วยตัวตรวจรู้ (sensor) แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ต้องการจะพิจารณา

ในระบบควบคุมอัตโนมัติแบบป้อนกลับ ดังรูปที่ 2.1 ค่าผิดพลาด e ซึ่งเป็นสัญญาณที่ได้มาจากการนำเอาสัญญาณป้อนกลับ f ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณป้อนเข้า r เข้าสู่ตัวควบคุม $G(S)$ แล้วตัวควบคุมจะส่งสัญญาณ u (manipulating variable) แก่ส่วนที่เป็นระบบที่เราต้องการควบคุม (Plant) เพื่อแก้ไขให้สัญญาณขาออก c มีลักษณะใกล้เคียงกับ สัญญาณขาเข้ามากขึ้น จะเห็นว่าตัวควบคุมจะมีส่วนสำคัญในการแก้ไขค่าผิดพลาด e ของระบบ



รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบปิด

ตัวควบคุมพื้นฐานที่จะใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นตัวควบคุมที่นิยมใช้กันทั่วไปในงานวิศวกรรมควบคุม เนื่องจากง่ายต่อการออกแบบและใช้งาน โดยเราจะทำการควบคุมระบบที่มีแรงเสียดทาน โดยใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (proportional) แบบอินทิกรัล (integral) และ แบบอนุพันธ์ (derivative) ควบคู่กัน ซึ่งเมื่อนำมาควบคุมระบบที่มีความไม่เชิงเส้น จะมีผลทำให้เกิดค่าผิดพลาดทางตำแหน่ง และเกิดปรากฏการณ์ limit cycles เมื่อควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบอินทิกรัล แต่เนื่องจากคุณสมบัติของแรงเสียดทานจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยเฉพาะความเร็วของระบบ

2.2 การพิจารณาระบบที่มีความเสียดทาน

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการแบ่งพิจารณาระบบทางกลที่เหมาะสมต่อการเลือกใช้วิธีการชดเชยแรงเสียดทาน และ วิธีการโดยทั่วไปที่นิยมใช้ในงานควบคุม เพื่อชดเชยแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระบบทางกล ซึ่งจะเพิ่มเสถียรภาพของระบบ และทำให้ค่าผิดพลาดในระบบลดลง

ในงานควบคุมตำแหน่งของชิ้นส่วนทางกลโดยทั่วไป จะสามารถพิจารณาการควบคุมระบบต่างๆ ออกเป็น 4 หมวดหมู่ได้แก่ หมวดการควบคุมทั่วไป (regulator) หมวดการควบคุมที่ความเร็วแบบผกผัน (tracking with velocity reversal) หมวดควบคุมที่ความเร็วต่ำ (tracking at

low velocity) และหมวดควบคุมที่ความเร็วสูง (tracking at high velocity) โดยผลของแรงเสียดทานที่มีต่อระบบควบคุมแบบต่างๆ จะมีลักษณะแตกต่างกัน ดังนี้

2.2.1 หมวดควบคุมทั่วไป (Regulator)

ระบบที่ได้รับการพิจารณาให้อยู่ในหมวดนี้ มักจะเป็นระบบที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่ง และ ระบบที่ใช้ในการควบคุมการชี้ตำแหน่งของอุปกรณ์ต่างๆ เช่น กล้องดูดาว เครื่องตัดชิ้นงานความละเอียดสูง และ แขนหุ่นยนต์ เป็นต้น การควบคุมตำแหน่งของอุปกรณ์เหล่านี้ส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ในช่วงการเคลื่อนที่แบบติดขัด (sticktion) กล่าวคือ ในช่วงที่แรงเสียดทานมีความชันที่เป็นลบ หรือเคลื่อนเข้าใกล้ตำแหน่งอ้างอิง ดังนั้นการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพื้นฐาน เช่น ตัวควบคุมแบบ PD จะไม่สามารถทำให้ระบบเข้าสู่ตำแหน่งอ้างอิงได้ ซึ่งทำให้เกิดค่าผิดพลาดขึ้น เมื่อเราเพิ่มตัวควบคุมแบบอินทิกรัลเข้าไปจะทำให้ระบบสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งอ้างอิงได้ แต่อย่างไรก็ตามแรงเสียดทานในระบบที่มีความไม่เชิงเส้นสูงจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ limit cycles ได้ [4] โดยระบบจะเคลื่อนที่ไปกลับ (stick-slip) ตลอดเวลา เราอาจจะเรียกปรากฏการณ์นี้อีกอย่างหนึ่งได้ว่า ปรากฏการณ์ Hunting

2.2.2 หมวดการควบคุมที่ความเร็วผกผัน (Tracking with velocity reversal)

ระบบนี้จะมีลักษณะคล้ายกับระบบควบคุมในหมวดทั่วไป แตกต่างกันว่าระบบจะมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่าบวกและลบสลับกัน โดยในแต่ละคาบการเคลื่อนที่ไปกลับนั้น ระบบจะมีค่าความเร็วเท่ากับศูนย์ด้วยเสมอ และเนื่องจากค่าแรงเสียดทานสถิตย์ที่ความเร็วเท่ากับศูนย์นี้จะมีค่าสูงทำให้ระบบอาจจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งระบบอาจจะหยุดไปชั่วขณะหนึ่งจนกระทั่งสัญญาณคำสั่งมีค่าสูงพอที่จะเอาชนะแรงเสียดทานสถิตย์ได้ก็จะทำให้ระบบเคลื่อนที่ต่อไปได้ โดยงานควบคุมที่สามารถพบหมวดการควบคุมแบบนี้ได้แก่ ระบบวางเล็อนในเครื่องมือตัดที่ต้องการการเคลื่อนที่ไปกลับ หรือแม้แต่ในแขนหุ่นยนต์ที่ถูกควบคุมแบบแรงที่เกิดขึ้น (force control) โดยมีนักวิจัยหลายท่านที่พยายามศึกษาระบบที่มีการเคลื่อนที่ไปกลับด้วยสัญญาณอินพุตเป็นแบบซายน์ และมีการเคลื่อนที่ความเร็วแบบผกผัน [14] ซึ่งได้ศึกษาถึงผลที่เกิดต่อระบบควบคุม และพยายามลดผลกระทบเนื่องจากแรงเสียดทานในขณะนั้น ซึ่งเป็นแรงเสียดทานที่มีความไม่สมมาตร กล่าวคือแรงเสียดทานมีขนาดไม่เท่ากันในทิศที่ความเร็วมีค่าเป็นบวกและลบ ซึ่ง

ยากแก่การออกแบบตัวชดเชยเป็นอย่างยิ่ง และยังมีผู้พยายามใช้วิธีอื่นๆ เพื่อชดเชยแรงเสียดทานในความเร็วช่วงที่มีการเปลี่ยนทิศทางของความเร็ว เช่น การใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล และการใช้แรงดลในช่วงที่ระบบมีการติดขัด เป็นต้น

2.2.3 หมวดการควบคุมที่ความเร็วต่ำ (Tracking at low velocity)

การควบคุมหมวดนี้จะแตกต่างจากหมวดที่ 2.2.2 คือ การเคลื่อนที่ของระบบในหมวดนี้จะมีทิศทางที่แน่นอนทิศทางเดียว และบางครั้งระบบจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สม่ำเสมอแต่มีความเร็วต่ำ เช่น การขึ้นรูปกัดชิ้นงานที่มีความละเอียดสูงในเครื่อง CNC หรือ การเคลื่อนที่แขนหุ่นยนต์เพื่อเชื่อมชิ้นงานตามเส้นทาง เป็นต้น ซึ่งในการออกแบบทางเดินของอุปกรณ์เหล่านี้จะต้องมีความเร็วในการเคลื่อนที่ช้ามาก เนื่องจากต้องการความละเอียดในการทำงานสูง ซึ่งผลของแรงเสียดทานที่ความเร็วต่ำจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบติดขัด (stick-slip motion) โดยการที่จะออกแบบตัวชดเชยแรงเสียดทานให้มีค่าถูกต้องนั้นเป็นไปได้ยากมาก เพราะแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นมีความไม่เชิงเส้นสูง

2.2.4 หมวดการควบคุมที่ความเร็วสูง (Tracking at high velocity)

ในปัจจุบัน โรงงานอุตสาหกรรมต้องการอุปกรณ์ทางกลที่ทำงานด้วยความเร็วสูง เนื่องจากสามารถลดเวลาในการทำงานลงได้มาก เช่น การใช้เครื่องมือตัดความเร็วสูง และแขนหุ่นยนต์ เป็นต้น แต่ปัญหาที่พบส่วนใหญ่จะแตกต่างจากหมวดการควบคุมก่อนหน้านี้ ตัวอย่างเช่น ปัญหาการระบายความร้อน การสึกกร่อนของชิ้นงานที่เกิดจากความร้อนที่เกิดขึ้น เป็นต้น ในการระบายความร้อนและลดการสึกกร่อนของชิ้นส่วนทางกล นิยมใช้สารหล่อลื่น หรือน้ำมันหล่อลื่นใส่ลงไปในระบบ

ดังนั้นผลกระทบของแรงเสียดทานที่มีต่อระบบที่มีความเร็วสูง จะได้แก่ผลกระทบเนื่องจากแรงเสียดทานหนืด ซึ่งสามารถคำนวณได้ถ้าทราบความหนืดของสารหล่อลื่น โดยผลของแรงเสียดทานที่มีผลต่อระบบควบคุมแบบต่างๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 หมวดการควบคุมเพื่อชดเชยแรงเสียดทาน

หมวดการควบคุม	ความผิดพลาดที่เกิดขึ้น	ผลของแรงเสียดทานที่เด่นชัด
หมวดควบคุมทั่วไป	- Steady-state error - Hunting	-Stiction
หมวดการควบคุมที่ความเร็ว ตกผัน	-Stand still -Lost motion	-Stiction
หมวดการควบคุมที่ความเร็วต่ำ	-Stick-slip	-Negatively sloped friction
หมวดการควบคุมที่ความเร็วสูง	-Large tracking error	-Viscous behavior of lubricant

2.3 การชดเชยแรงเสียดทาน (Friction compensation)

ในระบบทางกลอาจจะมีการเคลื่อนที่หลายหมวดการควบคุมพร้อมๆ กัน ดังนั้นแรงเสียดทานจึงมีผลต่อการควบคุมระบบเป็นอย่างยิ่ง ดังนั้นการออกแบบและเลือกใช้ตัวชดเชยแรงเสียดทานต้องเลือกให้ถูกต้องและเหมาะสมต่อระบบ โดยวิธีชดเชยแรงเสียดทานสามารถแบ่งออกได้ 2 วิธีหลักคือ การชดเชยแรงเสียดทานที่ไม่อ้างอิงแบบจำลอง (non-model-based compensation) และ การชดเชยแรงเสียดทานที่อ้างอิงแบบจำลอง (model-based compensation) ดังนี้

2.3.1 การชดเชยแรงเสียดทานที่ไม่อ้างอิงแบบจำลอง (Non-model-based compensation for friction)

การชดเชยแรงเสียดทานที่ไม่อ้างอิงแบบจำลองนี้ เป็นวิธีการชดเชยแรงเสียดทานโดยไม่คำนึงผลของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจริงในขณะนั้น ดังนั้นการชดเชยแบบนี้จึงไม่จำเป็นต้องมีความเข้าใจถึงคุณสมบัติของแรงเสียดทานมากนัก แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากการไม่คำนึงถึงคุณสมบัติของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งาน การชดเชยแบบไม่อ้างอิงแบบจำลองมีอยู่หลายวิธีการ กล่าวคือ วิธี Stiff PD Control วิธีการเพิ่มตัวควบคุมแบบอินทิกรัล วิธีสัญญาณอินพุตความถี่สูง วิธี Impulsive Control และวิธีการ Sensor-Based Technique โดยจะกล่าวถึงแต่ละวิธีในรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3.1.1 วิธี Stiff PD control

ในหมวดการควบคุมแบบทั่วไป (Regulator) การจะควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบ PD สามารถทำให้ระบบมีความเสถียรภาพในการควบคุมได้ และยัง สามารถลดค่าผิดพลาดทางตำแหน่งได้ โดยการเพิ่มค่าความหน่วง (damping) หรือ ความแข็งสปริง (stiffness) ให้กับระบบควบคุมโดยเพิ่มขนาดของอัตราขยายของตัวควบคุมแบบ PD

แต่เนื่องจากวิธีการเพิ่มค่าความแข็งสปริงของตัวควบคุมแบบ PD ถูกเริ่มใช้มาตั้งแต่อดีต โดยไม่คำนึงถึงผลของ friction memory ที่ค่าแรงเสียดทานสถิตย์จะมีค่าสูงขึ้นตามเวลาที่อยู่นิ่ง และการปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมก็ไม่ได้คำนึงถึงแบบจำลองของแรงเสียดทาน ทำให้การปรับเปลี่ยนอัตราขยายให้เหมาะสมกับงานค่อนข้างลำบาก และข้อจำกัดที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ เมื่อระบบมีค่าแรงเสียดทานสูง การปรับอัตราขยายของตัวควบคุมให้มีค่ามากนั้นทำได้ยาก เนื่องจากต้องใช้อุปกรณ์จ่ายกำลังที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งในบางครั้งจะเกิดการอิมพัลส์ของอุปกรณ์นั้นก่อนที่จะควบคุมได้ยังตำแหน่งที่ต้องการได้ ดังนั้นจึงทำให้ระบบเกิดค่าผิดพลาดทางตำแหน่งขึ้น

2.3.1.2 วิธีการเพิ่มตัวควบคุมแบบอินทิกรัล

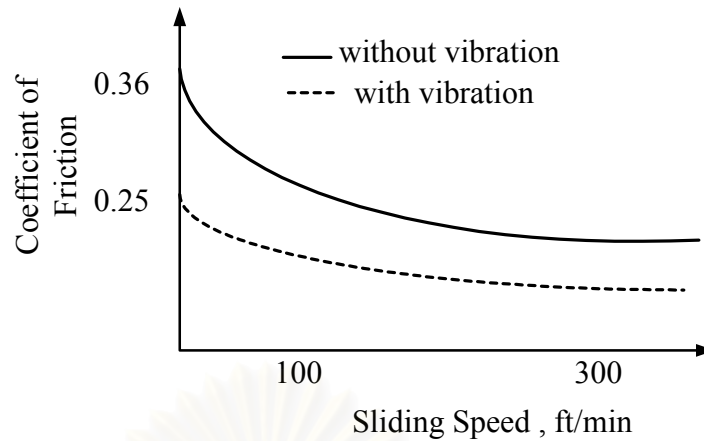
การควบคุมแบบ PD สามารถเพิ่มความเสถียรให้กับระบบ แต่ไม่สามารถลดค่าผิดพลาดในระบบได้ การเพิ่มตัวอินทิกรัลให้กับระบบก็เป็นวิธีที่สามารถลดค่าผิดพลาดให้กับระบบที่มีความเสียดทานอย่างได้ผล แต่การใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัลมีข้อจำกัดในการใช้กับระบบในช่วงความเร็วต่ำ หรือ เข้าใกล้ศูนย์ คือจะทำให้เกิด limit cycles กล่าวคือเนื่องจากตัวควบคุมจะสะสมค่าผิดพลาดของตำแหน่งและนำไปปรับอัตราขยายสัญญาณควบคุม จากเหตุที่ค่าแรงเสียดทานสถิตย์มีค่ามากกว่าแรงเสียดทานจลน์ เมื่อระบบอยู่ในสภาวะหยุดนิ่ง (stick) ตัวควบคุมสะสมค่าความผิดพลาดจากแรงเสียดทานสถิตย์ เป็นเหตุทำให้สัญญาณควบคุมมีค่ามากกว่าแรงเสียดทานที่วัตถุเริ่มเคลื่อนที่ (แรงเสียดทานจลน์) ทำให้ระบบไม่สามารถควบคุมตำแหน่งได้ตามต้องการ

ส่วนการนำตัวควบคุมแบบอินทิกรัลไปควบคุมระบบที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วผกผัน นั้นจะก่อให้เกิดปัญหาการไวด์อัฟ (Integral windup) กล่าวคือตัวควบคุมแบบอินทิกรัลจะสะสมค่าผิดในช่วงที่มีการเปลี่ยนทิศทางของความเร็ว ทำให้ตัวอินทิกรัลมีการสะสมค่าผิดพลาดมากขึ้น ซึ่งอาจจะทำให้เกิดโอเวอร์ชูต (overshoot) ขึ้นในระบบ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดค่าผิดพลาดในระบบควบคุม ดังนั้นการแก้ปัญหานี้ก็คือน่าจะมีการรีเซ็ต (reset) ตัวอินทิกรัลในช่วงที่ระบบมีความเร็วผกผัน ซึ่งในปี 1991 Suzuki และ Tomizuka [14] ได้คำนึงถึงการไวด์อัฟในการควบคุมเครื่องกัดความเร็วสูงด้วยตัวควบคุมแบบ PID จึงแก้ปัญหาช่วงความเร็วผกผันด้วยการใส่แรงดล (pulse) ลงในช่วงที่มีการติดขัด (sticktion) ณ จุดแตกหัก (break away) และในปี 1993 Hansson et al. [14] ได้ใช้กฎฟัซซี (Fuzzy rule) เพื่อควบคุมการไวด์อัฟในตัวควบคุมแบบ PID

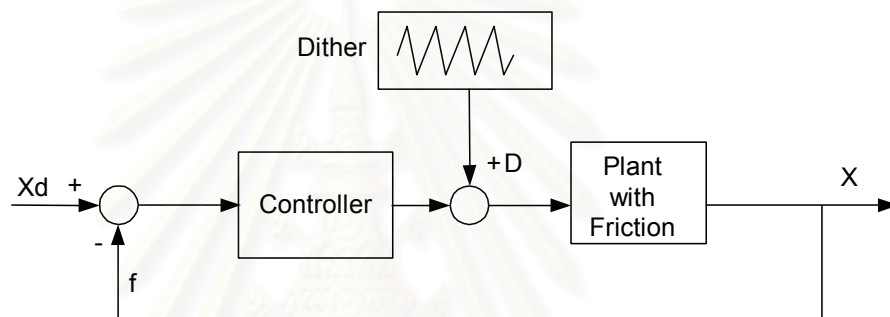
2.3.1.3 สัญญาณอินพุตความถี่สูง (Dither)

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการลดแรงเสียดทานโดยวิธีการเพิ่มสัญญาณอินพุตความถี่สูง หรือ Dither ลงในระบบควบคุม การลดแรงเสียดทานด้วยวิธีนี้เริ่มจากการที่นักวิจัยค้นพบว่า ที่ความเร็วต่ำๆ ณ ตำแหน่งอ้างอิง ระบบจะไม่สามารถเข้าสู่ตำแหน่งอ้างอิงได้เนื่องจากในระบบ เกิดการติดขัด (stick) [15,16] ซึ่งเป็นผลจากแรงเสียดทานสถิตย์ ดังนั้นจึงได้มีการผู้พยายามทดลองใส่ความสั่นสะเทือนทางกล (mechanical vibration) ลงในระบบควบคุม โดยพบว่าที่ความถี่สูงๆ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน จะมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.2 [11]

หลังจากนั้นจึงได้มีผู้ที่พยายามใส่สัญญาณควบคุมที่มีความถี่สูง เข้าสู่ระบบที่มีแรงเสียดทาน เพื่อลดความไม่ต่อเนื่อง และความไม่เชิงเส้นของแรงเสียดทานในช่วงความเร็วต่ำ ค่าสัญญาณอินพุตความถี่สูงที่เพิ่มเข้าไปถูกเรียกว่า สัญญาณ Dither โดยสัญญาณ Dither จะถูกเพิ่มเข้าไปเพื่อรวมกับสัญญาณที่ออกมาจากตัวควบคุมดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในระบบที่ใส่การสั่นสะเทือน [10]



รูปที่ 2.3 การเพิ่มสัญญาณ Dither ลงในระบบควบคุม

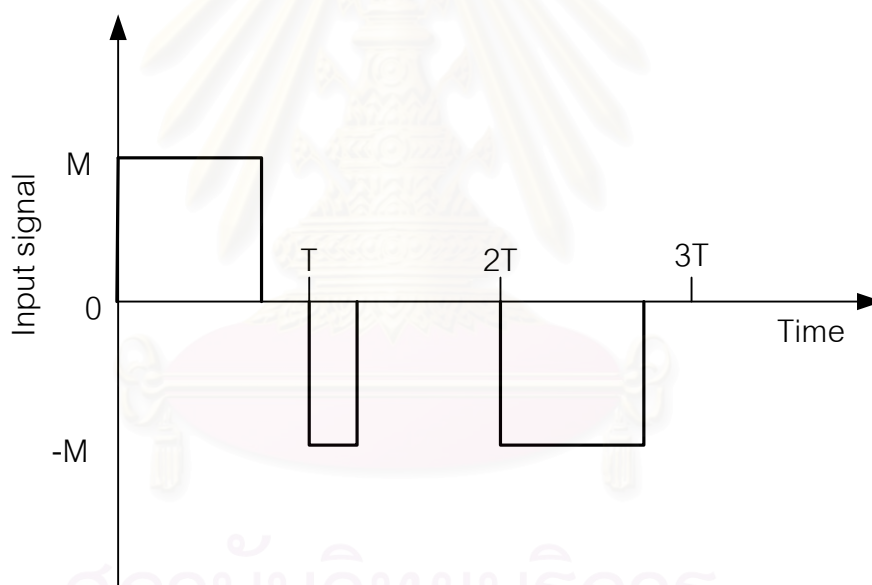
ในปี ค.ศ. 1989 Åström และ Wittenmark ได้ทดลองใส่สัญญาณ Dither ที่มีลักษณะเป็นรูปแบบต่างๆ ลงในระบบควบคุมแบบป้อนกลับ พบว่ารูปแบบของสัญญาณ Dither ที่มีลักษณะเป็นคลื่นรูปซายน์ (sine wave) มีความสามารถควบคุมตำแหน่งของระบบที่มีแรงเสียดทานได้ดีกว่าคลื่นสัญญาณ Dither รูปสามเหลี่ยม (triangular wave) [17] งานวิจัยนี้ จึงสนใจที่จะศึกษาในเรื่องของสัญญาณ Dither ต่อจากงานวิจัยที่กล่าวมาโดยจะเน้นศึกษาถึงผลของขนาดและความถี่ของสัญญาณ Dither ที่มีต่อค่าผิดพลาดทางตำแหน่ง

2.3.1.4 Impulsive control

ได้มีผู้วิจัยหลายท่านที่พยายามพัฒนาประสิทธิภาพของตัวควบคุมในระบบที่ต้องการความแม่นยำด้วยการเพิ่มแรงกระตุ้นให้กับระบบโดยตรง เพื่อลดปรากฏการณ์ที่เกิดจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น เช่น ลดการติดขัด (stiction) ของระบบ

ควบคุมตำแหน่งที่ความเร็วเท่ากับศูนย์ เป็นต้น โดยเรียกวิธีการนี้ว่าการควบคุมแบบ Impulsive control [14] ซึ่งวิธีนี้แตกต่างจากวิธีการใส่สัญญาณ Dither กล่าวคือ ระบบควบคุมจะมีการกระตุ้น หรือใส่แรงที่มีลักษณะเป็นแรงดล (impulse) ให้ตัวระบบเองโดยไม่ต้องเพิ่มจากภายนอกเหมือนกับ Dither และการเพิ่มแรงดลก็ไม่ได้มีค่าเฉลี่ยของแรงที่เพิ่มเข้าไปให้เท่ากับศูนย์เหมือนกับ Dither เนื่องจากต้องมีการปรับศูนย์ (calibration) เพื่อให้ได้ผลการควบคุมตามที่ต้องการ

การเพิ่มแรงดลลงในระบบควบคุม จะมีการพิจารณาเลือกใช้ในช่องที่ระบบมีการเคลื่อนที่แบบติดขัด (stick-slip) เท่านั้น [9] แรงดลจะทำให้เกิดการขจัดเพียงเล็กน้อยในระบบ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นช่วงจุดแตกหัก (breakaway) ของแรงเสียดทาน โดยขนาดของแรงดลจะมีค่ามากกว่าขนาดของแรงเสียดทานสถิตย์ในระบบ แต่จะกระทำในช่วงเวลาสั้นมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.4

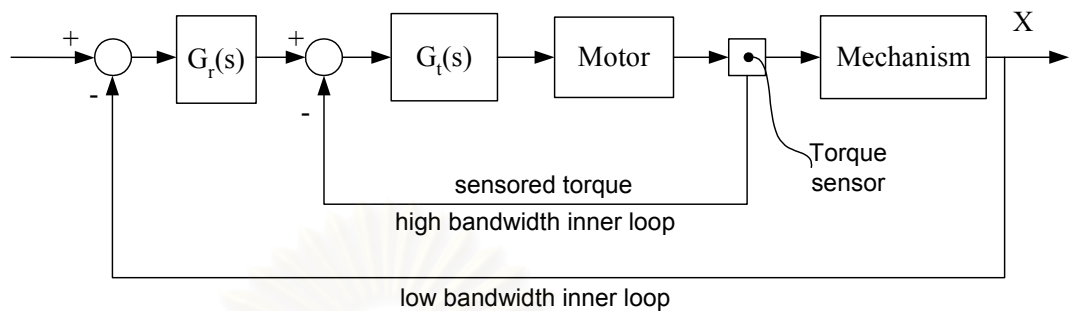


รูปที่ 2.4 การเพิ่มแรงดลในระบบควบคุม

2.3.1.5 วิธี Sensor-Based Technique

การควบคุมแรงบิดของข้อต่อโดยตรงใช้วิธีชดเชยแรงเสียดทานโดยการที่อ้างอิงถึงเครื่องมือตรวจวัด (sensor-based technique) ซึ่งติดกับตัวมอเตอร์หรือระบบส่งกำลังในข้อต่อในระบบกล ซึ่งสามารถตรวจรับสัญญาณแรงบิดที่เกิดขึ้นจริงแล้วป้อนกลับมายังตัวควบคุม ทำให้สามารถควบคุมระบบได้ โดยวิธีการควบคุม

แรงบิดนี้สามารถลดผลกระทบต่างๆ ที่เกิดจากตัวมอเตอร์ และระบบส่งกำลังได้ เช่น แรงเสียดทาน ความยืดหยุ่น (flexibility) เป็นต้น



รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแรงบิดในข้อต่อ

โดยเฉพาะแรงเสียดทานสามารถลดได้โดยการเลือกใช้อัตราขยายป้อนกลับ (feedback gain) ที่มีค่ามากพอที่จะเอาชนะแรงเสียดทานในระบบได้ โดยแบบจำลองการควบคุมอย่างง่ายของการควบคุมแรงบิดของข้อต่อสามารถแสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งการควบคุมแรงบิดของข้อต่อโดยตรงนี้จะสามารถลดพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (nonlinear dynamics) และ ชดเชยแรงโน้มถ่วงได้ ในปี ค.ศ. 1988 Kosuge และในปี ค.ศ.1989 Hashimoto [14] ได้นำไปทดลองควบคุมแขนหุ่นยนต์ที่มีดีกรีความอิสระ (degree of freedom) เท่ากับ 6 และในปี ค.ศ. 1985 Mukerjee และ Ballad ได้ทดลองหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (inertia) ของระบบ

จากรูปที่ 2.5 เป็นการออกแบบระบบควบคุมเพียงหนึ่งข้อต่อ โดยการควบคุมวงรอบใน (inner loop) จะทำหน้าที่จ่ายแรงบิด และลดแรงเสียดทานให้กับระบบส่งกำลัง ซึ่งวัดค่าแรงบิดในระบบมาจากอุปกรณ์ตรวจจับแรงบิด (torque sensor) เช่น ตัว strain gages เป็นต้น ส่วนการควบคุมวงรอบนอก (outer loop) จะเป็นการควบคุมระบบกลทั้งหมด จะเห็นได้ชัดว่าการควบคุมแรงบิดข้อต่อโดยตรง จะสามารถลดความไม่แน่นอนของระบบลงได้ แต่อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ตรวจจับแรงบิดมีราคาสูงและบำรุงรักษายากจึงไม่นิยมนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรม

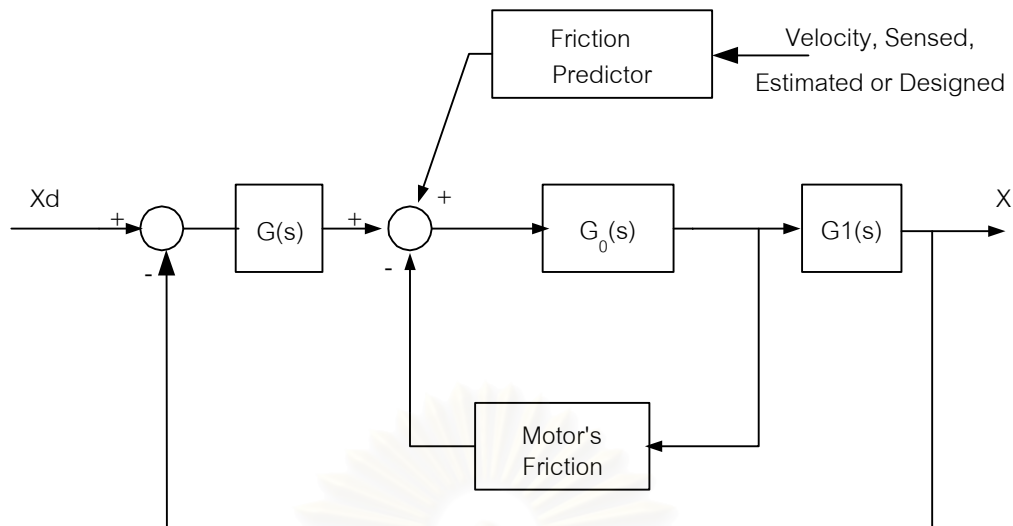
2.3.2 การชดเชยแรงเสียดทานที่อ้างอิงแบบจำลอง (Model-based compensation for friction)

ถ้าเราสามารถหาแบบจำลองของแรงเสียดทานได้อย่างถูกต้อง การจะออกแบบตัวชดเชยแรงเสียดทานเพื่อลดแรงเสียดทานทั้งหมดในระบบสามารถทำได้ง่ายโดยมีข้อแม้ว่าตัวกำเนิดแรง หรือแรงบิดมีค่าเพียงพอที่จะสร้างแรงที่สามารถเอาชนะแรงเสียดทานได้ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการชดเชยแรงเสียดทานที่อ้างอิงแบบจำลองซึ่งแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ การชดเชยแบบคงค่าพารามิเตอร์ และแบบค่าพารามิเตอร์ปรับเปลี่ยนได้

2.3.2.1 การชดเชยแรงเสียดทานแบบคงค่าพารามิเตอร์ (Fixed compensation)

งานวิจัยในอดีตได้มีผู้พยายามใช้ตัวชดเชยแรงเสียดทานแบบอ้างอิงแบบจำลอง ซึ่งส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงระบบควบคุมแบบป้อนกลับให้มีเสถียรภาพมากขึ้น การชดเชยแรงเสียดทานมักจะประมาณค่าความเร็ว (velocity estimation) ของระบบเพื่อนำมาคำนวณหาค่าชดเชยแรงเสียดทานในระบบ โดยส่วนใหญ่ในงานวิจัยเริ่มแรกนั้นจะมีการชดเชยแรงเสียดทานโดยใช้แบบจำลองแรงเสียดทานคูลอมบ์เป็นหลัก นั้นหมายถึงการคงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานที่ใช้ชดเชยในระบบ โดยระบบควบคุมที่มีการชดเชยแรงเสียดทานจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.6

ในปี ค.ศ. 1987 Canudas de Wit et al. [14] ได้แสดงให้เห็นถึงการชดเชยแรงเสียดทานที่อ้างอิงแบบจำลองสามารถลดปรากฏการณ์ติดขัด (stand-still) เมื่อมีการเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งที่มีความเร็วเท่ากับศูนย์ และอีกสองปีต่อมา Canudas de Wit et al. ได้วิจัยพบว่าการชดเชยแบบอ้างอิงแบบจำลองสามารถลดความต้องการของการใช้อัตราขยายของระบบเซอร์โว (servo gain) ที่มีค่าสูง ซึ่งทำให้สามารถลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากตัวตรวจรับ (sensor noise) ได้



รูปที่ 2.6 บล็อกไดอะแกรมการชดเชยแรงเสียดทานแบบอ้างอิงแบบจำลอง

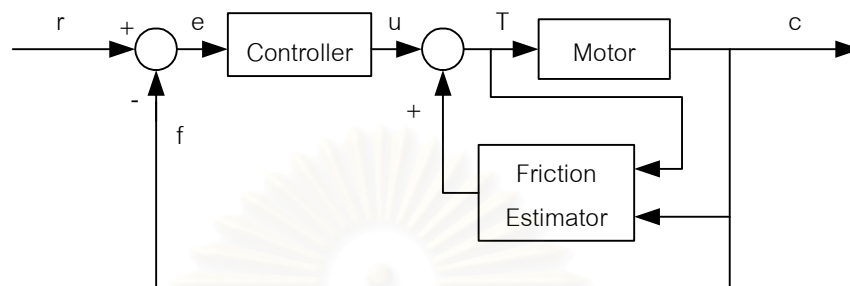
สำหรับการออกแบบตัวชดเชยแรงเสียดทานในช่วงความเร็วต่ำ ก็ยังเป็นปัญหาสำคัญที่ทำให้ระบบเกิดค่าผิดพลาด และ limit cycles ขึ้นดังที่ได้กล่าวมาในหัวข้อก่อนหน้านี้ ดังนั้นการใช้แบบจำลองที่ถูกต้องเพื่อชดเชยแรงเสียดทาน และสามารถปรับเปลี่ยนได้เมื่อแรงเสียดทานในระบบมีค่าเปลี่ยนไป จะทำให้ประสิทธิภาพในการควบคุมตำแหน่งดีขึ้น

2.3.2.2 การควบคุมแบบพารามิเตอร์ปรับเปลี่ยนได้ (Adaptive control)

ในระบบควบคุมที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น การควบคุมแขนหุ่นยนต์ที่มีการเคลื่อนที่และในบางครั้งต้องรับภาระ (load) ที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา การควบคุมแบบค่าพารามิเตอร์ปรับเปลี่ยนได้ (adaptive control) สามารถควบคุมให้ระบบมีความเสถียรและมีความถูกต้องได้ [18] ระบบควบคุมแบบปรับเปลี่ยนได้ เป็นอีกวิธีหนึ่งที่เหมาะสมกับการชดเชยแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระบบทางกล เพราะสามารถควบคุมระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ โดยระบบควบคุมแบบปรับเปลี่ยนค่าได้นี้จะสร้างกฎของการควบคุมที่แปรเปลี่ยนตามเวลา (a time varying control law) ซึ่งสามารถปรับค่าตามตัวแปรค่าทางเวลาอย่างซ้ำๆ ได้

จากรูปที่ 2.7 เป็นตัวอย่างการควบคุมมอเตอร์กระแสตรง โดยระบบควบคุมแบบปรับเปลี่ยนได้นี้จะประมาณค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระบบขณะใช้งานจริง

อย่างต่อเนื่อง โดยแรงบิดที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์จะเท่ากับผลรวมของแรงบิดเนื่องจากระบบควบคุมพื้นฐาน เช่น Proportional plus Derivative (PD) และแรงบิดเสียดทานที่ประมาณได้ [8,17]



รูปที่ 2.7 ระบบควบคุมแบบปรับเปลี่ยนได้ [8]

ในปี พ.ศ. 2544 วุชระ เลิศพิริยสุวัฒน์ และรัชทิน จันทรเจริญ [8] ได้พยายามประมาณค่าแรงเสียดทานโดยใช้ระบบประมาณค่าปริภูมิเชิงเส้น (linear state estimator) โดยให้แรงบิดเสียดทานเป็นหนึ่งในค่าปริภูมิ (state) ซึ่งทำให้สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ในระบบแขนหุ่นยนต์ในรูปสมการปริภูมิได้เป็น

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad \dots (2.4)$$

$$y = Cx \quad \dots (2.5)$$

โดยที่

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1/J \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/J \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 0 \ 0]$$

$$x = [\theta \ \dot{\theta} \ \tau_f]^T \text{ และ } u = \tau_m$$

ดังนั้นสมการของระบบประมาณค่าแรงเสียดทานคือ

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + K(y - C\hat{x}) \quad \dots (2.6)$$

$$y_e = [0 \quad 0 \quad 1]\hat{x} \quad \dots (2.7)$$

โดยที่

\hat{x}	คือ ค่าประมาณของ x
y_e	คือ ค่าประมาณของแรงบิดเสียดทาน
K	คือ เมตริกซ์คั้งที่ใช้ในการออกแบบ
J	คือ ความเฉื่อยแรงบิดของส่วนที่เคลื่อนที่ของหุ่นยนต์
θ	คือ ตำแหน่งเชิงมุมของข้อต่อ
τ_m	คือ แรงบิดจากมอเตอร์
τ_f	คือ แรงบิดเสียดทาน

โดยผลที่ได้จากการประมาณแรงเสียดทานจากตัวประมาณ (estimator) จะสามารถชดเชยแรงเสียดทานได้ แต่ก็ยังมีค่าผิดพลาดเกิดขึ้นเนื่องจากโครงสร้างของแรงเสียดทานที่ใส่ให้กับตัวประมาณค่าแรงเสียดทานไม่สามารถจะแสดงผลของแรงเสียดทานได้อย่างถูกต้อง

นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยอีกหลายท่านที่พยายามใช้ตัวควบคุมแบบปรับเปลี่ยนได้ มาควบคุมระบบที่มีความไม่เชิงเส้นของแรงเสียดทาน [8,9,17] แต่ข้อจำกัดของวิธีการนี้คือ ต้องทราบแบบจำลองของแรงเสียดทานที่มีผลต่อระบบควบคุม [8] เช่น แบบจำลองแรงเสียดทานที่ขึ้นกับความเร็ว [1,5,6,19,20] แบบจำลองแรงเสียดทานที่ขึ้นกับตำแหน่งและเวลาอยู่นิ่งของผิวสัมผัส [1,17] เป็นต้น แต่สำหรับงานควบคุมจริงนั้นผลของแบบจำลองแบบต่างๆ ไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ของแรงเสียดทานในระบบได้ถูกต้อง ดังนั้นเมื่อการออกแบบโครงสร้างของแรงเสียดทาน (friction structure) ยังมีความซับซ้อนและมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สร้างแบบจำลองต่างกัน จึงเป็นปัญหาที่นักวิจัยพยายามที่จะออกแบบโครงสร้างแรงเสียดทานให้ถูกต้อง เนื่องจากถ้าเราไม่สามารถทราบค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแรงเสียดทานได้ครบทุกตัว การใช้ตัวควบคุมแบบปรับเปลี่ยนได้ก็จะไม่สามารถชดเชยแรงเสียดทานให้หมดไปได้ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดค่าผิดพลาดในระบบขึ้นได้

เนื่องจากคุณสมบัติของแรงเสียดทานในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าระหว่างแรงเสียดทานสถิตย์ กับแรงเสียดทานจลน์จะมีความไม่ต่อเนื่อง (discontinuity) และความไม่เชิงเส้น (nonlinearity) สูง จึงได้มีการทดลองใช้ Adaptive Pulse Width Control (PWC) มาควบคุมระบบโดยเฉพาะบริเวณตำแหน่งอ้างอิง เมื่อระบบเริ่มมีการติดขัด (stick) เนื่องจากแรงเสียดทานสถิตย์ [9] ค่าความกว้างของ pulse จะเป็นฟังก์ชันของค่าผิดพลาด ซึ่งใช้ควบคุมตำแหน่ง และลดค่าผิดพลาด ซึ่งผลการทดลองทำให้ค่าผิดพลาดสามารถลดลงจนเท่ากับศูนย์ ขณะที่ค่าความสัมพันธ์ของความกว้างของ pulse และ ค่าผิดพลาดจะถูกปรับปรุงค่า โดยค่าอัลกอริทึมของการปรับเปลี่ยน (adaptive algorithm) แต่อย่างไรก็ตาม การใช้ตัวควบคุมแบบปรับเปลี่ยนได้นั้น ยังไม่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมากนัก เนื่องจากระบบควบคุมยังมีความซับซ้อน และยากต่อการออกแบบ

2.4 ตัวควบคุมที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

เนื่องจากตัวควบคุมแบบ PD สามารถควบคุมตำแหน่งในช่วงภาวะชั่วคราว (transient) ได้ แต่จะทำให้เกิดค่าผิดพลาดขึ้นในภาวะเสถียร (steady state) เพื่อเป็นการศึกษาวิธีการชดเชยแรงเสียดทานแบบต่างๆ พร้อมทั้งปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบควบคุมตำแหน่ง ในวิทยานิพนธ์จึงนี้สนใจการลดค่าความเสียดทานในระบบ โดยพิจารณาจากค่าผิดพลาดในการควบคุม ซึ่งในวิทยานิพนธ์ได้ใช้ตัวควบคุมแบบ PD เป็นตัวควบคุมพื้นฐาน ส่วนวิธีการชดเชยแรงเสียดทานในระบบจะใช้วิธีการชดเชย 3 วิธีเพื่อเปรียบเทียบถึงผลการควบคุมตำแหน่ง ได้แก่ 1) วิธีการเพิ่มตัวชดเชยแรงเสียดทานแบบคงค่าพารามิเตอร์ 2) วิธีการเพิ่มตัวควบคุมแบบอินทิกรัล และ 3) วิธีการเพิ่มสัญญาณ Dither โดยพยายามแสดงถึงผลของการควบคุมตำแหน่งด้วยวิธีการชดเชยในแต่ละวิธี และจะทำการศึกษาดังกล่าวของสัญญาณ Dither ที่สามารถใช้ชดเชยแรงเสียดทานที่เหลือจากวิธีการชดเชยแบบคงค่าพารามิเตอร์ ที่ไม่สามารถชดเชยแรงเสียดทานในระบบได้สมบูรณ์

การทดลองข้างต้น จะเป็นการศึกษาถึงความสามารถในการลดแรงเสียดทานของวิธีการชดเชยโดยการเพิ่มสัญญาณ Dither เปรียบเทียบกับวิธีการชดเชยด้วยวิธีต่างๆ หลังจากนั้นจะทำการศึกษาดังกล่าวของขนาดและความถี่ของสัญญาณ Dither ที่มีต่อความเสียดทาน โดยการใช้ขนาดและความถี่ต่างๆ โดยพิจารณาจากค่าความผิดพลาดในการควบคุมตำแหน่ง ทั้งนี้ก็นำไปเป็นพื้นฐานในการเลือกใช้ในการควบคุมระบบอื่นๆ ที่มีแรงเสียดทานต่อไป

บทที่ 3

พฤติกรรมแรงเสียดทาน

ปรากฏการณ์แรงเสียดทานมักจะเกิดขึ้นในระบบที่มีการพยายามเคลื่อนที่ของวัตถุที่มีพื้นผิวสัมผัสกัน โดยทิศทางของแรงเสียดทานจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ ตัวอย่างเช่น เมื่อมีมวลก้อนหนึ่งวางบนพื้นที่มีแรงเสียดทานโดยออกแรงผลักมวลก้อนหนึ่งดังรูปที่ 3.1 จะมีแรงที่พื้นต้านการเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามกับแรงผลักจนทำให้มวลเริ่มเคลื่อนที่ แรงที่ต้านการเคลื่อนที่นี้เราเรียกว่า แรงเสียดทานสถิตย และเมื่อเราออกแรงผลักให้มวลมีการเคลื่อนที่ โดยแรงผลักนั้นทำให้มวลมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระบบในขณะนั้นเรียกว่าแรงเสียดทานจลน ซึ่งโดยปกติแล้วแรงเสียดทานจลนจะมีค่าน้อยกว่าแรงเสียดทานสถิตยเสมอ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงพฤติกรรมของแรงเสียดทาน โดยแบ่งตามเงื่อนไขของระบบ เช่น ความเร็ว เวลา และตำแหน่ง เป็นต้น โดยอาศัยพื้นฐานความรู้จากวิชาหล่อลื่น (Tribology)

3.1 กฎพื้นฐานของแรงเสียดทาน

ในอดีตได้มีผู้พยายามทดลองและทำความเข้าใจถึงพฤติกรรมของแรงเสียดทาน โดยสามารถสรุปได้ว่า แรงเสียดทานจะประพติดกับกฎพื้นฐานอยู่ 2 ข้อ โดยข้อแรกคือแรงเสียดทานจะไม่ขึ้นกับขนาดของพื้นที่ของผิวสัมผัส และข้อสองแรงเสียดทานจะแปรผันโดยตรงกับแรงในทิศแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ โดยกฎสองข้อนี้เรียกอีกอย่างว่า Amontons law (1699) หลังจากนั้น Coulomb (1785) ได้เสนอกฎข้อที่สามคือ แรงเสียดทานจลนไม่แปรผันตามความเร็วสัมพัทธ์ของผิวสัมผัส แต่กฎข้อที่สามนี้ก็ถูกนำไปใช้น้อยกว่าสองข้อแรก แต่อย่างไรก็ตามทั้งหมดที่กล่าวถึงจะศึกษาคุณลักษณะของแรงเสียดทาน ในสาขาวิชาสารหล่อลื่น และการสึกหรอ (Lubrication, Rubbing and Wear) เป็นส่วนใหญ่

ในยุคต่อมาระบบวิศวกรรมควบคุมเริ่มนำมาใช้มากขึ้นในอุตสาหกรรม ทำให้ความต้องการความถูกต้องแม่นยำสูงในงานระบบควบคุมมีเพิ่มขึ้น นักวิจัยหลายท่านได้พยายามกำจัดแรงเสียดทานออกจากระบบ เพราะแรงเสียดทานเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดค่าผิดพลาดขึ้นในระบบควบคุม ดังนั้นจึงได้มีผู้พยายามหาแบบจำลองพลศาสตร์ของแรงเสียดทาน [1,5,6,7] เพื่อนำมาใช้

ในงานควบคุม เพื่อใช้สำหรับการชดเชยแรงเสียดทานในระบบเป็นสำคัญ โดยอาศัยพื้นฐานความรู้เดิมของสาขาวิชาหล่อลื่น

แรงเสียดทานที่จะกล่าวในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้าง และพลศาสตร์ของแรงเสียดทาน โดยสามารถแบ่งแรงเสียดทานออกเป็น 7 ชนิดดังนี้

1. แรงเสียดทานจลน์ (Kinetic Friction)
2. แรงเสียดทานหนืด (Viscous Friction)
3. แรงเสียดทานสถิตย์ (Static Friction)
4. ปรากฏการณ์ Pre-sliding Displacement
5. แรงเสียดทานที่ขึ้นกับเวลาอยู่นิ่ง
6. แรงเสียดทานที่แปรตามความเร็ว
7. แรงเสียดทานล้าหลัง

3.2 แรงเสียดทานจลน์ (Kinetic Friction)

ในปลาย ค.ศ. ที่ 17 Guillaume Amonton และปลาย ค.ศ. ที่ 18 Charles de Coulomb ได้พบว่าแรงเสียดทานจลน์แปรผันตามแรงในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ และไม่ขึ้นกับพื้นที่สัมผัสของวัตถุที่เคลื่อนที่ นอกจากนี้ Coulomb ยังพบว่าแรงเสียดทานจลน์ไม่แปรผันตามความเร็วสัมพัทธ์ของวัตถุที่มีผิวสัมผัสกัน ดังนั้นแรงเสียดทานจลน์อาจจะถูกเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าแรงเสียดทานแบบคูลอมบ์

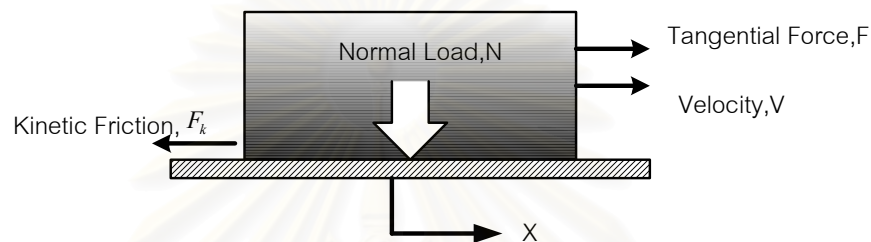
การจะทราบถึงแบบจำลองที่ถูกต้องของแรงเสียดทานจลน์ จะต้องขยายขนาดของผิวสัมผัสเพื่อดูถึงความหยาบของผิว ซึ่งจะมีลักษณะเป็นคลื่นยอดเขา (mountains) ดังรูปที่ 3.2 โดยรูปนี้จะแสดงให้เห็นว่ายอดเขาที่สัมผัสกันจะเป็นตัวแบกรับน้ำหนักของอีกวัตถุหนึ่ง ดังนั้นขนาดของพื้นที่จริงที่สัมผัสกันจะแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.2 เมื่อเราเพิ่มน้ำหนักของวัตถุด้านบนก็จะทำให้ค่าพื้นที่สัมผัสจริงมีค่าเพิ่มขึ้นตาม ดังอธิบายด้วยสมการต่อไปนี้ [17]

$$\text{True Area of contact} = \frac{\text{Load}}{\text{Yield pressure}} \quad \dots (3.1)$$

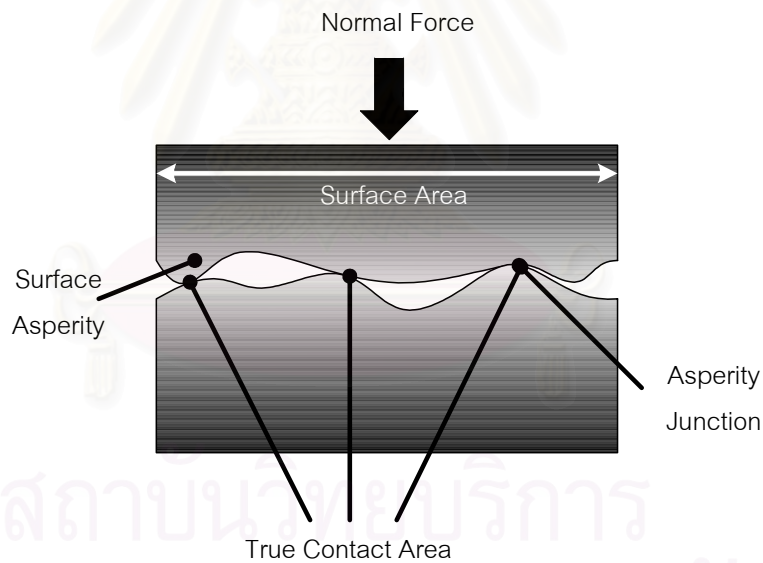
และ แรงเสียดทานจะเป็นแรงที่สามารถเอาชนะแรงที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันของยอดสัมผัส มีค่าดังนี้ [17]

$$\text{Friction Force} = (\text{True Area of Contact}) (\text{Shear Force per Unit Area}) \dots (3.2)$$

เมื่อ Yield pressure และ Shear Force per Unit Area ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุแต่ละชนิด



รูปที่ 3.1 แรงเสียดทานจลน์ที่เกิดขึ้นระหว่างมวลที่เคลื่อนที่



รูปที่ 3.2 ภาพขยายของพื้นผิวสัมผัส

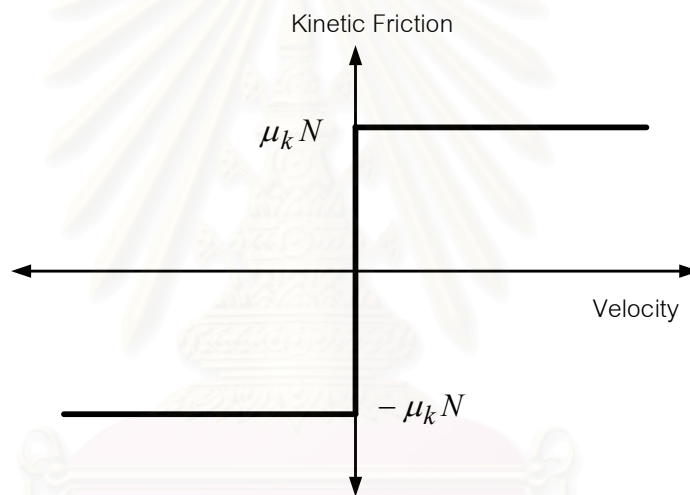
จากคุณสมบัติดังกล่าวข้างต้น แรงเสียดทานจลน์ที่เกิดขึ้นระหว่างวัตถุ 2 ชิ้นที่วางทับกัน ดังรูปที่ 3.1 โดยแบบจำลองแรงเสียดทานจลน์ (F_k) จะขึ้นอยู่กับขนาดของแรงในทิศตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ (N) ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์ (μ_k) และทิศทางของแรงเสียดทานจะขึ้นกับทิศทางของความเร็ว (V) ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$F_k = \mu_k N \operatorname{sgn}(V) \quad \dots (3.3)$$

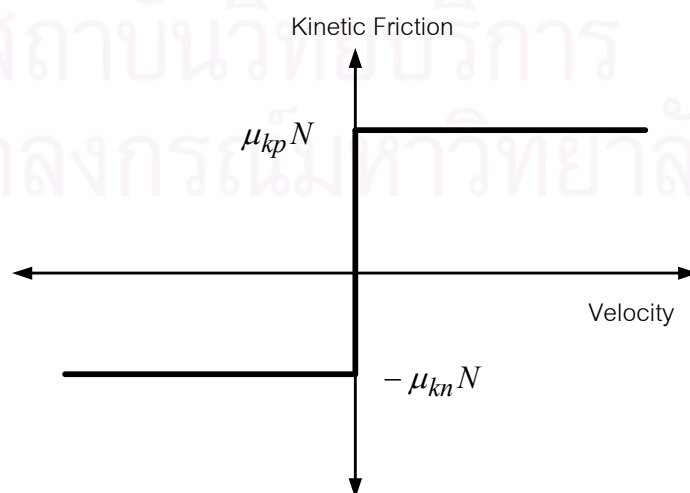
เมื่อ

$$\operatorname{sgn}(V) = \begin{cases} +1 & , V > 0 \\ -1 & , V < 0 \end{cases}$$

โดยแบบจำลองแรงเสียดทานจลน์จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นแบบจำลองของแรงเสียดทานจลน์แบบสมมาตร กล่าวคือแรงเสียดทานที่มีขนาดเท่ากันทั้งในทิศความเร็วที่เป็นบวกและลบ แต่มีนักวิจัยหลายท่านได้แสดงให้เห็นว่า ในงานที่มีชิ้นส่วนกลสัมผัสกันมากกว่า 2 ชิ้น และมีองค์ประกอบที่ซับซ้อนจะเป็นผลทำให้แรงเสียดทานจลน์ในทิศทางบวกลบมีขนาดไม่เท่ากัน หรือแรงเสียดทานจลน์ไม่สมมาตร [21] ดังแสดงในสมการที่ 3.4



รูปที่ 3.3 แบบจำลองแรงเสียดทานจลน์



รูปที่ 3.4 แรงเสียดทานจลน์ไม่สมมาตร

$$F_k = \begin{cases} \mu_{kp}N & , V > 0 \\ -\mu_{kn}N & , V < 0 \end{cases} \quad \dots (3.4)$$

เมื่อ μ_{kp} และ μ_{kn} คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์ในทิศทางบวกและลบตามลำดับ มีลักษณะแรงเสียดทานดังรูปที่ 3.4

3.3 แรงเสียดทานหนืด (Viscous Friction)

แรงเสียดทานหนืดเป็นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นผิวของสารหล่อลื่น (fluid lubricant layer) เช่น น้ำมันหล่อลื่น และ จารบี เป็นต้น โดยแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างผิวสัมผัส เพื่อใช้ในการลดการสึกหรอของชิ้นส่วนที่มีการเสียดสีกัน ในปลาย ค.ศ. ที่ 19 Osborne Reynolds ได้ศึกษาคุณสมบัติของสารหล่อลื่นที่ผิวสัมผัสที่มีแรงเสียดทานโดยพิจารณาในระบบที่มีเพลามีการหมุนที่เป็นระบบปิด และมีน้ำมันหล่อลื่นในระบบ เนื่องจากระบบเป็นแบบปิดเมื่อเพลามีการหมุนด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการไหลของน้ำมันเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าความดันของไหลก็เพิ่มขึ้น หลักการนี้สามารถใช้ได้กับการเคลื่อนที่บนพื้นราบที่มีการหล่อลื่นได้เช่นเดียวกัน ดังนั้นค่าความหนืดของสารหล่อลื่นจะมีผลต่อค่าแรงเสียดทานในระบบ เราจึงเรียกแรงเสียดทานชนิดนี้ว่าแรงเสียดทานหนืด (viscous friction) แต่อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ของค่าแรงเสียดทานหนืด (F_v) จะแปรผันเชิงเส้นกับค่าความเร็ว (V) ของระบบ ดังแสดงในสมการที่ 3.5

$$F_v = cV \quad \dots (3.5)$$

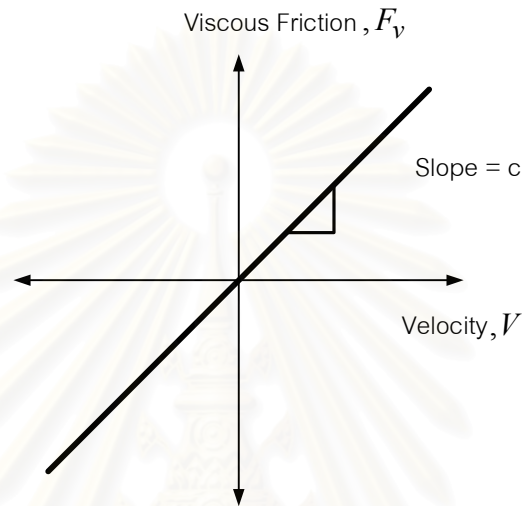
เมื่อ c คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานหนืด

เช่นเดียวกับกับแรงเสียดทานจลน์ คือ จากการทดลองทำให้พบว่าแรงเสียดทานหนืดจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานหนืดไม่สมมาตรกันในทิศทางบวกและลบ [21] ดังนั้นแบบจำลองของแรงเสียดทานหนืดจึงสามารถแสดงได้ ดังสมการต่อไปนี้

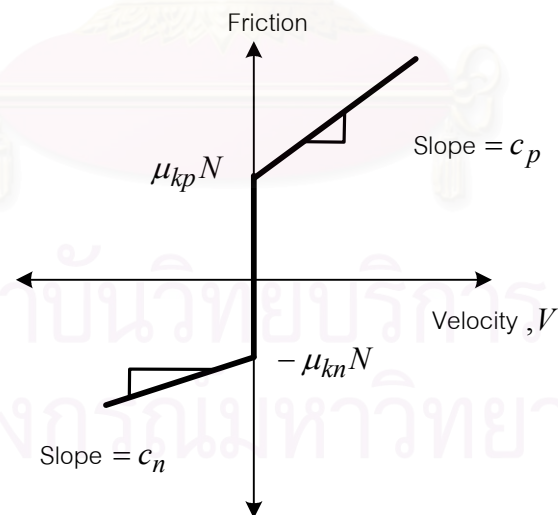
$$F_v = \begin{cases} c_pV & , V > 0 \\ c_nV & , V < 0 \end{cases} \quad \dots (3.6)$$

เมื่อ c_p และ c_n คือค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานหนืดในทิศบวกและลบตามลำดับ

ในรูปที่ 3.5 แสดงแบบจำลองของแรงเสียดทานหนืด ส่วนในรูปที่ 3.6 แสดงแบบจำลองของแรงเสียดทานจลน์บวกกับแรงเสียดทานหนืดแบบไม่สมมาตร จะเห็นว่าประโยชน์ของการเพิ่มสารหล่อลื่นลงในระบบคือ สารหล่อลื่นจะเคลือบระหว่างพื้นผิวสัมผัส ทำให้สามารถลดการเสียดสีของพื้นผิวโดยตรงได้ แต่อย่างไรก็ตามสารหล่อลื่นก็จะทำให้เกิดแรงเสียดทานหนืด ดังในระบบที่กล่าวมาในตอนต้น



รูปที่ 3.5 แบบจำลองแรงเสียดทานหนืด



รูปที่ 3.6 แบบจำลองแรงเสียดทานจลน์บวกกับแรงเสียดทานหนืด

3.4 แรงเสียดทานสถิตย์ (Static Friction) และปรากฏการณ์ stick-slip

เมื่อเราออกแรงผลักมวลที่วางนิ่งอยู่บนพื้นที่มีแรงเสียดทาน โดยก่อนที่มวลจะเริ่มเคลื่อนที่จะต้องอาศัยแรงผลักจำนวนหนึ่งที่สามารถเอาชนะแรงเสียดทานที่พื้นกระทำกับมวล เราเรียกแรงเสียดทานชนิดนี้ว่าแรงเสียดทานสถิตย์ (static friction) หรือ Stiction

ในปี ค.ศ. 1972 Bowden และ Tabor ได้เสนอแนวคิดเกี่ยวกับแรงเสียดทานสถิตย์ว่ามีเหตุผล 3 ประการ ที่ทำให้แรงเสียดทานสถิตย์มีค่าสูงกว่าแรงเสียดทานจลน์ ประการแรกคือ ขณะที่มวลไม่มีการเคลื่อนที่จะมีผิวสัมผัสที่แท้จริงมากกว่าขณะที่มวลเคลื่อนที่ ประการที่สองคือ ระยะเวลาที่ผิวสัมผัสวางทับกัน โดยขณะที่มวลอยู่นิ่งๆ ระยะเวลาานานจะทำให้เกิดพันธะระหว่างผิวสัมผัสทั้งสองทำให้ต้องออกแรงผลักมวลเพื่อเอาชนะพันธะที่เกิดขึ้น แต่ในขณะที่มวลมีการเคลื่อนที่จะทำให้พันธะนั้นหมดไป และประการสุดท้ายคือ เมื่อมวลไม่มีการเคลื่อนที่ในระบบที่มีการหล่อลื่นผิวด้วยสารหล่อลื่น มวลจะจมอยู่ในสารหล่อลื่นนั้น การจะเริ่มเคลื่อนที่มวลที่จมในสารหล่อลื่นจะต้องใช้แรงในแนวสัมผัส (Tangential Force) สูงกว่ามวลที่เคลื่อนที่อยู่บนผิวของสารหล่อลื่น ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อขนาดของแรงเสียดทานสถิตย์คือ แรงในแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ (N) และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตย์ (μ_s)

เมื่อเราจำลองแรงเสียดทานอย่างง่าย F_f โดยนำแรงเสียดทานจลน์ F_k แรงเสียดทานหนืด F_c และแรงเสียดทานสถิตย์ F_s มารวมกันจะมีค่าดังแสดงในรูปที่ 3.7 และสมการต่อไปนี้

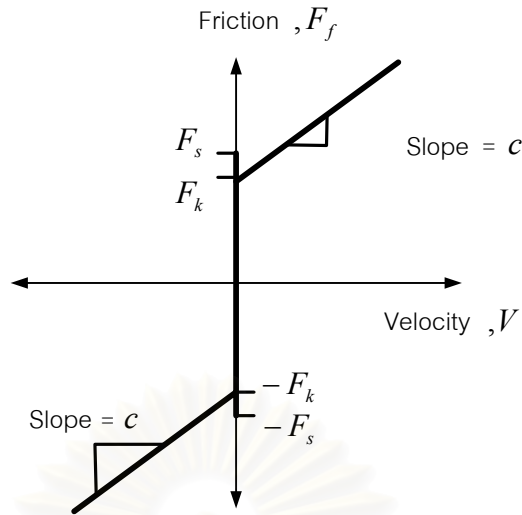
$$F_f = \begin{cases} F_k \operatorname{sgn}(V) + F_c & \text{if } V \neq 0 \\ F_s \operatorname{sgn}(F) & \text{if } V = 0 \end{cases} \quad \dots(3.7)$$

เมื่อ

$$F_s = f_s N \quad \dots(3.8)$$

$$F_k = f_k N \quad \dots(3.9)$$

$$F_c = cV \quad \dots(3.10)$$



รูปที่ 3.7 แบบจำลองอย่างง่ายของแรงเสียดทาน

การที่แรงเสียดทานสถิตยมีค่าสูงกว่าแรงเสียดทานจลนจะมีผลทำให้การเคลื่อนที่ที่มีการเคลื่อนที่แบบติดขัดขึ้น หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Stick-Slip Motion โดยเมื่อขณะที่มวลหยุดนิ่งจะเกิดแรงเสียดทานสถิตยกระทำต่อมวล และในขณะที่มวลเคลื่อนที่จะเกิดแรงเสียดทานจลนขึ้นกระทำต่อมวล

ตัวอย่างง่ายๆ ที่ปรากฏให้เห็นถึงการเคลื่อนที่แบบ stick-slip อย่างเห็นได้ชัด ได้แก่ ระบบที่ประกอบด้วยมวลที่มีค่าเท่ากับ M ก้อนหนึ่งที่ผูกติดปลายด้านหนึ่งไว้กับสปริงที่มีค่าคงตัวเท่ากับ K โดยที่ปลายด้านหนึ่งของสปริงถูกออกแรงดึงด้วยแรง F_{spring} ด้วยความเร็วคงที่ V และมวลถูกวางอยู่บนพื้นที่มีแรงเสียดทาน F_f ที่เวลาใดๆ t โดยเริ่มต้นสปริงไม่มีการยืด และแรงที่ดึงเป็นศูนย์ดังแสดงในรูปที่ 3.8 (ก) และมีค่าดังสมการต่อไปนี้

$$F_{spring} = KVt \tag{3.11}$$

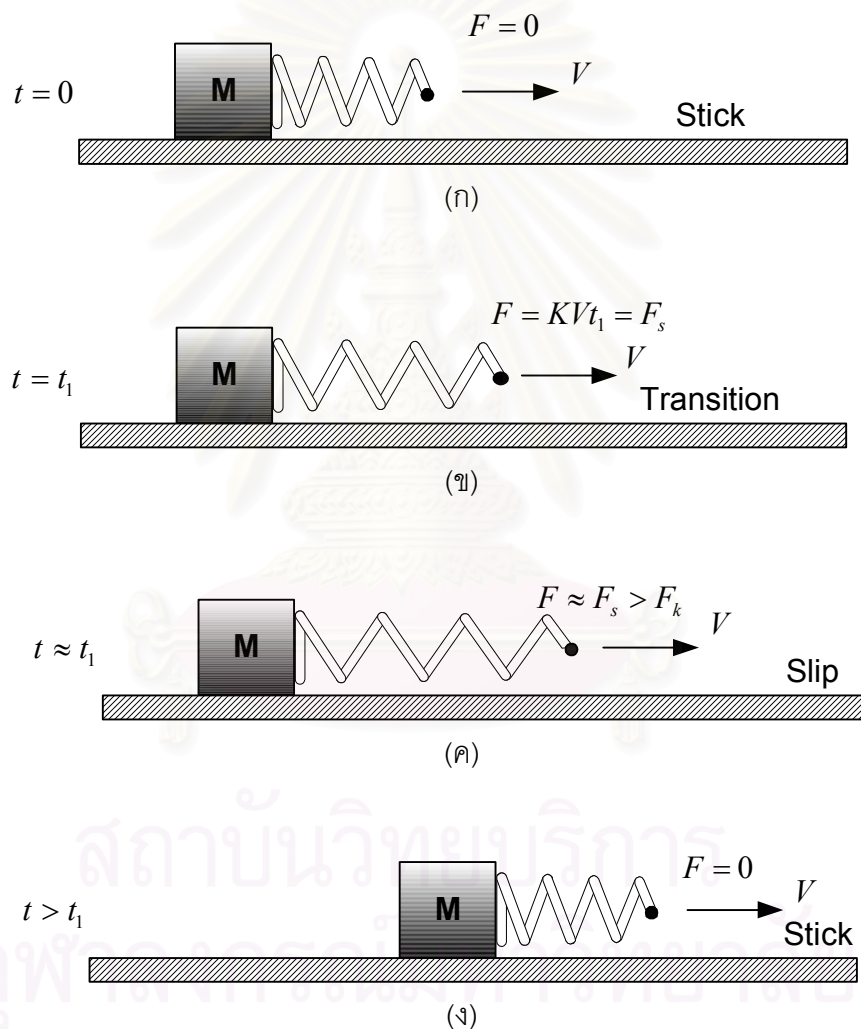
เมื่อแรงเสียดทานสถิตยกระทำกับระบบ โดยมวลจะอยู่นิ่งจนกระทั่งเวลา t_1 มวลจึงเริ่มเคลื่อนที่ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 (ข) แรงเสียดทานที่กระทำกับมวลคือ

$$F_{spring} = KVt_1 = F_s \tag{3.12}$$

ที่เวลา t_1 เมื่อมวลเริ่มเคลื่อนที่มวลจะเริ่มไถล (Slip) ทำให้แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นเป็นแบบแรงเสียดทานจลน

$$F_{spring} = F_k < F_s \quad \dots (3.13)$$

หลังจากนั้นมวลจะเคลื่อนที่แบบมีความเร่งในทิศทางเดียวกับความเร็ว V โดยขนาดของความเร็วของมวลบางช่วงจะมีค่ามากกว่าความเร็วที่ปลายสปริง ดังแสดงในรูปที่ 3.8 (ค) โดยสปริงจะถูกกดให้หดจากตำแหน่งสมดุล เมื่อสปริงขยายตัวกลับในทิศทางที่ถูกกดมาก่อน จะทำให้แรงที่ดึงสปริงถูกหักล้างจนเท่ากับศูนย์ ทำให้ระบบกลับไปสู่สภาวะหยุดนิ่งอีกครั้งหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.8 (ง)



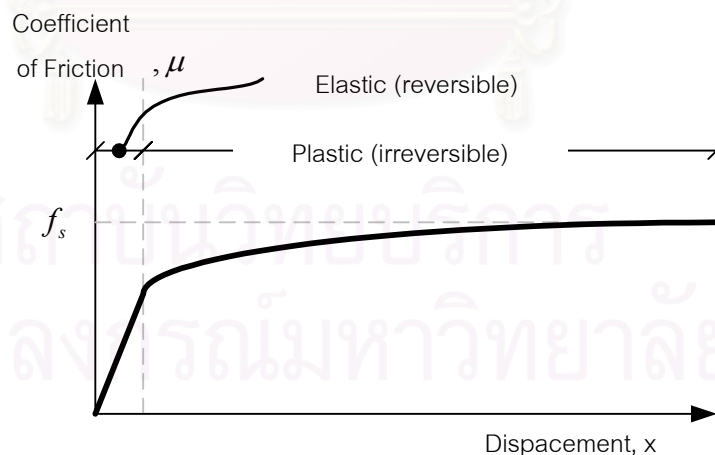
รูปที่ 3.8 ปรัชการณ Stick - Slip

3.5 การขจัดก่อนการไถล (Pre-Sliding Displacement)

ก่อนที่มวลจะเคลื่อนที่บนพื้นที่มีแรงเสียดทาน แรงที่ดึงมวลจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น โดยในขณะที่แรงมีค่าเพิ่มขึ้นจากศูนย์แต่มีค่าน้อยกว่าแรงเสียดทานสถิตย์ มวลจะเกิดการขจัดเพียงเล็กน้อยตามแรงที่ใส่ F_{appl} เข้าไปโดยขนาดของการขจัดที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยกว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยเชื่อมของความหยาบของผิวสัมผัส (asperity junctions) ซึ่งปกติแล้วการขจัดก่อนการไถล (Pre-sliding displacement) นี้จะเกิดขึ้นในช่วงระหว่างการติดขัด (stick) และการไถล (slip) ในปี ค.ศ. 1957 Courtney Patt และ Eisner ได้ทำการทดลองใส่แรง F_{appl} ลงในระบบมวลที่มีขนาดคงที่ ทำให้แรงในแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ N กระทำต่อมวล บนพื้นที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน μ ซ้ำกันหลายๆ ครั้ง [17] จะได้ความสัมพันธ์ ดังสมการต่อไปนี้

$$\mu = \frac{F_{appl}}{N} \quad \dots (3.14)$$

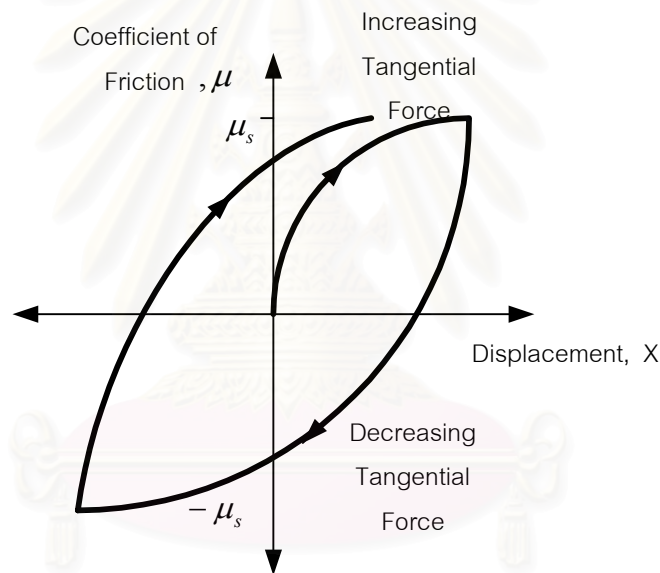
นอกจากนั้น เมื่อพล็อตกราฟระหว่างการขจัด x และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน μ จากการทดลองจะพบการยืดหยุ่นแบบอีลาสติก (elastic) และพลาสติก (plastic) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 การทดลองนี้ยังได้บ่งชี้ให้เห็นว่าลักษณะของเส้นกราฟจะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อใส่สารหล่อลื่นลงระหว่างผิวสัมผัส



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ของการขจัดกับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อการขจัดมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าเพิ่มจากศูนย์และเพิ่มเข้าสู่ค่าสูงสุดของแรงเสียดทานสถิตย์ จนกระทั่งถึงจุดแตกหัก (break away point) แล้วระบบจึงเริ่มเคลื่อนที่

เนื่องจากช่วงแรกก่อนการไถล ณ จุดรอยเชื่อมความหยาบของจุดสัมผัส (asperity junction) จะเกิดการยึดตัวแบบอีลาสติก แปรผันตามแรงในแนวสัมผัส (tangential force) ที่กระทำต่อมวล เมื่อมวลมีการขจัดเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ที่รอยเชื่อมความหยาบมีการยึดตัวแบบพลาสติก หลังจากนั้นเมื่อลดขนาดของแรงกระทำต่อมวล (ดังรูปที่ 3.10) จะทำให้มวลเคลื่อนที่กลับมาแต่ไม่ได้อยู่ในตำแหน่งเดิมเราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Hysteresis Loop ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์การยึดและหด ดังกล่าว



รูปที่ 3.10 Friction-Displacement Hysteresis Loop

ในปี ค.ศ. 1976 Dahl ได้เสนอแบบจำลองของปรากฏการณ์ Hysteresis Loop ซึ่งปรากฏในช่วงการขจัดก่อนการไถล ซึ่งแบบจำลองนี้ได้สมมติว่าแรงเสียดทาน F_f เป็นฟังก์ชันของการขจัด x และเวลา t ดังสมการต่อไปนี้ [17]

$$\frac{dF_f(x,t)}{dt} = \frac{\partial F_f(x,t)}{\partial x} \cdot \dot{x} + \frac{\partial F_f(x,t)}{\partial t} \quad \dots (3.15)$$

สมมติให้ $\frac{\partial F_f}{\partial t} = 0$ จะประมาณได้ว่า

$$\frac{\partial F_f(x,t)}{\partial x} = \sigma \left| 1 - \frac{F_f}{F_{fe}} \operatorname{sgn}(\dot{x}) \right|^i \cdot S \quad \dots (3.13)$$

เมื่อ

\dot{x} คือ ความเร็ว

σ คือ ค่าความชันของ F_f เทียบกับ x ที่ $F_f = 0$

F_{fe} คือ ขนาดของแรงเสียดทานสูงสุด

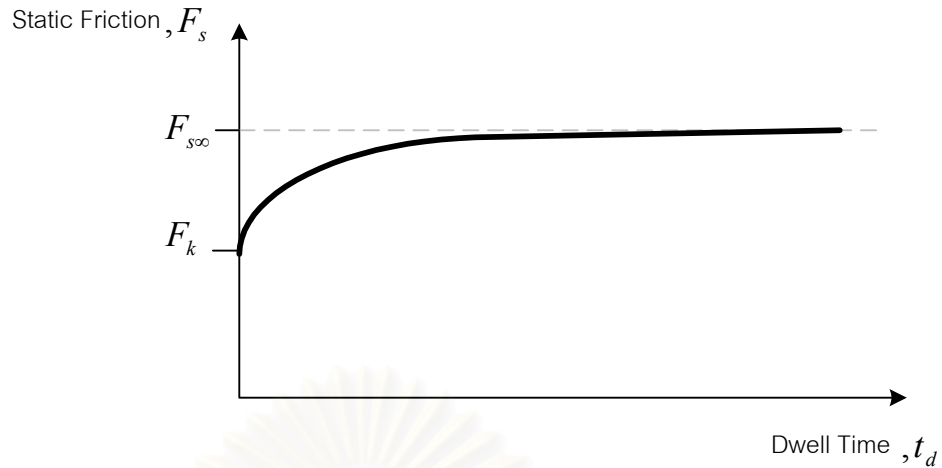
i คือ ตัวแปรพหุนาม (Exponential parameter)

S คือ ตัวแปรของ Dahl เพื่อความเสถียรของระบบจำลอง

โดยแบบจำลองนี้ได้ทำการทดลองบนแบริ่งแบบลูกบอล (ball bearing) โดยทดลองหา Hysteresis Loop และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ไม่ทราบค่า โดยจากการทดลองหลายครั้ง Dahl ได้พบว่าค่า i ที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 1.5 ดังนั้นปรากฏการณ์การจัดก่อนการไหลอาจจะเรียกได้ว่า Dahl Effect

3.6 แรงเสียดทานสถิตย์ที่ขึ้นกับเวลาอยู่นิ่ง (Static Friction Dependence on Dwell Time)

จากหัวข้อ 3.2 และ 3.4 แสดงให้เห็นว่าแรงเสียดทานสถิตย์จะเกิดกับระบบที่ไม่มี การเคลื่อนที่ ส่วนแรงเสียดทานจลน์จะเกิดก็ต่อเมื่อระบบมีความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างผิวสัมผัส เมื่อ พื้นที่มีความหยาบถูกวางทับด้วยมวลจะทำให้รอยเชื่อมความหยาบของผิวทั้งสองค่อยๆ เกิดพันธะ กัน และมีค่าพันธะแข็งแรงเพิ่มขึ้น เมื่อถูกวางทับกันนานขึ้น จากปรากฏการณ์นี้สามารถสรุปได้ว่า ขนาดของแรงเสียดทานสถิตย์จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ผิววัตถุไม่มีการเคลื่อนที่ เราเรียกเวลาที่มีความเร็วที่ผิวสัมผัสเท่ากับศูนย์นี้ว่าเวลาอยู่นิ่ง (dwell time) ในปี ค.ศ. 1958 Rabinowicz ได้ ศึกษางานวิจัยของ Ishlinski, Kragelski และ Dokos [17] โดยสามารถสรุปได้ว่าขนาดของแรง เสียดทานสถิตย์จะมีความสัมพันธ์เชิงลอการิทึม กับ เวลาอยู่นิ่ง (Logarithm of Dwell Time, t_d) เมื่อผิวสัมผัสถูกวางทับกัน ขนาดของแรงเสียดทานสถิตย์จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและจะ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เข้าสู่ค่าอนันต์ F_{∞} เมื่อเวลาอยู่นิ่ง (Dwell Time) มีค่าสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แรงเสียดทานสถิตย์ที่ขึ้นกับเวลาอยู่นิ่ง

ในปี ค.ศ. 1957 Derjaguin et al. ได้เสนอแบบจำลองของแรงเสียดทานสถิตย์ที่ขึ้นกับเวลาอยู่นิ่งดังสมการที่ 3.14 และ ในปี ค.ศ. 1972 Kato et al. ได้เสนอแบบจำลองที่คล้ายกันดังสมการที่ 3.15

$$F_s(t_d) = F_k + (F_{s\infty} - F_k) \frac{t_d}{t_d + \alpha} \quad \dots (3.14)$$

เมื่อ α คือค่าคงที่ทางเวลา

$$F_s(t_d) = F_k + (F_{s\infty} - F_k) (1 - e^{-\gamma t_d^m}) \quad \dots (3.15)$$

เมื่อ γ และ m คือ Empirical parameter

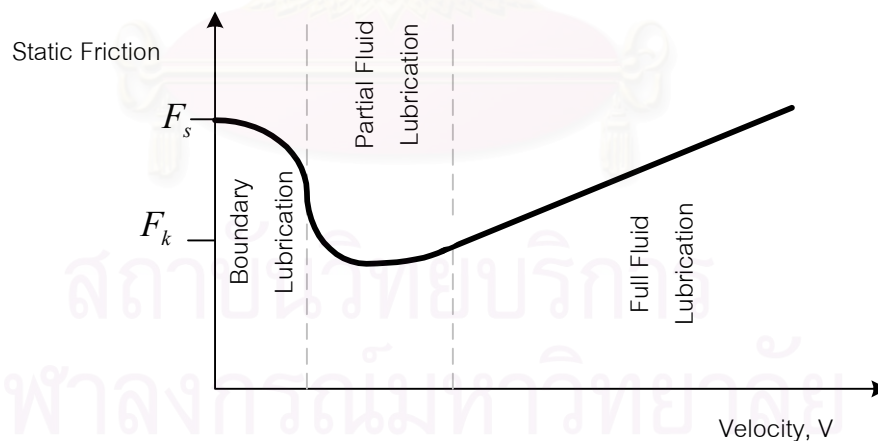
ในปี 1991 Armstrong-Hélouvry [17] ได้ทดสอบแบบจำลองทั้งสองแบบ (สมการ 3.14 และ 3.15) กับแขนหุ่นยนต์รุ่น PUMA 500 พบว่าแบบจำลองเสียดทานสถิตย์ที่ขึ้นกับเวลาทั้งสองแบบให้ผลการทดลองที่คล้ายคลึงกันมาก จึงสรุปได้ว่าเวลาอยู่นิ่งจะมีผลต่อแรงเสียดทานสถิตย์

3.7 แรงเสียดทานที่แปรตามความเร็ว (Friction Variation with Velocity)

ในปี ค.ศ. 1949 Dudley และ Swift ได้พยายามอธิบายว่าปรากฏการณ์ stick-slip ไม่ได้เป็นสาเหตุของการเกิด limit cycles เสมอไป [17] โดยพยายามชี้ให้เห็นว่า limit cycles ในระบบจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อระบบถูกควบคุมด้วยตัวอินทิกรัล (Integral) แต่อย่างไรก็ตาม ในปี ค.ศ. 1988

Armstrong ได้พบว่าระบบควบคุมสามารถจะเกิด limit cycles โดยไม่มีตัวอินทิกรัล โดยได้วิเคราะห์บนระนาบเฟส (Phase Plane) และชี้ให้เห็นว่าค่าความชื้นที่เป็นลบก็สามารถทำให้เกิด Stick-slip ได้ที่ความเร็วต่างๆ กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เมื่อความเร็วเพิ่มมากขึ้นจะทำให้แรงเสียดทานค่อยๆ ลดลงจากแรงเสียดทานสถิตย์เป็นแรงเสียดทานจลน์ โดยจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.12

จากรูปแสดงให้เห็นว่า เราจะแบ่งแรงเสียดทานเนื่องจากการหล่อลื่นออกเป็นสามช่วง โดยช่วงแรกคือช่วงที่ความเร็วมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ เราเรียกว่า Boundary Lubrication ในช่วงนี้ความเร็วจะมีค่าต่ำมาก แรงเสียดทานในช่วงนี้จะเกิดจากการพยายามเอาชนะแรงเฉือนของชั้นของสารหล่อลื่น ดังนั้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นค่าแรงเสียดทานจะลดลงเล็กน้อย เนื่องจากสามารถเอาชนะแรงเฉือนของชั้นของสารหล่อลื่น (boundary layer) เมื่อความเร็วมีค่าสูงขึ้นจนถึงช่วงการหล่อลื่นแบบ Partial Fluid Lubrication ในช่วงนี้ความเร็วของการไหลจะมีผลต่อแรงเสียดทานในระบบมากกว่าแรงเฉือนระหว่างชั้นของสารหล่อลื่น เมื่อความเร็วมีค่าสูงขึ้นค่าแรงเสียดทานจะลดลงจนกระทั่งถึงตำแหน่งที่แรงเสียดทานแบบหนืด (viscous friction) เริ่มปรากฏขึ้น ณ ตำแหน่งนี้เรียกว่าตำแหน่งความเร็ววิกฤติ (critical velocity) ซึ่งจะทำให้แรงเสียดทานมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามความเร็ว ดังนั้นสารหล่อลื่นจะสามารถทำงานได้อย่างเต็มที่ ช่วงนี้เราเรียกว่า Full Fluid Lubrication



รูปที่ 3.12 การเปลี่ยนแปลงของแรงเสียดทานเมื่อเทียบกับความเร็ว

ต่อมาได้มีผู้เสนอแบบจำลองของแรงเสียดทานที่ขึ้นกับค่าความเร็วของระบบ [17] โดยอ้างถึงแบบจำลองของ Stribeck โดยแบบจำลองส่วนใหญ่จะประกอบด้วยแรงเสียดทานสถิตย์ แรงเสียดทานจลน์ แรงเสียดทานหนืด และพจน์ของ Stribeck Effect (F_{str}) เช่น

$$F_f(V) = F_k \operatorname{sgn}(V) + \mu V + F_{str}(V) \operatorname{sgn}(V) \quad \dots (3.16)$$

ในปี 1990 Hess และ Soom ได้เสนอแบบจำลองไว้ดังสมการ 3.17

$$F_{str}(V) = F_{sk} \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{V}{V_{str}} \right)^2} \right) \quad \dots (3.17)$$

เมื่อ V_{str} คือ ความเร็ววิกฤติ (Critical Velocity) ที่มีความสัมพันธ์กับปรากฏการณ์ Stribeck Effect โดย $F_{sk} = F_s - F_k$ และในปี 1991 Armstrong และ H elouvy ได้เสนอแบบจำลองที่คล้ายกันดังสมการที่ 3.18

$$F_{str}(V) = F_{sk} e^{-(V/V_{str})^a} \quad \dots (3.18)$$

เมื่อพิจารณาในระบบที่มีค่าแรงเสียดทานแบบไม่สมมาตรและมีค่าแรงเสียดทานมากกว่า 1 ค่า จะได้

$$F_{str}(V) = F_{sk1} e^{-(V/V_{str1})^a} + F_{sk2} e^{-(V/V_{str2})^a} \quad \dots (3.19)$$

หรือ

$$F_{str}(V) = F_{sk1} \left(\frac{1}{1 + (V/V_{str1})^2} \right) + F_{sk2} \left(\frac{1}{1 + (V/V_{str2})^2} \right) \quad \dots (3.20)$$

เมื่อ a คือค่าคงที่ของแบบจำลอง และจากการทดลองของ Armstrong และ H elouvy พบว่าค่า a ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 2

ในปี ค.ศ.1989 Canudas de Wit ได้พยายามหาแบบจำลองของแรงเสียดทานเพื่อนำไปใช้กับตัวควบคุมแบบปรับเปลี่ยนได้ (adaptive control) และหาค่าตัวแปรเชิงเส้นได้ดังสมการ 3.21

$$F_f(V) = \alpha_0 \operatorname{sgn}(V) + \alpha_1 V + \alpha_2 |V|^{1/2} \operatorname{sgn}(V) \quad \dots (3.21)$$

เมื่อ α_0, α_1 และ α_2 เป็นตัวแปรของตัวควบคุมแบบปรับเปลี่ยนได้ (Adaptive Control) นอกจากนั้น ในปี 1987 Gogoussis และ Donath ได้พบว่าในช่วงความชันที่เป็นลบ ของแบบจำลองแรงเสียดทานในรูปที่ 3.12 จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ stick-slip และเป็นผลทำให้ระบบเกิด limit cycles โดยไม่จำเป็นต้องมีตัวควบคุมแบบอินทิกรัลในระบบ [17]

3.8 แรงเสียดทานล่าช้า (Friction Lag)

โดยปกติแล้วในระบบที่มีการเคลื่อนที่ ค่าของแรงเสียดทานจะไม่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วในทันที โดยในปี ค.ศ. 1958 Robinowicz ได้อธิบายไว้ว่าทันทีที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของระบบ ต้องอาศัยเวลาเล็กน้อยที่แรงเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยให้เหตุผลว่าปรากฏการณ์แรงเสียดทานล่าช้า (Frictional Lag) จะขึ้นอยู่กับระยะการขจัดวิกฤตครั้งก่อน (critical previous sliding distance) และในปี ค.ศ. 1943 Sampson et al. ได้พยายามหาความสัมพันธ์ของแรงเสียดทานกับความเร็ว เมื่อลดและเพิ่มขนาดของความเร่งของระบบซึ่งพบว่าระบบจะแสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์แรงเสียดทานล่าช้าดังแสดงในรูปที่ 3.13

ในปี 1983 Rice และ Ruina ได้ทดลองพบว่าแรงเสียดทานที่ขึ้นอยู่กับความเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ไม่เพียงพอที่จะอธิบายการไถล (slip) ของระบบ โดยในการทดลองครั้งนี้ได้ทดลองกับระบบที่มีความเร็วต่ำๆ และแรงเสียดทานมีลักษณะดังรูปที่ 3.12 ซึ่งจะทำให้ระบบขาดความเสถียรภาพ โดย Ruina ได้เสนอแนวคิดที่ว่า แรงเสียดทานไม่ได้ขึ้นอยู่กับสภาวะการไถล ณ เวลาปัจจุบันเพียงอย่างเดียวแต่ยังขึ้นอยู่กับสภาวะการไถลก่อนหน้าด้วย คือ

$$F_f = F_f(V, \theta) \quad \dots (3.22)$$

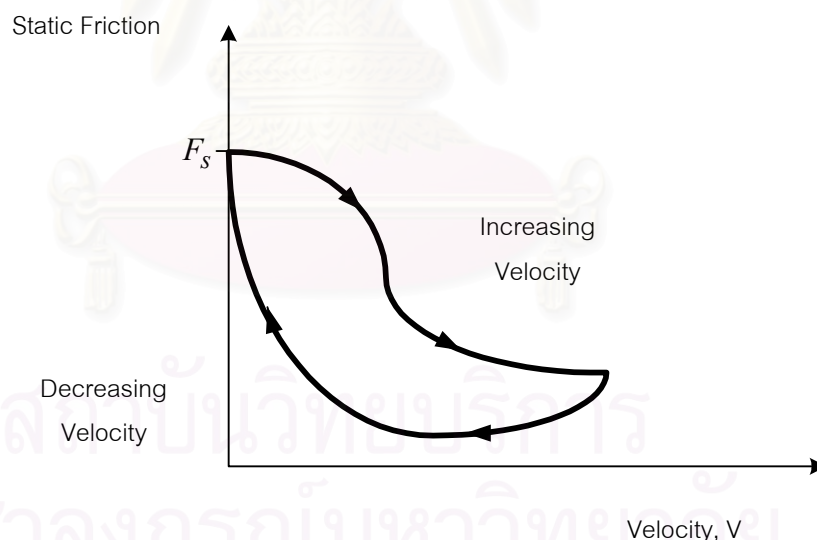
เมื่อ θ คือ ตัวบ่งบอกถึงสภาวะของผิวสัมผัส โดยที่ค่า θ จะไม่เปลี่ยนแปลงค่าตามความเร็วทันทีที่ความเร็วมีการเปลี่ยนแปลง เช่น

$$\frac{d\theta}{dt} = G(\theta, V) \quad \dots (3.23)$$

จากสมการ 3.23 แสดงให้เห็นว่าการตอบสนองล่าช้าของแรงเสียดทาน (a delayed friction response) ที่ค้นพบโดย Rice มีลักษณะคล้ายกับการค้นพบของ Robinowicz แตกต่างกันที่ค่า θ ไม่ขึ้นกับระยะการขจัดวิกฤตครั้งก่อน ในปี 1990 Hess และ Soom ได้ทดลองบนชุดทดลองที่ประกอบด้วยแผ่นจานเหล็กหมุนบนแผ่นเหล็ก ที่จานหมุนสามารถปรับค่าขนาดและความถี่ของการหมุนได้ โดยระหว่างผิวสัมผัสทั้งสองถูกหล่อลื่นด้วยสารหล่อลื่นหลายประเภท การทดสอบนี้ได้ทดลองจ่ายสัญญาณอ้างอิง (reference signal) เป็นแบบรูปคลื่นสามเหลี่ยม (triangular wave pattern) พบว่าความสัมพันธ์ที่ได้ระหว่างแรงเสียดทานกับความเร็วมีค่าดังรูปที่ 3.13 ซึ่งปรากฏ Hysteresis Loop ของแรงเสียดทาน ซึ่งเกิดจากการหน่วงของเวลาเช่นเดียวกับการทดลองของนักวิจัยที่ผ่านมา ซึ่ง Hess และ Soom ได้สร้างแบบจำลองของปรากฏการณ์นี้ให้ขึ้นอยู่กับค่าของเวลาหน่วง (time delay) แทนที่จะขึ้นอยู่กับ ระยะการขจัดวิกฤตครั้งก่อน (critical previous sliding distance) ที่ถูกเสนอโดย Robinowicz ดังสมการ 3.24

$$F_f(t) = F_f(V(t - \tau)) \quad \dots (3.24)$$

เมื่อ τ คือ ค่าคงตัวของเวลาหน่วง (The constant Time lag)



รูปที่ 3.13 Hysteresis Friction เนื่องจากแรงเสียดทานล่าช้า

ดังนั้นแบบจำลองแรงเสียดทานของ Stribeck จากสมการ 3.17 จะกลายเป็น

$$F_{str}(t) = F_s \left(\frac{1}{1 + (V(t - \tau)/V_{str})^2} \right) \quad \dots (3.25)$$

จากการศึกษาโครงสร้างของแรงเสียดทานทั้งหมด ที่เกิดขึ้นในระบบทางกลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จะเห็นได้ว่าตัวพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแรงเสียดทานนั้น มีมากมายขึ้นอยู่กับชนิดของระบบทางกลที่เราต้องการควบคุม แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาเพื่อหาโครงสร้างของแรงเสียดทานก็ยังมีผู้ทำการศึกษาอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งปัจจุบัน เนื่องจากยังมีค่าพารามิเตอร์อีกหลายตัวที่ยังมีผลต่อแรงเสียดทานแต่ด้วยความยากต่อการออกแบบสมการโครงสร้าง ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีการลดแรงเสียดทานดังที่กล่าวในบทที่ 2 มาปรับปรุงระบบควบคุมที่มีแรงเสียดทาน โดยคำนึงถึงแรงเสียดทานหลักที่เกิดขึ้นในระบบบางตัว เช่น แรงเสียดทานสถิตย์ แรงเสียดทานจลน์ แรงเสียดทานหนืด และผลของ Stribeck เท่านั้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การจำลองการควบคุมมอเตอร์ที่มีแรงเสียดทาน

ในบทนี้ได้จำลองการควบคุมระบบมอเตอร์กระแสตรงที่มีแรงเสียดทานในระบบ โดยใช้ตัวควบคุมเชิงเส้น เพื่อแสดงให้เห็นถึงค่าผิดพลาดทางตำแหน่งเนื่องจากการควบคุมระบบที่มีความไม่เชิงเส้นของแรงเสียดทาน โดยการจำลองจะใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ (PD control) และการควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (PI control) ทั้งนี้การจำลองยังชี้ให้เห็นถึงปรากฏการณ์ limit cycles เนื่องมาจากตัวควบคุมแบบอินทิกรัล และการลดค่าผิดพลาดทางตำแหน่ง โดยการใส่สัญญาณ Dither และ ตัวชดเชยแรงเสียดทานลงในระบบควบคุม โดยแบบจำลองทั้งหมดจะทำการจำลองผ่านโปรแกรม Matlab[®] 6.1/Simulink[™]

4.1 แบบจำลองของระบบมอเตอร์กระแสตรง

การจำลองนี้จะพิจารณาระบบควบคุมให้เป็นแบบทั่วไป (regulator) โดยการควบคุมให้มอเตอร์หมุนด้วยคำสั่งเป็นแบบขั้น (step response) เพื่อศึกษาถึงผลของแรงเสียดทานที่มีต่อระบบควบคุมตำแหน่ง โดยเฉพาะที่ตำแหน่งเมื่อระบบถูกควบคุมเข้าใกล้ตำแหน่งอ้างอิง ซึ่งระบบจะมีความเร็วเข้าใกล้ศูนย์ และจะทำให้เกิดค่าผิดพลาดทางตำแหน่งได้ เนื่องจากความเสียดทานที่เกิดขึ้นจะมีความไม่เชิงเส้นสูง ดังที่ได้กล่าวในบทที่ 2

ในระบบมอเตอร์กระแสตรงที่เราพิจารณานั้น จะกำหนดให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของตัวมอเตอร์ซึ่งมีค่า เท่ากับ 0.0011 กิโลกรัม-ตารางเมตร และสมการการเคลื่อนที่ของตัวมอเตอร์แสดงได้ดังสมการ 4.1

$$J\ddot{\theta} = \tau_{motor} - \tau_f \quad \dots (4.1)$$

เมื่อ

τ_{motor} คือ แรงบิดของมอเตอร์ , กิโลกรัม-ตารางเมตร

τ_f คือ แรงบิดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระบบมอเตอร์, กิโลกรัม-ตารางเมตร

ส่วนแบบจำลองของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในตัวมอเตอร์นั้น ได้ใช้แบบจำลองที่สามารถแสดงพฤติกรรมของแรงเสียดทานที่ประกอบด้วย แรงเสียดทานสถิตย์ แรงเสียดทานหนืด และ Stribeck's effect โดยจะมีคุณสมบัติดังรูปที่ 4.1 ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ [22]

$$\tau_f = \lambda(\dot{\theta}) \cdot \tau_{slip}(\dot{\theta}) + (1 - \lambda(\dot{\theta})) \cdot \tau_{stick}(\dot{\theta}) \quad \dots (4.2)$$

เมื่อ

$$\lambda(\dot{\theta}) = \begin{cases} 1 & \dot{\theta} > 0 \\ 0 & \dot{\theta} \leq 0 \end{cases} ,$$

$$\tau_{stick} = k\dot{\theta} ,$$

$$\tau_{slip} = \text{sgn}(\dot{\theta}) \left[k\alpha + (\tau_{slip,0} - k\alpha) \left(1 - e^{-a\dot{\theta}} \right) \right] + b\dot{\theta} ,$$

$$\text{sgn}(\dot{\theta}) = \begin{cases} 1 & \dot{\theta} > 0 \\ 0 & \dot{\theta} = 0 \\ -1 & \dot{\theta} < 0 \end{cases} ,$$

โดยที่

τ_f คือ แรงเสียดทานบิดที่เกิดขึ้นในระบบมอเตอร์, นิวตัน-เมตร

$\dot{\theta}$ คือ ความเร็วสัมพัทธ์, เรเดียนต่อวินาที

τ_{stick} คือ ค่าแรงเสียดทานบิดสถิตย์, นิวตัน-เมตร

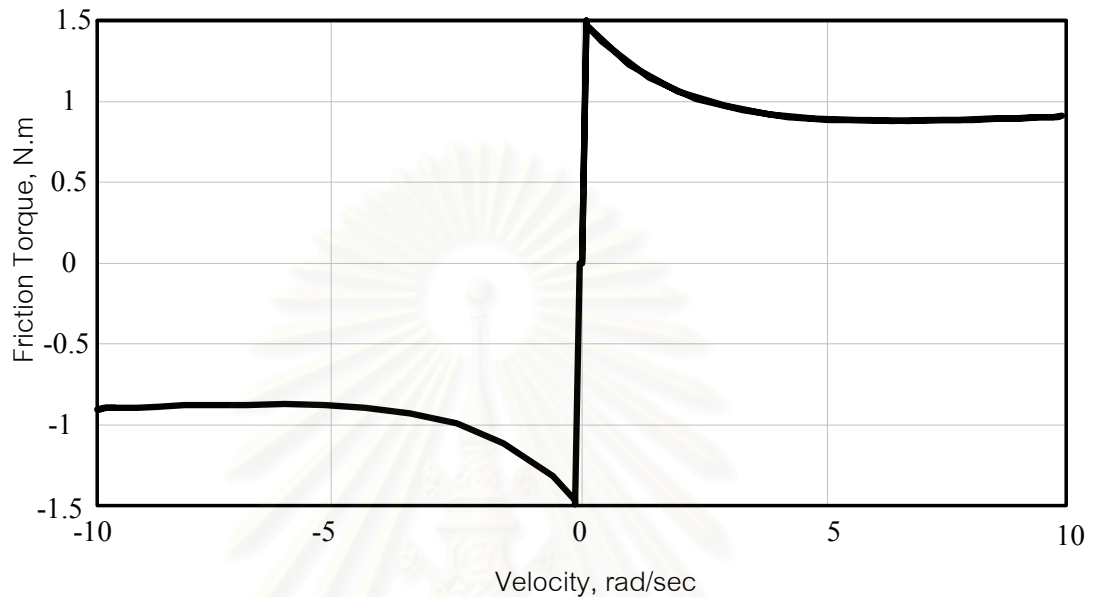
τ_{slip} คือ ค่าแรงเสียดทานจลน์บิด, นิวตัน-เมตร

$\tau_{slip,0}$ คือ ค่าแรงเสียดทานบิดจลน์ที่เวลา เท่ากับศูนย์, นิวตัน-เมตร

b คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานหนืด

ในการจำลองเรากำหนดให้ตัวแปรต่างๆ มีค่าดังนี้ $\tau_{slip,0} = 0.5$, $\alpha = 0.1$, $k = 15$, $a = 0.5$, $b = 0.01$ โดยค่าดังกล่าวใช้ค่าอ้างอิงจาก [23]

จากรูปที่ 4.1 และสมการที่ 4.2 จะเห็นว่าแบบจำลองแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในมอเตอร์จะประกอบไปด้วยแรงเสียดทานหลักสามชนิด คือแรงเสียดทานสถิตย์ แรงเสียดทานแบบคูลอมบ์ และแรงเสียดทานหนืด โดยมีค่าแรงเสียดทานสถิตย์สูงสุดเท่ากับ 1.5 นิวตัน-เมตร



รูปที่ 4.1 แบบจำลองแรงเสียดทาน

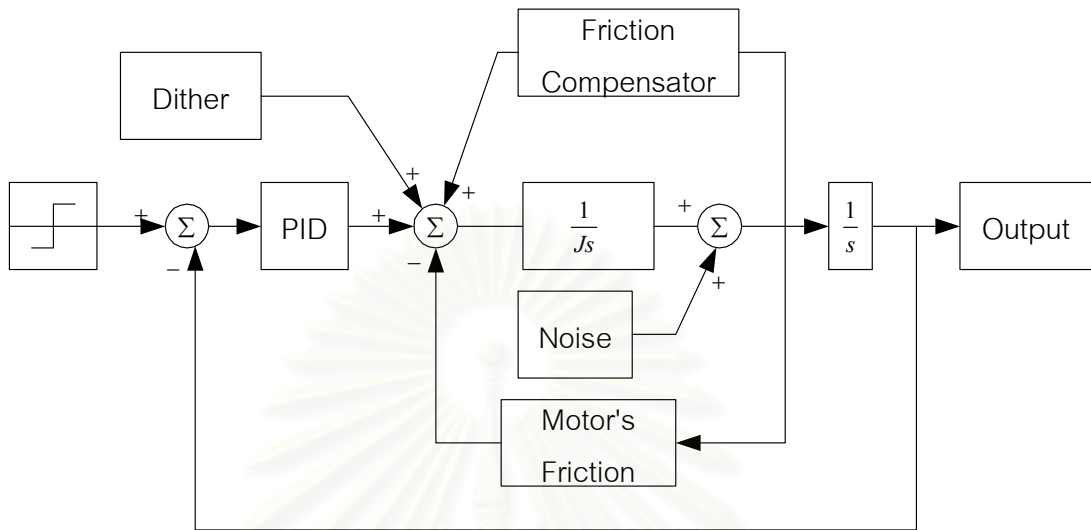
4.2 แบบจำลองระบบควบคุม

ในการจำลองแบบควบคุม เราจะใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับอนุพันธ์ (PD) เป็นตัวควบคุมหลัก โดยจะทำการเพิ่มวิธีการควบคุมแบบอื่นๆ เข้ามาชดเชยแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระบบ เพื่อลดค่าผิดพลาดทางตำแหน่งที่สถานะเสถียร ระบบควบคุมหลักจะประกอบด้วย ตัวควบคุมเชิงเส้น แบบจำลองตัวชดเชยแรงเสียดทาน และสัญญาณ Dither โดยการจำลองจะสั่งให้มอเตอร์เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ 20 องศา และระบบควบคุมต่างๆ สามารถแสดงด้วยแผนภาพการจำลองการควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ทั้งนี้รายละเอียดของส่วนต่างๆ ของระบบควบคุมที่ใช้ในแบบจำลอง จะอธิบายในหัวข้อย่อย ดังนี้

4.2.1 แบบจำลองตัวควบคุมเชิงเส้น

ในการจำลอง เราจะกำหนดให้ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบสัดส่วนมีค่า $K_p = 2$ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์มีค่า $K_d = 0.2$ และอัตราขยายของตัว

ควบคุมแบบอินทิกรัลมีค่า $K_i = 100$ โดยแรงเสียดทานในระบบจำลองมีคุณสมบัติตามสมการ 4.2



รูปที่ 4.2 แผนภาพการจำลองการควบคุม

4.2.2 แบบจำลองตัวชดเชยแรงเสียดทาน

ในการชดเชยแรงเสียดทานด้วยตัวชดเชย เราจะกำหนดให้ตัวชดเชยมีโครงสร้างแรงเสียดทานเป็นแบบ Stribeck's model [1] ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการ 4.3

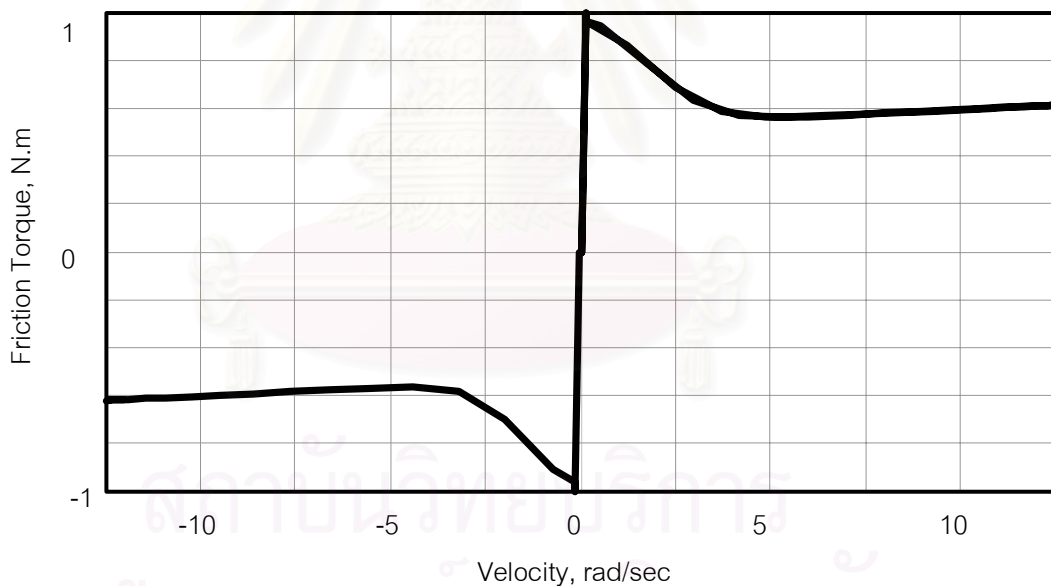
$$F = \begin{cases} F(\dot{\theta}); \dot{\theta} \neq 0 \\ F_e; \dot{\theta} = 0 \text{ and } |F_e| < F_s \\ F_s \operatorname{sgn}(F_e); \text{otherwise } \left(\dot{\theta} = 0 \text{ and } |F_e| \geq F_s \right) \end{cases} \dots (4.3)$$

โดยที่ $F(\dot{\theta}) = F_c + (F_s - F_c)e^{-|\dot{\theta}/\dot{\theta}_s|^2} + F_r\dot{\theta}$

- เมื่อ F_e คือ แรงที่กระทำต่อมวล
- F_s คือ ค่าแรงเสียดทานสถิตย์สูงสุด
- $F_r\dot{\theta}$ คือ ค่าแรงเสียดทานหนืด
- $\dot{\theta}_s$ คือ ความเร็วที่ค่าแรงเสียดทานจลน์ต่ำสุด (Stribeck's velocity)
- F_c คือ แรงเสียดทานแบบคูลอมบ์

จะเห็นว่าตัวชดเชยที่สร้างขึ้นมีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับแบบจำลองแรงเสียดทานที่กล่าวมาก่อนหน้านี้คือ มีผลของแรงเสียดทานสถิตย์ แรงเสียดทานหนืด และ Stribeck's effect โดยสมมติค่าในการจำลอง ดังนี้ $F_c = 0.52$, $F_s = 1$, $\theta_s = 1.91$ และ $F_v \dot{\theta} = 0.0095$ โดยจะทำให้แรงเสียดทานมีลักษณะ ดังรูปที่ 4.3

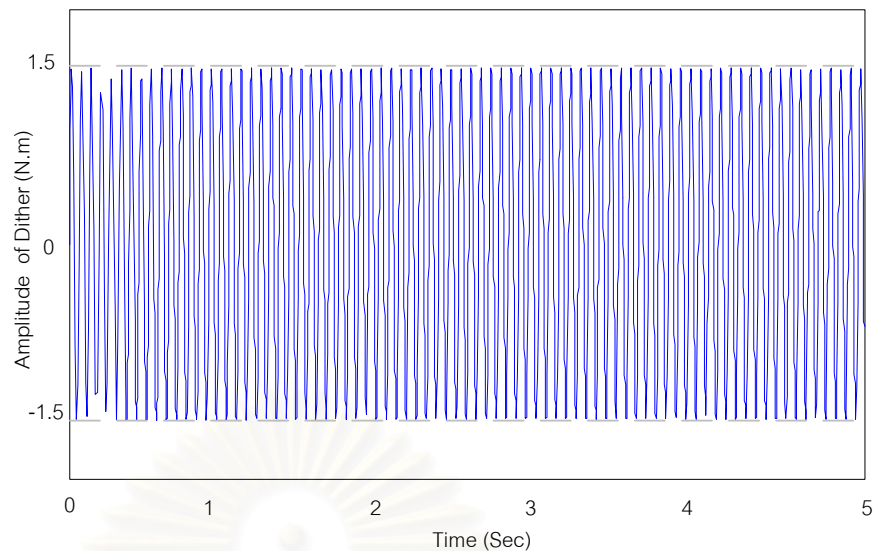
เนื่องจากโครงสร้างของแบบจำลองของตัวชดเชยมีลักษณะคล้ายกับแรงเสียดทานในตัวมอเตอร์ ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถแสดงให้เห็นถึงผลการจำลองที่มีการชดเชยที่ไม่สมบูรณ์ได้ ดังนั้นในการจำลองนี้จะสมมติให้ค่าแรงเสียดทานสถิตย์สูงสุดในตัวชดเชยมีค่าเท่ากับ 1.0 นิวตัน-เมตร ซึ่งมีค่าต่ำกว่าแรงเสียดทานในตัวมอเตอร์ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1.5 นิวตัน-เมตร เนื่องจากการจำลองนี้ต้องการแสดงให้เห็นถึงค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้น เมื่อตัวชดเชยไม่สามารถชดเชยแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ แล้วจึงนำสัญญาณ Dither มาชดเชยแรงเสียดทานที่เหลือ โดยแรงเสียดทานที่ได้จากตัวชดเชยมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แบบจำลองแรงเสียดทานแบบ Stribeck's model ในตัวชดเชย

4.2.3 สัญญาณ Dither

ค่าสัญญาณอินพุตความถี่สูง หรือ Dither ที่ใส่ลงไปในระบบมีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์ (sinusoidal) โดยมีขนาด 1.5 นิวตัน-เมตร และความถี่ที่ 100 เฮิรตซ์ มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 สัญญาณ Dither ในระบบจำลอง

ซึ่งขนาดของสัญญาณ Dither ที่เพิ่มเข้าไปในระบบควบคุมจะมีค่าเท่ากับแรงเสียดทานสถิตย์ของมอเตอร์ในการจำลอง (1.5 นิวตัน-เมตร) โดยขนาดและความถี่ที่กำหนดนี้จะนำไปใช้เพื่อชดเชยแรงเสียดทานสำหรับระบบที่ควบคุมด้วย PD และใช้ปรับปรุงประสิทธิภาพในการควบคุมตำแหน่งของตัวชดเชยแรงเสียดทานที่อ้างอิงแบบจำลอง

ในส่วนของการวิเคราะห์ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นเมื่อระบบถูกควบคุมด้วย PD ควบคู่กับสัญญาณ Dither นั้นค่าของสัญญาณ Dither จะถูกปรับเปลี่ยนขนาดและความถี่ให้มีค่าอยู่ระหว่างเท่ากับ 0-2.5 นิวตัน-เมตร และ 0.1-1000 เฮิรตซ์ ตามลำดับ

4.3 ผลการจำลองระบบควบคุม

ในการจำลองการควบคุมระบบมอเตอร์กระแสตรง ดังรูปที่ 4.2 เพื่อนำผลการจำลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับความสามารถในการชดเชยแรงเสียดทาน โดยพิจารณาจากค่าผิดพลาดทางตำแหน่งของระบบควบคุม จึงได้แบ่งการควบคุมเป็น 5 แบบการควบคุม ดังต่อไปนี้ :

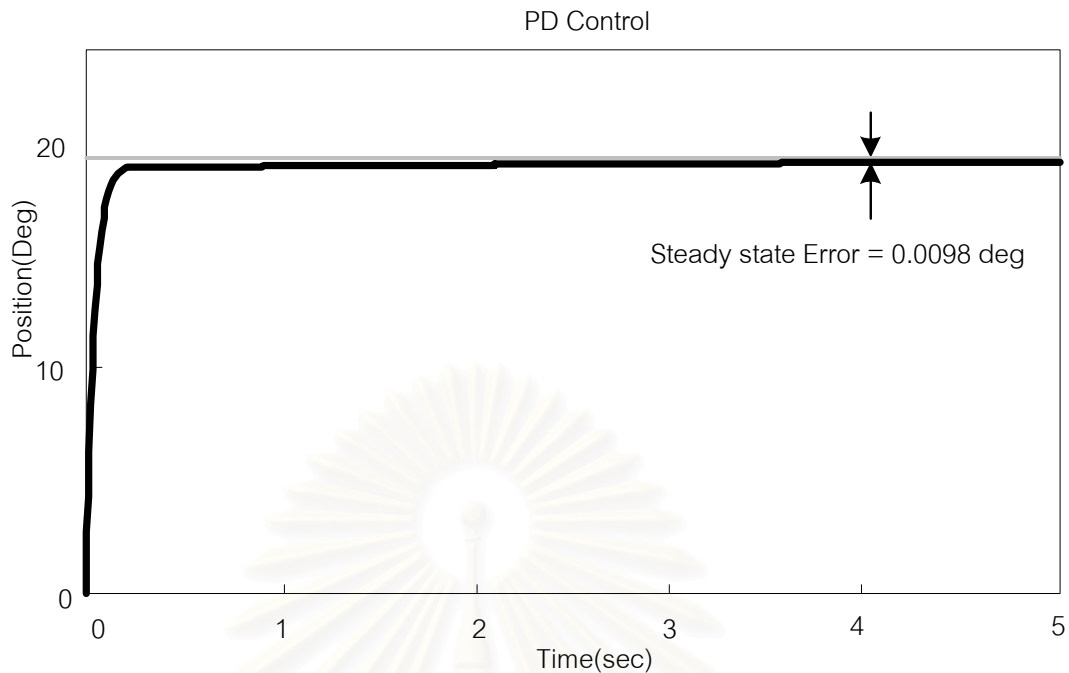
- การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ (PD Control)
- การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอินทิกรัล (PI Control)

- การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ และตัวชดเชยแรงเสียดทาน (PD with Friction Compensation)
- การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ และสัญญาณ Dither
- การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ พร้อมตัวชดเชยแรงเสียดทาน และสัญญาณ Dither (PD with Friction Compensation and Dither)

ในการจำลองนี้เป็นการจำลองควบคุมระบบมอเตอร์ด้วยตัวควบคุมแบบ PD ก่อนเพื่อชี้ให้เห็นถึงค่าผิดพลาดเนื่องจากไม่สามารถชดเชยแรงเสียดทานในระบบได้ หลังจากนั้นจะเป็นการลดแรงเสียดทาน โดยเพิ่มตัวชดเชยแบบต่างๆ เข้าไปในระบบควบคุม ทั้งนี้การจำลองยังได้ทำการจำลองปรากฏการณ์ limit cycles ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ระบบไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งอ้างอิงได้ โดยจะมีการเคลื่อนที่รอบๆ บริเวณตำแหน่งอ้างอิง เนื่องจากการเพิ่มตัวควบคุมแบบอินทิกรัลในระบบควบคุม ดังจะได้อธิบายในผลการจำลอง

4.3.1 การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ (PD Control)

ในรูปที่ 4.5 แสดงผลการจำลองการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PD โดยจะทำการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 20 องศา ด้วยตัวควบคุมแบบ PD จะเห็นว่าตัวควบคุมพยายามที่จะหมุนมอเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 20 องศา แต่เนื่องจากที่ใกล้ตำแหน่งอ้างอิง ขนาดของค่าผิดพลาดจะมีขนาดเล็ก จึงทำให้อัตราขยายของตัวควบคุมคูณกับ ค่าผิดพลาดทางตำแหน่งของระบบขณะนั้นมีขนาดน้อยกว่าแรงเสียดทานสถิตย์สูงสุดในระบบ จึงทำให้มอเตอร์ไม่สามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้อีก ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดค่าผิดพลาดทางตำแหน่งในภาวะเสถียรขึ้น



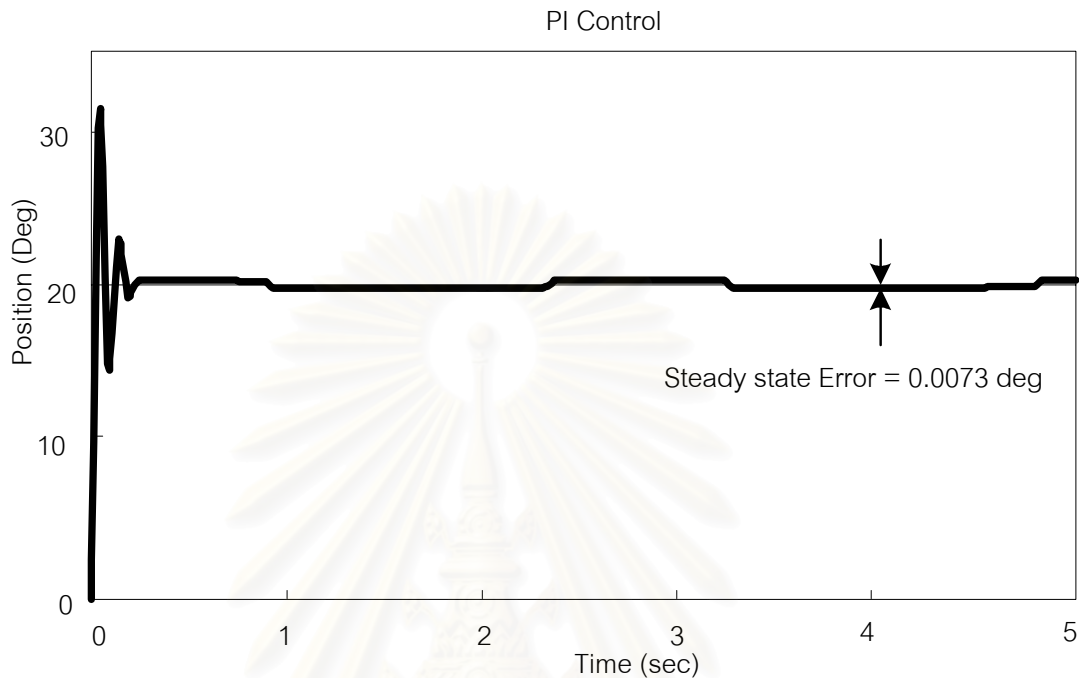
รูปที่ 4.5 ผลการจำลองการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PD

4.3.2 การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอินทิกรัล (PI Control)

ในรูปที่ 4.6 แสดงผลการจำลองการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI control โดยตัวควบคุมแบบอินทิกรัลจะถูกเพิ่มเข้าไปในระบบควบคุม เพื่อให้ค่าผิดพลาดทางตำแหน่งมีค่าลดลง แต่เนื่องจากระบบมอเตอร์มีแรงเสียดทานที่มีความไม่เชิงเส้นสูง โดยเฉพาะช่วงที่ค่าความเร็วต่ำๆ ไกล่ศูนย์ จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ Stick-slip ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิด Limit cycles ดังแสดงในรูปที่ 4.6 เมื่ออัตราขยายของตัวควบคุมแบบ PI Control มีค่า $K_p = 2$ และ $K_i = 100$

จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่าเมื่อตอนเริ่มต้นระบบจะเคลื่อนที่เลยตำแหน่งอ้างอิง (overshoot) แต่ก็สามารถจะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้ตำแหน่งอ้างอิงได้ แต่เมื่อระบบเข้าใกล้ตำแหน่งอ้างอิง ขนาดของค่าผิดพลาดมีขนาดเล็กลงจึงทำให้มอเตอร์หยุดการเคลื่อนที่ด้วยแรงเสียดทานสถิตย์ เนื่องจากขนาดของอัตราขยายของตัวควบคุมคูณกับค่าผิดพลาดมีขนาดน้อยกว่าแรงเสียดทานสถิตย์ หลังจากนั้นตัวควบคุมแบบอินทิกรัลจะทำการสะสมค่าผิดพลาดจนกระทั่งขนาดของสัญญาณคำสั่งมีค่ามากกว่าแรงเสียดทานสถิตย์มอเตอร์จึงเริ่มเคลื่อนที่ในขณะที่มอเตอร์เริ่มเคลื่อนที่นั้น แรงเสียดทานที่กระทำต่อมอเตอร์จะเปลี่ยนเป็นแรงเสียดทานจลน์ ทำให้คำสั่งควบคุมเนื่องจากตัวอินทิกรัลมีค่า

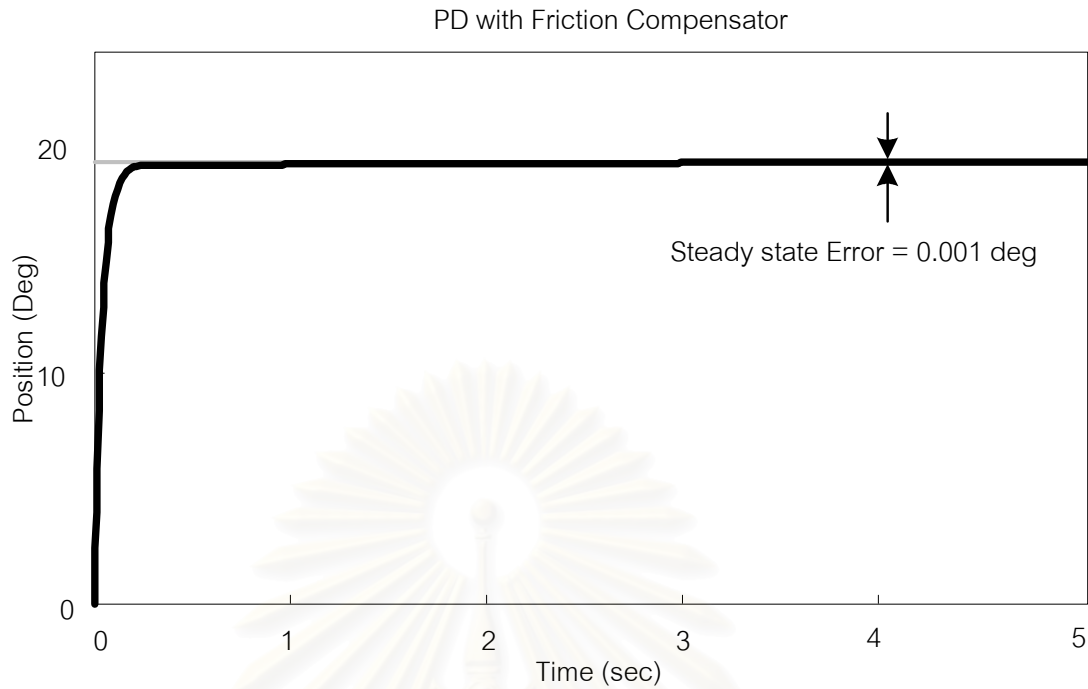
มากกว่า จึงทำให้มอเตอร์เคลื่อนที่เลยตำแหน่งอ้างอิง ซึ่งเรียกปรากฏการณ์การเคลื่อนที่แบบนี้ว่าปรากฏการณ์ limit cycles



รูปที่ 4.6 ผลการจำลองการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI

4.3.3 การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ และตัวชดเชยแรงเสียดทาน (PD with Friction Compensation)

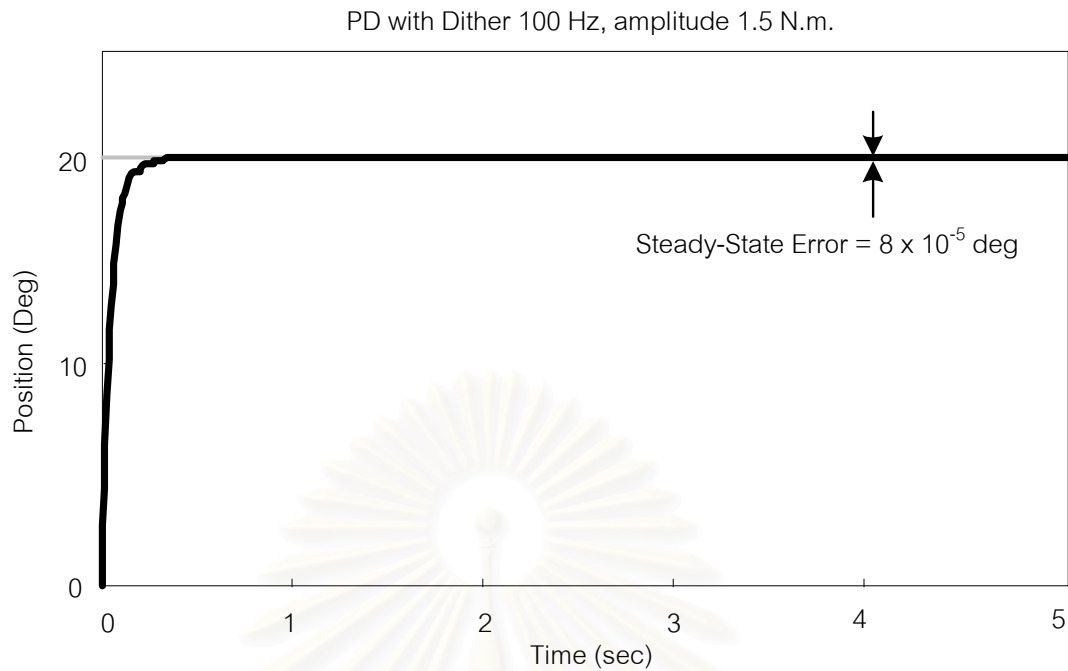
รูปที่ 4.7 แสดงผลการจำลองการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PD พร้อมทั้งตัวชดเชยแรงเสียดทานที่อ้างอิงแบบจำลอง จะเห็นว่าแบบจำลองของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ และแบบจำลองแรงเสียดทานในตัวชดเชยมีคุณสมบัติคล้ายกัน ทำให้สามารถควบคุมมอเตอร์เข้าสู่ตำแหน่งอ้างอิงได้ แต่อย่างไรก็ตามในช่วงวินาทีที่ 0-3 ระบบยังไม่สามารถเข้าสู่ตำแหน่งอ้างอิงได้ทันที เนื่องจากค่าแรงเสียดทานสถิตที่เกิดขึ้นในมอเตอร์มีค่ามากกว่าตัวชดเชยจึงทำให้มีค่าผิดพลาดเกิดขึ้นเล็กน้อย



รูปที่ 4.7 ผลการจำลองการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PD พร้อมทั้งตัวชดเชยแรงเสียดทาน

4.3.4 การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ และสัญญาณ Dither

รูปที่ 4.8 แสดงผลการจำลองการควบคุมมอเตอร์กระแสตรง โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PD พร้อมทั้งสัญญาณ Dither โดยที่สัญญาณ Dither ที่ใส่เข้าไปในระบบจะลดขนาดของแรงเสียดทานสถิตย์ที่มีค่ามากกว่าแรงเสียดทานจลน์ลง ซึ่งทำให้แรงเสียดทานในช่วงความเร็วต่ำมีความต่อเนื่องมากขึ้น ในการจำลองการควบคุมแบบนี้เราเลือกใช้ขนาดของ $K_p = 2$ และ $K_d = 0.2$ ส่วนสัญญาณ Dither จะมีลักษณะเป็นรูปแบบไซน์ ขนาด 1.5 นิวตัน-เมตร และความถี่ 100 เฮิรตซ์ ผลการจำลองจะเห็นได้ว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมมอเตอร์เข้าสู่ตำแหน่งอ้างอิงได้ โดยค่าผิดพลาดลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ในช่วงเวลา 0-1 วินาที จะเห็นว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมมอเตอร์เข้าสู่ตำแหน่งอ้างอิงได้โดยไม่มีการติดขัดเนื่องจากสัญญาณ Dither สามารถลดขนาดของแรงเสียดทานสถิตย์ลงได้ แต่อย่างไรก็ตามค่าผิดพลาดในระบบก็อาจจะเกิดจากขนาดของสัญญาณ Dither เอง ดังจะกล่าวภายหลัง



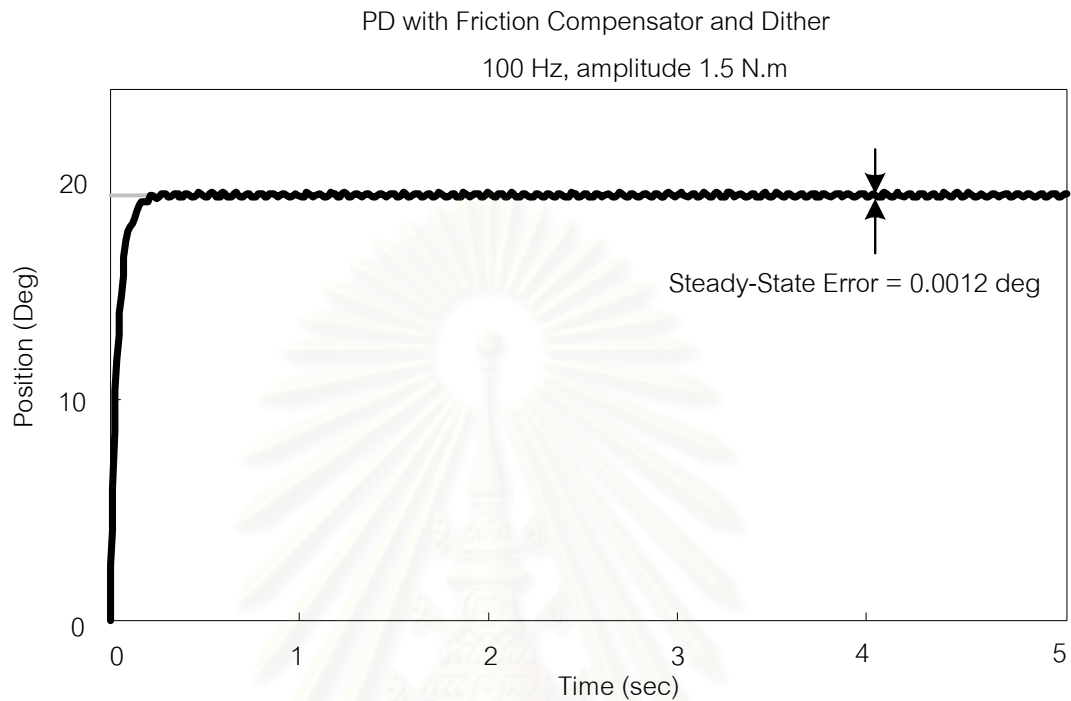
รูปที่ 4.8 ผลการจำลองการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PD พร้อมทั้งสัญญาณ Dither

4.3.5 การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ พร้อมตัวชดเชยแรงเสียดทาน และสัญญาณ Dither (PD with Friction Compensation and Dither)

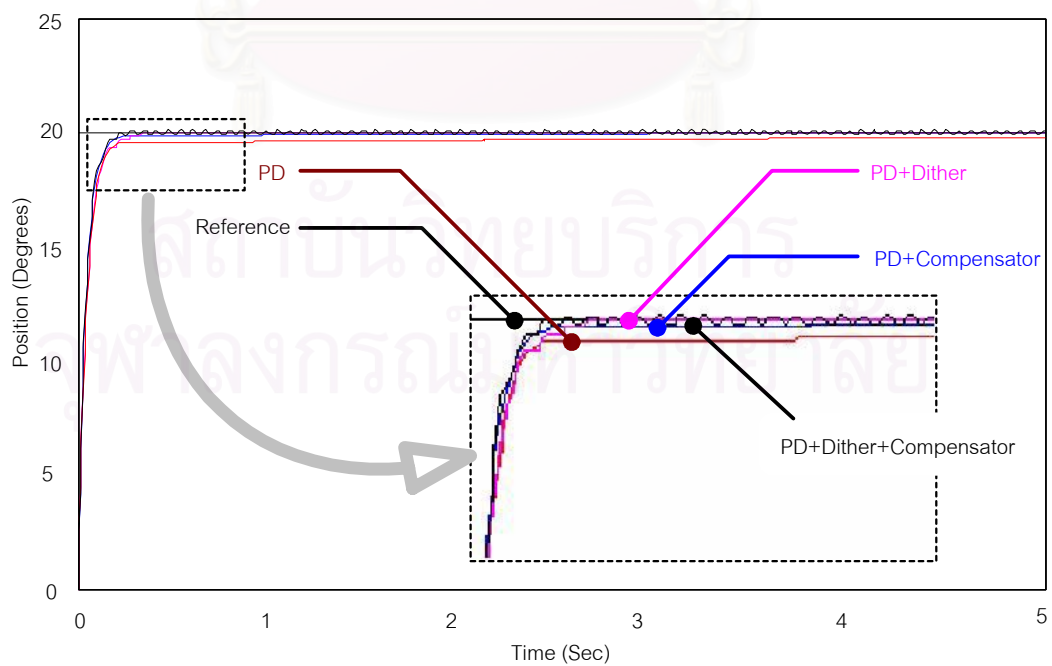
เมื่อพิจารณาการชดเชยแรงเสียดทาน ด้วยตัวชดเชยแรงเสียดทานในระบบควบคุมตำแหน่งนั้นจะพบว่า ตัวชดเชยที่ไม่สามารถชดเชยแรงเสียดทานในระบบได้อย่างสมบูรณ์ จะทำให้เกิดค่าผิดพลาดทางตำแหน่งขึ้น และการชดเชยแรงเสียดทานด้วยวิธีเพิ่มสัญญาณ Dither ในหัวข้อก่อนหน้านั้น จะพบว่าค่าผิดพลาดทางตำแหน่งที่สถานะเสถียรมีค่าลดลงได้มาก จนเกือบมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นเพื่อที่จะลดแรงเสียดทานที่คงเหลือในการชดเชยแรงเสียดทาน ด้วยตัวชดเชยที่ไม่สามารถชดเชยแรงเสียดทานได้สมบูรณ์ ในการจำลองนี้จึงทำการชดเชยแรงเสียดทานที่คงเหลือ ด้วยการเพิ่มสัญญาณ Dither พร้อมกับตัวชดเชย โดยตัวชดเชยแรงเสียดทานมีค่าแรงเสียดทานสถิตย์สูงสุดเท่ากับ 1 นิวตัน-เมตร และขนาดของสัญญาณ Dither มีขนาด 1.5 นิวตัน-เมตร

ในรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นถึงผลการจำลองการชดเชยด้วยวิธีเพิ่มสัญญาณ Dither พร้อมกับตัวชดเชย จะเห็นได้ว่าระบบจะเกิดการเคลื่อนที่ไปกลับรอบตำแหน่งอ้างอิง แต่อย่างไรก็ตามค่าเฉลี่ยของตำแหน่งในการควบคุมจะมีค่าใกล้เคียงกับตำแหน่ง แต่ค่า

ผิดพลาดทางตำแหน่งสูงสุดที่เกิดขึ้นจะเกิดจากขนาดของสัญญาณ Dither ที่มีค่ามากกว่าแรงเสียดทานที่เหลือจากตัวชดเชยแรงเสียดทาน



รูปที่ 4.9 ผลการจำลองการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PD พร้อมทั้งตัวชดเชยแรงเสียดทาน และสัญญาณ Dither



รูปที่ 4.10 ผลการจำลองด้วยวิธีการชดเชยแบบต่างๆ

ในรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบผลการควบคุมตำแหน่ง ด้วยวิธีการชดเชยแรงเสียดทานแบบต่างๆ ซึ่งจะพบว่า การควบคุมมอเตอร์ด้วยตัวควบคุม PD จะมีค่าผิดพลาดทางตำแหน่งสูงสุด ส่วนวิธีการชดเชยด้วยวิธีการเพิ่มสัญญาณ Dither จะสามารถควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ให้เข้าใกล้ตำแหน่งอ้างอิงมากที่สุด และเมื่อนำสัญญาณ Dither ที่มีขนาดเดียวกันมาชดเชยแรงเสียดทานที่เหลือจากตัวชดเชยแรงเสียดทาน จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยของตำแหน่งจะมีค่าเข้าใกล้ตำแหน่งอ้างอิงมากกว่าวิธีการชดเชยด้วยตัวชดเชยเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าผิดพลาด การจำลองควบคุมตำแหน่งของระบบมอเตอร์ทั้ง 5 แบบการควบคุม โดยค่าผิดพลาดทางตำแหน่งสูงสุดจะเกิดขึ้นในระบบควบคุมแบบ PD control ซึ่งมีค่าผิดพลาดเท่ากับ 0.049 % และระบบควบคุมที่มีการชดเชยแรงเสียดทานด้วยการเพิ่มสัญญาณ Dither จะมีค่าผิดพลาดทางตำแหน่งต่ำสุด โดยมีค่าผิดพลาดทางตำแหน่งเท่ากับ 0.0004 % ในการควบคุมแบบ PI จะทำให้ค่าผิดพลาดเกิดขึ้นมาก เนื่องจากปรากฏการณ์ limit cycles ส่วนการชดเชยด้วยวิธีอื่นๆ สามารถพิจารณาได้ดังตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าผิดพลาดเนื่องจากการควบคุมแบบต่างๆ

แบบการควบคุม	ค่าผิดพลาดเฉลี่ย (%)	ช่วงเวลายืน (วินาที)
PD Control	0.0490	0.110
PD with Compensator	0.0052	0.060
PD with Dither	0.0004	0.110
PD with Dither and Compensator	0.0060	0.090
PI Control	0.0366	0.025

ดังนั้นจะเห็นว่า เมื่อต้องการชดเชยแรงเสียดทานที่เหลือจากตัวชดเชย ที่ไม่สามารถชดเชยแรงเสียดทานในระบบมอเตอร์ได้หมด จะต้องทำการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณ Dither ที่เพิ่มเข้าไปพร้อมกับตัวชดเชย โดยในการจำลองนี้จะทำการลดและเพิ่มขนาดของสัญญาณ Dither และวัดค่าผิดพลาดสูงสุดในการควบคุมตำแหน่ง โดยใช้แบบจำลองมอเตอร์ และตัวชดเชยแรงเสียดทาน เช่นเดียวกันกับการจำลองที่ผ่านมา และทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณ Dither ให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 3 นิวตัน-เมตร โดยผลการจำลองสามารถแสดงได้ ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบผลของค่าผิดพลาดเนื่องจากการควบคุมแบบชดเชยแรงเสียดทานและเปลี่ยนขนาดของสัญญาณ Dither ที่มีความถี่ 100 เฮิรตซ์

ขนาดของสัญญาณ Dither (นิวตัน-เมตร)	ค่าผิดพลาดเฉลี่ย (%)
3	0.148
2	0.009
1.5	0.006
1	2×10^{-4}
0.5	8×10^{-4}

จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า สัญญาณ Dither ที่มีขนาดเท่ากับ 1 นิวตัน-เมตร ซึ่งต่ำกว่าแรงเสียดทานสถิตย์สูงสุดของระบบมอเตอร์ (1.5 นิวตัน-เมตร) จะให้ค่าผิดพลาดในการควบคุมตำแหน่งต่ำที่สุด ในขณะที่ขนาดของสัญญาณ Dither ที่มีค่ามากกว่า 1 นิวตัน-เมตรนั้น จะให้ค่าผิดพลาดทางตำแหน่งจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากตัวชดเชยแรงเสียดทานสามารถลดค่าแรงเสียดทานได้ส่วนหนึ่ง โดยแรงเสียดทานคงเหลือจากตัวชดเชยจะมีค่าลดลงจากเดิม เมื่อทำการชดเชยแรงเสียดทานด้วยสัญญาณ Dither ที่มีขนาดมากกว่าแรงเสียดทานคงเหลือ จะทำให้ระบบมีการเคลื่อนที่ไปกลับรอบตำแหน่งอ้างอิง เนื่องจากขนาดของสัญญาณ Dither ที่มีค่าสูงเกินไปเมื่อเทียบกับแรงเสียดทานสถิตย์คงเหลือ ในกรณีที่ขนาดของสัญญาณ Dither ที่มีขนาด 0.5 นิวตัน-เมตร ซึ่งเป็นขนาดที่ต่ำกว่าแรงเสียดทานสถิตย์คงเหลือ จะทำให้สัญญาณ Dither ไม่สามารถลดค่าแรงเสียดทานได้หมด จึงทำให้ค่าผิดพลาดทางตำแหน่งมีค่าสูงขึ้น

เราจึงสามารถสรุปได้ว่าถ้าเราทำการชดเชยแรงเสียดทาน พร้อมกับใส่สัญญาณ Dither ควรจะทำการลดขนาดของสัญญาณ Dither ให้เหมาะสมต่อแรงเสียดทานที่คงเหลือในระบบ แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าค่าผิดพลาดที่ใส่สัญญาณ Dither (ในทุกกรณีของขนาด Dither ที่ปรับ) พร้อมกับตัวชดเชยแรงเสียดทานก็ยังให้ค่าผิดพลาดน้อยกว่ากรณีที่มีการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PD โดยไม่มีการชดเชยแรงเสียดทานด้วยวิธีการใดวิธีการหนึ่งในระบบควบคุม

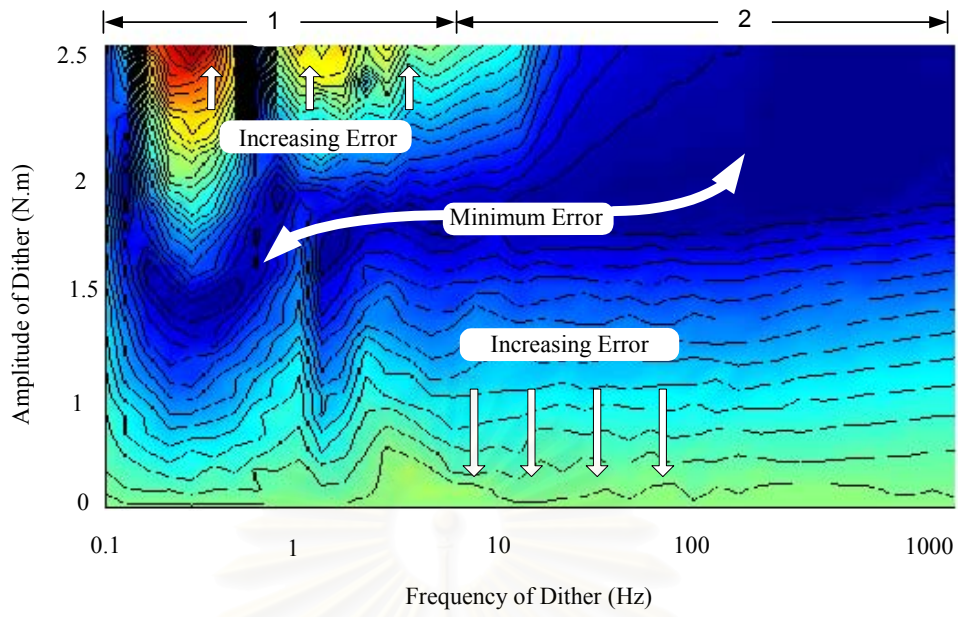
4.4 ผลของขนาดและความถี่ของสัญญาณ Dither ต่อค่าผิดพลาดทางตำแหน่ง

จากผลการจำลองข้างต้น จะเห็นได้ชัดว่าขนาดและความถี่ของสัญญาณ Dither มีผลต่อค่าความผิดพลาดในการควบคุม เนื่องจากถ้าขนาดของสัญญาณ Dither มีค่าสูงเกินไปจะเป็นผลให้ระบบมีการสั่นไปกลับเนื่องจากตัวสัญญาณเอง แต่ถ้าขนาดของสัญญาณ Dither มีค่าน้อยเกินไปก็จะทำให้ระบบไม่สามารถเอาชนะแรงเสียดทานสถิตย์ หรือ stiction ของระบบมอเตอร์ได้

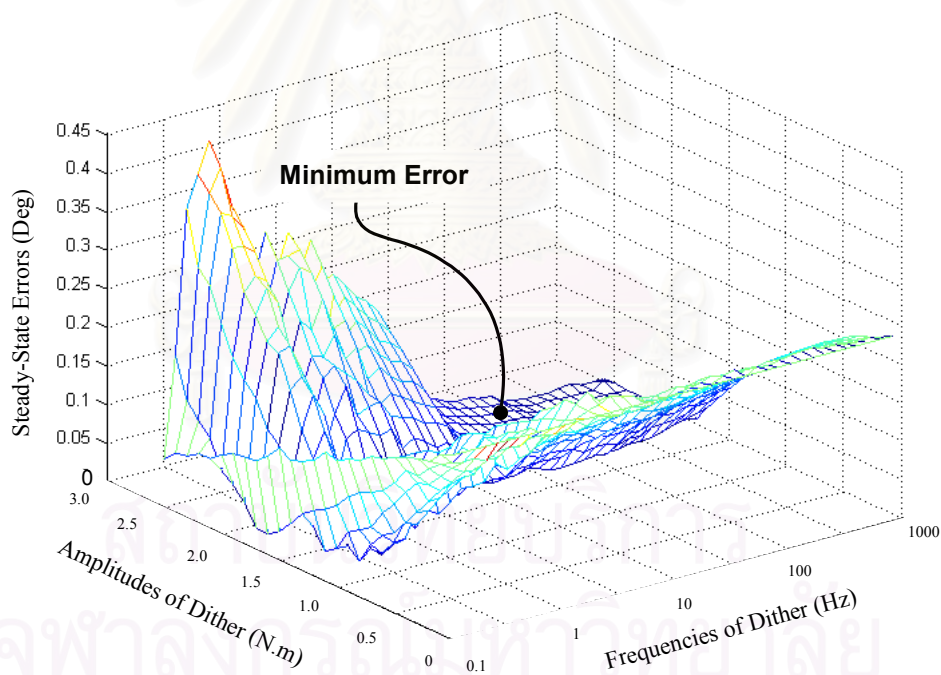
เพื่อศึกษาถึงผลของขนาดและความถี่ของสัญญาณ Dither ที่มีต่อการลดค่าแรงเสียดทานในระบบมอเตอร์ เราจะทำการพิจารณาจากค่าผิดพลาดทางตำแหน่งของระบบที่เกิดขึ้น โดยในการจำลองจะกำหนดให้แรงเสียดทานสถิตย์สูงสุดมีค่าเท่ากับ 1.5 นิวตัน-เมตร ลักษณะของสัญญาณ Dither ที่เพิ่มเข้าไปเป็นคลื่นรูปซายน์ โดยมีขนาดตั้งแต่ 0–2.5 นิวตัน-เมตร และมีความถี่ ระหว่าง 0.1–1000 เฮิรตซ์

รูปที่ 4.11 แสดงผลการจำลองการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ เมื่อเปลี่ยนขนาดและความถี่ของสัญญาณ Dither ในรูป (ก) แสดงค่าผิดพลาดทางตำแหน่งเมื่อพิจารณาบนระนาบ 2 มิติ ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงค่าผิดพลาดทางตำแหน่งที่มีค่าลดลง (แถบสีเข้ม) และค่าผิดพลาดทางตำแหน่งที่สูงขึ้น (แถบสีจาง) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนขนาดและความถี่ของสัญญาณ Dither ในระบบควบคุม โดยเราสามารถแบ่งการพิจารณาผลการจำลองออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 ซึ่งมีความถี่ของสัญญาณ Dither ต่ำกว่า 20 เฮิรตซ์ และช่วงที่ 2 มีความถี่สูงกว่า 20 เฮิรตซ์

เมื่อพิจารณาในช่วงที่ 1 จะพบว่าเมื่อขนาดของสัญญาณมีค่าอยู่ระหว่าง 1.5-2 นิวตัน-เมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับแรงเสียดทานสถิตย์สูงสุด (1.5 นิวตัน-เมตร) สัญญาณ Dither จะสามารถลดค่าผิดพลาดทางตำแหน่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เมื่อขนาดของสัญญาณมีค่าต่ำกว่าแรงเสียดทานสถิตย์สูงสุด สัญญาณ Dither จะไม่สามารถชดเชยแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระบบให้หมดได้ จึงทำให้เกิดค่าผิดพลาดทางตำแหน่งขึ้น ในกรณีที่ขนาดของสัญญาณมีขนาดสูงกว่า 2 นิวตัน-เมตร ขนาดของสัญญาณที่มีค่าสูงนี้ จะไม่สามารถลดค่าผิดพลาดทางตำแหน่งได้ เนื่องจากขนาดของสัญญาณมีค่าสูงเกินไป จะทำให้ตำแหน่งของระบบมีการเคลื่อนที่ไป-กลับรอบตำแหน่งอ้างอิง โดยขึ้นอยู่กับขนาดและความถี่ของสัญญาณ Dither เอง



(ก) ค่าผิดพลาดทางตำแหน่งเมื่อพิจารณาขนาด 2 เมตร



(ข) ค่าผิดพลาดทางตำแหน่งเมื่อพิจารณาขนาด 3 เมตร

รูปที่ 4.11 ผลการจำลองการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ เมื่อเปลี่ยนขนาดและความถี่ของสัญญาณ Dither

เมื่อพิจารณาในช่วงที่ 2 จะพบว่าเมื่อขนาดของสัญญาณมีค่าสูงกว่าค่าแรงเสียดทาน สถิติสูงสุดในระบบ ผลของสัญญาณ Dither จะสามารถลดค่าแรงเสียดทานในระบบลงได้ โดยทำให้ค่าผิดพลาดทางตำแหน่งมีค่าลดลง แต่เมื่อขนาดของสัญญาณมีค่าต่ำกว่าแรงเสียดทาน สถิติสูงสุด เช่นเดียวกับกับช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 20 เฮิรตซ์ สัญญาณ Dither จะไม่สามารถชดเชยแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระบบให้หมดได้ จึงทำให้เกิดค่าผิดพลาดทางตำแหน่งขึ้น ในรูปที่ 4.11 (ข) แสดงถึงค่าผิดพลาดทางตำแหน่งเมื่อพิจารณาบนระนาบ 3 มิติ ซึ่งแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าสัญญาณ Dither สามารถลดค่าผิดพลาดทางตำแหน่งได้ดี ในช่วงขนาดและความถี่ดังที่ได้ อธิบายก่อนหน้านี้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การทดลองควบคุมมอเตอร์กระแสตรงที่มีแรงเสียดทาน

ในบทนี้เป็นการทดลองนำเอาเทคนิคการชดเชยแรงเสียดทานที่ได้กล่าวมาแล้ว ในบทที่ 4 มาทดลองใช้กับระบบทางกลจริงเพื่อยืนยันผลการจำลอง โดยจะทำการทดลองควบคุมตำแหน่งของระบบมอเตอร์กระแสตรง ของชุดทดลองของบริษัท Comdyna รุ่น 767 และ อุปกรณ์ทดลองระบบส่งกำลังของบริษัท ECP รุ่น 220 ในส่วนของทฤษฎีวิเคราะห์ค่าผลของขนาดและความถี่ของสัญญาณ Dither ที่มีต่อค่าผิดพลาดทางตำแหน่ง จะทำการศึกษาทดลองบนแขนหุ่น CRS Robotic เนื่องจากค่าที่ได้จากการวัดตำแหน่งจาก encoder ของ CRS Robot มีค่าความละเอียดสูงกว่าการวัดตำแหน่งจาก potentiometer ในชุดควบคุมมอเตอร์ 767 และชุดทดลอง ECP 220 ซึ่งจะทำให้มีผลการทดลองที่ถูกต้องแม่นยำขึ้น

การเลือกใช้ระบบควบคุมทั้งสามแบบนี้ก็เพื่อที่จะยืนยันผลการควบคุมว่า สามารถให้ผลการควบคุมเหมือนกันแม้ว่าค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบจะเปลี่ยนไป โดยอุปกรณ์ทดลองระบบส่งกำลังของบริษัท ECP รุ่น 220 จะมีค่าความละเอียดในการวัดตำแหน่งสูง ในตัวชุดทดลองจะมีกลไกที่สามารถปรับค่าแรงเสียดทานแบบคูลอมบ์ได้ แต่การที่จะดัดแปลงระบบควบคุมทำได้ยากเนื่องจากชุดควบคุมได้รับการติดตั้งมาจากบริษัท และระบบนี้มีปัญหาเนื่องจากค่าความยืดหยุ่น (Flexibility) ของสายพานส่งกำลัง ซึ่งจะมีผลต่อขนาดและความถี่ของสัญญาณ Dither โดยเฉพาะที่ความถี่สูงๆ ทำให้ไม่สามารถแสดงถึงผลของสัญญาณ Dither ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนในชุดทดลองควบคุมมอเตอร์รุ่น 767 นั้นเป็นระบบที่ไม่มีความซับซ้อนในการทำงานมากนัก เนื่องจากระบบมีความไม่ยืดหยุ่น (rigid) สูง เนื่องจากใช้ระบบเกียร์ทดเพื่อส่งกำลัง โดยสามารถปรับค่า backlash ได้โดยผ่านชุดเกียร์ทดนี้ แต่มีข้อเสียคือ สัญญาณที่ได้รับจากตัวตรวจรู้ทางตำแหน่งมีสัญญาณรบกวนมาก ซึ่งในระบบจะใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ (Potentiometer) เป็นตัวตรวจรู้ ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการศึกษาถึงผลของขนาดและความถี่ของสัญญาณ Dither ที่มีผลต่อการลดค่าความผิดพลาด ซึ่งมีต้องการความละเอียดในการวัดตำแหน่งสัญญาณสูงมาก

ดังนั้นเมื่อเราต้องการระบบที่มีความน่าเชื่อถือได้ และมีค่าความละเอียดในการอ่านค่าจากตัวตรวจรู้ เราจึงทดลองศึกษาผลของสัญญาณ Dither ที่มีขนาดและความถี่ต่างๆ กับระบบแขนหุ่นยนต์ CRS Robotics ซึ่งอุปกรณ์วัดตำแหน่งข้อต่อมีความละเอียดสูง และสามารถออกแบบระบบควบคุมได้อย่างอิสระ โดยผ่านชุดควบคุมหุ่นยนต์ที่สร้างขึ้น และทำการควบคุม

ผ่านระบบปฏิบัติการจริง matlab®/xPC Target สำหรับรายละเอียดของชุดทดลองนี้ จะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- ชุดอุปกรณ์ทดลองระบบส่งกำลังของบริษัท ECP รุ่น 220 เป็นชุดอุปกรณ์สามารถปรับค่าความเฉื่อยได้ โดยการเพิ่มมวลของล้อลงบนจานหมุน ซึ่งปลายด้านหนึ่งของแกนหมุนจะติดอุปกรณ์วัดตำแหน่ง (encoder) ที่มีความละเอียด 4000 พัลส์ต่อรอบ โดยระบบจะทำการควบคุมตำแหน่งของจานหมุนผ่านระบบสายพานที่ต่อตรงกับมอเตอร์กระแสตรง ส่วนตัวควบคุมจะทำการออกแบบบนซอฟต์แวร์ที่มาพร้อมกับชุดทดลอง
- ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์รุ่น 767 ของบริษัท Comdyna, Inc. ประกอบด้วยมอเตอร์กระแสตรงจำนวน 1 ตัว ต่อผ่านระบบเกียร์มายังมวลของล้อ ในชุดแกนมอเตอร์จะประกอบด้วยอุปกรณ์วัดตำแหน่ง หรือ Potentiometer รุ่น 6539 ของบริษัท BOURNS และมีอุปกรณ์ตรวจวัดความเร็ว หรือ Tachometer โดยชุดมอเตอร์จะมีตัวจ่ายพลังงานต่อตรงจากชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ ส่วนการควบคุมจะถูกออกแบบผ่านโปรแกรมควบคุมในเวลาจริง matlab®/xPC Target
- แขนกลแบบ Articulated ของบริษัท CRS Robotic Inc รุ่น A255 พร้อมชุดควบคุม โดยจะทำการควบคุมข้อต่อเอว (waist joint) ของแขนหุ่นยนต์ เพื่อศึกษาถึงผลของสัญญาณ Dither ที่มีต่อค่าผิดพลาดทางตำแหน่งของระบบควบคุม โดยแขนหุ่นยนต์มีค่าความละเอียดในการวัดตำแหน่งเท่ากับ 200 พัลส์ต่อองศา และมีมอเตอร์กระแสตรงขนาด ± 25 โวลต์ ขับแขนหุ่นยนต์ผ่านเกียร์ทดแบบฮาร์โมนิก (harmonic drive) ที่มีความละเอียดในการเคลื่อนที่เท่ากับ 0.005 องศา ส่วนการควบคุมจะถูกออกแบบผ่านโปรแกรมควบคุมในเวลาจริง matlab®/xPC Target

5.2 การควบคุมชุดทดลองระบบส่งกำลังของบริษัท EPC รุ่น 220

อุปกรณ์ทดลองระบบส่งกำลังของบริษัท EPC รุ่น 220 นี้ใช้เป็นชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบค่าแรงเสียดทานแบบหนืด แบบคูลอมบ์ และค่า backlash ที่เกิดในชุดเกียร์ทด ชุดทดลองนี้ประกอบด้วยสามส่วนสำคัญดังรูปที่ 5.1 โดยส่วนแรกคือ ระบบกลและไฟฟ้า (Electro-mechanical Plant) ส่วนที่สองคือ ชุดควบคุมและประมวลสัญญาณในเวลาจริง (Real-time Controller & I/O) และส่วนที่สามคือ ตัวโปรแกรม (System Interface Software)

ในอุปกรณ์นี้ใช้ตัวตรวจรู้ตำแหน่ง Encoder สองตัวที่มีความละเอียด 4000 พัลส์ต่อรอบ และเป็นแบบ incremental โดย encoder แต่ละตัวจะถูกต่อเข้ากับแกนเพลลาของมอเตอร์ตัวขับ (θ_1) และตัวตาม (θ_2) เพื่ออ่านค่าตำแหน่งเชิงมุมของการหมุนของมอเตอร์ ตัวขยายสัญญาณที่ใช้ขับมอเตอร์เป็นแบบ servo amplifiers และ ตัวจ่ายกำลังจะอยู่ในตัวควบคุม ค่าตำแหน่งที่ส่งมาจาก encoder ถูกส่งมายังส่วนประมวลสัญญาณ เพื่อเปลี่ยนสัญญาณพัลส์ เป็นค่าตำแหน่งเชิงมุม



รูปที่ 5.1 ชุดอุปกรณ์ทดลองระบบส่งกำลัง

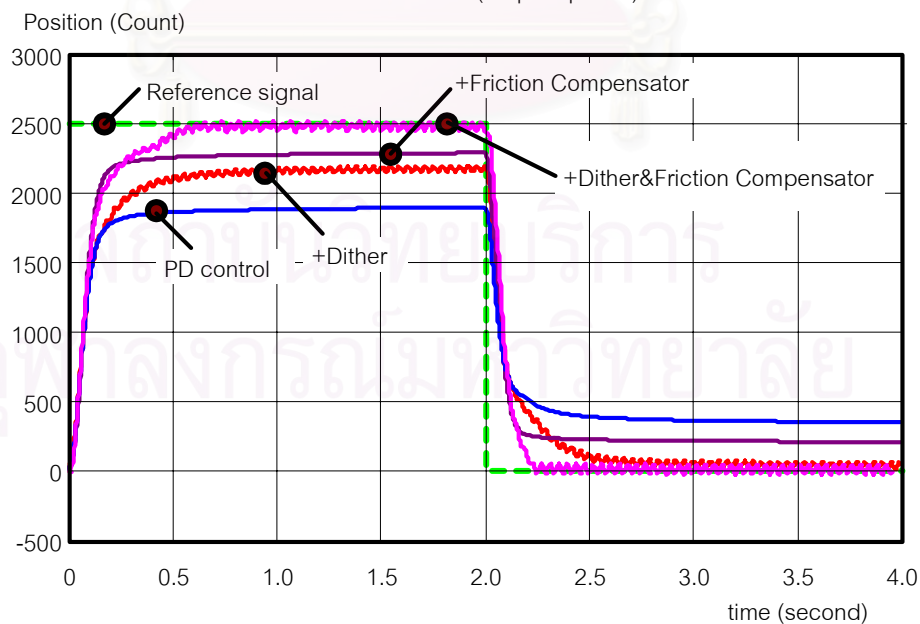
เพื่อให้การควบคุมตำแหน่งของระบบจานหมุน มีความแม่นยำขึ้น จึงได้ป้อนสัญญาณ Dither เข้าสู่ระบบและได้ชดเชยแรงเสียดทาน Coulomb จากตัวชดเชยแรงเสียดทานไปพร้อมกัน การศึกษาจะเน้นถึงผลของ Dither และการชดเชยแรงเสียดทาน โดยจะทดลองเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดทางตำแหน่งและความเร็วในการตอบสนองที่เป็นผลมาจากสัญญาณดังกล่าว

ในการหาขนาดของค่าแรงเสียดทานสถิตย์สูงสุดในระบบ เราจะทำการจ่ายค่าแรงดันที่มีลักษณะแรมป์ฟังก์ชัน (ramp function) เพื่อนำไปขับชุดทดลอง โดยจะพิจารณาแรงดันที่งานเริ่มหมุนให้มีค่าเท่ากับแรงเสียดทานสถิตย์สูงสุด โดยในการทดลองนี้สามารถหาแรงเสียดทานสถิตย์สูงสุดเท่ากับ 1 โวลต์

สัญญาณ Dither สร้างขึ้นจาก Function Generator มีขนาดของสัญญาณเท่ากับ 1 โวลต์ ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงเสียดทานสถิตย์สูงสุดของระบบ และมีความถี่เท่ากับ 24.15 เฮิรตซ์ ซึ่งได้จากการปรับขนาดของความถี่แล้วใช้ค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยจะทำการรวมสัญญาณควบคุมกับสัญญาณ Dither ผ่านอุปกรณ์อนาล็อกคอมพิวเตอร์ (Analog Computer) เพื่อควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ ในส่วนของการชดเชยแรงเสียดทานแบบ Coulomb นั้นจะทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าคงที่ไปยังมอเตอร์เพื่อหักล้างกับแรงเสียดทานแบบคูลอมบ์โดยตรง (Feedforward friction compensation) สำหรับตัวควบคุมแบบ PD control กำหนดให้มีค่า $K_p = 0.2$ และ $K_d = 2.26$

การทดลองนี้จะแสดงเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดทางตำแหน่งและความเร็วในการตอบสนองใน 4 กรณี ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 พร้อมทั้งให้ค่าสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบขั้นบันได (step response) ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 5.2

The effects of dither and friction compensation
on PD control (Step response)



รูปที่ 5.2 ผลการควบคุมชุดส่งกำลังของ ECP โดยการชดเชยแรงเสียดทานแบบต่างๆ

รูปที่ 5.2 แสดงให้เห็นถึงผลของการชดเชยแรงเสียดทานในระบบ โดยการพิจารณาค่าผิดพลาดทางตำแหน่งด้วยตัวชดเชยแบบต่างๆ ผลการทดลองจะเห็นว่าเมื่อทำการควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมแบบ PD control เพียงอย่างเดียว จะไม่สามารถควบคุมตำแหน่งของจกหมุนไปยังตำแหน่งอ้างอิงได้ ซึ่งจะทำให้มีค่าผิดพลาดสูงสุดในระบบ เมื่อทำการชดเชยแรงเสียดทานด้วยวิธีเพิ่มสัญญาณ Dither ที่มีขนาด 1 โวลต์ ความถี่ 25.4 เฮิร์ตซ์ พบว่าตัวชดเชยสามารถชดเชยแรงเสียดทานของระบบลงได้บางส่วน โดยพิจารณาจากค่าผิดพลาดทางตำแหน่งที่มีค่าน้อยกว่าค่าผิดพลาดจากการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ PD เพียงอย่างเดียว เมื่อทำการชดเชยแรงเสียดทานด้วยตัวชดเชย (friction compensator) ที่มีแบบจำลองเป็นแบบคูลอมบ์โดยมีขนาดเท่ากับ 0.7 โวลต์ พบว่าให้ผลเช่นเดียวกับผลที่จากการชดเชยด้วยสัญญาณ Dither แต่การชดเชยด้วยตัวชดเชย สามารถลดค่าช่วงเวลาขึ้น (rise time) ของระบบในช่วงภาวะชั่วคราว (transient) ได้และจากการทดลองโดยวิธีการชดเชยด้วยสัญญาณ Dither และตัวชดเชยไปพร้อมกัน จะสามารถลดค่าแรงเสียดทานในระบบอย่างมีประสิทธิภาพ กล่าวคือสามารถควบคุมตำแหน่งของจกหมุนไปยังตำแหน่งอ้างอิงได้ โดยค่าที่ได้จากการทดลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปค่าความผิดพลาดและความเร็วในการตอบสนองของวิธีการชดเชยความเสียดทานแบบต่าง ๆ

ระบบควบคุม	ช่วงเวลาขึ้น(วินาที)	ค่าผิดพลาดเฉลี่ย(%)
PD Controller	0.18	24
PD+Friction Compensator	0.11	8.6
PD+Dither	0.17	14
PD+Dither+ Friction Compensator	0.12	2

การทดลองนี้มีข้อจำกัดในการออกแบบตัวชดเชย เนื่องจากต้องทำการออกแบบตัวควบคุม และตัวชดเชยบนซอฟต์แวร์ของบริษัท ECP และความยืดหยุ่นของสายพานอาจจะมีผลต่อขนาดและความถี่ของสัญญาณ Dither ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการชดเชยแรงเสียดทานได้ ดังนั้นเราจึงทำการทดลองควบคุมระบบที่มีความไม่ยืดหยุ่น และจะทำการการปรับปรุงระบบพร้อมทั้งพัฒนาระบบควบคุมผ่านโปรแกรม xPC Target ของ Matlab[®] /Simulink[™] ในหัวข้อต่อไป

5.3 การทดลองควบคุมชุดมอเตอร์ของบริษัท Comdyna, Inc. รุ่น 767

เราจะทำการควบคุมชุดมอเตอร์ของบริษัท Comdyna, Inc. รุ่น 767 ที่มีแรงเสียดทานสถิตย์สูงสุดเท่ากับ 0.6 นิวตัน-เมตร โดยหาด้วยวิธีการเดียวกันกับระบบ ECP รุ่น 220 ในการทดลองควบคุมชุดมอเตอร์นี้ เราต่อชุดมอเตอร์เข้ากับชุดควบคุมสัญญาณ analog / digital positional control panel เพื่อจ่ายพลังงานให้ชุดมอเตอร์ และต่อชุดไดรฟ์คอมพิวเตอรืเพื่อใช้เป็นรวมสัญญาณคำสั่ง (control effort) ที่มาจากตัวควบคุมและสามารถปรับเปลี่ยนอัตราขยายของตัวควบคุมได้โดยผ่านโปรแกรม xPC targets

การทำงานของ xPC Target real-time OS นี้จะประกอบไปด้วย PC คอมพิวเตอร์สองเครื่อง โดยเครื่องแรกจะเรียกว่า Host computer ซึ่งประกอบด้วยโปรแกรมหลักคือ Microsoft OS หรือ windows โปรแกรมภาษา Visual C++ และ โปรแกรม Matlab® 6.1 เครื่อง Host computer จะมีหน้าที่พัฒนาโปรแกรมควบคุมโดยผ่านโปรแกรม xPC Target ของโปรแกรม Matlab® และยังเป็นตัวแสดงผล พร้อมทั้งเก็บค่าต่างๆ จากอุปกรณ์ ทั้งหมดนี้จะทำการส่งผ่านข้อมูลไปยังเครื่อง Target computer ซึ่งเป็นคอมพิวเตอร์อีกตัวหนึ่งที่ทำหน้าที่ติดต่อกับการ์ดต่างๆ ซึ่งใช้ติดต่อกับมอเตอร์โดยตรงเครื่อง Target นี้ทำงานได้โดยอาศัยการทำงานบน Real-time Operating System ของ Matlab® ซึ่งตัวเครื่องคอมพิวเตอร์ Target ต้องการอุปกรณ์หลักสำหรับการเปิด-ปิด และแสดงผล เช่น หน่วยความจำ (อย่างน้อย 8 MB) ช่องอ่านแผ่นดิสก์ หน้าจอแสดงผล และแป้นพิมพ์ ในการติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก (hardware) สัญญาณขาเข้า (input signal) และสัญญาณขาออก (output signal) จะถูกส่งผ่านการ์ดรับส่งข้อมูลแบบอนาล็อกและดิจิทัล ที่ติดตั้งบน ISA slots ของเครื่อง Target ส่วนการสื่อสารกันระหว่างเครื่อง Host และ Target จะถูกส่งผ่านการ์ด LAN หรือช่องพอร์ตอนุกรม (serial port) ของคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 5.3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.3 ชุดการทดลองควบคุมระบบมอเตอร์กระแสตรงรุ่น 767

การทดลองนี้เป็นการทดลองควบคุมตำแหน่งของชุดมอเตอร์กระแสตรงดังกล่าวข้างต้น เพื่อเปรียบเทียบผลค่าผิดพลาดทางตำแหน่งที่เกิดจากแรงเสียดทานในระบบควบคุม กับผลการจำลองการทดลองในบทที่ 4 โดยในการทดลองนี้จะทำการควบคุมแบบระบบปิด (closed-loop control) และชดเชยแรงเสียดทานด้วยวิธีต่างๆ ดังนี้ :

- การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ (PD Control)
- การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอินทิกรัล (PI Control)
- การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ (PD Control) และมีการชดเชยแรงเสียดทาน (Friction compensation)
- การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ (PD Control) และมีการใส่สัญญาณ Dither
- การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ (PD Control) และมีการชดเชยแรงเสียดทาน (Friction compensation) และใส่สัญญาณ Dither

โดยรายละเอียดจะอธิบายในหัวข้อย่อย ต่อไปนี้

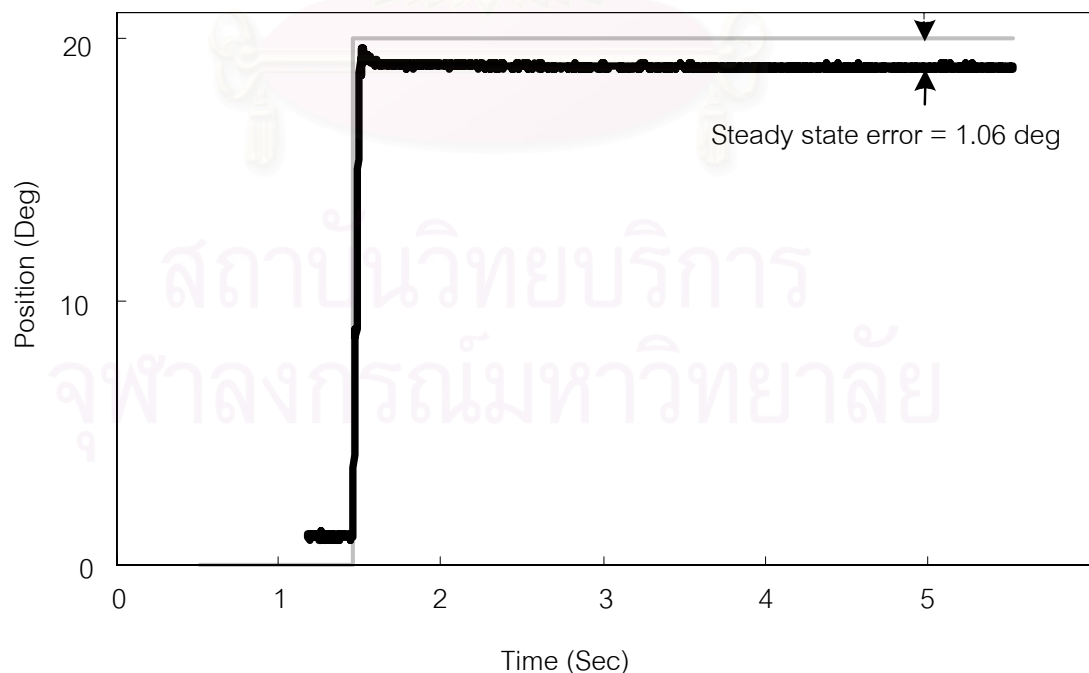
5.3.1 การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ (PD Control)

การทดลองควบคุมมอเตอร์แบบระบบปิด (closed loop system) ตัวควบคุมแบบ PD จะเป็นตัวควบคุมพื้นฐาน (ordinary controller) โดยจะใช้เปรียบเทียบค่าผิดพลาดในการควบคุม กับการควบคุมแบบอื่นๆ โดยตัวควบคุมมีคุณสมบัติดังสมการ 5.1 สำหรับการควบคุมตำแหน่งของชุดมอเตอร์กระแสตรง เรากำหนดให้ตัวควบคุมมีค่าอัตราขยาย K_p และ K_d มีค่าเท่ากับ 5 และ 0.2 ตามลำดับ

$$u = K_p \cdot e + K_d \cdot \frac{de}{dt} \quad \dots (5.1)$$

โดยที่

- u คือ Manipulating variable
- e คือ ค่าผิดพลาดทางตำแหน่ง
- K_p คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบสัดส่วน
- K_d คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์



รูปที่ 5.4 ผลของการควบคุมมอเตอร์เป็นมุม 20 องศา เมื่อควบคุมโดย PD control

จากรูปที่ 5.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อเริ่มต้นมอเตอร์พยายามหมุนไปยังตำแหน่งอ้างอิงที่ 20 องศา แต่มอเตอร์หมุนไปได้ 18.94 องศา ก็ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งอ้างอิงได้ เนื่องจากมอเตอร์จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วช้าลงเมื่อเคลื่อนที่เข้าใกล้ตำแหน่งอ้างอิง ทำให้แรงเสียดทานสถิตยมีค่ามากกว่า แรงที่เกิดจากค่าผิดพลาดคูณกับอัตราขยายของตัวควบคุมแบบ PD จึงทำให้มอเตอร์มีค่าผิดพลาดทางตำแหน่งเกิดขึ้น

5.3.2 การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอินทิกรัล (PI Control)

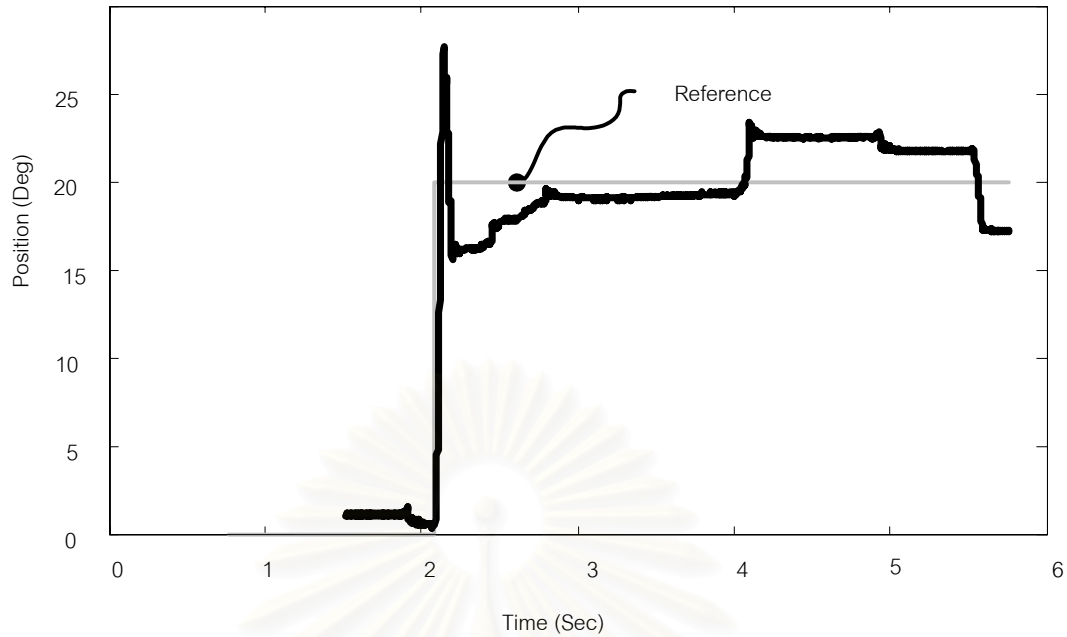
การทดลองนี้จะใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอินทิกรัล (PI) เพื่อลดค่าผิดพลาดทางตำแหน่ง เนื่องจากตัวอินทิกรัลสามารถแก้ไขปัญหาค่าผิดพลาดทางตำแหน่งได้ โดยควบคุมแบบระบบปิดโดยนี้ใช้ตัวควบคุมแบบ PI ตามสมการ 5.2

$$u = K_p \cdot e + K_i \int e dt \quad \dots (5.2)$$

โดยที่

K_i คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบอินทิกรัล

การควบคุมตำแหน่งของชุดมอเตอร์กระแสตรงนี้ กำหนดให้ค่าอัตราขยาย K_p และ K_i มีค่าเท่ากับ 5 และ 15 ตามลำดับ จากรูปที่ 5.5 แสดงถึงผลของการควบคุมมอเตอร์กระแสตรง ด้วยตัวควบคุมแบบ PI จะเห็นได้ว่า เมื่อเริ่มต้นมอเตอร์จะพยายามเคลื่อนที่จากตำแหน่งศูนย์ไปยังตำแหน่งอ้างอิง แต่เนื่องจากขนาดของอัตราขยายของตัวควบคุมคูณกับค่าผิดพลาด จะทำให้มอเตอร์เคลื่อนที่เลยตำแหน่งอ้างอิง หลังจากนั้นเมื่อค่าผิดพลาดจะถูกสะสมด้วยตัวควบคุมแบบอินทิกรัล และสั่งให้มอเตอร์เริ่มหมุนจนกระทั่งประมาณวินาทีที่ 3 ตำแหน่งของมอเตอร์เข้าใกล้ตำแหน่งอ้างอิง มอเตอร์จะเคลื่อนที่ช้าลง และในที่สุดมอเตอร์ก็หยุดเนื่องจากแรงเสียดทานได้เปลี่ยนจากแรงเสียดทานจลน์ เป็นแรงเสียดทานสถิตย จนกระทั่งวินาทีที่ 4 ตัวควบคุมขนาดของผิดพลาดคูณกับอัตราขยายมีค่ามากพอที่จะเอาชนะแรงเสียดทานสถิตยได้ มอเตอร์จึงเริ่มเคลื่อนที่อีกครั้งหนึ่ง แต่เมื่อมอเตอร์เริ่มเคลื่อนที่ เนื่องจากแรงเสียดทานที่กระทำกับระบบได้เปลี่ยนเป็นแรงเสียดทานจลน์ จึงทำให้ขนาดของสัญญาณคำสั่งมีค่าสูงเกินไป จึงทำให้เคลื่อนที่เลยตำแหน่งอ้างอิง เป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จะทำให้ระบบเกิดความไม่เสถียร และไม่สามารถควบคุมมอเตอร์ให้ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้



รูปที่ 5.5 ผลของการควบคุมมอเตอร์เป็นมุม 20 องศา เมื่อควบคุมโดย PI control

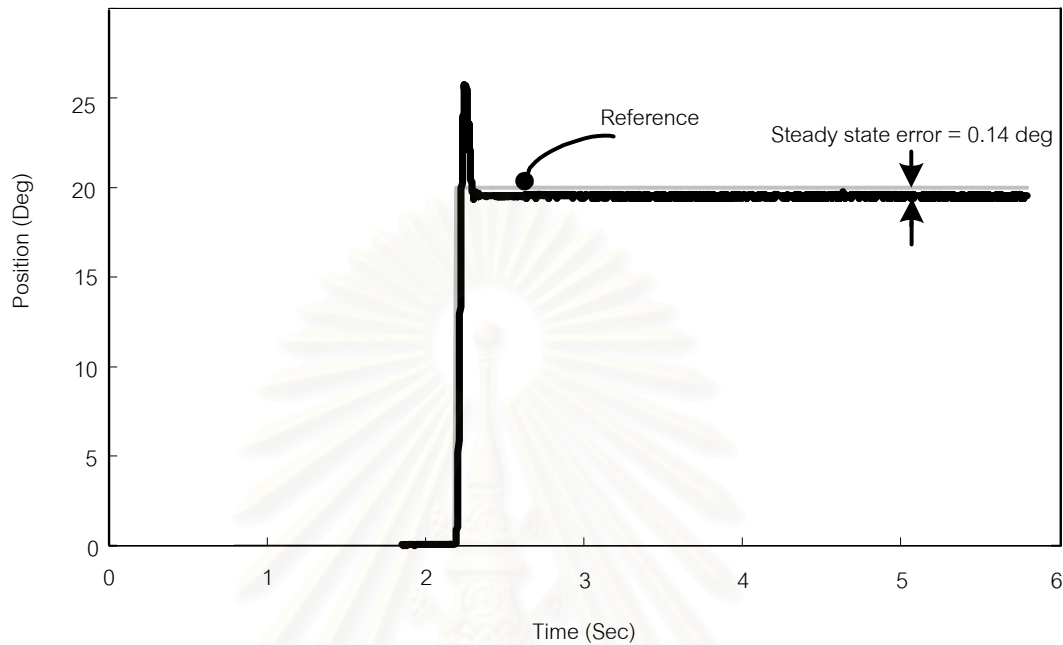
การควบคุมด้วยตัวอินทิกรัลนี้ เมื่อนำไปใช้กับระบบเชิงเส้นจะสามารถลดค่าผิดพลาดในระบบควบคุมได้ แต่ในระบบมอเตอร์ที่มีแรงเสียดทานที่มีความไม่เชิงเส้นสูง ตัวอินทิกรัลจะไม่สามารถลดค่าผิดพลาดได้ ซึ่งทำให้เกิด limit cycles ขึ้นในระบบควบคุม

5.3.3 การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ (PD Control) และมีการชดเชยแรงเสียดทาน (Friction compensation)

การทดลองนี้จะใช้ค่าอัตราขยาย K_p และ K_d เท่ากับค่าในการทดลองข้อ 5.3.1 และมีการชดเชยแรงเสียดทานด้วยตัวชดเชยที่มีลักษณะของแรงเสียดทาน ดังสมการ 4.3 ซึ่งตัวชดเชยแรงเสียดทานในระบบ มีค่าแรงเสียดทานสถิตย์สูงสุดเท่ากับ 0.5 นิวตัน-เมตร เนื่องจากการทดลองนี้ต้องการแสดงให้เห็นถึง ผลของการชดเชยแรงเสียดทานที่ไม่สามารถชดเชยแรงเสียดทานในระบบได้สมบูรณ์ เพื่อจะนำไปเปรียบเทียบในการใช้สัญญาณ Dither เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการลดแรงเสียดทาน ในหัวข้อถัดไป

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.6 จะเห็นว่า เมื่อเริ่มต้นมอเตอร์จะเริ่มเคลื่อนที่ และมีความสูงกว่าตำแหน่งอ้างอิงเนื่องค่าอัตราขยายของตัวเอง และจะสามารถมอเตอร์เคลื่อนที่กลับมาที่ตำแหน่ง 19.86 และไม่สามารถจะเคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งอ้างอิงได้

เนื่องจากตัวชดเชยแรงเสียดทานสามารถชดเชยแรงเสียดทานได้บางส่วน ซึ่งทำให้ระบบควบคุมมีค่าผิดพลาดทางตำแหน่งเกิดขึ้น



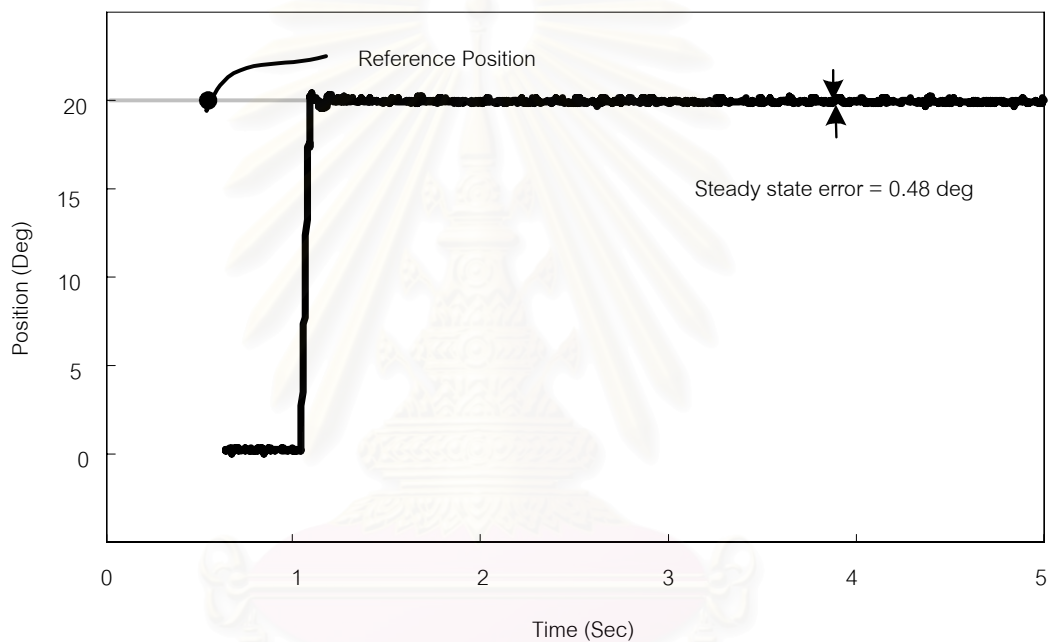
รูปที่ 5.6 ผลของการควบคุมมอเตอร์เป็นมุม 20 องศา เมื่อควบคุมโดย PD control พร้อมด้วยตัวชดเชยแรงเสียดทาน

5.3.4 การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ (PD Control) และสัญญาณ Dither

การทดลองนี้จะใช้ค่าอัตราขยาย K_p และ K_d เท่ากับค่าในการทดลองข้อ 5.3.1 ส่วนค่าสัญญาณ Dither ที่ใส่เข้าไปเพื่อลดความไม่เชิงเส้นของแรงเสียดทานในระบบมอเตอร์กระแสตรง มีรูปแบบซายน์ ขนาด 0.6 โวลต์ ที่ความถี่ 100 เฮิรตซ์

รูปที่ 5.7 แสดงผลการการควบคุมมอเตอร์เป็นมุม 20 องศา เมื่อควบคุมด้วย PD control พร้อมทั้งสัญญาณ Dither จะเห็นว่าเมื่อมอเตอร์เริ่มเคลื่อนที่ ตัวควบคุมจะสามารถควบคุมให้มอเตอร์หมุนไปยังตำแหน่งที่ 20 องศาได้ โดยจะเห็นว่าผลการควบคุมจะไม่แสดงถึงผลของการติดขัด (stick) ซึ่งทำให้เกิดค่าผิดพลาดทางตำแหน่งขึ้น เหมือนกับผลการทดลองในรูปที่ 5.4 และ 5.6 ในกรณีที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PD และวิธีการใช้ตัวชดเชยตามลำดับ โดยตำแหน่งของมอเตอร์เมื่อระบบเข้าสู่ภาวะเสถียร จะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับตำแหน่งอ้างอิง

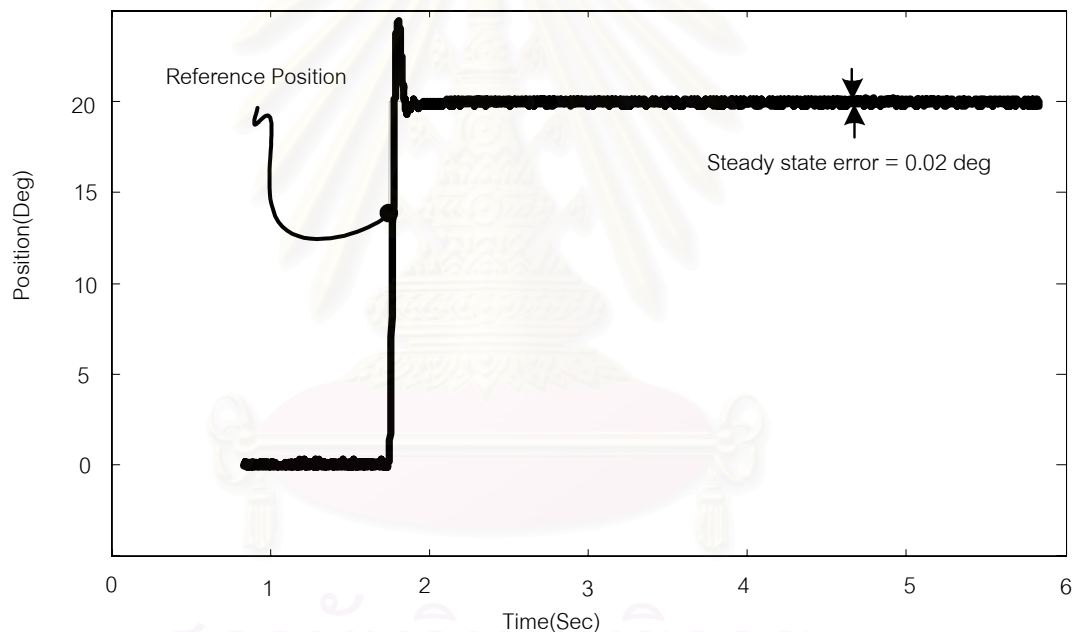
เนื่องจากค่าสัญญาณ Dither ที่ใส่ลงในระบบควบคุมจะทำให้มอเตอร์มีการเคลื่อนที่ด้วยขนาดและความถี่ของสัญญาณ Dither ตลอดเวลา ทำให้แรงเสียดทานสถิตย์ของระบบมอเตอร์มีค่าลดลง และสามารถกำจัดปรากฏการณ์การเคลื่อนที่แบบ stick – slip ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดค่าผิดพลาดในการควบคุมระบบที่มีความเร็วเข้าใกล้ศูนย์ ในการทดลองนี้ได้เลือกค่า Dither ที่เหมาะสมจึงทำให้ระบบเข้าสู่ตำแหน่งอ้างอิงโดยมีค่าค่าเฉลี่ยของตำแหน่งควบคุมมีค่าเท่ากับ 19.52 องศา แต่อย่างไรก็ตามในการเลือกใช้ค่าขนาดและความถี่ในย่านอื่นๆ จะมีผลต่อขนาดของค่าผิดพลาดในการควบคุม ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 5.4



รูปที่ 5.7 ผลของการควบคุมมอเตอร์เป็นมุม 20 องศา เมื่อควบคุมด้วย PD control พร้อมทั้งสัญญาณ Dither

5.3.5 การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ (PD Control) และมีการชดเชยแรงเสียดทาน (Friction compensation) และใส่สัญญาณ Dither

ตัวชดเชยแรงเสียดทานที่ออกแบบในหัวข้อก่อนหน้านี้ ไม่สามารถชดเชยแรงเสียดทานในระบบได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งทำให้เกิดค่าผิดพลาดทางตำแหน่งในระบบควบคุมได้ ดังนั้นในการทดลองนี้จะเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพในการควบคุมตำแหน่งของระบบควบคุมที่มีตัวชดเชยแรงเสียดทานดังกล่าว โดยการเพิ่มสัญญาณ Dither เพื่อไปชดเชยแรงเสียดทานที่เหลือจากตัวชดเชย โดยตัวชดเชยได้ถูกออกแบบมาให้มีลักษณะเช่นเดียวกันกับหัวข้อที่ 5.3.3 และใช้สัญญาณ Dither ที่มีขนาด 0.6 โวลต์ ความถี่ 100 เฮิรตซ์



รูปที่ 5.8 ผลการควบคุมมอเตอร์โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PD พร้อมทั้งตัวชดเชยแรงเสียดทาน และสัญญาณ Dither

จากรูปที่ 5.8 แสดงผลการควบคุมมอเตอร์โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PD พร้อมทั้งตัวชดเชยแรงเสียดทาน และสัญญาณ Dither จะเห็นว่า มอเตอร์สามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งอ้างอิงได้ และค่าเฉลี่ยของตำแหน่งมีค่าเข้าใกล้ตำแหน่งอ้างอิงได้ โดยสามารถพิจารณาเปรียบเทียบกับวิธีการชดเชยแบบอื่น ๆ ได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของบริษัท Comdyna รุ่น 767

วิธีการควบคุม	ช่วงเวลาขึ้น (วินาที)	ค่าผิดพลาดเฉลี่ย (%)
PD control	0.050	5.3
PD + Compensator	0.038	0.7
PD + Dither	0.047	2.4
PD + Compensator + Dither	0.038	0.1

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของบริษัท Comdyna รุ่น 767 ซึ่งผลการทดลองจะเห็นว่า วิธีการควบคุมแบบ PD มีค่าผิดพลาดทางตำแหน่งสูงสุด ส่วนของวิธีการชดเชยด้วยการเพิ่มสัญญาณ Dither นั้นให้ผลเช่นเดียวกันกับวิธีการชดเชยด้วยตัวชดเชย กล่าวคือสามารถชดเชยแรงเสียดทานได้บางส่วน และเมื่อเราใช้วิธีชดเชยทั้งสองวิธีพร้อมกัน จะทำให้ค่าผิดพลาดทางตำแหน่งเฉลี่ยมีค่าต่ำที่สุด ซึ่งผลการทดลองควบคุมตำแหน่งของชุดมอเตอร์ Comdyna รุ่น 767 นี้ให้ผลการควบคุมตำแหน่งเหมือนกันกับการทดลองในชุดทดลองของบริษัท ECP รุ่น 220

จากการทดลองที่ผ่านมา เป็นการพิจารณาค่าผิดพลาดทางตำแหน่งเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในระบบควบคุม แต่จากการควบคุมตำแหน่งที่เกิดขึ้นจริง ขนาดของสัญญาณ Dither จะมีส่วนทำให้ตำแหน่งที่สภาวะเสถียร มีการเคลื่อนที่ไปกลับรอบตำแหน่งอ้างอิง ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงค่าผิดพลาดทางตำแหน่งที่เกิดขึ้นจริงในระบบ จะมีค่าผิดพลาดเกิดขึ้นสูงกว่าค่าเฉลี่ย ดังแสดงในรูปที่ 4.9 รูปที่ 5.2 และ รูปที่ 5.8 ซึ่งเป็นผลของการชดเชยแรงเสียดทานด้วยสัญญาณ Dither พร้อมกับตัวชดเชยแรงเสียดทาน โดยเป็นผลจากการจำลองผลจากชุดทดลอง Comdyna รุ่น 767 และ ผลจากชุดทดลอง ECP รุ่น 220 ตามลำดับ

ดังนั้นเราจึงสนใจการศึกษาถึงผลของขนาดของสัญญาณ Dither ที่มีต่อระบบควบคุมที่มีการชดเชยแรงเสียดทานด้วยตัวชดเชย ซึ่งใช้เป็นแนวทางในการศึกษา และนำไปประยุกต์ใช้ในงาน โดยเฉพาะการควบคุมที่ระบบมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ โดยจะทำการทดลองควบคุมตำแหน่งของชุดมอเตอร์ Comdyna รุ่น 767 ต่อจากการทดลองในหัวข้อที่ 5.3.5 โดยจะทำการปรับเปลี่ยนขนาดของสัญญาณ Dither ที่เพิ่มเข้าสู่ระบบควบคุม ให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.4 ถึง 0.7 นิวตัน-เมตร ซึ่งเป็นขนาดที่ต่ำและสูงกว่าแรงเสียดทานสถิตย์สูงสุดในระบบมอเตอร์ ซึ่งผลการทดลองสามารถแสดงได้ ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบผลของค่าผิดพลาดเนื่องจากการควบคุมแบบชดเชยแรงเสียดทาน และเปลี่ยนขนาดของสัญญาณ Dither ที่มีความถี่ 100 เฮิรตซ์

ขนาดของสัญญาณ Dither (นิวตัน-เมตร)	ค่าผิดพลาดสูงสุด (%)
0.4	9
0.5	0.15
0.6	7.05
0.7	5.9

จากผลการควบคุมตำแหน่งในตารางที่ 5.3 แสดงให้เห็นว่าสัญญาณ Dither ที่ขนาด 0.5 นิวตัน-เมตร ซึ่งเป็นขนาดที่ต่ำกว่าแรงเสียดทานสถิตย์สูงสุดของระบบเล็กน้อย โดยค่าผิดพลาดทางตำแหน่งจะมีค่าต่ำสุด แต่เมื่อใส่ขนาดที่สูงกว่า 0.5 นิวตัน-เมตร ค่าผิดพลาดจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากขนาดของ Dither มีค่าสูงเกินกว่าแรงเสียดทานคงเหลือจากตัวชดเชย ในทางกลับกันเมื่อสัญญาณของ Dither มีขนาดต่ำเกินไป เช่นที่ขนาดของสัญญาณมีค่าเท่ากับ 0.4 นิวตัน-เมตร ค่าผิดพลาดจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากขนาดของ Dither รวมกับตัวชดเชย มีขนาดต่ำกว่าแรงเสียดทานในระบบ ทำให้ไม่สามารถชดเชยแรงเสียดทานในระบบทานได้หมด

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสัญญาณ Dither สามารถลดค่าผิดพลาดทางตำแหน่งที่เหลือจากตัวชดเชยแรงเสียดทานได้ แต่จำเป็นต้องมีการปรับลดขนาดของสัญญาณ Dither ให้เหมาะสมกับระบบควบคุมไม่เช่นนั้นแล้ว ขนาดของสัญญาณ Dither อาจจะไม่สามารถชดเชยแรงเสียดทานในระบบให้หมดไปได้

5.4 ผลของสัญญาณ Dither ที่มีต่อค่าผิดพลาดทางตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ CRS Robotics

จากการทดลองชดเชยแรงเสียดทานด้วยวิธีต่างๆ ในหัวข้อ 5.3 แสดงให้เห็นว่าวิธีการใส่สัญญาณ Dither ลงในระบบควบคุมที่มีแรงเสียดทานที่มีความไม่เชิงเส้นสูง โดยเฉพาะที่ช่วงความเร็วต่ำ จะเป็นวิธีการที่สามารถลดค่าผิดพลาดในการควบคุมตำแหน่งอย่างได้ผล ซึ่งต้องคำนึงถึงผลของขนาด และความถี่ของสัญญาณ Dither ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ในหัวข้อที่ 4.4 เพื่อยืนยันผลการจำลองการลดค่าผิดพลาดด้วยวิธีการใส่สัญญาณ Dither โดยจะทำการทดลองควบคุมแขนหุ่นยนต์ CRS Robotics ซึ่งเป็นหุ่นยนต์ที่มีความแม่นยำสูงในการควบคุมตำแหน่ง

แทนระบบมอเตอร์ รุ่น 767 เนื่องจากระบบมอเตอร์ รุ่น 767 มีค่าความละเอียดในการวัดไม่ดีพอ และมีค่าสัญญาณรบกวน (noise) ในระบบสูงมาก จึงทำให้ไม่เหมาะสมต่อการทดลองใส่สัญญาณ Dither ที่มีขนาดและความถี่ที่ใกล้เคียงกันได้ ในการทดลองควบคุมตำแหน่งของแขนหุ่น CRS Robotics จะใช้ตัวควบคุมแบบ PD ที่มีค่า $K_p = 0.4$ และ $K_d = 0.03$ เพื่อเป็นตัวควบคุมหลัก ขนาดของแรงเสียดทานสถิตย์สูงสุดในแขนหุ่น CRS Robotics มีค่าเท่ากับ 0.3 นิวตัน-เมตร การหาค่าแรงเสียดทานสถิตย์สูงสุดในแขนหุ่นยนต์ จะใช้วิธีการเดียวกันกับการหาค่าแรงเสียดทานสถิตย์สูงสุดในชุดทดลอง ECP รุ่น 220 กล่าวคือ จะทำการจ่ายค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นแบบแรมป์ฟังก์ชัน ให้กับแขนหุ่นยนต์และทำการอ่านค่าแรงดันเมื่อแขนหุ่นเริ่มขยับ ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าที่สามารถทำให้แขนหุ่นยนต์เริ่มขยับ จะมีค่าเท่ากับแรงเสียดทานสถิตย์สูงสุด ส่วนสัญญาณ Dither ที่ใช้ทดลองมีค่าขนาดและความถี่อยู่ระหว่าง 0–0.5 นิวตัน-เมตร และ 0.1-1000 เฮิรตซ์ ตามลำดับ

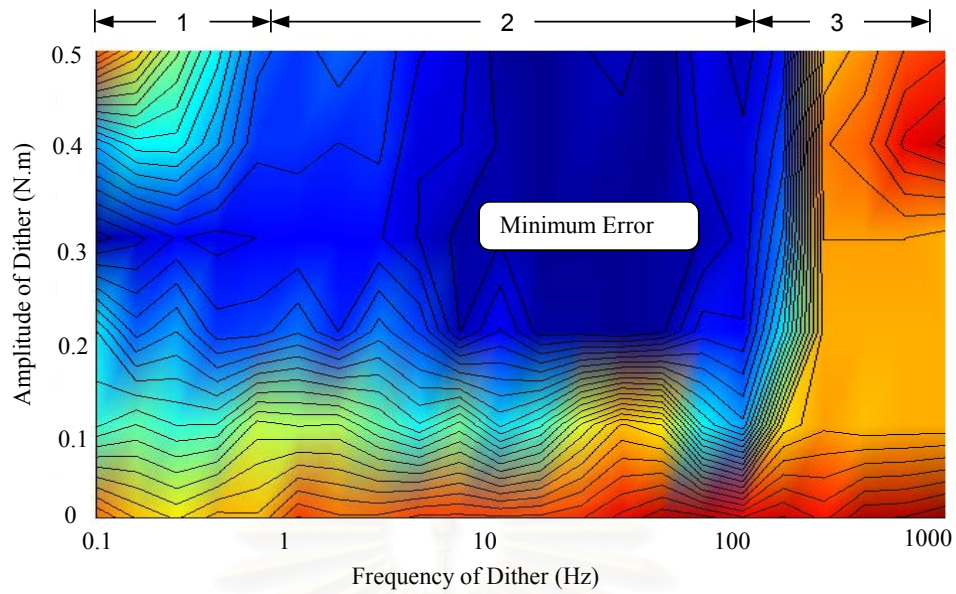
รูปที่ 5.9 แสดงผลการควบคุมตำแหน่งของแขนหุ่น CRS Robotics เมื่อเปลี่ยนขนาด และความถี่ของสัญญาณ Dither ในรูปที่ 5.9 (ก) แสดงให้เห็นถึงค่าผิดพลาดทางตำแหน่ง เมื่อพิจารณาบนระนาบ 2 มิติ ซึ่งสามารถแบ่งการพิจารณาผลการชดเชยแรงเสียดทานได้เป็น 3 ช่วงความถี่ กล่าวคือ ช่วงที่ 1 มีความถี่น้อยกว่า 1 เฮิรตซ์ ช่วงที่ 2 มีความถี่ระหว่าง 1-120 เฮิรตซ์ และช่วงที่ 3 มีความถี่มากกว่า 120 เฮิรตซ์

ในช่วงที่ 1 จะพบว่าขนาดของสัญญาณ Dither ที่สามารถลดค่าผิดพลาดทางตำแหน่งได้ดี จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าแรงเสียดทานสถิตย์สูงสุดของแขนหุ่น CRS Robotics ซึ่งมีค่าประมาณ 0.2 ถึง 0.35 นิวตัน-เมตร ในขณะที่ขนาดของสัญญาณ Dither มีค่าต่ำกว่า 0.2 นิวตัน-เมตร จะไม่สามารถชดเชยแรงเสียดทานในระบบลงได้มากนัก จึงทำให้ระบบมีค่าผิดพลาดทางตำแหน่ง ซึ่งเกิดจากแรงเสียดทานที่เหลือในระบบ เมื่อขนาดของสัญญาณ Dither ที่มีค่ามากกว่า 0.35 นิวตัน-เมตร จะพบว่าค่าผิดพลาดของระบบจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากขนาดของสัญญาณ Dither ที่มีค่าสูง จะทำให้แขนหุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่เนื่องจากขนาดของสัญญาณเอง

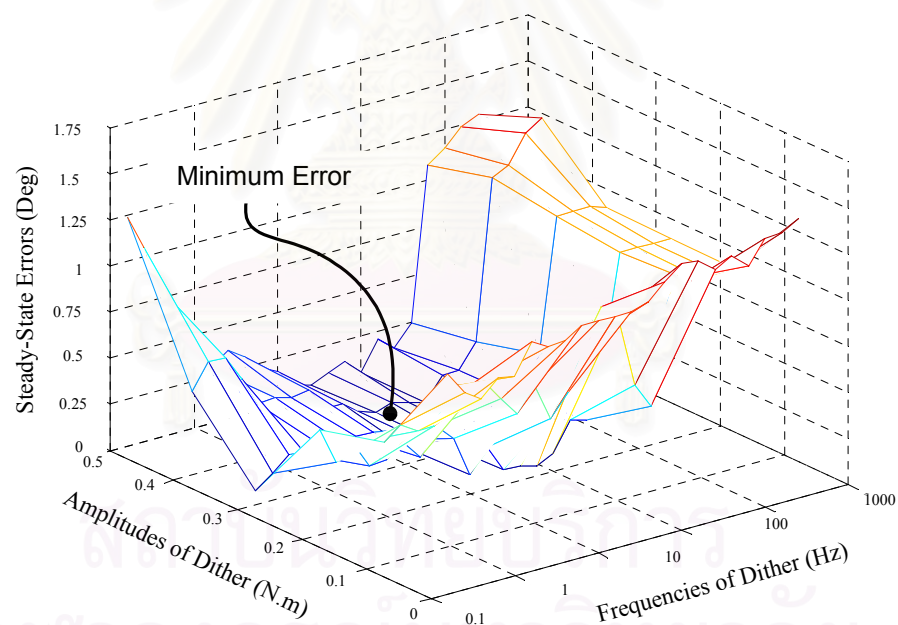
ในช่วงที่ 2 ขนาดของสัญญาณ Dither ที่มีขนาดสูงกว่าแรงเสียดทานสถิตย์สูงสุดในระบบ จะสามารถชดเชยแรงเสียดทานได้อย่างมีประสิทธิภาพ กล่าวคือสัญญาณ Dither สามารถทำให้ระบบมีค่าผิดพลาดทางตำแหน่งที่ต่ำที่สุด และเช่นเดียวกันกับช่วงความถี่ต่ำกว่า 120 เฮิรตซ์ ขนาดของสัญญาณ Dither ที่มีน้อยกว่าแรงเสียดทานสถิตย์ของระบบจะไม่สามารถชดเชยแรงเสียดทานได้หมด ทำให้มีค่าผิดพลาดทางตำแหน่งเกิดขึ้น

ส่วนในช่วงที่ 3 ขนาดของสัญญาณ Dither ทุกๆ ค่าจะไม่สามารถชดเชยแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระบบแขนหุ่นยนต์ได้ โดยจะสังเกตจากค่าผิดพลาดทางตำแหน่งมีค่าสูง ดังนั้นสัญญาณ Dither ที่มีความถี่สูงกว่า 120 เฮิรตซ์ จึงไม่มีผลต่อการลดค่าผิดพลาดทางตำแหน่งของระบบแขนหุ่นยนต์ CRS จะเห็นได้ว่าผลของการทดลองมีลักษณะที่แตกต่างจากผลการจำลองในรูปที่ 4.9 กล่าวคือที่ความถี่ระหว่าง 120-1000 เฮิรตซ์ ผลของค่าผิดพลาดทางตำแหน่งเนื่องจากการทดลองจะมีค่าสูง ส่วนผลของการจำลองค่าผิดพลาดทางตำแหน่งจะมีค่าลดต่ำลง ทั้งนี้เกิดจากความถี่ของสัญญาณ Dither มีค่าสูงกว่าช่วงความถี่ใช้งาน (bandwidth) ของระบบควบคุมจึงทำให้ระบบแขนหุ่นยนต์ ไม่สามารถตอบสนองต่อสัญญาณ Dither ได้ ซึ่งเป็นผลให้ไม่สามารถลดค่าผิดพลาดทางตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ได้ ซึ่งแบบจำลองในหัวข้อ 4.4 ไม่ได้คำนึงถึงความถี่ใช้งานของระบบ

ในรูปที่ 5.9 (ข) แสดงค่าผิดพลาดทางตำแหน่งเมื่อพิจารณาบนระนาบ 3 มิติ ซึ่งสามารถเห็นถึงความสามารถในการลดค่าผิดพลาดทางตำแหน่ง ดังที่ได้กล่าวข้างต้นได้ชัดเจนยิ่งขึ้น จากรูปจะเห็นว่าสัญญาณ Dither ที่เหมาะสมต่อการลดค่าผิดพลาดทางตำแหน่ง มีขนาดตั้งแต่ 0.3 นิวตัน-เมตร เป็นต้นไปและความถี่ของสัญญาณ Dither ที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 1-100 เฮิรตซ์



(ก) ค่าผิดพลาดทางตำแหน่งเมื่อพิจารณาบนระนาบ 2 มิติ



(ข) ค่าผิดพลาดทางตำแหน่งเมื่อพิจารณาบนระนาบ 3 มิติ

รูปที่ 5.9 ผลการควบคุมตำแหน่งของแขนหุ่น CRS Robotics เมื่อเปลี่ยนขนาดและความถี่ของสัญญาณ Dither

บทที่ 6

บทสรุป

6.1 บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการชดเชยแรงเสียดทานในระบบทางกล ด้วยวิธีการหลัก 2 วิธี กล่าวคือ การชดเชยแรงเสียดทานที่อ้างอิงแบบจำลอง และการชดเชยแรงเสียดทานที่ไม่อ้างอิงแบบจำลอง โดยนำมาใช้ร่วมกับตัวควบคุมเชิงเส้น ได้แก่ ตัวควบคุมแบบ PD และ PI ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสร้างง่ายและราคาถูก แต่เมื่อเรานำตัวควบคุมเชิงเส้นแบบ PD มาควบคุมระบบที่มีความเสียดทานที่มีความไม่เชิงเส้นสูง โดยเฉพาะในช่วงที่ความเร็วของระบบมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ จะทำให้เกิดค่าผิดพลาดทางตำแหน่งขึ้นได้ ส่วนการใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัลมาช่วยลดค่าผิดพลาดทางตำแหน่งนั้น ทำให้ระบบเกิด limit cycles ในบริเวณใกล้ตำแหน่งอ้างอิง

การจำลองและการทดลองระบบควบคุมในงานวิจัยนี้ ได้ใช้ตัวชดเชยแบบคงค่า (Fixed compensator) โดยโครงสร้างของแรงเสียดทานประกอบด้วย แรงเสียดทานสถิตย์ แรงเสียดทานหนืด และ Stribeck's effect ในการจำลองและการทดลองจะทำการควบคุมตำแหน่งของระบบด้วยระบบการควบคุม 4 แบบการควบคุมได้แก่ แบบ PD control แบบ PD พร้อมสัญญาณ Dither แบบ PD พร้อมตัวชดเชย และแบบ PD พร้อมตัวชดเชยและสัญญาณ Dither โดยจะพิจารณาความสามารถในการชดเชยแรงเสียดทานจากค่าผิดพลาดทางตำแหน่งที่เกิดขึ้น สำหรับการทดสอบกับระบบจริงนั้นจะทดสอบกับระบบทางกล 2 ระบบได้แก่ ชุดส่งกำลัง ECP รุ่น 220 และชุดมอเตอร์กระแสตรงของบริษัท Comdyna รุ่น 767

ผลการจำลองและการทดลองควบคุมตำแหน่งของชุดส่งกำลัง ECP รุ่น 220 และชุดมอเตอร์กระแสตรงของบริษัท Comdyna รุ่น 767 ให้ผลการชดเชยแรงเสียดทานในแต่ละวิธีการควบคุมคล้ายกัน กล่าวคือ การควบคุมด้วยตัวควบคุม PD ไม่สามารถลดค่าแรงเสียดทานได้ ทำให้ค่าผิดพลาดทางตำแหน่งมีค่าสูงสุด ในการควบคุมแบบ PD พร้อมสัญญาณ Dither และแบบ PD พร้อมตัวชดเชย สามารถชดเชยแรงเสียดทานในระบบได้ ซึ่งจะทำให้ค่าผิดพลาดทางตำแหน่งมีค่าลดลง แต่ยังคงเหลือค่าผิดพลาดในระบบควบคุมอยู่เล็กน้อย และเมื่อทำการชดเชยด้วยสัญญาณ Dither และตัวชดเชยพร้อมกัน จะทำให้ค่าผิดพลาดมีค่าต่ำสุด หลังจากนั้นได้ทดลองเปลี่ยนขนาด

ของสัญญาณ Dither ที่ใช้ควบคู่กับตัวชดเชยแรงเสียดทาน พบว่าสัญญาณ Dither ที่มีแต่ขนาดของน้อยกว่าแรงเสียดทานสถิตย์ในระบบ สามารถชดเชยแรงเสียดทานที่เหลือจากตัวชดเชยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากการจำลองและการทดลอง การชดเชยแรงเสียดทานด้วยตัวชดเชยที่อ้างอิงแบบจำลองไม่สามารถลดค่าผิดพลาดลงได้หมด แต่สามารถลดช่วงเวลาขึ้น (rise time) ได้ดี ส่วนสัญญาณ Dither สามารถลดค่าผิดพลาดทางตำแหน่งเฉลี่ยได้ใกล้เคียงค่าศูนย์ แต่ต้องทำการศึกษาถึงขนาดและความถี่ที่เหมาะสมต่อระบบควบคุม โดยจากการทดลองใส่สัญญาณ Dither ให้กับระบบควบคุมตำแหน่งแขนหุ่นยนต์ CRS Robotics ซึ่งทำการควบคุมเพียงข้อต่อ (Joint) แรกของหุ่นเท่านั้น พบว่าที่ขนาดของสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกับค่าแรงเสียดทานสถิตย์สูงสุด สามารถลดค่าผิดพลาดลงได้มากที่สุด ส่วนค่าความถี่ของสัญญาณจะต้องมีค่าระหว่าง 10 ถึง 120 เฮิรตซ์ ซึ่งเป็นช่วงความถี่ใช้งาน (bandwidth) ของระบบควบคุมแขนหุ่นยนต์ทั้งหมด เมื่อนำผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม matlab®/simulink ซึ่งให้ผลแตกต่างกันในช่วงความถี่ที่มีค่ามากกว่า 120 เฮิรตซ์ โดยผลจากการจำลองจะสามารถลดค่าผิดพลาดทางตำแหน่งได้ เนื่องจากในแบบจำลองไม่ได้คำนึงถึงข้อจำกัดของช่วงความถี่ใช้งานของระบบควบคุม

งานวิจัยนี้จะ เป็นพื้นฐานของวิธีการควบคุมงานที่ต้องเผชิญกับแรงเสียดทานในระบบ ซึ่งสามารถลดค่าผิดพลาดทางตำแหน่งในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจุดเด่นของงานวิจัยนี้คือวิธีการที่ใช้ชดเชยแรงเสียดทานสามารถทำได้ง่าย ราคาถูก และสามารถชี้ให้เห็นถึงช่วงของขนาดและความถี่ของสัญญาณ Dither ที่เหมาะสมต่อการใช้งาน

6.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยต่อเนื่อง

ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองการใช้สัญญาณ Dither เพื่อชดเชยแรงเสียดทานในระบบควบคุมเชิงเส้นเป็นหลัก โดยพิจารณาความสามารถในการลดแรงเสียดทานจากค่าผิดพลาดทางตำแหน่ง แต่ไม่สามารถศึกษาถึงผลของสัญญาณ Dither ที่มีต่อแรงเสียดทานได้โดยตรง เนื่องจากข้อจำกัดด้านอุปกรณ์การทดลอง วิทยานิพนธ์นี้จึงสามารถนำความรู้เรื่องการชดเชยด้วยสัญญาณ Dither ไปใช้กับระบบทางกลได้เพียงบางระบบเท่านั้น โดยงานวิจัยที่น่าจะขยายต่อไปคือผลการชดเชยด้วยสัญญาณ Dither ที่มีต่อลักษณะของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจริงในระบบ เพื่อสามารถที่จะนำไปใช้เป็นพื้นฐานในการนำไปใช้กับระบบต่างๆ ได้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ทั้งนี้ในวิทยานิพนธ์ไม่ได้คำนึงถึงการสืบทอดของชิ้นส่วนทางกล เช่น แบริ่ง และ เกียร์ เป็นต้น จึงน่าจะมีการศึกษาถึงผลของการสืบทอดของระบบ เปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา และอายุการทำงานของระบบชิ้นส่วนทางกล



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. Armstrong-Hélouvry, B., and Dupont, P. Friction Modeling for Control. Proceedings of the American Control Conference, San Francisco, California (June 1993): 1905-9.
2. Lee, S., and Asada, H. Assembly Automation using Vibratory End Effector: Modeling and Stability Analysis. IEEE conference on Robotics and Automation Albuquerque, New Mexico (1997): 1980-5.
3. Susan, L., Ipri and Asada, H. Tuned Dither for Friction Suppression during Force-Guided Robotic Assembly. IEEE conference on Robotics and Automation (1995): 310-5.
4. Åström, K. J. Friction Generated Limit Cycles. IEEE CDC Workshop#2, Tampa Florida (1998).
5. Canudas-de-wit, C.; Olsson, H.; Astrom, K., J.; and P. Lischinsky. A New Model for Control of System with Friction. IEEE Transactions on Automatic Control 40, 3 (March 1995): 419-25.
6. Haessig, D. A., Jr., and Friedland, B. On the Modeling and Simulation of Friction. ASME Journal of Dynamic System, Measurement, and Control 113 (1991): 354-62.
7. Dunlap E. P., and Dupont, P. E. Friction Modeling and PD Compensation at Very Low Velocities. ASME Journal of Dynamic System, Measurement, and Control 117 (1995): 8-14.

8. วัชระ เลิศพิริยสุวัฒน์ และ รัชทิน จันทร์เจริญ. การควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรมแบบปรับเปลี่ยนได้โดยใช้การประมาณค่าความเสียดทานในเวลาจริง. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 15 (2544): MC-43-7.
9. Yang, S., and Tomizuka, M. Adaptive Pulse Width Control for Precise Positioning Under the Influence of Stiction and Coulomb Friction. ASME Journal of Dynamic System, Measurement, and Control 110 (1988): 221-7.
10. Dupont, P. E. Avoid Stick-Slip through PD Control. IEEE Transactions on Automatic Control 39, 5 (May 1994): 1094-7.
11. ชลิต สิ้นสุข. ผลของการสั่นสะเทือนที่มีต่อความเสียดทานจลน์ (ปีการศึกษา 2508-2512) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2512.
12. Cunefare, K.; Montbrun, N.; Rastelli, V.; Aller, J.; and Dizrasa, M. Burst Mode Dither Control of Automotive Brake Squeal. International Congress on Acoustics 17th Roma, Italia III (April 2001): 6A.10.02 1-6A.10.02 2.
13. Maeda, S.; Kawakami, Y.; and Nakano, K. Position Control of Pneumatic Lifters [Online] Available from: www.callisto.si.usherb.ca/~fluo2000/PDF/FI_033.pdf
14. Armstrong-Hélouvry, B.; Dupont, P.; and Canudas-de-wit, C. A Survey of Models, Analysis-Tools and Compensation Methods for the Control of Machines with Friction. Pergamon Survey paper of Automatics 30, 7 (1994): 1083-1138.
15. Karnopp, D. Computer Simulation of Stick-slip Friction in Mechanical Dynamic System. ASME Journal of Dynamic System, Measurement, and Control 107 (1985): 100-103.
16. Liu, J. Joint stick-slip friction compensation for robotic manipulator by iterative learning. IEEE conference on Robotics and Automation (1994): 502-9.

17. Ehrich, N. E., and Krishnaprasad, P. S. An Investigation of Control Strategies for Friction Compensation [Online] Available from: http://www.isr.umd.edu/TechReports/ISR/1991/MS_91-4/MS_91-4.phtml
18. Slotine, Jean-Jacques. E., and Li, W. Applied Nonlinear Control. New Jersey: Prentice-Hall International, 1991.
19. Astrom, K. J. Control of System with Friction [Online] Available from: <http://www.control.lth.se>
20. Freeman, P. Lubrication and Friction.(n.p.): Sir Isacc Pitman & Son, 1962.
21. Canudas, C.; Astrom, K.; and Braun, K. Adaptive friction compensation in DC motor drives. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, CA (April 1986): 1556-61.
22. Adams, J., and Payandeh, S. On Methods for Low Velocity Friction Compensation: Theory and Experimental Study. Journal of Robotics Systems 13, 66 (1996): 901-404.
23. Chanchaoren, R. Determination of Friction Characteristics Using GRNN Embedded Model. Proceedings of the Sixth IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Soft computing (July 2002): 293-298.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

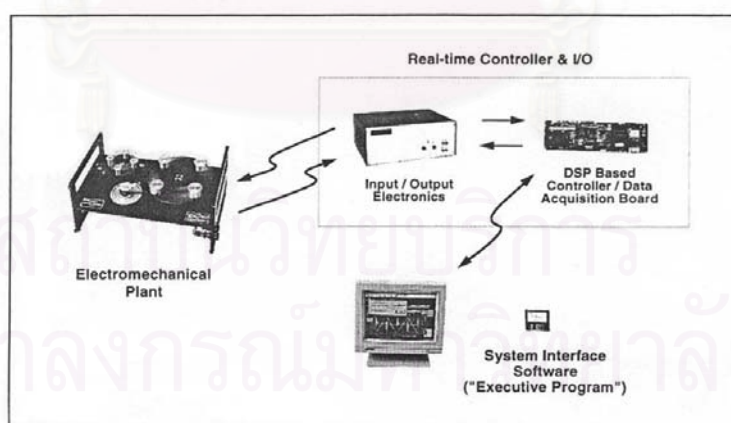
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้พยายามทดลองการชดเชยแรงเสียดทาน โดยทำการทดลองบนชุดทดสอบจำนวน 3 ชุดเพื่อยืนยันผลการทดลองว่าการชดเชยแรงเสียดทานแบบต่างๆ สามารถให้ผลการทดลองเหมือนกันทุกระบบ

ก.1 ชุดอุปกรณ์ทดลองระบบส่งกำลังของบริษัท EPC รุ่น 220

อุปกรณ์ทดลองระบบส่งกำลังของบริษัท EPC¹ ใช้เป็นชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบค่าแรงเสียดทานแบบหนืด แบบคูลอมบ์ และค่า backlash ที่เกิดในชุดเกียร์ทด โดยเราจะทำการทดลองชดเชยแรงเสียดทานโดยวิธีต่างๆ ก่อนที่จะนำไปใช้กับชุดควบคุมอื่นๆ เนื่องจากชุดทดลองนี้มีโปรแกรม ECP ที่สามารถใช้ทดสอบได้

ชุดทดลองนี้ประกอบด้วยสามส่วนสำคัญดังรูปที่ ก.1 โดยส่วนแรกคือ ระบบกลและไฟฟ้า (Electromechanical Plant) ส่วนที่สองคือ ชุดควบคุมและประมวลสัญญาณในเวลาจริง (Real-time Controller & I/O) และส่วนที่สามคือ ตัวโปรแกรม (System Interface Software ("Executive Program"))



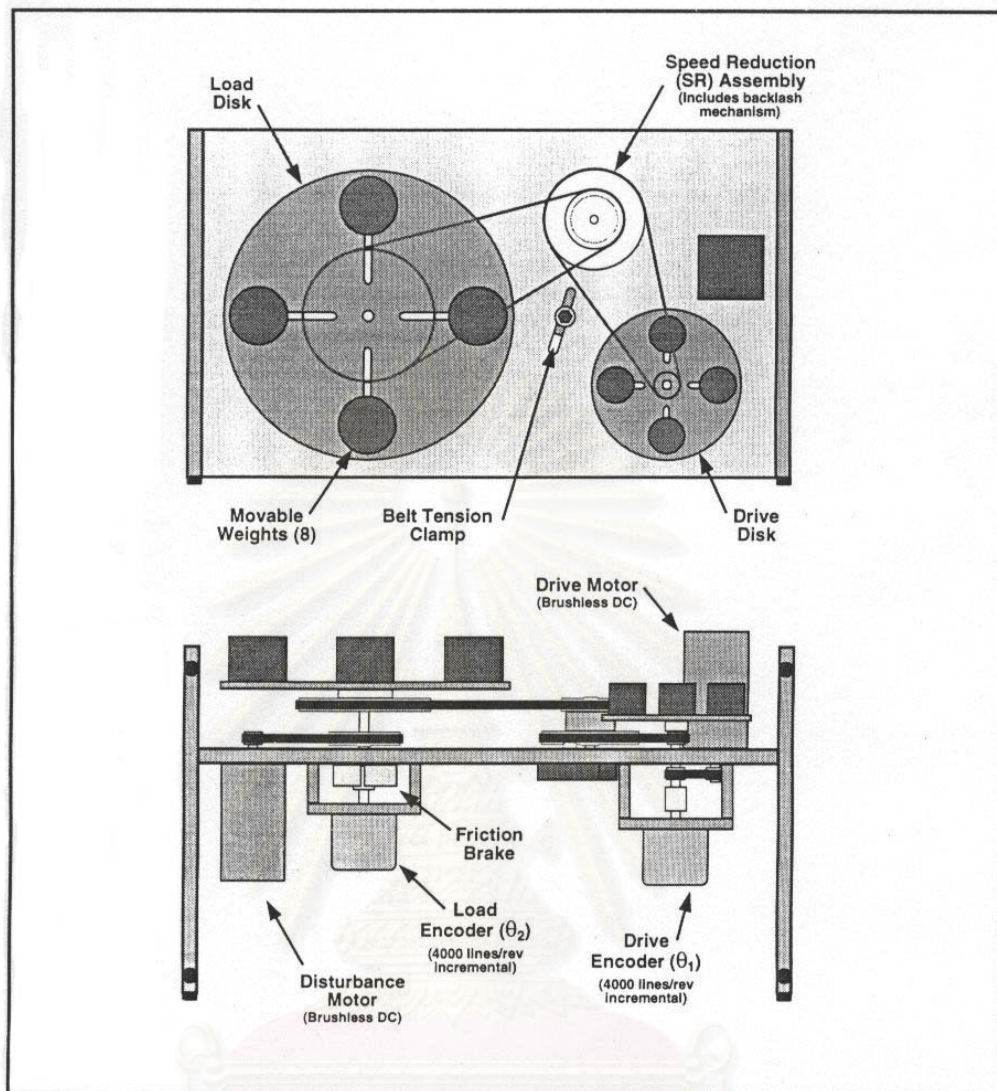
รูปที่ ก.1 ชุดอุปกรณ์ทดลองระบบส่งกำลังของ EPC รุ่น 220

¹ Industrial Emulator/servo Trainer Model 220, Education Control Products 5725 Ostin Ave Woodland Hills California 91367 ph: (818) 703-0802 fax: (818) 703-6040

โดยระบบที่เราต้องการนำมาใช้ทดสอบเพื่อใส่สัญญาณ Dither ลงไปนั้นคือส่วนแรกดังรูปที่ ก.2 โดยระบบประกอบด้วยมอเตอร์ตัวขับ (drive motor) โดยต่อเข้าด้วยสายพานเพื่อนำไปขับจานตัวขับ (drive disk) ที่สามารถแปรค่าความเฉื่อยได้ ต่อจากจานขับจะมีสายพานต่อไปยังชุดลดความเร็ว เพื่อลดความเร็วที่ส่งผ่านสายพานอีกชุดหนึ่งไปยังจานหมุนอีกชุดหนึ่งที่เรียกว่าจานตัวตาม (load disk) โดยทั้งจานตัวขับและจานตัวตามเราสามารถเปลี่ยนค่าความเฉื่อยได้โดยการเพิ่มหรือลดลูกตุ้มของเหล็บบนจาน ส่วนการลดความเร็วของจานตัวตามสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนค่าตัวทดรอบบนพู่เล่ย์ในชุดลดความเร็ว ซึ่งในชุดลดความเร็วนี้ยังสามารถกำเนิดค่า backlash ได้ ส่วนค่าความยืดหยุ่นของระบบจะเกิดบนสายพานระหว่างจานตัวขับกับชุดลดความเร็ว

ในชุดจานขับจะต่อเข้ากับมอเตอร์ตัวขับโดยใช้อัตราทด 1 ต่อ 1 แต่ทั้งนี้ค่าความยืดหยุ่นของสายพานกับค่า backlash จะยังมีผลต่อการหมุนของจานตัวตาม ที่จานตัวตามจะมีชุดอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณรบกวนซึ่งต่อเข้ากับจานตัวตามในอัตราทด 4 ต่อ 1 โดยใช้เป็นตัวกำเนิดแรงเสียดทานแบบหนืด และสัญญาณรบกวนขาออก ส่วนอุปกรณ์ชุดเบรกที่ต่อเข้ากับจานหมุนตามจะใช้กำเนิดความเสียดทานแบบคูลอมป์

เพลลาในชุดทดลองนี้จะรองรับด้วยบอลแบร์ริง ส่วนในอุปกรณ์ลดความเร็วจะใช้แบร์ริงแบบเข็ม ซึ่งจะให้ค่าแรงเสียดทาน และ ค่า backlash ต่ำ ในอุปกรณ์นี้ใช้ Encoder สองตัวที่มีความละเอียด 4000 pulse/rev และเป็นแบบ incremental โดย encoder แต่ละตัวจะถูกต่อเข้ากับแกนเพลลาของมอเตอร์ตัวขับ (θ_1) และตัวตาม (θ_2) เพื่ออ่านค่าตำแหน่งเชิงมุมของการหมุนของมอเตอร์ ตัวขยายสัญญาณที่ใช้ขับมอเตอร์เป็นแบบ servo amplifiers และ ตัวจ่ายกำลังจะอยู่ในตัวควบคุม ค่าตำแหน่งที่ส่งมาจาก encoder ถูกส่งมายังส่วนประมวลสัญญาณ เพื่อเปลี่ยนสัญญาณพัลส์ เป็นค่าตำแหน่งเชิงมุม

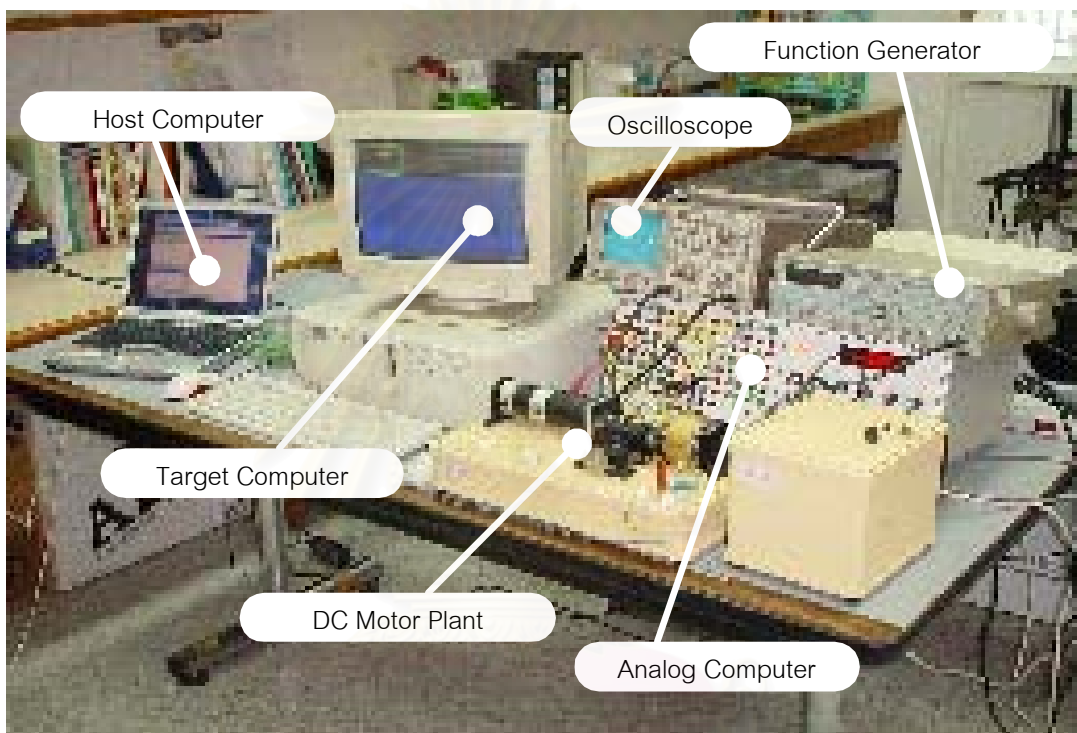


รูปที่ ก.2 อุปกรณ์ส่วนของทางกลและไฟฟ้าของชุดทดลองระบบส่งกำลัง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.2 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์รุ่น 767 ของบริษัท Comdyna, Inc.

ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการควบคุมระบบมอเตอร์ที่มีแรงเสียดทานในระบบ ประกอบด้วย ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงพร้อมชุดควบคุมสัญญาณ อนาล็อกคอมพิวเตอร์ ชุดกำเนิดสัญญาณ และ โปรแกรมและอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการควบคุม ดังแสดงในรูปที่ ก.3

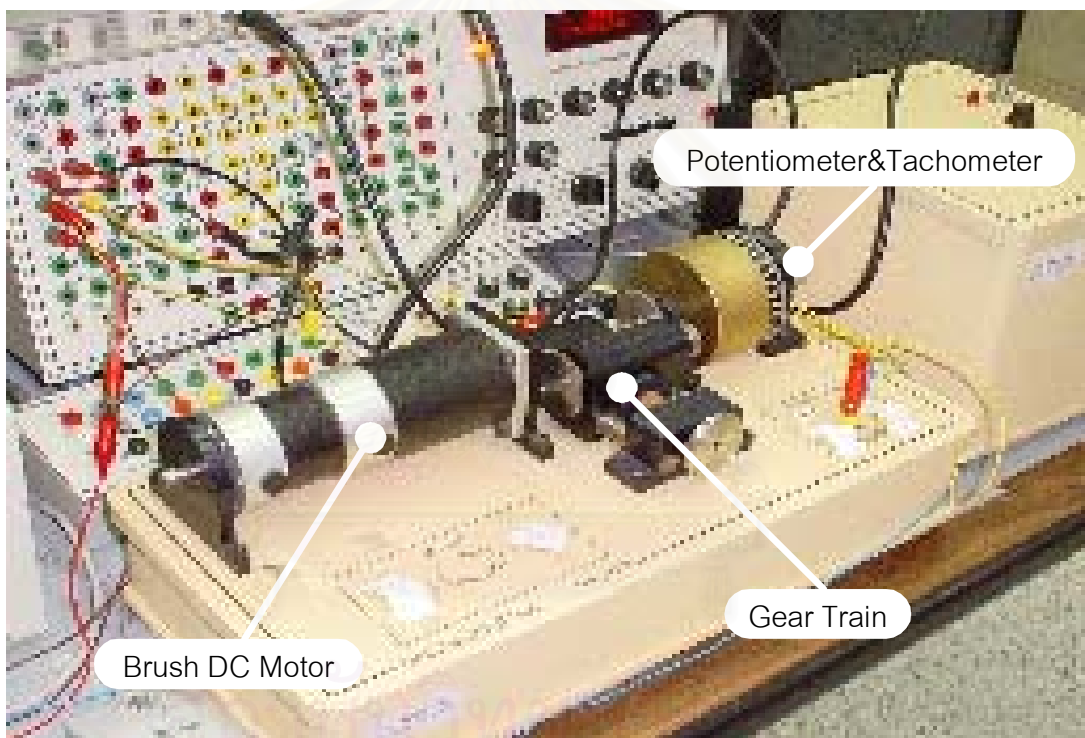


รูปที่ ก.3 ชุดการทดลองควบคุมมอเตอร์รุ่น 767 ของบริษัท Comdyna, Inc.

ประกอบด้วยอุปกรณ์ดังนี้ :

- ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์รุ่น 767 ของบริษัท Comdyna, Inc. ประกอบด้วยมอเตอร์กระแสตรง จำนวน 1 ตัว ต่อผ่านระบบเกียร์มายังมวลของล้อ ในชุดแกนมอเตอร์จะประกอบด้วยอุปกรณ์วัดตำแหน่ง หรือ Potentiometer รุ่น 6539 ของบริษัท BOURNS และมีอุปกรณ์ตรวจวัดความเร็ว หรือ Tachometer โดยชุดมอเตอร์จะมีตัวจ่ายพลังงานต่อตรงจากชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยผ่านชุดควบคุมสัญญาณ analog/digital positional control panel ดังรูป ก.4

- อนุาล็อกคอมพิวเตอร์รุ่น GP-6 Patch Panel ของบริษัท Comdyna, Inc. ประกอบด้วยตัวออป-แอมป์ (Op-Amp) เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์จัดการสัญญาณเพื่อใช้ควบคุมชุดมอเตอร์ เช่นตัวรวมสัญญาณ (summer) ตัวกลับสัญญาณ (inverter) ตัวอินทิเกรตสัญญาณ (integrator) และตัวอนุพันธ์สัญญาณ (differentiator) โดยมีสัญญาณอ้างอิง ± 10 โวลต์ ดังแสดงในรูป ก.3
- ชุดกำเนิดสัญญาณรุ่น G-305 ของบริษัท Hung Ghang สามารถจ่ายสัญญาณที่มีลักษณะต่างๆ เช่น คลื่นรูปซายน์ สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม โดยให้ขนาดสูงสุด ± 1 โวลต์ มีความถี่ 0 ถึง 1 เมกกะเฮิรตซ์ ดังรูป ก.3

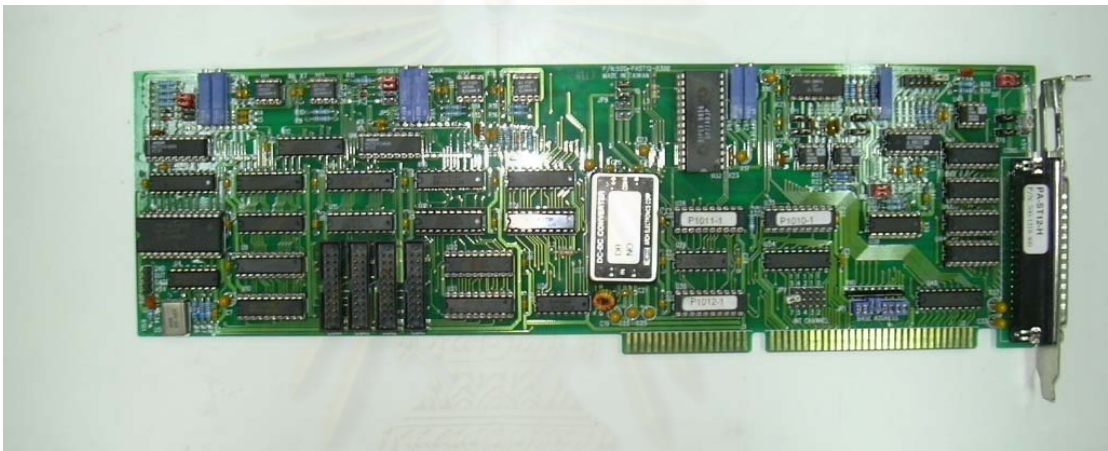


รูปที่ ก.4 ชุดขับมอเตอร์กระแสตรง

- โปรแกรมและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการควบคุมประกอบด้วย Personal Computer ตัวประมวลผล Pentium II 400 MHz จำนวน 2 เครื่อง การ์ด LAN ของบริษัท Accton รุ่น ISA slot ชิพ MPX 503AJ24470290 NE2000 Supported จำนวน 2 การ์ด โปรแกรม Matlab[®] 6.1/Simulink[™] และ xPC target real-time Operating System โดยหลักการทำงานผ่านระบบเน็ตเวิร์ค TCP/IP

- การ์ดรับส่งข้อมูลแบบอนาล็อกและดิจิตอล รุ่น PA-ST12(-H) ของบริษัท Acqutek Corporation มีคุณสมบัติดังนี้ :

แผงวงจรรับสัญญาณรุ่น PA-ST12(-H) ของบริษัท Acqutek Corporation มีค่าความละเอียด 12 บิต ในโหมดการทำงานแบบ A/D สามารถทำงานที่ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ หรือ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ โหมดการทำงานแบบ D/A สามารถทำงานที่ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ และภาครับส่งแบบดิจิตอลสามารถทำงานที่ความละเอียด 32 บิต ดังแสดงในรูปที่ ก.5

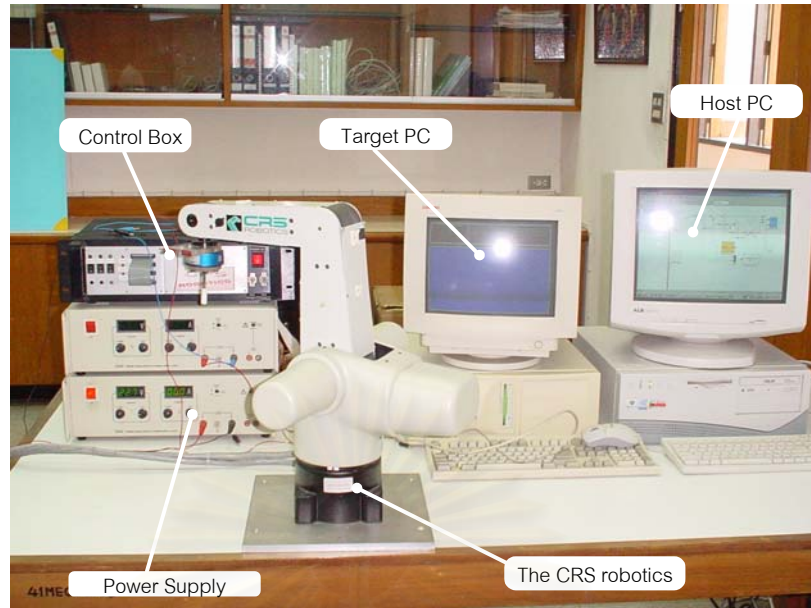


รูปที่ ก.5 การ์ดรับส่ง/แปลงสัญญาณ รุ่น PA-ST12(-H) ของบริษัท Acqutek Corporation

ก.3 แขนหุ่นยนต์ CRS Robotics

ในการทดลองเพื่อวิเคราะห์ค่าผิดพลาดที่เกิดจากการใส่สัญญาณ Dither ที่มีขนาดและความถี่ต่างๆ ลงในระบบทางกล ดังนั้นเราจึงเลือกใช้แขนหุ่นยนต์ CRS Robotics เพื่อทำการทดลองหาช่วงที่เหมาะสมของสัญญาณที่ใส่เข้าไป และเนื่องจากอุปกรณ์ตรวจรับทางตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์มีค่าความละเอียดสูง จึงทำให้ผลการทดลองออกมาถูกต้อง

วิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงส่วนประกอบหลักแต่ละส่วน โดยระบบควบคุมจะมีลักษณะดังรูปที่ ก.6



รูปที่ ก.6 ชุดการทดลองควบคุมแขนหุ่นยนต์ CRS Robotics

ชุดการทดลองเป็นแขนหุ่นยนต์แบบ Articulate ของบริษัท CRS Robotic รุ่น 255 จะประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้ :

- แขนหุ่นยนต์แบบ Articulate ของบริษัท CRS Robotics รุ่น 255 : มี 5 แกนหมุนและ 5 องศาอิสระโดยแต่ละแกนจะขับเคลื่อนด้วย มอเตอร์กระแสตรงขนาดแรงดัน ± 25 V. ส่งผ่านกำลังขับไปสู่แกนด้วยระบบ Harmonic Drive มีค่าความละเอียดในการเคลื่อนที่ 0.005 องศา และมีความเร็วสูงสุด 3.05 rad/s และมีคุณสมบัติอื่นๆ ดังตาราง ก.1



รูปที่ ก.7 แขนหุ่นยนต์ CRS Robotics

ตารางที่ ก.1 รายละเอียดแขนหุ่นยนต์ CRS Robotics

รายการ	รายละเอียด
Structure	articulated 5 DOF
Drive motor Bearings Max voltage Mac Current Mech. Time const. Max speed @ 25 V Peak torque Brush life	Permanent magnet DC Servo ABEC Class 1- 0.375" ID +/- 25 Vdc 10.8 amps 11.62 msec 3600 rpm 100 oz-in 8000 hours @ 1200 rpm
Transmission Waist rotate Shoulder Elbow Wrist bend (pitch) Tool roll	Size 20 cup type harmonic drive Size 20 cup type harmonic drive Size 20 cup type harmonic drive/chain Bevel/spur-gear/chain Bevel/spur-gear/chain/gear
Payload Max design Full speed/acc	Kg 2.0 1.0
Reach – Waist to tool flange	22 inches
Reach (by link) Base to shoulder Shoulder to elbow Elbow to wrist pivot Wrist pivot to tool flange	Inches 10 10 10 2

Joint travel ranges Waist rotate Shoulder Elbow Wrist bend (pitch) Tool roll	Degrees +/-175 +110,-0 +0,-130 +/-110 +/-180
Joint speeds at 100 % program speed A150 Series: Waist rotate Shoulder3 Elbow Wrist bend (pitch) Tool roll A250 Series: Waist rotate Shoulder 3 Elbow Wrist bend (pitch) Tool roll	Rad/sec 1.74 1.08 1.74 3.14 6.28 3.05 2.18 3.05 3.14 6.28
Joint default acceleration rates A150 Series: Waist rotate Shoulder Elbow Wrist bend (pitch) Tool roll A250 Series:	Rad/sec² 5.45 5.45 5.45 24.54 49.09

Waist rotate	12.93
Shoulder 3	12.93
Elbow	12.93
Wrist bend (pitch)	58.18
Tool roll	116.36
Position Feedback	Optical incremental encoders
Resolution	1000 pulse/rev
Index	marker pulse 1 per rev
Output	Chnls A,B,Z sq.wave TTL
Joint Resolution	Deg
Waist rotate	0.005
Shoulder	0.005
Elbow	0.005
Wrist bend (pitch)	0.023
Tool roll	0.045
Joint Resolution	Inches @ tool flange
Waist rotate	0.0019
Shoulder	0.0009
Elbow	0.0009
Wrist bend (pitch)	0.0008
Tool roll	0.0016

- การ์ดแปลงสัญญาณจาก Digital เป็น Analog ของบริษัท Advantech รุ่น PCL 726 : มีช่องสัญญาณขาออกจำนวน 6 ช่องสัญญาณ โดยแต่ละช่องสัญญาณสามารถส่งค่าได้แรงดันมากที่สุดมีค่าเท่ากับ ± 10 V. มีค่าความละเอียดของแต่ละช่องสัญญาณ 12 บิต โดยชนิดของการ์ดเป็นแบบ ISA Slot

- การ์ดรับสัญญาณ Digital ของบริษัท ETT รุ่น ET-PC8255 : ใช้ในการรับสัญญาณดิจิตอล จะมีส่วนประกอบสำคัญคือ IC 8255 จำนวน 3 ตัว โดยแต่ละตัวจะมีความละเอียด 8 บิต
- อุปกรณ์อื่นๆ : เช่นเดียวกับชุดทดลองมอดูเลเตอร์กระแสตรงรุ่น 767 ของบริษัท Comdyna, Inc. ที่ใช้เพื่อจัดการสัญญาณต่างๆ เช่น อนาล็อกคอมพิวเตอรืรุ่น GP-6 Patch Panel ของบริษัท Comdyna, Inc. และ ชุดกำเนิดสัญญาณรุ่น G-305 ของบริษัท Hung Ghang เพื่อจ่ายสัญญาณ Dither ให้แก่ระบบ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

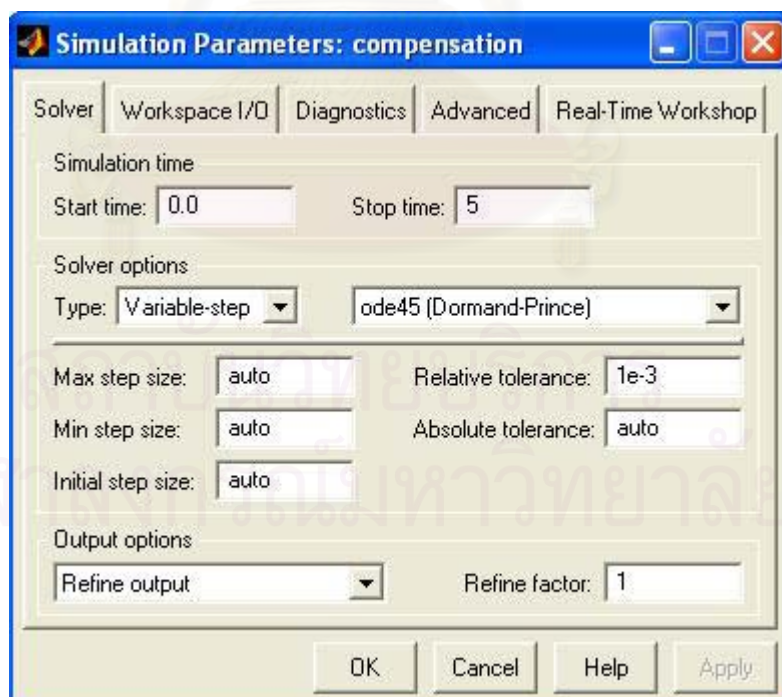
ภาคผนวก ข.

ตัวอย่างโปรแกรมควบคุม

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการใช้โปรแกรม matlab®/simulink™ เพื่อใช้ในงานจำลองระบบมอเตอร์ที่มีความเสียดทาน และ การใช้โปรแกรม matlab®/xPC Target เพื่อออกแบบตัวควบคุมและควบคุมระบบกต่าง ๆ

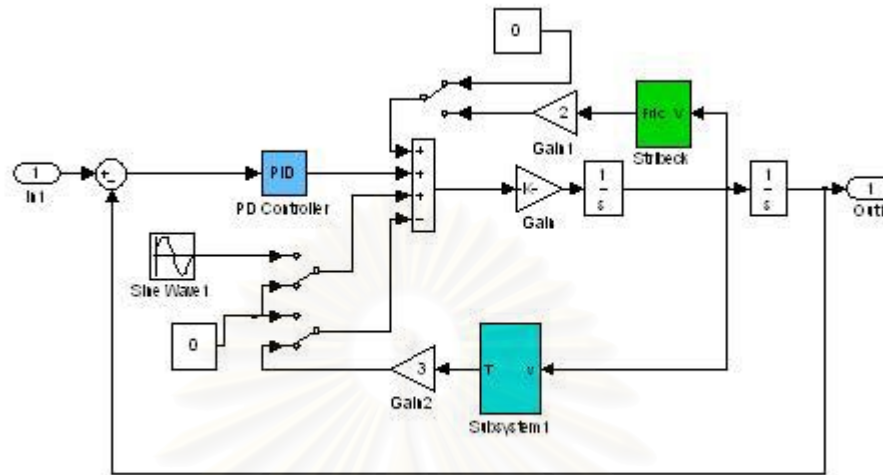
ข.1 การจำลองการควบคุมมอเตอร์กระแสตรง

ก่อนการจำลองการควบคุมระบบมอเตอร์กระแสตรงที่มีแบบจำลองของมอเตอร์และแบบจำลองแรงเสียดทาน ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.1 เราต้องทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ของระบบจำลองเสียก่อน ในรูปที่ ข.1 แสดงให้เห็นถึงค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการจำลองเพื่อให้ได้ผลการจำลองตรงตามวิทยานิพนธ์นี้ โดยจะเห็นว่าระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) ที่ใช้คือ ode45 ชนิด variable-step



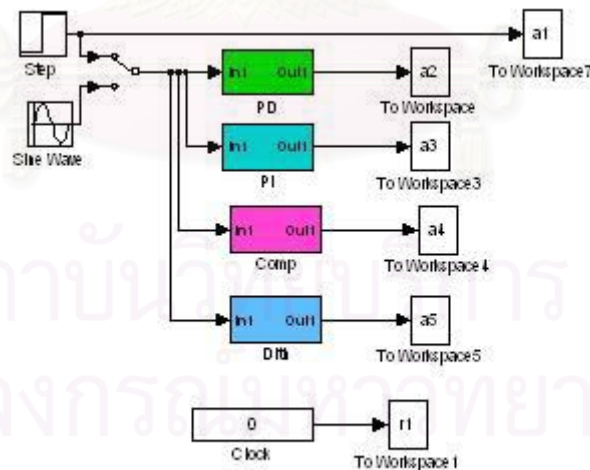
รูปที่ ข.1 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของการจำลอง

หลังจากนั้นเราจะทำการออกแบบจำลองระบบผ่านโปรแกรม simulink โดยทำการสร้างบล็อกไดอะแกรมต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย สัญญาณขาเข้า ตัวควบคุม ระบบมอเตอร์ แรงเสียดทาน สัญญาณ Dither ตัวชดเชยแรงเสียดทาน ดังแสดงในรูป ข.2



รูปที่ ข.2 ระบบจำลองการควบคุมมอเตอร์กระแสตรง

เมื่อระบบควบคุมถูกสร้างให้พร้อมทำงานแล้ว เราจึงทำการออกแบบตัวควบคุมแบบต่างๆ เช่น PD PI Friction compensator และ Dither แล้วนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในรูปที่ ข.3



รูปที่ ข.3 การเปรียบเทียบผลการจำลองด้วยตัวควบคุมชนิดต่างๆ

ในส่วนของการวิเคราะห์ค่าผิดพลาด เราจะทำการเขียนโปรแกรมภาษา M-file เพื่อจำลองผลของค่าผิดพลาดทางตำแหน่ง เมื่อเปลี่ยนขนาดและความถี่ของสัญญาณ Dither โดยมีลักษณะดังหัวข้อ ข.2

ข.2 โปรแกรมการจำลองการวิเคราะห์ค่าผิดพลาดเมื่อชดเชยด้วยสัญญาณ Dither

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear;clc;mul=0.1;coutx=1;couty=1;k=1;ind=1;ind2=1;clear fre
% Start frequency 0.1 Hz increase by log scale
for i=1:50
    f=ind*mul;
    ind2=ind2+1;
    fre(ind2)=f;
    couty=1;
% This loop vary Amplitude
for j=0:0.5:10
    a=j;
    amp(ind2)=a;
    %sim ErrDither01 % connect to simulink
    sim ttt
    % Find Max Error
    range=length(tout)-20;
    A=abs(r(range:end));
    T=tout(range:end);

    % Plot(T,A);
    E=max(abs(A));
    err(couty,coutx)=E;%out put Error
    couty=couty+1;
end
coutx=coutx+1;
%End Amp. Loop
if mod(l,10)==0
    mul=mul*10;
    ind=2;

```

```

else
    ind=ind+1;
end
end
end
%%%%%%%%%%
% Plot surface
figure
surf(err);pcolor(err);shading interp;hold;contour(err,25,'k');
%%%%%%%%%%

```

ข.3 โปรแกรมควบคุมระบบมอเตอร์กระแสตรง

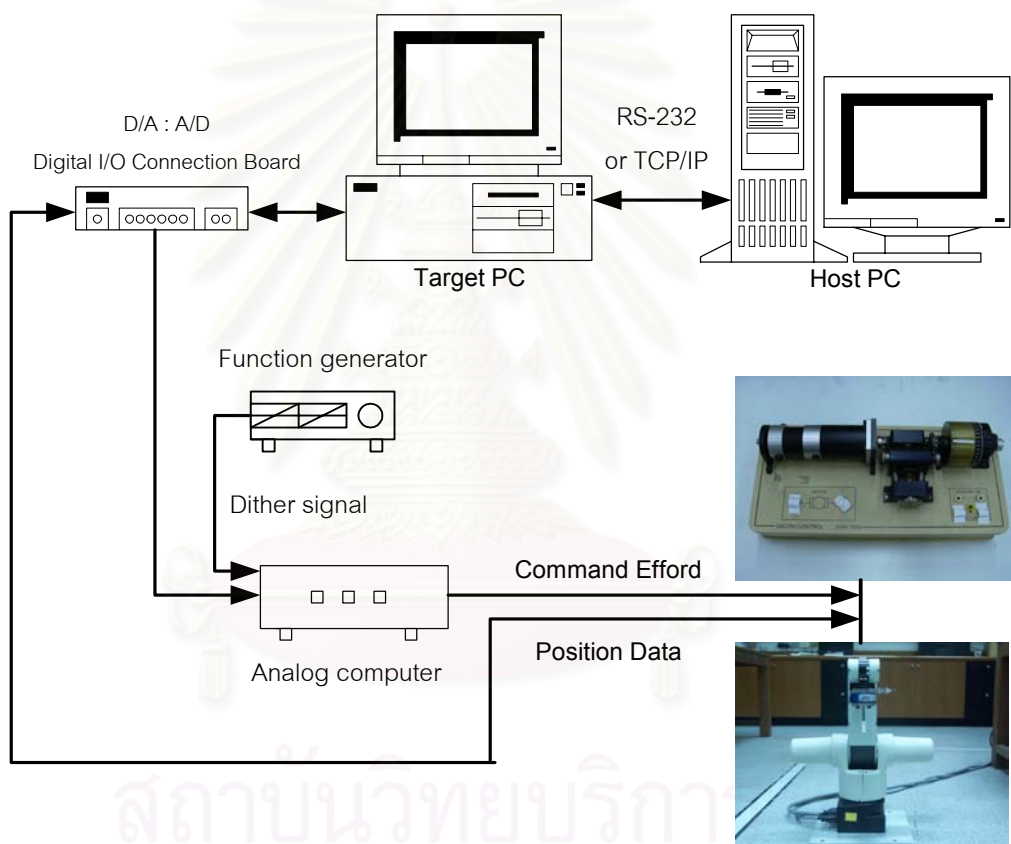
ในการทดสอบเพื่อดูค่าผิดพลาดเนื่องจากการใช้ตัวควบคุมแบบต่างๆ เราทำออกแบบตัวควบคุมบนโปรแกรม simulink และ ทำการติดต่อสื่อสารรวมทั้งเก็บข้อมูลของการทดสอบ ผ่านโปรแกรม xPC Target ซึ่งทั้งสองโปรแกรมเป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรม matlab ของบริษัท Mathworks Inc. โดยหัวข้อนี้จะกล่าวถึงหลักการทำงานของโปรแกรม xPC Target การตั้งค่าก่อนการใช้งาน และการนำไปใช้ในวิทยานิพนธ์

ข.3.1 โปรแกรม xPC Target

xPC Target เป็นเครื่องมือหนึ่งในโปรแกรม Matlab ที่ใช้ในการสร้างต้นแบบควบคุมและทำการทดสอบระบบ ในเวลาจริง ที่ทำงานอยู่บน Target PC โดยระบบปฏิบัติการ xPC kernel ซึ่งอุปกรณ์ติดต่อต่างๆ ที่จะต้องใช้ เช่น A/D D/A หรือการ์ดติดต่อต่างๆ จะต้องติดตั้งอยู่บนเครื่อง Target PC

ข้อดีที่สำคัญของระบบ xPC Target คือการแยกระหว่างเครื่องต้นแบบและเครื่องเป้าหมาย โดยเมื่อเครื่องต้นแบบที่ใช้งานบนระบบปฏิบัติการ Window ทำให้สามารถนำความสามารถและส่วนสนับสนุนที่มีอยู่มากมายในระบบปฏิบัติการ Window มาใช้ในการพัฒนาระบบได้ และเครื่องเป็นเป้าหมายที่ใช้ในการควบคุมระบบจะทำงานบนระบบปฏิบัติการของ xPC Real-time สามารถใช้ในการควบคุมและทดสอบงานที่ต้องการความแม่นยำสูงได้

xPC Target เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ในงานควบคุมระบบในเวลาจริง (real-time control system) ลักษณะของโปรแกรมเหมาะสำหรับการสร้างแบบจำลอง (prototyping) และการทดสอบ (testing) โดยอาศัยการทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลจำนวน 2 เครื่อง ซึ่งเครื่องแรกจะเป็นเครื่อง target PC ซึ่งจะทำการจัดการติดต่อ และควบคุมแบบเวลาจริง กับระบบควบคุม ส่วนเครื่องที่สองจะเป็นตัว host PC ซึ่งใช้สำหรับเก็บข้อมูล ออกแบบตัวทดลอง และเป็นติดตั้งซอฟต์แวร์พื้นฐานที่ใช้สำหรับระบบควบคุม เช่น โปรแกรม matlab visual C++ Microsoft OS เป็นต้น หลักการทำงานของระบบสามารถอธิบายดังแสดงในรูปที่ ข.4



รูปที่ ข.4 การทำงานของโปรแกรม xPC Target

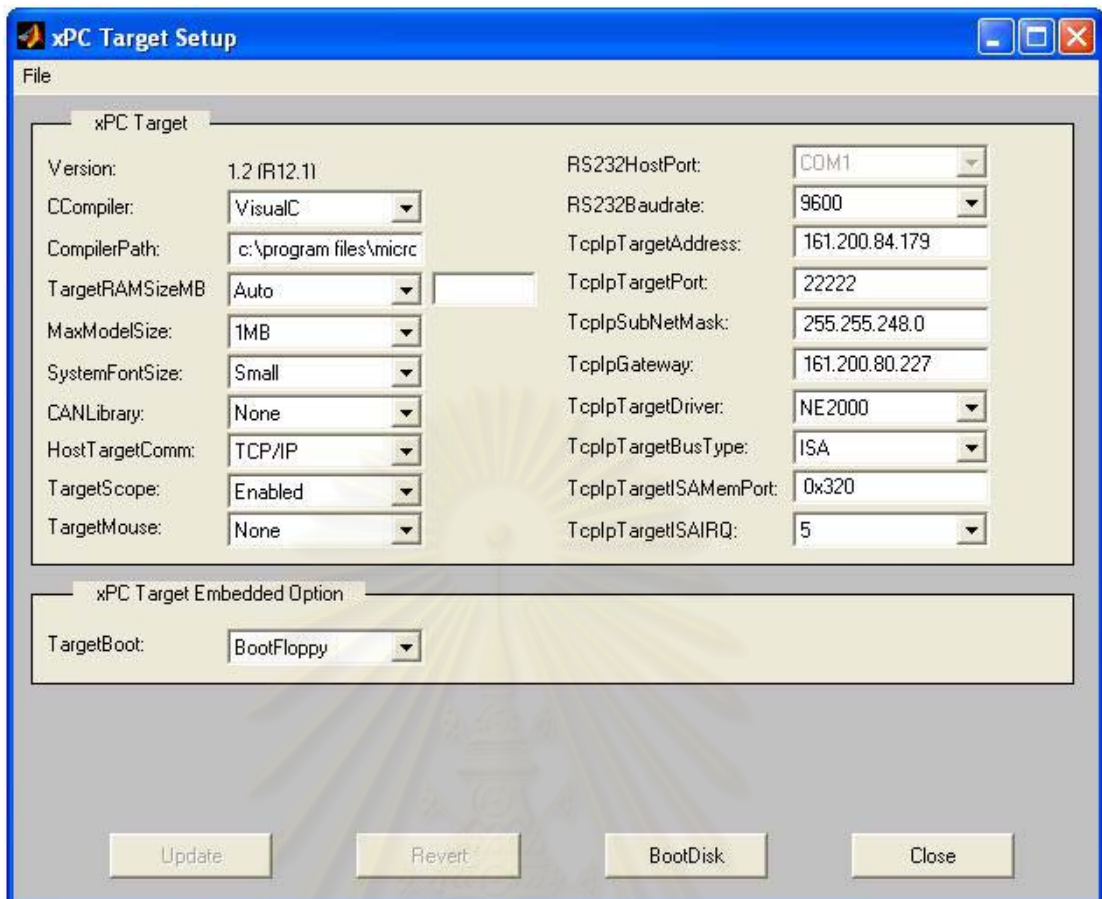
เมื่อได้ระบบที่จะลองด้วย Block Diagram แล้ว Host PC จะทำการเปลี่ยนแปลงจาก Block Diagram เป็นภาษาที่สามารถใช้ใน Target PC ได้โดยใช้โปรแกรม Real-Time Workshop® และ C/C++ ในการสร้างโค้ดใหม่ และทำการส่งผ่านข้อมูลจากเครื่อง Host PC ไปสู่ Target PC ในการทดลองควบคุมชุดมอเตอร์รุ่น 767 และแขนหุ่นยนต์ CRS Robotics จะทำการรวมสัญญาณขาเข้า กับสัญญาณ Dither โดยผ่านตัวอนาล็อกคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ ข.4

ข.3.2 การใช้งานโปรแกรม xPC Target

ก่อนการใช้งานของระบบ xPC Target ในตัวของ Host PC จะต้องติดตั้งระบบปฏิบัติการ Windows และโปรแกรมต่างๆ ดังนี้ :

- Matlab ใช้ในการควบคุมและติดต่อกับระบบ xPC Target โดยผ่านบรรทัดคำสั่ง สามารถใช้ในการ บันทึกข้อมูลจาก Target PC สั่งเริ่มและหยุดการทำงานของ Target เปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรที่ใช้ รวมไปถึงการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จาก Target PC
- Simulink Library ใช้ในการสร้าง Block Diagram เพื่อควบคุมและจำลองระบบพลศาสตร์ที่สนใจ และสามารถสร้าง Block เพิ่มเติมจากที่ Simulink Library มีไว้ โดยการใช้ C-Code S-Function ในการสร้าง Block ตามคุณลักษณะที่ต้องการ เพื่อขยายความสามารถของโปรแกรมออกไปตามที่ต้องการ และอีกหนึ่งคุณลักษณะที่น่าสนใจใน Simulink Library คือ I/O Diver Block Library ซึ่งเป็นการจัดเตรียม Driver สำหรับการติดต่อ I/O ชนิดต่างๆ ที่นิยมใช้ มากกว่า 400 ชนิด
- Real-Time Workshop ใช้ในการแปลงข้อมูลจาก Block Diagram ไปสู่รหัสภาษา C ด้วยคำสั่ง Build
- C Compiler ใช้ในการสร้าง executable code เพื่อใช้ในการปฏิบัติการของ xPC kernel ในการใช้งานต้องติดตั้ง C compiler ที่ Host PC โดยโปรแกรมที่สามารถใช้ได้ได้แก่ Micosoft Visual C++ version 5 6 หรือ 7 Watcom C/C++ version 1.6 หรือ 11

เมื่อพัฒนาหรือจำลองระบบบน Host PC แล้ว จะสามารถสร้างโปรแกรมที่จะทำงานบนเวลาจริงเพื่อนำใช้ใน Target PC โดยเริ่มจากการบูท Target PC ด้วยแผ่นพิเศษที่สร้างขึ้นมาเพื่อการติดตั้งข้อมูล real time Kernel ผู้ระบบบน Target PC หลังจากบูทเครื่อง Target PC แล้วจึงจะสามารถสร้างหรือถ่ายโอนข้อมูลที่พัฒนาไว้สู่ Target PC ได้การตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่อง target ต้องตั้งค่าให้ถูกต้อง ตัวอย่างเช่นรูปที่ ข.5 เป็นการตั้งค่าของเครื่อง target PC ที่ใช้ควบคุมระบบมอเตอร์ กระแสตรงรุ่น 767 ที่ใช้ในการทดลอง

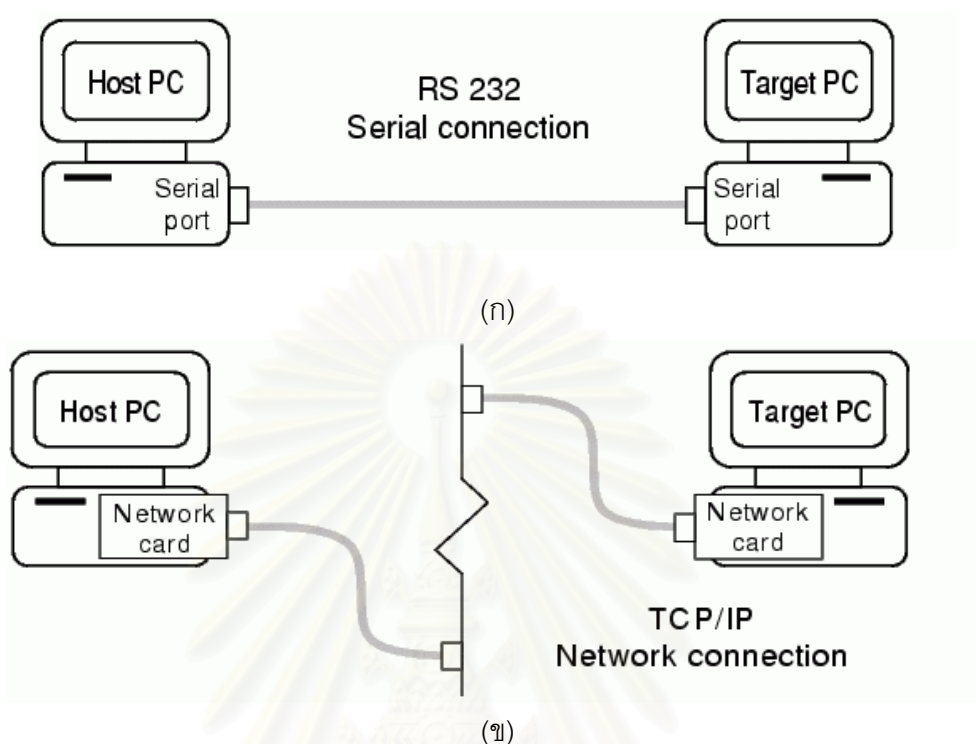


รูปที่ ข.5 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของ xPC Target

xPC Target real-time kernel เป็นระบบปฏิบัติการที่ทำงานในเวลาจริง ซึ่งสามารถควบคุมจากเครื่อง Host PC ทั้งบน Matlab Command line และ Standard toolbox ของ Matlab หรือจะควบคุมผ่านทาง standard Internet browser และ the target PC command-line interface ในขณะที่ Target PC กำลังทำงานจะสามารถเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่างๆ ของระบบสั่งให้แสดงผลการวัดสัญญาณ ณ ขณะนั้น หรือแม้แต่การเก็บค่าที่แสดงอยู่เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป และสามารถแสดงสถานะของการทำงานบนจอของ Target PC

ในการเชื่อมต่อระหว่าง Host และ Target PC สามารถใช้ได้ทั้ง ระบบ RS232 และ TCP/IP Protocol ซึ่งการเชื่อมต่อผ่านระบบ RS 232 โดยการใช้ COM1 หรือ COM2 ในการเชื่อมต่อโดยวิธีนี้จะใช้ค่อนข้างง่ายเนื่องจากใช้เพียงอุปกรณ์พื้นฐานที่มีอยู่กับเครื่องคอมพิวเตอร์ และสนับสนุนการส่งผ่านข้อมูลด้วยความเร็วสูงสุด 115 kBaud สำหรับการเชื่อมต่อผ่านระบบ TCP/IP Protocol นั้นจะค่อนข้างยุ่งยากกว่าเนื่องจากต้องใช้ LAN Card ในรุ่นที่ matlab[®] สนับสนุน แต่สามารถส่งข้อมูลจากได้ในระยะทางที่ไกล

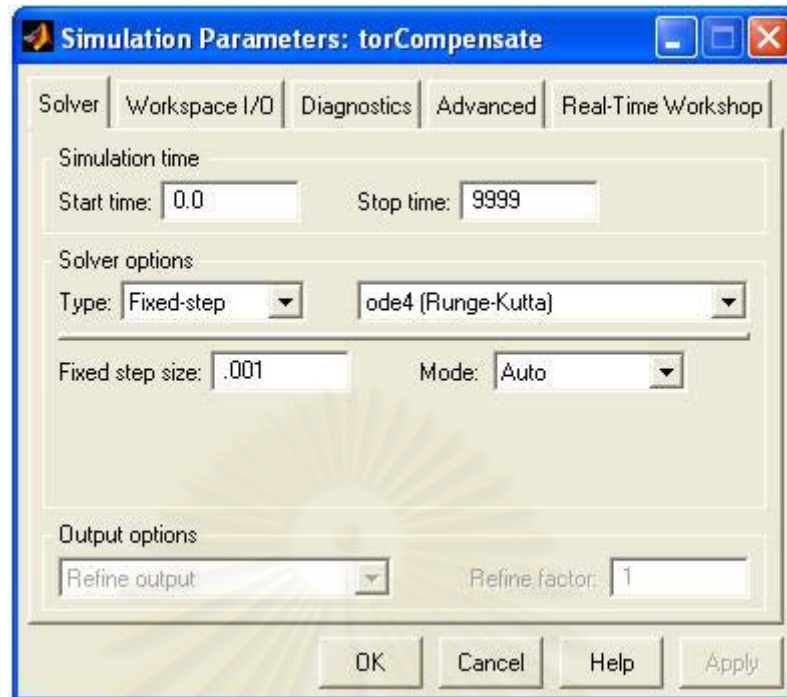
กว่า และสามารถรับและส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงถึง 100 Mbit/s การเชื่อมต่อดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ ข.6



รูปที่ ข.6 การเชื่อมต่อระหว่าง Host PC และ Target PC (ก) ผ่าน RS-232 และ (ข) ผ่านระบบ TCP/IP

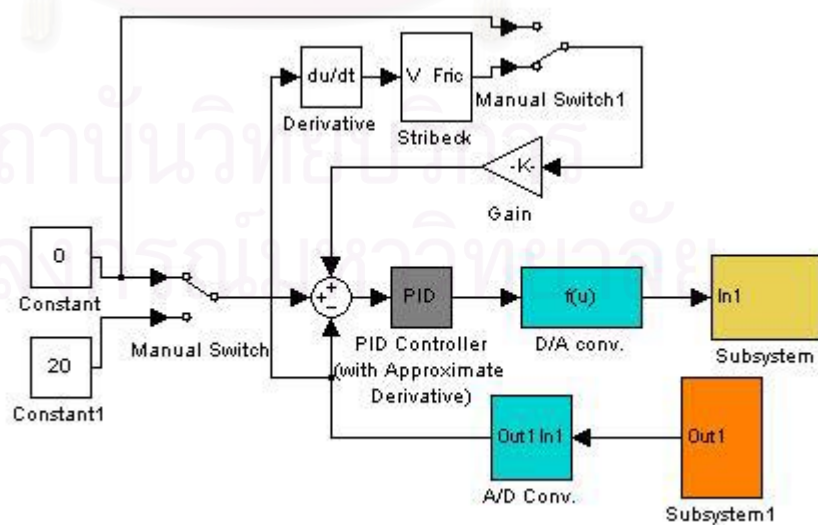
ข.3.3 การควบคุมระบบทดลองผ่านโปรแกรม simulink/xPC Target

หลังจากทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่อง target เสร็จเรียบร้อยแล้ว ก่อนทำการออกแบบระบบควบคุมเราจะต้องตั้งค่าพารามิเตอร์ของโปรแกรม matlab เช่นเดียวกันกับหัวข้อ ข.1 โดยเราจะกำหนดให้ระบบควบคุมใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบ รุนง-กุตตา อันดับสี่ และมีขนาดของเท่ากับ step size 0.001 ดังแสดงในรูปที่ ข.7

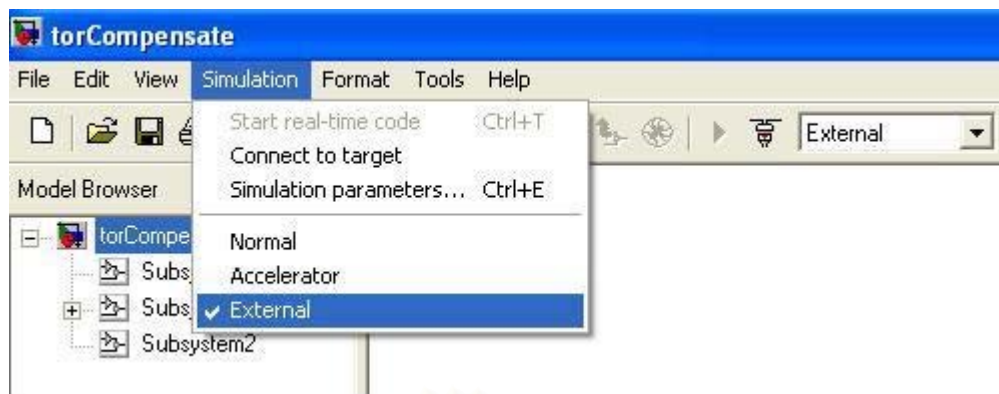


รูปที่ ข.7 การตั้งค่าพารามิเตอร์ของการทดลอง

หลังจากนั้นจึงทำการออกแบบระบบควบคุมบนโปรแกรม simulink™ ดังแสดงในรูปที่ ข.8 โดยทำการต่ออุปกรณ์ทางกลต่างๆ ผ่านการรับส่งข้อมูลโดยบล็อก subsystem เป็นการแปลงคำสั่งควบคุมจากดิจิทัลเป็นอนาล็อกเพื่อสั่งให้ระบบมอเตอร์เคลื่อนที่ และรับสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจรู้ (sensor) ผ่านบล็อก subsystem1 ซึ่งเป็นการแปลงข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจรู้ที่เป็นอนาล็อกเป็นดิจิทัล



รูปที่ ข.8 ระบบควบคุมชุดมอเตอร์กระแสตรงของบริษัท Comdyna, Inc. รุ่น 767



รูปที่ ข.9 เมนูคำสั่งการเชื่อมต่อระหว่าง host PC และ target PC

เมื่อออกแบบตัวควบคุมเสร็จแล้วก็ทำการ build model เพื่อแปลงแบบจำลองของ simulink ให้เป็นภาษาที่ทำงานได้ในเวลาจริง เช่น แปลงเป็นภาษาที่พัฒนามาจากภาษาซี (embedded C format) หรือ C-MEX ที่ถูกพัฒนาโดย matlab หลังจากนั้นก็เปลี่ยนโหมดการจำลองให้เป็นโหมดภายนอก (external) และทำการเชื่อมต่อระหว่าง host PC กับ target PC โดยการเลือกเมนู Connect to target เพื่อทำการควบคุมระบบต่อไป ดังแสดงในรูปที่ ข.9

ภาคผนวก ค.

ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ ค.1 ค่าผิดพลาดทางตำแหน่งเมื่อใส่สัญญาณอินพุตที่ขนาดและความถี่ต่างๆ ลงในระบบ CRS Robotics

		ขนาดแอมพลิจูด (นิวตัน-เมตร)									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
ความถี่ (เฮิรตซ์)	0.1	132	113	16	91	248	348	448	550	650	760
	0.5	146	73	29	118	210	310	410	450	610	710
	1	134	89	45	118	160	240	320	400	450	550
	2	135	60	40	90	117	160	200	270	310	360
	4	173	61	44	58	70	103	120	170	170	210
	6	167	76	45	60	60	82	93	110	110	120
	8	169	55	45	55	74	75	80	65	81	80
	10	145	83	45	58	63	50	82	55	70	60
	20	124	65	32	33	45	65	60	75	65	72
	30	150	21	18	33	37	47	78	43	50	50
	40	109	45	20	20	16	23	28	35	55	55
	50	132	16	14	14	12	25	16	35	55	45
	60	181	16	12	20	20	23	21	45	47	55
	70	215	10	14	15	27	18	12	18	20	28
	80	202	19	15	10	10	8	16	10	14	18
	90	120	50	22	35	42	10	12	15	20	15
	100	92	45	39	35	27	26	10	8	12	5
	200	207	112	80	62	50	50	72	60	30	14
	400	222	218	225	235	216	183	209	117	198	180
	600	216	218	225	243	230	200	215	203	215	200
800	217	217	225	273	248	239	232	206	217	214	
1000	217	218	220	284	256	250	246	209	218	240	

ภาคผนวก ง.

บทความวิจัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง.1 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 16



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การชดเชยแรงเสียดทานในเวลาจริงในระบบทางกลโดยใช้วิธีการเพิ่มสัญญาณความถี่สูง Real-Time Friction Compensation of Mechanical Systems using Feedforward Dither- Based Technique

รัชทิน จันทรเจริญ วัชระ เลิศพิริยสุวัฒน์ สิริณัฐ ชันธิจิรวัดน์ ภิญโญ ศรีคำแหง
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
โทร 218-6642, โทรสาร 218-6642, E-mail fmercc@eng.chula.ac.th

Ratchatin CHANCHAROEN, Vatchara LERTPIRIYASUWAT, Siranat KANTACHEERAWAT, Phinyo SRIKAMHAENG
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,
Pyathai Road, Patumwan, Bangkok, 10300, Thailand
Tel : 218-6642, Fax : 218-6642

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการชดเชยแรงเสียดทานในเวลาจริง โดยศึกษาถึงผลลัพธ์ของสัญญาณความถี่สูง (dither) ที่มีต่อแรงเสียดทานสถิตย์ และออกแบบการชดเชยแรงเสียดทานในเวลาจริงที่เกิดขึ้นในระบบทางกล เนื่องจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นมีลักษณะไม่เชิงเส้นและไม่ต่อเนื่องเนื่องในขณะที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ หรือมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการเคลื่อนที่ วิธีการที่นำเสนอใช้สัญญาณความถี่สูงควบคู่กับการชดเชยแรงเสียดทานสถิตย์ ผลการทดลองกับระบบจานหมุนได้แสดงให้เห็นว่า วิธีการที่เสนอมารถลดค่าความผิดพลาดที่เป็นผลมาจากแรงเสียดทานลงได้

Abstract

In this paper, a real-time friction compensation technique is introduced for a real mechanical plant. The study demonstrates the effects of both dither and friction compensation in the reduction of the steady state error. The friction is nonlinear and discontinuous due to the Coulomb friction. The proposed technique combines dither and friction compensation to efficiently reduce the error. Both simulation and experiment on a real mechanical plant are used to verify the technique.

1. บทนำ

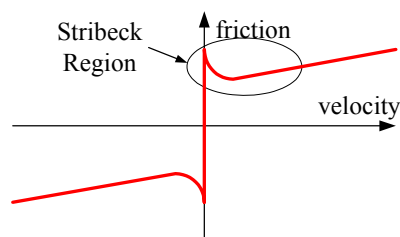
ในงานวิศวกรรมควบคุม ความเสียดทานมีผลต่อความถูกต้องแม่นยำในการควบคุมตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรม เครื่องวัดตำแหน่ง เครื่องกัดชิ้นงานอัตโนมัติ เครื่องมือกลที่ใช้ในระบบนิวเมติกหรือไฮดรอลิก โดยปกติเราจะออกแบบระบบควบคุมโดยไม่คำนึงถึงความเสียดทานเนื่องจากสามารถจำลองได้ยาก โดยเฉพาะที่ความเร็วของระบบต่ำ (ใกล้ศูนย์) ซึ่งจะมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง แรงเสียดทานเป็นสาเหตุที่สำคัญของค่าผิดพลาด (steady-state error) ของตำแหน่ง

ที่ต้องการควบคุม ทั้งยังเป็นสาเหตุของการเกิด limit cycles และทำให้สมรรถนะของระบบลดลง

การใช้ตัวควบคุมแบบ Proportional-plus-Derivative(PD) [1, 2] ควบคุมตำแหน่งแขนกลเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม แต่มีข้อเสียคือ PD Controller ไม่สามารถชดเชยความเสียดทานที่เกิดขึ้นในระบบได้หมดทำให้เกิดค่าผิดพลาดที่ตำแหน่งสุดท้าย ส่วนการควบคุมแบบ PID controller ก็ได้รับความนิยมเช่นกัน มีข้อดีคือค่าผิดพลาดตำแหน่งสุดท้ายมีค่าเป็นศูนย์ แต่มีข้อเสียคืออาจจะทำให้เกิด limit cycle [3] นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องมีการ reset ค่า Integral control เป็นระยะเพื่อป้องกันการอิ่มตัวของมอเตอร์และแอมพลิฟายเออร์

วิธีที่ง่ายและเป็นที่ยอมรับวิธีหนึ่งในการลดค่าความเสียดทานในระบบกล คือการใช้สัญญาณความถี่สูง (dither) ลงในระบบควบคุมเพื่อลดค่าผิดพลาดของตำแหน่งสุดท้าย วิธีการลดค่าแรงเสียดทานโดยวิธีนี้ได้มีการทดลองใช้มานาน แต่ยังไม่มีการศึกษาถึงแนวทางในการเลือกใช้งาน และความถี่ของสัญญาณความถี่สูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาผลของขนาด และความถี่ของสัญญาณรบกวนความถี่สูงที่มีต่อประสิทธิภาพในการควบคุมตำแหน่งของระบบกลที่มีความเสียดทาน

2. ความเสียดทานในช่วงความเร็วต่ำ



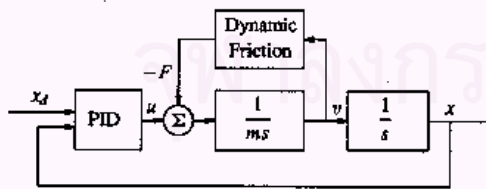
รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียดทานและความเร็วตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Coulomb

เมื่อวัตถุ 2 ชนิดสัมผัสกันและมีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ต่อกันจะทำให้เกิดความเสียดทานระหว่างสองพื้นผิว ที่ผ่านมามีการจำลองรูปแบบของความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างสองผิวสัมผัสโดยคณะวิจัยหลายแห่ง [4] และแบบจำลองที่ได้รับการกล่าวถึงมากที่สุดแบบหนึ่งคือแบบจำลองความเสียดทานที่เป็นฟังก์ชันของความเร็วของ Coulomb & Stribeck ซึ่งเป็นแบบจำลองที่เข้าใจได้ง่าย ดังรูปที่ 1 จากรูปเมื่อพิจารณาที่ความเร็วเข้าใกล้ศูนย์หรือเมื่อวัตถุทั้งสองมีการเปลี่ยนทิศทางของการเคลื่อนที่สัมพัทธ์จะเป็นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนขนาดและทิศทางของแรงเสียดทานซึ่งเป็นช่วงที่มีความไม่เชิงเส้นสูงมาก และเป็นช่วงที่มีผลต่อความแม่นยำของการควบคุมตำแหน่ง รวมทั้งอาจเป็นสาเหตุของปรากฏการณ์ Stick-Slip Motion

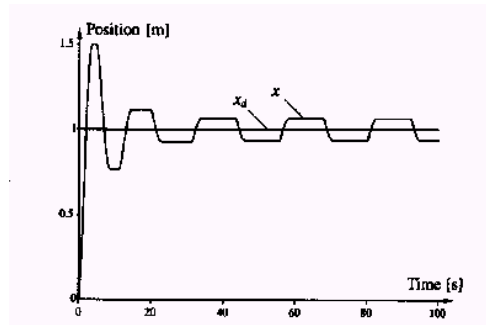
3. Stick-Slip Motion

Stick-slip motion เป็นปรากฏการณ์แบบทั่วๆ ไปที่พบได้ในระบบที่มีความเสียดทาน สาเหตุเนื่องมาจากความจริงที่ว่าแรงเสียดทานสถิตย์มีค่ามากกว่าแรงเสียดทานจลน์ ปรากฏการณ์นี้สามารถพบได้โดยการดึงสปริงที่ติดกับวัตถุบนพื้นผิวใดๆ ที่มีแรงเสียดทาน วัตถุจะเริ่มเคลื่อนที่เมื่อแรงดึงในสปริงมีค่ามากกว่าแรงเสียดทานสถิตย์และเมื่อเกิดการเคลื่อนที่ที่แรงเสียดทานจะลดลงเนื่องจากผลของ Stribeck effect (รูปที่ 1) และแรงที่เกิดขึ้นในสปริงจะลดลงเช่นกัน มวลจะเคลื่อนที่ช้าลงและแรงเสียดทานจะเพิ่มขึ้นจากผลของ Stribeck effect จนทำให้มวลหยุดนิ่งและจะเกิดการสลับเปลี่ยนไปมาระหว่างการเคลื่อนที่และหยุดนิ่ง (sticking and slipping)

ผลจากปรากฏการณ์ Stick-Slip Motion ทำให้เกิดปัญหาในระบบควบคุม ตำแหน่งของอุปกรณ์ทางกลต่างๆ โดยอาจส่งผลให้ระบบเกิดความไม่เสถียรภาพได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบควบคุมที่ใช้ integral controller (รูปที่ 2) ตัวควบคุมจะสะสมค่าผิดพลาดของตำแหน่งและนำไปปรับอัตราการขยายสัญญาณควบคุม จากเหตุที่ค่าความเสียดทานสถิตย์มีค่ามากกว่าความเสียดทานจลน์ เมื่อตัวควบคุมสะสมค่าความผิดพลาดจากแรงเสียดทานแบบสถิตย์อาจเป็นเหตุให้สัญญาณควบคุมมีค่ามากกว่าแรงเสียดทานจลน์และเป็นผลให้สัญญาณควบคุมมีค่ามากเกินไปและไม่สามารถไปหยุดยังตำแหน่งที่ต้องการได้ดังรูปที่ 3



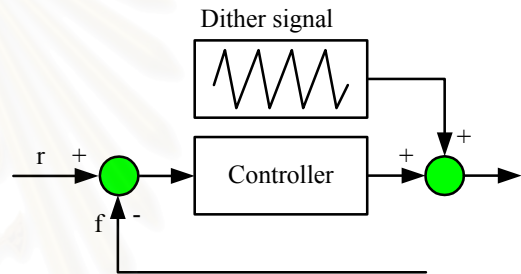
รูปที่ 2 ระบบควบคุม PID [3]



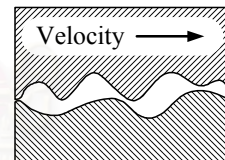
รูปที่ 3 ผลการควบคุมตำแหน่งของ PID Control ตามรูปที่ 2 [3]

4. การใส่สัญญาณความถี่สูง (dither) ลงในตัวควบคุม

ผลของ Stick-Slip ดังกล่าว ซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่วัตถุมีความเร็วต่ำหรือมีการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่นั้น ยกต่อการจำลองแบบของความเสียดทาน ดังนั้นจึงได้มีการใส่สัญญาณความถี่สูง ที่มีขนาดเล็ก (dither) ลงในระบบที่มีความเสียดทานเพื่อลดขนาดของแรงเสียดทานสถิตย์ [2] (static friction or stick friction) ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 4

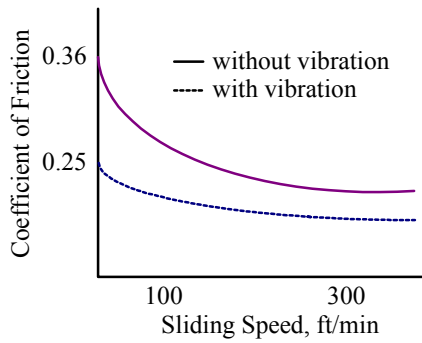


รูปที่ 4 การใส่สัญญาณ dither ลงในระบบควบคุม



รูปที่ 5 คู่มือสัมผัสที่แสดงให้เห็นถึง interacting mountains

รูปที่ 5 แสดงภาพขยายพื้นผิวสัมผัสของพื้นผิว 2 ชนิด ซึ่งมีลักษณะแบบการสัมผัสคล้ายยอดเขา (Interacting mountains) ปรากฏการณ์นี้จะแสดงให้เห็นว่า ค่าความเสียดทานที่เกิดจากการวางกดวัตถุหนึ่งบนอีกวัตถุหนึ่งนานๆ จะทำให้เกิดพันธะระหว่างพื้นผิวยึดผิวทั้งสองไว้ เป็นสาเหตุให้ค่าความเสียดทานเพิ่มขึ้นตามเวลา หยุดนิ่ง ดังนั้นการใส่สัญญาณความถี่สูง ทำให้มีการเคลื่อนที่ระหว่างผิวสัมผัสตลอดเวลา จึงเป็นการลดความเสียดทานที่เพิ่มขึ้นตามเวลาที่วัตถุหยุดนิ่ง [5] แต่การใส่สัญญาณความถี่สูง มีผลเสียคือจะทำให้มีการสั่นของชิ้นส่วนสูงขึ้น หรืออาจเกิดการไม่เสถียรของระบบขึ้นได้ หากค่าสัญญาณที่ใส่มีขนาดและความถี่ไม่เหมาะสมกับระบบที่ควบคุม



รูปที่ 6 สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และ ความเร็วของการหมุน [6]

การใส่การสั่นสะเทือนลงไปในระบบมอเตอร์โดยต่อตัวกำเนิดความสั่นสะเทือนกับเพลของมอเตอร์ ก็เป็นอีกวิธีที่สามารถลดค่าแรงเสียดทานในระบบมอเตอร์ได้ [6] ซึ่งหมายความว่า การสั่นสะเทือนจะเป็นตัวลดขนาดของความเสียดทานที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 6

5. การจำลองผลการควบคุม

พิจารณาระบบงานหมุนซึ่งขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์มีแรงเสียดทานแบบ Coulomb & viscous สมการการเคลื่อนที่คือ $\tau - \tau_f = J\ddot{\theta}$ โดยที่ $J = 0.0011 \text{ kg.m}^2$ ลักษณะของแรงเสียดทานสามารถเขียนได้ด้วยสมการที่ 1 [7]

$$\tau_f = \lambda(\dot{\theta}) \cdot \tau_{slip}(\dot{\theta}) + (1 - \lambda(\dot{\theta})) \cdot \tau_{stick}(\dot{\theta}), \quad (1)$$

โดยที่

$$\lambda(\dot{\theta}) = \begin{cases} 1 & \dot{\theta} > \alpha \\ 0 & \dot{\theta} \leq \alpha \end{cases}$$

$$\tau_{stick} = k\dot{\theta}$$

$$\tau_{slip} = \text{sgn}(\dot{\theta}) \left[k\alpha + (\tau_{slip0} - k\alpha) (1 - e^{-a\dot{\theta}}) \right] + b\dot{\theta}$$

$$\text{sgn}(\dot{\theta}) = \begin{cases} 1 & \dot{\theta} > 0 \\ 0 & \dot{\theta} = 0 \\ -1 & \dot{\theta} < 0 \end{cases}$$

ในการจำลองการควบคุมมอเตอร์นี้ ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Matlab / Simulink ดังแสดงแผนภาพการจำลองในรูปที่ 7 และ กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแรงเสียดทานดังนี้: $\tau_{slip0} = 0.5$, $\alpha = 0.1$, $k = 10$, $a = 0.5$, และ $b = 0.01$ ส่วนของตัวควบคุมมีค่า $K_p = 1$ และ $K_d = 0.52$

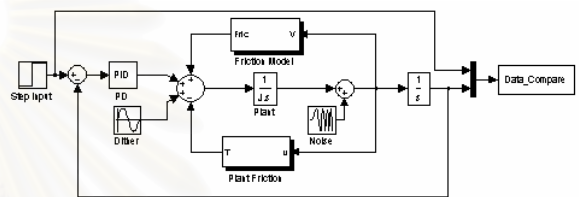
การจำลองผลการควบคุมโดยคอมพิวเตอร์นี้ ทำการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดและความเร็วในการตอบสนองใน 4 กรณีคือ

1. PD controller
2. PD Controller และ สัญญาณ Dither
3. PD Controller และ Feedforward friction compensation
4. PD Controller, สัญญาณ Dither และ Feedforward friction compensation

ในส่วนของแบบจำลองความเสียดทานที่นำมาใช้ในการชดเชยสัญญาณเพื่อลดผลที่เกิดจากแรงเสียดทานของระบบ (Feedforward friction compensation) ได้ใช้แบบจำลองความเสียดทานที่ประกอบด้วย Coulomb & Stribeck friction model [4] ซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$F = \begin{cases} F(v); v \neq 0 \\ F_e; v = 0 \text{ and } |F_e| < F_s \\ F_s \text{sgn}(F_e); \text{otherwise } (v = 0 \text{ and } |F_e| \geq F_s) \end{cases}$$

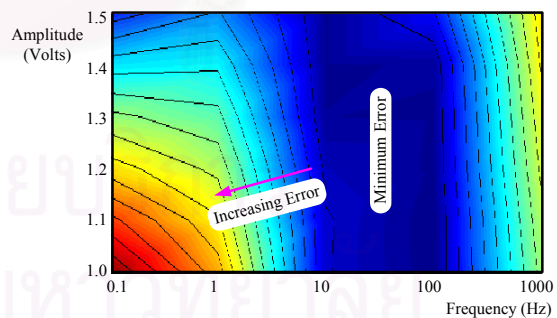
$$F(v) = F_c + (F_s - F_c) e^{-|v/v_s|} + F_r v$$



รูปที่ 7 แผนภาพการจำลองควบคุม

ในการจำลองนี้ ค่าของแรงเสียดทาน Coulomb จะกำหนดให้มีค่าสูงเพื่อแสดงให้เห็นถึงค่าผิดพลาดจากการควบคุมชัดเจนยิ่งขึ้น จากนั้นนำค่า Dither ที่มีขนาดและค่าความถี่ต่างๆ มารวมกับสัญญาณควบคุมพบว่า มีเพียงบางที่ช่วงความถี่เท่านั้น (10-100 Hz) ที่ทำให้ค่าผิดพลาดสุดท้ายลดลง สำหรับขนาดของ Dither จะมีผลต่อการควบคุมน้อยกว่าความถี่ดังแสดงในรูปที่ 8

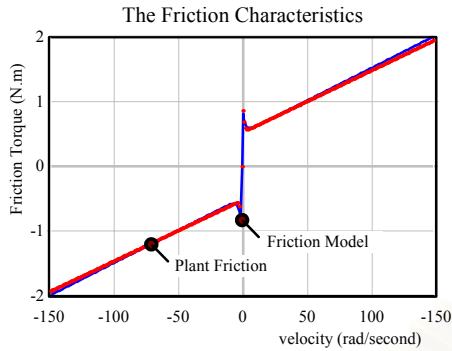
The effect of amplitude and frequency of Dither on the steady state error



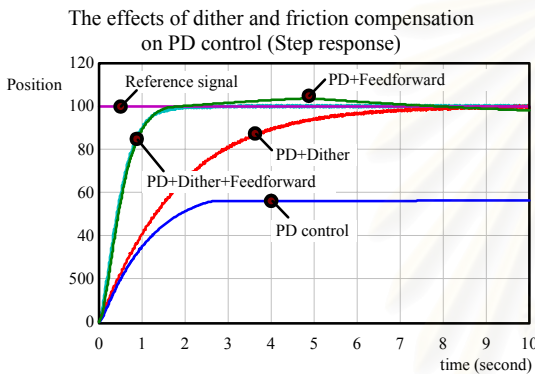
รูปที่ 8 ผลของขนาดและความถี่ของสัญญาณความถี่สูง

ในการชดเชยแรงเสียดทาน (Feedforward compensation) ได้นำแบบจำลองของ Stribeck มาชดเชยแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระบบ และผลจากความไม่สมบูรณ์ของแบบจำลองความเสียดทานทำให้มีค่าผิดพลาดของค่าสุดท้ายจากการควบคุมขึ้น แต่ค่า rise time ของระบบมีค่าลดลง แต่เมื่อใส่ทั้ง Dither และ ชดเชยแรงเสียดทานพร้อมกัน จะทำให้ระบบเข้าสู่ค่าที่ต้องการเร็วขึ้นและค่าผิดพลาดลดลง ดังแสดงในรูปที่ 10 อย่างไรก็ตามค่าตำแหน่งสุดท้ายจะมีการสั่นเล็กน้อยเนื่องจากผลของความถี่และขนาดของสัญญาณความถี่สูง ดังนั้นการเลือกใช้

ขนาดและความถี่ของสัญญาณความถี่สูงจะต้องถูกพิจารณาให้เหมาะสมกับระบบ



รูปที่ 9 ลักษณะของแรงเสียดทานการการจำลอง



รูปที่ 10 ผลของสัญญาณความถี่สูงและการชดเชยแรงเสียดทาน

6. การทดลองและผลลัพธ์

ระบบในการทดลอง: ในการทดลองนี้ จะนำเสนอการชดเชยแรงเสียดทานในเวลาจริงกับระบบจานหมุน ดังแสดงในรูปที่ 10 โดยมีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน 2 ตัว โดยที่แต่ละตัวจะต่อกับ incremental encoder ความละเอียด 4000 PPR มอเตอร์ตัวแรกเป็นมอเตอร์ขับเคลื่อนและต่อกับจานขับ จานขับนี้จะต่อกับจานหมุนหลักด้วยสายพานและชุดเกียร์เพื่อลดความเร็วลง ภาระอินเนอร์เซียของทั้งจานขับและจานหมุนหลักจะสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการเพิ่มลดมวลทองเหลือง และ/หรือ เปลี่ยนตำแหน่งในการยึดมวลเหล่านี้บนจานหมุน ชุดเกียร์สามารถเปลี่ยนอัตราทดได้โดยการเปลี่ยนขนาดของเกียร์ และชุดเกียร์นี้มีกลไกในการสร้าง Backlash ให้กับระบบ

มอเตอร์อีกตัวนั้นจะใช้ในการจำลองแรงเสียดทานแบบ viscous และสิ่งรบกวนระบบ มอเตอร์นี้จะต่อกับจานหมุนหลักผ่านทางชุดเกียร์ที่มีอัตราทด 4:1 ที่ด้านล่างของจานหมุนหลักจะมีเบรกเพื่อใช้ในการสร้างแรงเสียดทานแบบ Coulomb จากกลไกที่กล่าวมานี้ ทำให้สามารถสร้างแรงเสียดทานทั้งแบบ viscous และ Coulomb รวมถึงสิ่งรบกวนและ Backlash ให้กับระบบได้พร้อมกัน

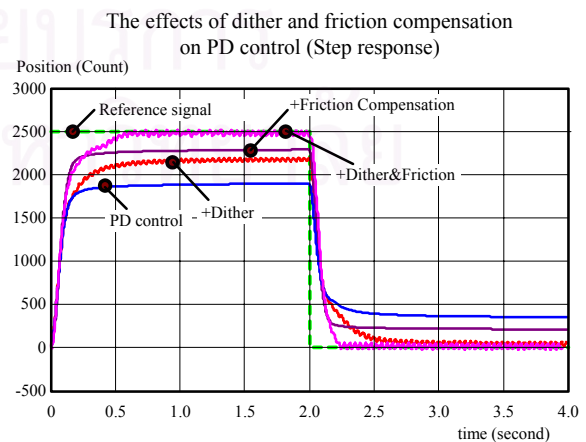


รูปที่ 11 ระบบจานหมุนในการทดลอง

สำหรับระบบประมวลสัญญาณนั้น จะใช้แผงวงจรควบคุมซึ่งมีหน่วยประมวลผล Motorola DSP 56001 และสามารถควบคุมมอเตอร์ได้ถึง 4 แกนพร้อมกัน ที่ความเร็ว 0.884 มิลลิวินาทีต่อครั้ง สัญญาณควบคุมทั้ง 4 แกนมีความละเอียด 16 บิต และสามารถรับสัญญาณจาก incremental encoder ได้ 4 ช่องที่มีความละเอียด 4X

การชดเชยแรงเสียดทานในเวลาจริง

เพื่อให้การควบคุมตำแหน่งของระบบจานหมุน มีความแม่นยำขึ้น จึงได้ป้อนสัญญาณ Dither เข้าสู่ระบบและได้ชดเชยแรงเสียดทาน Coulomb ไปด้วยพร้อมกัน การศึกษาจะเน้นถึงผลลัพธ์ของสัญญาณ Dither และการชดเชยแรงเสียดทาน โดยจะทดลองเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดและความเร็วในการตอบสนองที่เป็นผลมาจากสัญญาณดังกล่าว สัญญาณ Dither สร้างขึ้นจาก Function Generator โดยให้มีขนาดของสัญญาณเท่ากับ ± 1 โวลต์ และมีความถี่เท่ากับ 24.15 Hz และจ่ายให้กับระบบผ่านทางวงจรวัดสัญญาณบนเครื่อง Analog Computer โดยนำไปรวมกับสัญญาณควบคุมก่อนป้อนเข้าสู่มอเตอร์ ในส่วนของการชดเชยแรงเสียดทานแบบ Coulomb นั้นจะใช้การป้อนแรงดันไฟฟ้าคงที่ไปยังมอเตอร์เพื่อหักล้างกับแรงเสียดทานแบบคูลอมบ์โดยตรง (Feedforward friction compensation) สำหรับตัวควบคุมแบบ PD มีค่า $K_p = 0.2$ และ $K_d = 2.26$



รูปที่ 12 ผลของสัญญาณ Dither และการชดเชยแรงเสียดทาน

บทความนี้จะแสดงเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดและความเร็วในการตอบสนองใน 4 กรณีดังที่กล่าวไว้ในผลการจำลองการผลการควบคุม พร้อมทั้งให้คำสัญญาอ้างอิงเป็นแบบขั้นบันได (step response) ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 12

ตารางที่ 1 สรุปค่าความผิดพลาดและความเร็วในการตอบสนองของวิธีการชดเชยความเสียดทานแบบต่าง ๆ

ระบบควบคุม	Rise Time(s)	Steady-State Error (%)
PD Controller	0.18	24
PD+Feedforward	0.11	8.6
PD+Dither	0.17	14
PD+Dither+Feedforward.	0.12	2

จากรูปที่ 12 พบว่าผลที่ได้จากการทดลองโดยใช้ระบบจลนศาสตร์สอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองการควบคุม กล่าวคือ ทั้งวิธีชดเชยค่าแรงเสียดทานโดยใช้แบบจำลองแรงเสียดทานแบบ Coulomb และการนำสัญญาณความถี่สูงเพิ่มเข้าไปในสัญญาณคำสั่งยังผลให้ค่าความผิดพลาดสุดท้ายลดลงและมีผลต่อ rise time ดังแสดงในตารางที่ 1

7. บทสรุป

บทความนี้แสดงให้เห็นถึงผลของสัญญาณความถี่สูง (dither) และการชดเชยแรงเสียดทานที่มีต่อค่าความผิดพลาดของการควบคุมระบบทางกลที่มีแรงเสียดทาน สัญญาณความถี่สูงจะมีผลช่วยให้ค่าความผิดพลาดลดลงอย่างชัดเจน ในขณะที่การชดเชยแรงเสียดทานนั้นอาจไม่สามารถลดให้ค่าความผิดพลาดเป็นศูนย์ได้เนื่องจากแบบจำลองของแรงเสียดทานอาจไม่แม่นยำ แต่การชดเชยแรงเสียดทานจะช่วยให้ความเร็วของการควบคุมดีขึ้น เมื่อใช้ทั้งสัญญาณความถี่สูงพร้อมกันกับการชดเชยแรงเสียดทานจะทำให้ลดค่าความผิดพลาดลงและเพิ่มความเร็วในการควบคุมได้พร้อมกัน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ให้ทุนสนับสนุนในงานวิจัยนี้ให้เสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนให้ผู้วิจัยได้มีเวลาในการทำงานวิจัยนี้อย่างเต็มที่

รายการอ้างอิง

[1] Sooyong Lee and Haruhiko Asada, "Assembly Automation using Vibratory End Effector: Modeling and Stability Analysis", IEEE conference on Robotic and Automation, Albuquerque, New Mexico, 1997, pp 1980-5.

[2] Susan L. Iprid and Haruhiko Asada, "Tuned Dither for Friction Suppression During Force-Guided Robotic Assembly", IEEE conference on Robotic and Automation, 1995, pp 310-5.

[3] C. Canudas de wit, H. Olsson, K. J. Astrom, and P. Lischinsky, "A New Model for Control of System with Friction," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 40, No.3, Mar 1995. pp 419-25.

[4] Karl J. Astrom, "Control of System with Friction," 1999. <http://www.control.lth.se>

[5] Naomi Elizabeth Ehrich and P.S. Krishnaprasad, "An Investigation of Control Strategies for Friction Compensation," 1991. http://www.isr.umd.edu/TechReports/ISR/1991/MS_91-4/

[6] ชลิต สินสุข, "ผลของการสั่นสะเทือนที่มีต่อความเสียดทานจลน์," วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พ.ศ. 2512.

[7] J. Adam and S. Payandeh, "On methods for Low Velocity Friction Compensation: Theory and Experimental Study," Journal of Robotic Systems, Vol. 13, No. 6, pp. 391-404, 1996.

๓.2 The Third Asian Conference on Industrial Automation and Robotics



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REAL-TIME FRICTION COMPENSATION OF A DC MOTOR SYSTEM USING FEEDFORWARD DITHER-BASED TECHNIQUE

P. Srikamhang, and R. Chancharoen,
Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University,
Thailand.
E-mail: Phinyo.S@student.chula.ac.th

Abstract: This paper presents a real-time friction compensation for a mechanical plant. The study demonstrates effectiveness of both dither signal and friction compensation techniques in the reduction of the steady state error caused by stick-slip friction. The experimental results on a DC motor system show that the dither signal significantly improves the steady state error while the friction compensation reduces the time constant. In addition, both dither based and friction compensation techniques can be combined to reduce both types of errors. In addition, the selection method for the amplitude and frequency of dither signal that optimally reduce the steady state error are presented. Both simulations and experiments are used to validate the proposed technique.

Key words: friction compensation, dither, stick-slip, PD controller.

1. INTRODUCTION

Friction is highly nonlinear at low velocities and poses a considerable challenge in the control of mechanical systems such as machine tools, robots, tracking mechanisms, etc, which require precision positioning. Friction is commonly neglected since the traditional PID controller with appropriate gains normally gives a stable performance with error within the acceptable limit. However, friction compensation may be required for high precision positioning or system control at low velocities. Friction compensation is a challenging task since it is difficult to model and barely understood. In recent years, there has been progress in developing friction models for compensation. Both dynamic and empirical friction models have successfully captured pertinent friction characteristics such as Dahl, LuGre, Bliman-Sorine and Bristle model, etc. (Armstrong-Hélouvy & Dupont, 1993; Haessig, Jr. & Friedland, 1991)

The presence of friction often imposes limits on positioning, tracking performance and accuracy of position control. This phenomenon causes a limit cycles (Canudas et al, 1995) and positioning error in control systems. If the system with friction is linear and operated only at high velocities without changing directions, i.e., without crossing zero velocity, friction can be modeled as a linear function of velocity (Armstrong-Hélouvy & Dupont, 1993; Haessig, Jr. & Friedland, 1991). A simple PD controller with a velocity feedback control can compensate for friction. On the other hand, if system operated at low velocities or with direction reversals, the ordinary PD control may be ineffective. When the traditional integral control is included in the feedback controller, the presence of stiction causes the system to stick near zero-velocity position (Lee & Asada, 1997; Iprí & Asada, 1995) and start to move when the controller output is greater than the level of stiction force.

On the other hand, the simple high frequency dither technique reduces the effect of friction between parts in relative motion. A successful example is the use of dither in gyroscopes for autopilots in the 1940s, where dither signal was obtained simply by a mechanical vibrator (Ehrich & Krishnaprasad, 1991).

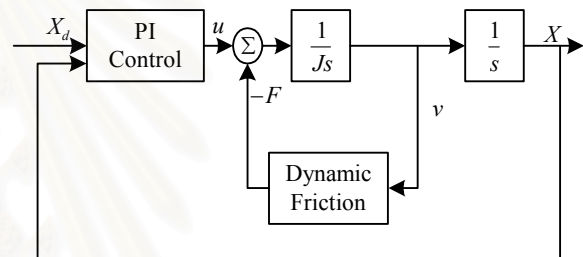


Figure 1. Block diagram for PI-Control.

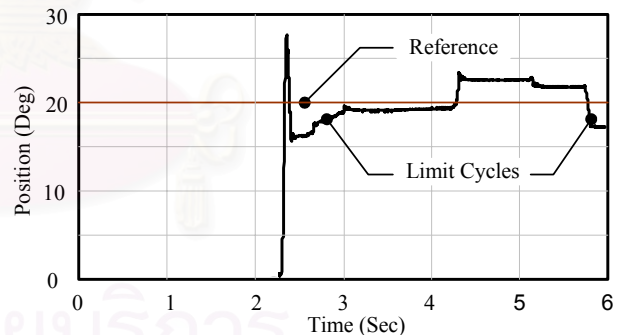


Figure 2. Limit Cycles on DC Motor System.

The mechanism of the dither-based technique introduces extra forces to move the system before it reaches the stiction level. It is introduced in the position control of pneumatic lifters system (Maeda et al., 2000), which does not induce limit cycles, commonly found in integral control.

The paper also addresses the model based friction compensation. The model of friction is determined offline and used to estimate and compensate for the instantaneous friction. This technique improves the transient performance.

This study applied both techniques, dither signal and friction compensation through a friction model, to reduce steady-state error on a DC motor and improve the transient performance. Both simulations and experiments demonstrate the reduction of the error and the improvement of transient response.

2. STICK-SLIP FRICTION

Stick-slip friction is a common friction phenomenon occurred in low velocity system (Armstrong-Hélouvy, 1993). It manifests itself as repeated sequences of sticking between two surfaces with static friction, followed by sliding or slipping of the two surfaces with kinetic friction. It is found in the transmission elements in robotic manipulators such as harmonic drive, gears, pulleys etc.

Stick-slip is a seriously problem in low speed motion, causing a stable limit cycle near a reference position with integral control, as shown in Figure 1. Hence, a system under integral control is unstable when the moving body is stuck and the control gain is too high. As time progresses, the integral error, which is building up to move the body from its stuck configuration, becomes so high that the body overshoots the origin and comes to rest at another position. This phenomenon is illustrated by DC motor experimental results as shown in Figure 2.

3. FRICTION COMPENSATION

There are two major friction compensation techniques, model-based and non-model-based friction compensation. Examples of the non-model-based friction compensation techniques include stiff PD control, integral control, dither, impulsive control, and joint torque control, etc. The increase of the damping or the stiff of the system can eliminate the stick-slip motion; by increasing the PD gain, the stiff of the system increases. This is a very simple way to control the system with friction. However, the high control effort is limited by the hardware. Normally, the stiff PD control is used for a stable tracking while the integral control is used to minimize the steady state error. Nevertheless, the system exhibits limit cycles at low or zero velocity tracking. In addition, integral control may be ineffective at velocity reversals. Integral windup is normally reset at velocity reversals, causing the minimal effect of integral action when most needed to overcome the stiction.

The dither-based technique can effectively improve the control performance of the system with friction. This technique is mainly used in this study. The other similar technique, called impulsive control, applies the impulses to the system at low or zero velocity.

For the model-based friction compensation, the estimated friction torque is calculated by the friction model and an equal and opposite torque is applied to the system to cancel out the instantaneous friction torque. The model-based friction compensation may decrease the need for the high servo gains. The Coulomb friction model is the simplest and widely used but the richer friction models can further improve the performance. The major difficulty is the friction modeling at very low velocities. Several practical problems must be addressed, such as the almost undetectable nonlinear phenomena, and the unmeasurable internal states of the model, etc. In this study, the Coulomb viscous friction model is used for the friction compensation since it is most suitable for typical system sensing.

As mentioned earlier, the study has focused on two effective friction compensation techniques, dither-based and the use of Coulomb viscous friction model. Both techniques are combined together to take advantages of each method.

3.1 Feedforward Dither-based Technique

Dither is a practical technique to reduce the nonlinear effects of friction at low velocities. The mechanism of dither introduces extra forces to move the system before the stiction level is reached. In 1969, a mechanical vibrator was used to

reduce the coefficient of kinetic friction in servo system, as shown in Figure 3. Electrical dither signals can also be superimposed on the command signals generated by the controller as shown in Figure 4. The frequency of dither is normally much higher than the frequency of the command signals.

3.2 Model Based Friction Compensation

Several schemes for model-based friction compensation have been proposed (Adams & Payandeh, 1996; Ehrich & Krishnaprasad, 1991). If a servomechanism is operated at low velocity or with velocity reversal, then effective friction compensation is required to achieve good precision. To obtain an effective friction compensation, the velocity has to be measured or estimated with good resolution and small time delay. The mechanism of model based friction compensation is very simple. The friction force is estimated using the appropriate friction model, which may be determined offline. The estimated signal is then used to compensate the real friction by adding to the control signal. This is showed in the block diagram in Figure 5.

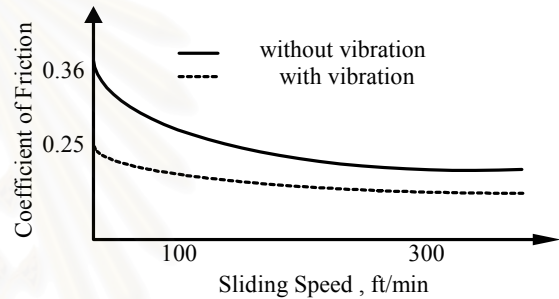


Figure 3. Friction Coefficient in Motor System. (Sinsookh, 1969)

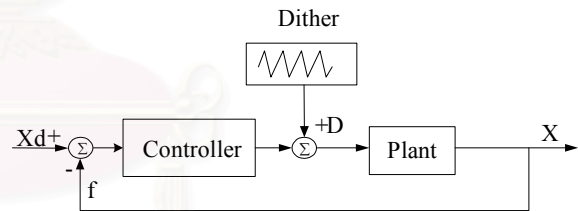


Figure 4. System with Dither.

This paper addresses the effects of friction compensation to improve a positioning control of a DC motor by dither based technique. The effect of the amplitude and frequency of dither is investigated. The model based friction compensator is also discussed and demonstrated.

4. SIMULATION

The simulation is used to study the role of the nonlinear friction that was strongly related to the steady-state error in a motor system. In the simulation, both inherent nonlinear characteristics of the motor system and the simulated friction found in the experimental equipment, are taken into account. The dynamics of the DC motor system is:

$$J\ddot{\theta} = \tau_{motor} - \tau_f \quad (1)$$

where J is the motor's inertia = 0.0011 kg.m². Friction behavior can be expressed as follows (Adams & Payandeh, 1996):

$$\tau_f = \lambda(\dot{\theta}) \cdot \tau_{slip}(\dot{\theta}) + (1 - \lambda(\dot{\theta})) \cdot \tau_{stick}(\dot{\theta}) \quad (2)$$

where:

$$\lambda(\dot{\theta}) = \begin{cases} 1 & \dot{\theta} > 0 \\ 0 & \dot{\theta} \leq 0 \end{cases},$$

$$\tau_{stick} = k\dot{\theta},$$

$$\tau_{slip} = \text{sgn}(\dot{\theta}) \left[k\alpha + (\tau_{slip,0} - k\alpha)(1 - e^{-a\dot{\theta}}) \right] + b\dot{\theta},$$

$$\text{sgn}(\dot{\theta}) = \begin{cases} 1 & \dot{\theta} > 0 \\ 0 & \dot{\theta} = 0 \\ -1 & \dot{\theta} < 0 \end{cases},$$

In the simulation, friction parameters are given as $\tau_{slip,0} = 0.8$, $\alpha = 0.1$, $k = 15$, $a = 0.5$, and $b = 0.01$.

The mathematical model of the friction compensator is expressed by Equation 3. The friction model is assumed to be imperfect and the estimated friction does not match the real friction. This is important for realistic simulation. The simulation block diagram is shown in Figure 5. The compensator is modeled by Coulomb and Stribeck's model as follows (Armstrong-Hélouvy & Dupont, 1993):

$$F = \begin{cases} F(v); v \neq 0 \\ F_c; v = 0 \text{ and } |F_e| < F_s \\ F_s \text{sgn}(F_e); \text{otherwise } (v = 0 \text{ and } |F_e| \geq F_s) \end{cases} \quad (3)$$

where

$$F(v) = F_c + (F_s - F_c)e^{-|v|/v_s} + F_r v$$

The simulation is performed on Matlab[®]/Simulink[™] and used for a comparative study on four types of control techniques, consisting of PD, PD+compensator, PD+dither, and PD+compensator+dither. The proportional and derivative gains are 2 and 0.2 respectively. The dither is a sinusoidal signal with the amplitude equal to the maximum static friction of 1.5 N.m. The optimum frequency of 100 Hz is determined from the range between 0.1 to 1000 Hz. The step command of 20 deg is applied to the system

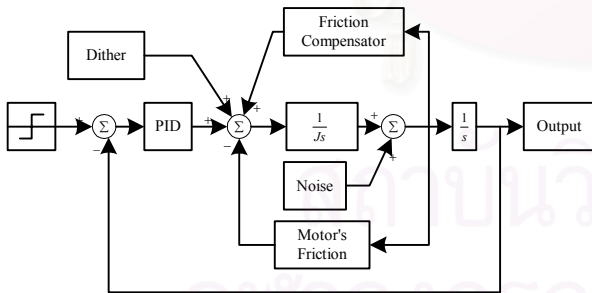


Figure 5. Block diagram of control system for DC motor.

The PD plus friction compensator demonstrates a good rise time (0.06 sec) compared to the only PD control (0.11 sec) while the PD plus dither significantly reduces the steady state error to 0.0004%. However, when both friction compensator and dither are used, the rise time decrease (0.09 sec) but the steady state error also increases (0.148 %).

Table 1. Errors analysis by simulation.

Control Techniques	Error (%)	Rise-time (sec)
PD	0.0490	0.11
PD + Compensator	0.0052	0.06
PD + Dither	0.0004	0.11
PD + Compensator + Dither	0.1480	0.09

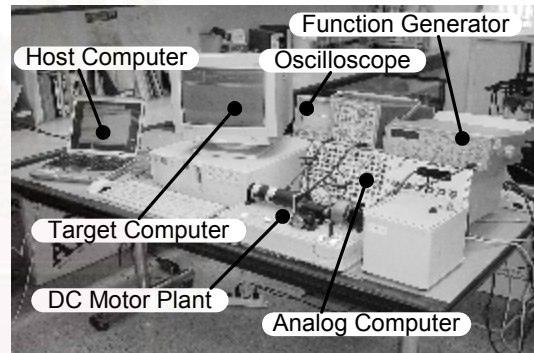
Table 1 summarizes the comparison between four techniques, which used to control the DC motor system. The PD plus dither gives the minimum steady state error while the PD plus friction compensation has the minimum rise time. When both dither and friction compensator are applied, the command input to the motor is much larger than necessity overcome the static friction and thus the steady state error increases.

5. EXPERIMENT AND RESULTS

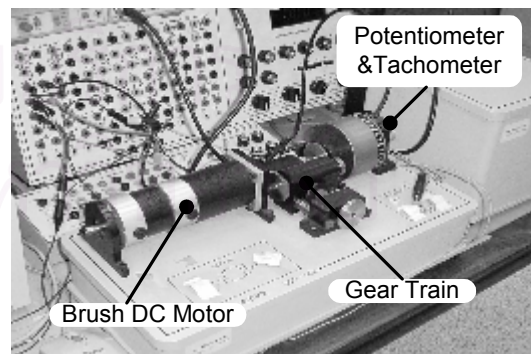
5.1 Experimental Setup

The DC motor system model 767 from Comdyna, Inc. is used for the experimental study. The motor system has a mechanism for adjusting the friction force as shown in Figure 6. This system is designed to emulate a typical rotational mechanical system. A mass inertia is attached the motor via gear transmission and friction adjusting assembly. The precision potentiometer model 6539 from BOURNS Co. is coupled at the end of the mass.

The input and output signals are connected between plant and controller via an analog computer model GP-6 from Comdyna, Inc. The Matlab[®]/Simulink[™] -xPC Target is used for a real-time control of the system. The PA-ST12 (-H) card from Acqtec Corporation is employed for data acquisition and control. The card communicates with target computer via ISA bus. Two Accton LAN cards are installed on both a host computer and a target computer, and is used for a host and target communication via TCP/IP.



(a) Experimental Setup.



(b) The DC motor system.

Figure 6. The DC motor system.

The Matlab[®]/Simulink[™] -xPC allows us to develop a control on the host computer in the Microsoft[®] Windows 2000 environment. Once the control model is designed, it can be downloaded to the target PC. The target PC runs the control algorithm in real time. The sampling time of the control system is set to 0.001 sec.

The dither signal is generated by the signal generator and is superimposed to the control signal via the summer circuit on the analog computer. Thus, the frequency of the dither is not limited to the speed of the real time operating system and can be as high as the signal generator can generate.

The friction compensator is determined offline and is implemented on Simulink™-xPC. The Coulomb viscous is used for the friction model since it is closed to the friction characteristics that is detected with the system sensing.

5.2 Experiment Procedure

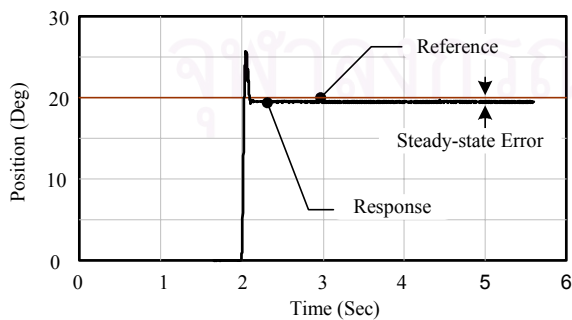
First, the maximum static friction torque is identified by slowly applying the torque until the motor begins to rotate. This torque is the maximum static friction and is found to be 0.6 N.m. for the employed system. This value is used as the reference for the design of the friction compensator and dither amplitude.

The reference command step of 20 degrees is used. In the experiment, four control techniques are used to control the DC motor system. There are PD, PD+compensator, PD+dither, and PD+compensator+dither, as in the simulation. The dither is a sinusoidal signal generated by the signal generator. The amplitude and frequency of the dither signal are ± 0.6 N.m. and 100 Hz, respectively. The friction compensator is a velocity-based model, expressed by Equation 3. The maximum static friction in the model is 0.3 N.m. The step responses from each technique are shown in Figure 7.

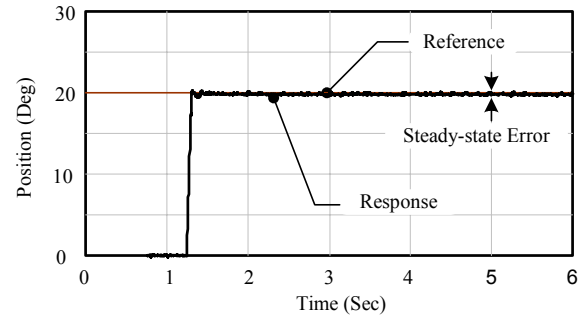
The experimental results agree with the simulation, i.e., the PD+dither technique gives a minimum steady state error (0.7 % error) while the PD+compensator gives the minimum rise-time (0.04 sec).

Table 2 shows the errors when the various amplitudes of dither are considered. The dither's amplitude varies from ± 0.4 to ± 0.7 N.m while the frequency is fixed at 100 Hz. In this experiment, the PD and friction compensation is already applied. This is to study the effect of amplitude of dither when the both dither and friction compensation are both applied to the PD controller. The minimum error occurs when the amplitude is equal to ± 0.5 N.m, which is less than the static friction of ± 0.6 N.m. This is because a part of friction has already been cancelled by compensator and a smaller amplitude of dither should be used. The larger amplitude of dither such as ± 0.6 and 0.7 N.m. do increases the error.

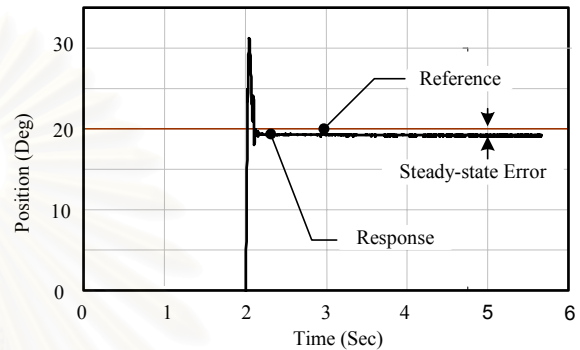
Both dither based and model based friction compensation can be integrated. However, the amplitude of dither should be smaller than the static friction in order to gain the advantages of both techniques.



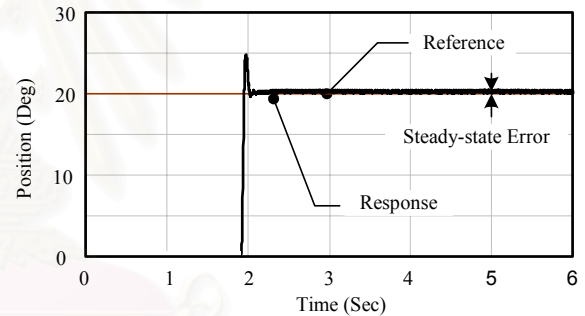
(a) PD Control.



(b) PD and Dither control.



(c) PD and Friction Compensation.



(d) PD with Dither and Friction Compensation.

Figure 7. Step responses with the control techniques

Table 2. The effect of dither's amplitude.

Amplitude of Dither (N.m)	Error (%)
± 0.4	9.00
± 0.5	0.15
± 0.6	7.05
± 0.7	5.90

5.3 Error Boundary Analysis

In the section 5.2, the steady-state errors are found to depend on the frequency and amplitude of dither. In this section, the boundary of error of a different mechanical system, i.e., the waist joint of the CRS Robotics system is investigated. This robotics system, shown in Figure 8, is equipped with more accurate positioning sensors than that of the DC motor system in the earlier experiment. The positioning sensors of the CRS Robotics system are optical incremental encoders while the sensor of the DC motor system is a high precision potentiometer.

The maximum static friction of the waist joint in this CRS robotics system is determined as 0.3 N.m. In this study, both dither amplitude and frequency are varied to see the effects of both parameters. The frequency of dither is varied from 0.1 to 1000 Hz and the amplitude from 0.1 to 0.5 N.m. Both

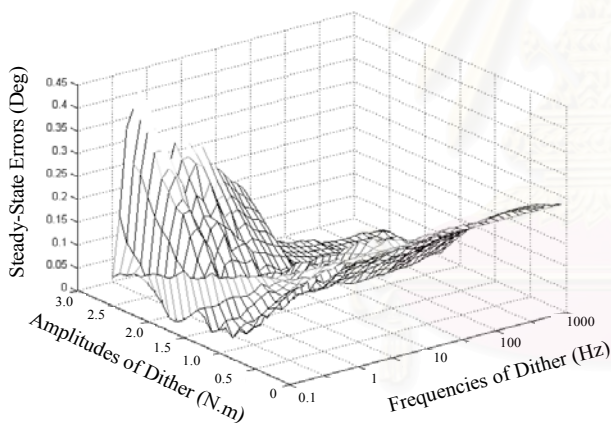
simulation and experiment are performed and the results are shown in Figure 9. In the simulation, the maximum static friction of 1.5 N.m. is used while 0.3 N.m. is used in the experiment.

Both simulation and experiment demonstrate that the amplitude of dither closed to the static friction (1.5 in simulation and 0.3 in experiment) can effectively reduce the steady state error.

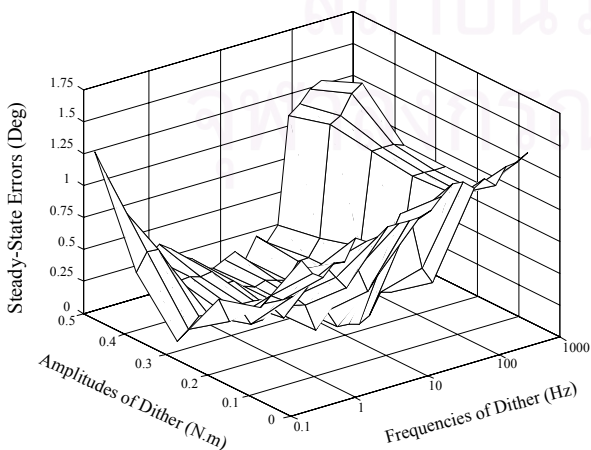
When the dither frequency is between 10 to 120 Hz, dither successfully decreases the steady state error. In contrast to the real experimentation, the dither of higher frequency (>120 Hz) is effective in the simulation. This discrepancy is due to the fact that the frequency exceeds the bandwidth of the servo system. The dither frequency less than 10 Hz is too low and unable to compensate the stiction completely.



Figure 8. CRS Robotics system.



(a) Simulation result.



(b) Experimental result on CRS Robotics system

Figure 9. The effects of the frequency and amplitude of dither.

6. CONCLUSIONS

The dither can drastically decrease the steady state error of a system with stick slip friction. The amplitude of the dither should be as high as the maximum static friction while the frequency must be within the effective range. The friction compensator can decrease the error and significantly reduce the rise time. Since the friction model is not perfect, the friction compensator cannot completely cancel the real friction. The dither-based technique can be integrated to the friction compensator to improve the effectiveness of the compensator. For the integration, the dither amplitude is not as high as the maximum static friction. The experiment may be used to determine the appropriate amplitude for this case.

7. ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to thank Dr. W. Lertpiriyasawat for his valuable suggestions regarding to friction models and experimental implementation issues. Finally, I would also thank MTEC for financial support.

REFERENCES

- Brian Armstrong-Hélouvy & Pierre Dupont (1993). Friction Modeling for Control, Proceeding of the American Control Conference, pp. 1905-9, San Francisco, June 1993, California.
- Brian Armstrong-Hélouvy (1993). Stick Slip and Control in Low-Speed Motion, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 38, No.10, pp. 1483-96, October 1993.
- C. Canudas de wit, H. Olsson, K. J. Astrom & P. Lischinsky (1995). A New Model for Control of System with Friction, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 40, No.3, pp 419-25, Mar 1995.
- Chalit Sinsookh (1969). The Effect of Mechanical Vibration on Kinetic Friction, Thesis, Department of Mechanical Engineering, Chulalongkorn University, 1969.
- D.A. Haessig, Jr. & B. Friedland (1991). On the Modeling and Simulation of Friction, ASME Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, vol.113, 1991, pp 354-62.
- J. Adams & S. Payandeh (1996). On Methods for Low Velocity Friction Compensation: Theory and Experimental Study, Journal of Robotic Systems, Vol. 13, No.66, pp 901-404, 1996.
- Naomi Elizabeth Ehrich & P.S. Krishnaprasad (1991). An Investigation of Control Strategies for Friction Compensation, 1991, available from: http://www.isr.umd.edu/TechReports/ISR/1991/MS_91-4/MS_91-4.phtml.
- Satoshi Maeda; Yukio Kawakami & Kazuo Nakano (2000). Position Control of Pneumatic Lifters, 2000, Available from: http://www.callisto.si.usherb.ca/~fluo2000/PDF/FI_033.pdf.
- Sooyong Lee & Haruhiko Asada (1997). Assembly Automation using Vibratory End Effector: Modeling and Stability Analysis, IEEE conference on Robotic and Automation Albuquerque, pp 1980-5, New Mexico, 1997.
- Susan L. Ipri & Haruhiko Asada (1995). Tuned Dither for Friction Suppression During Force-Guided Robotic Assembly, IEEE conference on Robotic and Automation, pp 310-5, 1995.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายภิญโญ ศรีคำแหง เกิดเมื่อวันที่ 30 ธันวาคม พ.ศ. 2520 เป็นชาวลำปาง เข้าศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนอัสสัมชัญลำปาง เมื่อสำเร็จการศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่หก ได้สอบเข้าศึกษาต่อในระดับมัธยมที่โรงเรียนบุญวาทย์วิทยาลัย หลังจากนั้น ได้เข้าศึกษาต่อในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในปีการศึกษา 2542 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2543



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย