

การประมาณค่าพารามิเตอร์แบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น
ในระบบขับเคลื่อนแทนเชิงเส้น

กิตติวงศ์ สุธรรมโน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-533-424-3

**PARAMETER ESTIMATION OF NONLINEAR
FRICTION MODEL FOR A LINEAR SLIDE BED**

Kittiwong Suthamno

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology**

Academic Year 2004

ISBN 974-533-424-3

การประมาณค่าพารามิเตอร์แบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น
ในระบบขับเคลื่อนแท่นเชิงเส้น

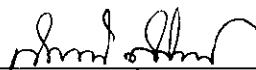
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



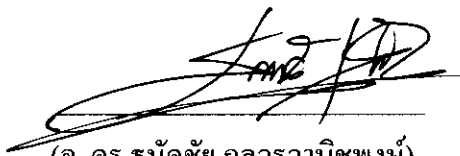
(ผศ. ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว)

ประธานกรรมการ



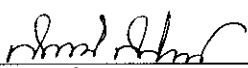
(รศ. น.ท. ดร.สรารุติ สุจิตจร)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(อ. ดร.ชนัดชัย กุลวรรณิพงษ์)

กรรมการ



(รศ. น.ท. ดร.สรารุติ สุจิตจร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ



(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กิตติวงศ์ สุธรรมโน : การประมาณค่าพารามิเตอร์แบบจำลองแรงเสียดทาน

ไม่เป็นเชิงเส้นในระบบขับเคลื่อนแท่นเชิงเส้น (PARAMETER ESTIMATION
OF NONLINEAR FRICTION MODEL FOR A LINEAR SLIDE BED)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ น.ท. ดร.สราวุฒิ สุจิตจร, 152 หน้า

ISBN 974-533-424-3

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาพฤติกรรมของแรงเสียดทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น
ดำเนินการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานโดยพึ่งพาวิธีปัญญาประดิษฐ์ทั้ง
แบบออฟไลน์ (วิธีค้นหาแบบตาบอดและจินเนติกอัลกอริทึม) และแบบออนไลน์ (ฟิชชี่ลอจิก) โดยเริ่ม
จากการศึกษาผลของแรงเสียดทานที่มีต่อการเคลื่อนตัวของแท่น พร้อมสำรวจวรรณกรรมด้าน
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแรงเสียดทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น ทำการทดสอบระบบขับเคลื่อนแท่น
เชิงเส้นให้เคลื่อนตัวด้วยความเร็วต่ำมาก เพื่อบันทึกพฤติกรรมทางพลวัตของระบบขับเคลื่อนแท่น
สำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบจำลอง ได้มีพัฒนาโปรแกรม MATLAB ดำเนินการ
ประมาณค่าแบบออฟไลน์ และพัฒนาโปรแกรมภาษาซีในการประมาณค่าแบบออนไลน์ เพื่อให้ได้
ผลตอบสนองของระบบที่มีความถูกต้องโดยการเปรียบเทียบกับวิธีการที่ต่างกัน

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2547

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

KITTIWONG SUTHAMNO : PARAMETER ESTIMATION OF
NONLINEAR FRICTION MODEL FOR A LINEAR SLIDE BED.

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SARAWUT SUJITJORN, Ph.D.

152 PP. ISBN 974-533-424-3

FRICTION MODEL/LINEAR SLIDE BED /ADAPTIVE TABU SEARCH
/GENETIC ALGORITHM/FUZZY LOGIC

The objectives of this thesis are to study the behaviour of nonlinear friction, and to estimate the parameters of a friction model. The parameter estimation employs some artificial intelligent techniques of both offline (e.g. adaptive tabu search, and genetic algorithm) and online (fuzzy logic) approaches. The work firstly reviews some existing nonlinear friction models, then investigates the effects of the friction on the motion of the slide bed. The recorded performance of the slide bed is used for the model parameter estimation. Program codes in MATLAB and C are for offline and online estimations, respectively. Results obtained from various methods are compared to confirm the correctness.

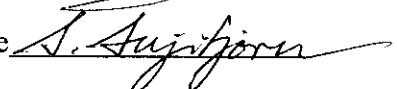
School of Electrical Engineering

Academic Year 2004

Student's Signature



Advisor's Signature



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่างๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.สราวุฒิ สุจิตจร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งกำลังใจ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยโดยตลอด

คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ช่วยให้ คำปรึกษาทางด้านวิชาการ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอบคุณ คณาจารย์แผนกวิชาไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตภาค ตะวันออกเฉียงเหนือ ที่สนับสนุนอุปกรณ์ในการดำเนินงานจัดทำวิทยานิพนธ์และให้กำลังใจมาโดย ตลอด

ขอบคุณ วิศวกรศูนย์เครื่องมือ รวมทั้งเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานและรวมทั้งในการจัดหา เครื่องมือต่างๆ

ขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่ให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดย ตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีต และปัจจุบัน และขอกราบขอบคุณบิดา มารดา รวมถึงครอบครัว ที่ให้ความรัก กำลังใจ การเลี้ยงดู ที่ดีรวมทั้งเป็นผู้ส่งเสริมทางการศึกษามาโดยตลอด จึงทำให้ผู้เขียนได้ประสบความสำเร็จใน ชีวิตเรื่อยมา

กิตติวงศ์ สุธรรมโน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ(ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ(ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขีดกลางเบื้องต้น	2
1.3.1 ขีดกลางย่อยเบื้องต้นในการวิจัยวิทยานิพนธ์นี้	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย	2
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 ทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 บทนำ	5
2.2 แรงเสียดทานในระบบเชิงกล	5
2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแรงเสียดทาน	6
3 กรอบแนวคิดของงานวิจัย	12
3.1 กล่าวนำ	12
3.2 กรอบแนวคิดของงาน	12
4 การค้นหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองแบบออฟไลน์ด้วยหลักการจิ้นเนติกอัลกอริทึม	18
4.1 บทนำ	18

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2	จินเนติกอัลกอริทึม	18
4.2.1	หลักการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึม	18
4.2.2	ขั้นตอนการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึม	19
4.3	การจำลองสถานการณ์มวลไหลที่มีผลกระทบจากแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น	20
4.4	การค้นหามิติเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทาน	25
4.4.1	ขั้นตอนทดสอบและจัดเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการค้นหาแบบจำลองแรงเสียดทาน	25
4.4.2	การค้นหามิติเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้นโดยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม	30
4.5	ผลทดสอบค่าตัวแปรของจินเนติกอัลกอริทึมที่ใช้ในโปรแกรม MATLAB	36
4.5.1	การทดสอบเพื่อหาค่าจำนวนประชากรเริ่มต้นที่เหมาะสม	36
4.5.2	การทดสอบเพื่อหาวิธีการคัดเลือกสายพันธุ์ที่เหมาะสม	37
4.5.3	การทดสอบเพื่อหาร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์ที่เหมาะสม	38
4.5.4	การทดสอบเพื่อหาชนิดของการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสม	38
4.5.5	การทดสอบเพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสม	39
4.6	การค้นหามิติเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานโดยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม	40
4.6.1	การค้นหามิติเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้นช่วงแรก	42
4.6.2	การค้นหามิติเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้นช่วงที่สอง	42
4.6.3	การค้นหามิติเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้นช่วงที่สาม	44
4.6.4	การค้นหามิติเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้นช่วงที่สี่	46
5	การค้นหามิติเตอร์ของแบบจำลองแบบออฟไลน์ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบ	51
5.1	บทนำ	51
5.2	การค้นหาแบบตาบ	51
5.2.1	หลักการทำงานของวิธีการค้นหาแบบตาบ	51
5.2.2	การค้นหาค่าพารามิเตอร์แบบจำลองแรงเสียดทานด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบ	52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3 ผลการทดสอบค่าตัวแปรของวิธีการค้นหาแบบตามู	55
5.3.1 การทดสอบเพื่อหาขนาดรัศมีในการสุ่มคำตอบที่เหมาะสม	55
5.3.2 การทดสอบเพื่อหาค่าจำนวนการสุ่มคำตอบที่เหมาะสม	56
5.3.3 การทดสอบเพื่อหาจำนวนค่าเคลื่อนย้ายก่อนการถอยกลับที่เหมาะสม	56
5.3.4 การทดสอบเพื่อหาค่าคำตอบชุดที่เก็บไว้ก่อนหน้าที่เหมาะสม	57
5.4 การค้นหาพารามิเตอร์แบบจำลองแรงเสียดทานโดยวิธีการค้นหาแบบตามู	58
5.4.1 การค้นหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้นช่วงแรก	59
5.4.2 การค้นหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้นช่วงที่สอง ...	61
5.4.3 การค้นหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้นช่วงที่สาม ...	61
5.4.4 การค้นหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้นช่วงที่สี่	62
6 การปรับแต่งพารามิเตอร์ของแบบจำลองแบบออนไลน์	73
6.1 บทนำ	73
6.2 หลักการปรับแต่งพารามิเตอร์แบบออนไลน์	73
6.3 กระบวนการปรับแต่งพารามิเตอร์โดยฟังก์ชันการฟิชชีลอจิก	78
6.3.1 การออกแบบการปรับแต่งพารามิเตอร์แบบออนไลน์	79
6.4 การทดสอบและผลการทดสอบกระบวนการปรับแต่งพารามิเตอร์แบบออนไลน์	86
6.4.1 การคำนวณค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์แบบจำลองแรงเสียดทาน	86
6.4.2 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในกระบวนการปรับแต่งพารามิเตอร์	86
6.4.3 การทดสอบกระบวนการปรับแต่งพารามิเตอร์แบบออนไลน์	88
7 บทสรุป	96
7.1 สรุป	96
7.2 ข้อเสนอแนะ	97
รายการอ้างอิง	99

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก รายละเอียดวงจรปรับแต่งสัญญาณ	101
ภาคผนวก ข ผลการค้นหาพารามิเตอร์ของระบบแบบออนไลน์โดยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม และวิธีค้นหาแบบตามู	136
ภาคผนวก ค ผลการปรับแต่งพารามิเตอร์ของระบบแบบออนไลน์โดยอาศัยหลักการ ฟิชชี่ลอจิก	145
ประวัติผู้เขียน	152

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ค่าความละเอียดของตัวแปรของแบบจำลองแรงเสียดทาน	31
4.2 ขอบเขตของค่าต่ำสุดและสูงสุดของพารามิเตอร์ระบบมวลไถล	32
4.3 ค่าตัวแปรของจินเนติกอัลกอริทึมที่ใช้ในโปรแกรม MATLAB สำหรับงานวิจัย วิทยานิพนธ์	41
4.4 ขอบเขตพารามิเตอร์ระบบช่วงแรก	43
4.5 ผลการค้นหามิติพารามิเตอร์ระบบช่วงแรก	43
4.6 ขอบเขตพารามิเตอร์ระบบช่วงที่สอง	43
4.7 ผลการค้นหามิติพารามิเตอร์ระบบช่วงที่สอง	44
4.8 ขอบเขตพารามิเตอร์ระบบช่วงที่สาม	45
4.9 ผลการค้นหามิติพารามิเตอร์ระบบช่วงที่สาม	45
4.10 ขอบเขตพารามิเตอร์ระบบช่วงที่สี่	47
4.11 ผลการค้นหามิติพารามิเตอร์ระบบช่วงที่สี่	47
4.12 ผลการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{S+} , F_{S-} ในแต่ละชุดการเคลื่อนที่	48
5.1 ค่าตัวแปรของวิธีการค้นหาแบบตามูสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์	59
5.2 ผลการค้นหามิติพารามิเตอร์ระบบช่วงแรก	60
5.3 ผลการค้นหามิติพารามิเตอร์ระบบช่วงที่สอง	61
5.4 ผลการค้นหามิติพารามิเตอร์ระบบช่วงที่สาม	62
5.5 ผลการค้นหามิติพารามิเตอร์ระบบช่วงที่สี่	63
5.6 ผลการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{S+} , F_{S-} ในแต่ละชุดการเคลื่อนที่	64
5.7 ผลการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{S+} , F_{S-} ในแต่ละชุดการเคลื่อนที่	67
6.1 ผลทดสอบแบบจำลองแรงเสียดทานก่อนปรับแต่งพารามิเตอร์ของระบบแบบออนไลน์ ที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที.....	87
6.2 ผลทดสอบการปรับแต่งพารามิเตอร์ของระบบแบบออนไลน์ที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อ วินาที.....	89

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.1 ความสัมพันธ์ของพอร์ตข้อมูลกับขาสัญญาณที่พอร์ตเครื่องพิมพ์	108
ก.2 ความสัมพันธ์ของพอร์ตแสดงสถานะกับขาสัญญาณที่พอร์ตเครื่องพิมพ์	109
ก.3 ความสัมพันธ์ของพอร์ตควบคุมกับขาสัญญาณที่พอร์ตเครื่องพิมพ์	110
ก.4 สัญญาณอินพุตควบคุมไอซี LTC1298	112
ข.1 ผลจากการค้นหาพารามิเตอร์ของระบบช่วงแรกโดยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม	137
ข.2 ผลจากการค้นหาพารามิเตอร์ของระบบช่วงแรกโดยวิธีค้นหาแบบตามู	138
ข.3 ผลจากการค้นหาพารามิเตอร์ของระบบช่วงที่สองโดยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม	139
ข.4 ผลจากการค้นหาพารามิเตอร์ของระบบช่วงที่สองโดยวิธีค้นหาแบบตามู	140
ข.5 ผลจากการค้นหาพารามิเตอร์ของระบบช่วงที่สามโดยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม	141
ข.6 ผลจากการค้นหาพารามิเตอร์ของระบบช่วงที่สามโดยวิธีค้นหาแบบตามู	142
ข.7 ผลจากการค้นหาพารามิเตอร์ของระบบช่วงที่สี่โดยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม	143
ข.8 ผลจากการค้นหาพารามิเตอร์ของระบบช่วงที่สี่โดยวิธีค้นหาแบบตามู	144
ค.1 ผลการทดสอบแบบจำลองแรงเสียดทานก่อนปรับแต่งพารามิเตอร์ของระบบ แบบออนไลน์ที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที	146
ค.2 ผลการทดสอบการปรับแต่งพารามิเตอร์ของระบบแบบออนไลน์ (แบบปรับ F_c เฉลี่ย) ที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที	147
ค.3 ผลการปรับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยวิธีการปรับแต่งพารามิเตอร์แบบออนไลน์ ...	148

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การทดสอบชุดขับเคลื่อนแท่นในอาคารเครื่องมือที่ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	3
2.1 ปรัชญาการณผลสตรายเบ็ด	6
2.2 แบบจำลองของแรงเสียดทานแบบซับซ้อน	7
2.3 แบบจำลองของแรงเสียดทานของลูกร	8
2.4 แบบจำลองของแรงเสียดทานของคาร์บอนปี	9
2.5 แผนภาพแสดงมวลโกลที่ปรากฏแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น	9
2.6 แผนผังการจำลองสถานการณ์มวลโกลที่ปรากฏแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น	10
3.1 แผนผังการทำงานการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมชุดขับเคลื่อนแท่นแนวตรง	13
3.2 แผนผังการทำงานวงจรควบคุมตำแหน่งแบบป้อนกลับ	14
3.3 สัญญาณตำแหน่งการเคลื่อนที่แท่นที่ควบคุมความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที	15
3.4 สัญญาณความเร็วในการเคลื่อนที่แท่นที่ควบคุมความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที	16
3.5 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ที่ควบคุมความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที	16
3.6 สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ที่ควบคุมความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที	17
4.1 การยึดมวลติดกับสปริงที่มีค่านิจ k_{spring} โกลไปทางขวามีแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น F_f กับแรงกระทำภายนอก F_{ex}	20
4.2 แผนผังโครงสร้างการจำลองสถานการณ์มวลโกล	21
4.3 แผนผังของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น	24
4.4 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์สัมพันธ์กับฐานเวลา	26
4.5 แรงของมอเตอร์สัมพันธ์กับฐานเวลา	26
4.6 ตำแหน่งอ้างอิงและตำแหน่งของแท่นสัมพันธ์กับฐานเวลา	27
4.7 ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแท่นสัมพันธ์กับฐานเวลา	28
4.8 ตำแหน่งจากการจำลองสถานการณ์เทียบกับตำแหน่งที่ได้จากการทดสอบ	28
4.9 การเปรียบเทียบผลของความเร็วจากการจำลองสถานการณ์กับความเร็วของแท่นที่วัดได้	29
4.10 แรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้นที่ได้จากการค้นหาสัมพันธ์กับความเร็ว	30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ผลการลู่เข้าค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบจำนวนประชากรเริ่มต้น	36
4.12 ผลการลู่เข้าค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบวิธีการคัดเลือกสายพันธุ์	37
4.13 ผลการลู่เข้าค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบค่าร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์	38
4.14 ผลการลู่เข้าค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบชนิดของการทำครอสโอเวอร์	39
4.15 ผลการลู่เข้าค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบค่าความน่าจะเป็นในการทำ ครอสโอเวอร์	39
4.16 ผลการลู่เข้าค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อทดสอบที่ค่าความเร็ว -5 มิลลิเมตรต่อวินาที	41
4.17 ผลการลู่เข้าค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อทดสอบที่ค่าความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที	42
4.18 แรงเสียดทานเทียบความเร็วในช่วงความเร็ว ± 5 มิลลิเมตรต่อวินาที	44
4.19 แบบจำลองแรงเสียดทานที่ได้จากการค้นหาช่วงที่สาม	46
4.20 แบบจำลองแรงเสียดทานที่ได้จากการค้นหาช่วงที่สี่	47
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของวิธี จินเนติกอัลกอริทึม	49
4.22 ผลการจำลองสถานการณ์มวลโกลที่ความเร็ว -5 มิลลิเมตรต่อวินาที จากวิธี จินเนติกอัลกอริทึม	49
4.23 ผลการจำลองสถานการณ์มวลโกลที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที จากวิธี จินเนติกอัลกอริทึม	50
5.1 ผลการลู่เข้าค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบประสิทธิภาพในการสุ่มคำตอบ	55
5.2 ผลการลู่เข้าค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบค่าจำนวนการสุ่มคำตอบ	56
5.3 ผลการลู่เข้าค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบจำนวนรอบก่อนการย้อนรอย	57
5.4 ผลการลู่เข้าค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบค่าคำตอบชุดที่เก็บไว้ก่อนหน้า	58
5.5 ผลการลู่เข้าค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อทดสอบที่ค่าความเร็ว -5 มิลลิเมตรต่อวินาที	59
5.6 ผลการลู่เข้าค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อทดสอบที่ค่าความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที	60
5.7 แบบจำลองแรงเสียดทานที่ได้จากการค้นหาช่วงที่สาม	62
5.8 แบบจำลองแรงเสียดทานที่ได้จากการค้นหาช่วงที่สี่	63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของวิธีการค้นหาแบบตาบอด	64
5.10 ผลการจำลองสถานการณ์มวลไหลที่ความเร็ว -5 มิลลิเมตรต่อวินาที จากวิธีการค้นหาแบบตาบอด	65
5.11 ผลการจำลองสถานการณ์มวลไหลที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที จากวิธีการค้นหาแบบตาบอด	66
5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับตำแหน่งในการเคลื่อนที่เฉลี่ยทั้งสองวิธี	67
5.13 ผลการจำลองสถานการณ์มวลไหลที่ความเร็ว -5 มิลลิเมตรต่อวินาที จากการค้นหาทั้งสองวิธี	68
5.14 ผลการจำลองสถานการณ์มวลไหลที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที จากการค้นหาทั้งสองวิธี	69
5.15 ผลการจำลองสถานการณ์มวลไหลที่ความเร็ว -6 มิลลิเมตรต่อวินาที จากการค้นหาทั้งสองวิธี	69
5.16 ผลการจำลองสถานการณ์มวลไหลที่ความเร็ว 6 มิลลิเมตรต่อวินาที จากการค้นหาทั้งสองวิธี	70
5.17 ผลการจำลองสถานการณ์มวลไหลที่ความเร็ว -8 มิลลิเมตรต่อวินาที จากการค้นหาทั้งสองวิธี	71
5.18 ผลการจำลองสถานการณ์มวลไหลที่ความเร็ว 8 มิลลิเมตรต่อวินาที จากการค้นหาทั้งสองวิธี	71
6.1 แผนผังการทำงานของโปรแกรมการปรับแต่งพารามิเตอร์	74
6.2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแรงกระทำที่ได้จากการวัดกับที่ได้จากสมการ (6-2)	75
6.3 การคำนวณค่า $time_adj$ และค่า $error_adj$ จากส่วนที่ 6	76
6.4 กระบวนการปรับแต่งโดยฟิชชีลอจิก	79
6.5 ลักษณะความเป็นสมาชิกของฟิชชีเซตขนาดค่า $time_adj$	80
6.6 ลักษณะความเป็นสมาชิกของฟิชชีเซตของค่า $error_adj$	81
6.7 ลักษณะความเป็นสมาชิกฟิชชีเซตค่าการปรับแต่งพารามิเตอร์ F_s	82

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.8 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยวิธีการปรับแต่งค่าแบบออนไลน์รอบที่ 187	
6.9 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยวิธีการปรับแต่งค่าแบบออนไลน์รอบที่ 1188	
6.10 ผลการปรับแต่งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_s รอบที่ 189	
6.11 ผลการเคลื่อนที่จากการจำลองสถานการณ์แบบออนไลน์รอบที่ 190	
6.12 ผลการปรับแต่งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_s รอบที่ 591	
6.13 ผลการเคลื่อนที่จากการจำลองสถานการณ์แบบออนไลน์รอบที่ 591	
6.14 ผลการปรับแต่งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_s รอบที่ 1192	
6.15 ผลการเคลื่อนที่จากการจำลองสถานการณ์แบบออนไลน์รอบที่ 1192	
6.16 ผลการปรับแต่งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_s รอบที่ 1793	
6.17 ผลการเคลื่อนที่จากการจำลองสถานการณ์แบบออนไลน์รอบที่ 1793	
6.18 ผลการปรับแต่งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_s รอบที่ 2094	
6.19 ผลการเคลื่อนที่จากการจำลองสถานการณ์แบบออนไลน์รอบที่ 2095	
ก.1 การทำงานภายในตัวตรวจวัดตำแหน่งชนิดอัลตราโซนิก102	
ก.2 การวัดระยะของตัวตรวจวัดตำแหน่งชนิดอัลตราโซนิก103	
ก.3 สัญญาณเอาต์พุตของตัวตรวจวัดตำแหน่ง103	
ก.4 หน้าต่างการทำงานของโปรแกรม ULTRA 3.0104	
ก.5 หน้าต่างการกำหนดค่าตัวตรวจวัด105	
ก.6 หน้าต่างการวัดระยะและขนาดของแรงดันกับกระแสเอาต์พุต105	
ก.7 วงจรควบคุมการหมุนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง106	
ก.8 ขาสัญญาณที่ตัวต่อแบบ DB25 พอร์ตเครื่องพิมพ์109	
ก.9 โครงสร้างภายในของไอซี เบอร์ LTC1298110	
ก.10 สัญญาณควบคุมและข้อมูลเอาต์พุตของไอซี LTC1298111	
ก.11 วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลในการควบคุมตำแหน่ง113	
ก.12 วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 4 ช่องสัญญาณ114	
ก.13 วงจรควบคุมตำแหน่งแบบป้อนกลับ115	
ก.14 วงจรวัดตำแหน่งและอนุพันธ์สัญญาณตำแหน่ง118	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.15 วงจรวัดกระแสไฟฟ้าที่เข้ามอเตอร์	119
ก.16 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้าที่เข้ามอเตอร์	120
ก.17 วงจรเครื่องหมายสัญญาณ	121
ก.18 วงจรสับเปลี่ยนสัญญาณ	121
ก.19 ผลการทดสอบวงจรปรับแต่งสัญญาณตำแหน่ง	122
ก.20 สัญญาณความเร็วที่สัมพันธ์กับตำแหน่งที่เปลี่ยนแปลงคงที่	123
ก.21 สัญญาณความเร็วที่สัมพันธ์กับตำแหน่งที่เปลี่ยนแปลงแบบติดเส้น	124
ก.22 การเปรียบเทียบแรงดันอินพุตกับเอาต์พุตของวงจรวัดแรงดันไฟฟ้าที่เข้ามอเตอร์	125
ก.23 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันจากวงจรวัดกระแสกับเครื่องวัดกระแส	126
ก.24 สัญญาณความเร็วที่ผ่านวงจรสับเปลี่ยนสัญญาณและวงจรเครื่องหมายสัญญาณ	127
ก.25 สัญญาณแรงดันที่เข้ามอเตอร์ที่ผ่านวงจรสับเปลี่ยนสัญญาณและวงจรเครื่องหมายสัญญาณ ..	128
ก.26 สัญญาณกระแสเข้ามอเตอร์ที่ผ่านวงจรสับเปลี่ยนสัญญาณและวงจรเครื่องหมายสัญญาณ	128
ก.27 กระบวนการแยกข้อมูลจากออสซิลโลสโคปออกเป็น 5 แฟ้มข้อมูล	130
ก.28 การเปรียบเทียบสัญญาณจากวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่ช่อง สัญญาณ 1	131
ก.29 การเปรียบเทียบสัญญาณจากวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่ช่อง สัญญาณ 2	132
ก.30 การเปรียบเทียบสัญญาณจากวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่ช่อง สัญญาณ 3	132
ก.31 การเปรียบเทียบสัญญาณจากวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่ช่อง สัญญาณ 4	133
ก.32 แผนภาพวงจรปรับแต่งสัญญาณต่างๆ รวมทั้งหมด	135

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้ได้มีการใช้เครื่องมือในงานควบคุมตำแหน่งทั้งเชิงมุมและเชิงเส้น ที่ต้องการความแม่นยำสูง ในงานอุตสาหกรรมกันอย่างกว้างขวาง เช่น เครื่องกลึง แขนกล วาล์ว ชิ้นส่วนไฮดรอลิกส์และนิวแมติกส์ การควบคุมตำแหน่งเมื่อวัตถุเคลื่อนตัวด้วยความเร็วต่ำมาก จะกระทำได้อย่างเพราะประสบปัญหาเกี่ยวกับการติดลื่น (stick-slip) ซึ่งมีสาเหตุมาจากแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น ปัญหาดังกล่าวได้มีการแก้ไขในรูปแบบหนึ่ง ด้วยเทคโนโลยีที่เรียกว่า การหล่อลื่นไฮโดรสแตติกส์ (hydrostatic lubrication) เพื่อลดพื้นผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงาน ซึ่งอาจใช้โลหะทรงกลมเป็นตัวรองรับระหว่างผิวสัมผัส หรือใช้วิธีการหล่อลื่นโดยใช้ของเหลว ทำให้มีขีดจำกัดที่ความเร็วต่ำค่าหนึ่ง ภายใต้อัตราเร็วที่ต่ำกว่าก็ยังคงเกิดการสัมผัสกันระหว่างวัตถุกับวัตถุ จึงเป็นเหตุให้มีการศึกษาพฤติกรรมการเสียดทานระหว่างรอยต่อโลหะกับโลหะที่มีการเคลื่อนตัว เพื่อพิจารณาแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น โดยมีการเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์กับโหลด ความเร็วในการเคลื่อนที่ และกับขนาดของพื้นผิวสัมผัส ทำให้เกิดแนวความคิดหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์มาอธิบายพฤติกรรมดังกล่าว ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นไปถึงการหาแบบจำลองของแรงเสียดทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น ที่มีผลกระทบต่อการเคลื่อนที่ของชุดขับเคลื่อนแทน เพื่อนำผลที่ได้จากการศึกษามาใช้ในการระบุเอกลักษณ์ ให้แก่แบบจำลองของแรงเสียดทานไม่เชิงเส้นทั้งออฟไลน์ (offline) และออนไลน์ (online)

ในงานวิจัยเป็นการประมาณค่าพารามิเตอร์ชุดขับเคลื่อนแทนเชิงเส้น ซึ่งมีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นตัวขับเคลื่อน ตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการเครื่องกลไฟฟ้า ในอาคารเครื่องมือที่ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อเป็นการศึกษาพฤติกรรมของระบบ ที่มีผลกระทบของแรงเสียดทาน และจะได้นำไปใช้ประโยชน์ในการแก้ปัญหาการควบคุมการเคลื่อนเชิงเส้นที่ความเร็วต่ำๆ ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- เพื่อศึกษาและเลือกแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เชิงเส้นที่เหมาะสม ต่อการอธิบายผลกระทบที่มีกับการเคลื่อนที่ของชุดขับเคลื่อนแทน
- เพื่อพัฒนาโปรแกรมการจำลองสถานการณ์ของระบบมวลไถล ที่มีผลกระทบจากแรงเสียดทาน

- เพื่อพัฒนาวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานแบบออฟไลน์ (offline estimation) โดยอาศัยวิธีปัญญาประดิษฐ์
- เพื่อพัฒนาเทคนิคการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานแบบออนไลน์ (online estimation) ที่เหมาะสม
- ออกแบบและพัฒนาวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานแบบออนไลน์ ในขณะที่งานชุดขับเคลื่อนแทน

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

การวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการค้นคว้าหาแบบจำลองแรงเสียดทาน ที่เหมาะสำหรับระบบขับเคลื่อนแทนในแนวตรงที่มีอยู่ในอาคารเครื่องมือ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยใช้วิธีวิเคราะห์และหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทาน แบบออฟไลน์อย่างน้อย 2 วิธีแตกต่างกัน เพื่อทดสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ และเพื่อนำค่าที่ได้ใช้เป็นค่าตั้งต้นให้กับการออกแบบและพัฒนาการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์แบบจำลองแรงเสียดทานแบบออนไลน์

1.3.1 ข้อตกลงย่อยเบื้องต้นในการวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

- ทดสอบและเก็บข้อมูล จากชุดขับเคลื่อนแทนที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ที่มีอยู่ในอาคารเครื่องมือ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ดำเนินการจำลองสถานการณ์ของระบบมวลไถล ที่มีผลของแรงเสียดทาน โดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนอง
- พัฒนาการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบออฟไลน์ ของแบบจำลองแรงเสียดทานที่เหมาะสมกับชุดขับเคลื่อนแทน ที่ได้จากการเก็บข้อมูล โดยมีการเปรียบเทียบกันระหว่างวิธีการค้นหาแบบตาบ (tabu search) ตาม (Traferro and Uncini,2000) และวิธีการจินเนติกอัลกอริทึม (genetic algorithms) ตาม (Man,Tang and Kwong,1996)
- พัฒนาการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบแบบออนไลน์ โดยนำค่าที่ได้จากการประมาณค่าแบบออฟไลน์เป็นค่าตั้งต้นในการดำเนินงาน

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

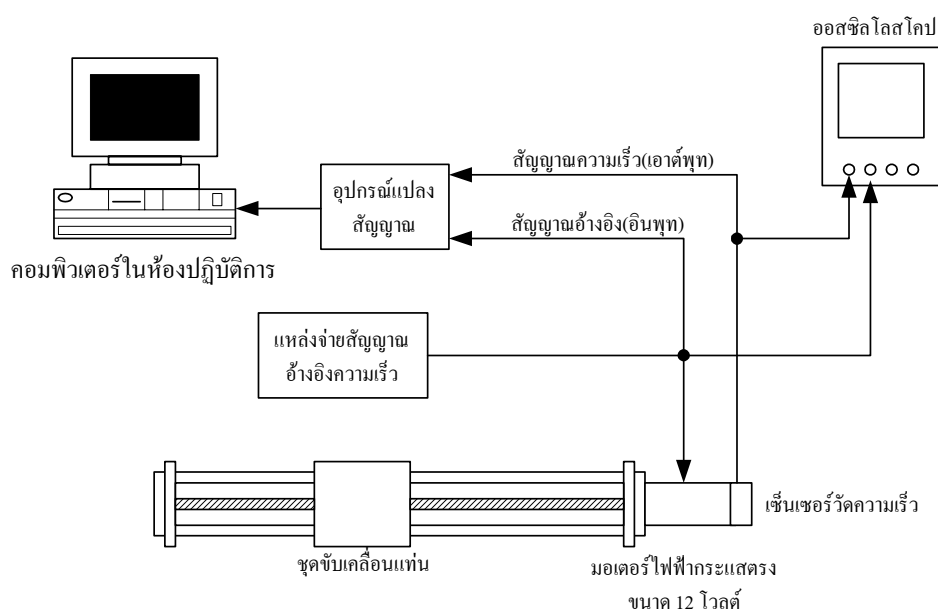
- เลือกแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น ที่เหมาะสำหรับระบบขับเคลื่อนแทน และจำลองสถานการณ์ระบบมวลไถลเชิงเส้น ที่มีผลของแรงเสียดทานโดยฟังก์ชันการเขียนโปรแกรมด้วย MATLAB

- ประเมินค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานแบบออฟไลน์ ระหว่างวิธีการค้นหาแบบตามกับแบบจีนเนติกอัลกอริทึมมาเทียบกัน โดยแบ่งย่านความเร็วในการประมาณค่าออกเป็น 2 ช่วง คือ ย่านอัตราโทรไฮโดรไดนามิกส์ และช่วงความเร็วใกล้ศูนย์

- ประเมินค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานแบบออนไลน์ โดยใช้ค่าตั้งต้นที่เป็นผลจากการประมาณค่าแบบออฟไลน์ พึ่งพาการปรับแต่งค่าโดยวิธีฟัชชี่ลอจิก (Li-Xin W., 1994)

1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

- ดำเนินการศึกษาและเลือกแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น ทำการทดสอบและเก็บข้อมูลการเคลื่อนที่ของระบบทดสอบ ใช้ในการประมาณค่าระบบแบบออฟไลน์ซึ่งจะมีการเปรียบเทียบกัน 2 วิธี และนำผลที่ได้นำไปเป็นค่าตั้งต้นในการประมาณค่าแบบออนไลน์ต่อไป การตรวจสอบผลที่ได้จะทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการดำเนินการแบบออนไลน์กับแบบออฟไลน์ ซึ่งจะต้องสอดคล้องกัน โดยอุปกรณ์ที่ต่อทดสอบมีดังแผนภาพที่แสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 การทดสอบชุดเคลื่อนที่แทนในอาคารเครื่องมือที่ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

- ดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการเครื่องกลไฟฟ้า อาคารเครื่องมือ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

- ใช้ชุดขับเคลื่อนแทนที่มีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นตัวขับ คอมพิวเตอร์ ออสซิลโลสโคปและมัลติมิเตอร์ ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการเครื่องกลไฟฟ้า

- พัฒนาโปรแกรม MATLAB ในการประมาณค่าแบบออฟไลน์ ซึ่งต้องอาศัยผลทดสอบที่บันทึกไว้โดยออสซิลโลสโคป

- พัฒนาโปรแกรมภาษาซีเพื่อประมาณค่าแบบออนไลน์ โดยติดต่อกับพอร์ตรับสัญญาณจากชุดขับเคลื่อนแท่นโดยตรง

- ทำการวัดและบันทึกผลการทดลองออกเป็นสองลักษณะ คือ ลักษณะแรกทำการทดสอบชุดขับเคลื่อนแท่นโดยเก็บค่าในแฟ้มข้อมูลจากออสซิลโลสโคป จึงจะต้องแบ่งย่านความเร็วการเคลื่อนที่แท่นออกเป็นช่วงๆ ลักษณะที่สองทำการทดสอบและอ่านข้อมูลเข้าทางพอร์ตของคอมพิวเตอร์ใช้ในการประมาณค่าแบบออนไลน์

- นำข้อมูลที่ได้มาทำการประมาณค่า โดยวิธีประมาณค่าแบบออฟไลน์ 2 วิธีดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นมาเทียบกัน ผลที่ได้ต้องสอดคล้องกัน ส่วนในการประมาณค่าแบบออนไลน์จะนำผลที่ได้มาเทียบกับแบบออฟไลน์อีกครั้ง

- การทดสอบจะทำการนำผลที่ได้มาเทียบกับการเคลื่อนที่ของระบบ เพื่อวิเคราะห์ความถูกต้อง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- พารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานที่มีความแม่นยำ ที่ส่งผลกระทบต่อระบบขับเคลื่อนแท่นในย่านความเร็วต่ำมาก

- ได้ระบบการประมาณค่าและทดสอบหาพารามิเตอร์แบบจำลองแรงเสียดทาน ทั้งด้วยวิธีออฟไลน์และออนไลน์ของชุดขับเคลื่อนแท่นด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

- ค่าพารามิเตอร์ของแรงเสียดทานที่ได้ และการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ จะมีประโยชน์ในอนาคต สำหรับการชดเชยทางพลวัตเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของระบบขับเคลื่อนแท่น

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

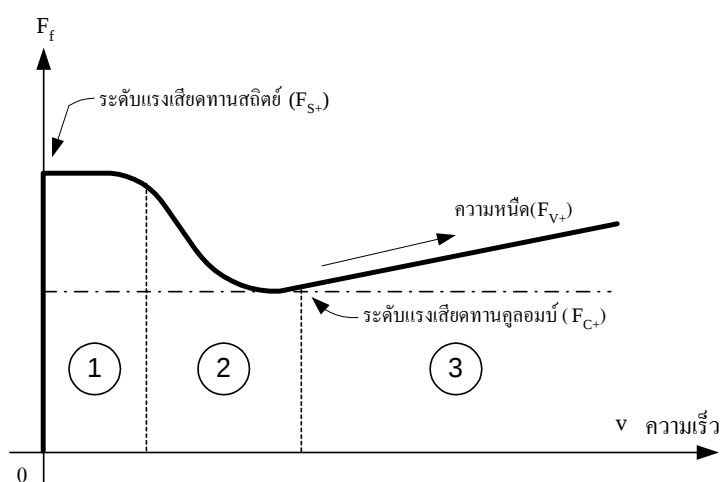
2.1 บทนำ

บทนี้จะเป็นการกล่าวถึง ลักษณะการเสียดทานเกิดระหว่างพื้นผิวโลหะทั้งสองในเชิงกล ใน การศึกษาผลกระทบของแรงเสียดทานต่อระบบขับเคลื่อนแท่นเชิงเส้น จึงมีความจำเป็นรู้ถึง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแรงเสียดทาน เพื่อมาอธิบายถึงพฤติกรรมแรงเสียดทานต่อระบบ มวลไถลได้ ส่วนในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ ณ ปัจจุบันมีความนิยมให้หลักการค้นหาโดยวิธี ปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งมีความรวดเร็วในการค้นหา และมีหลักการที่ได้มีการทดสอบใช้งานแล้ว เพื่อที่จะสามารถระบุเอกลักษณ์ของแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้นได้ เพื่อให้ผลการจำลองสถานการณ์ สอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของแท่นที่ทำการทดสอบ

2.2 แรงเสียดทานในระบบเชิงกล

การพิจารณาแบบจำลองแรงเสียดทาน ที่นำมาใช้ประโยชน์ในทางวิศวกรรมที่เป็นพื้นฐาน ที่สุดคงจะเป็นแรงเสียดทานคูลอมบ์ (Coulomb friction) ซึ่งเป็นที่คุ้นเคยจากการศึกษาฟิสิกส์ ระดับต้นๆ ต่อมาเมื่อมีการพิจารณารายละเอียดถึงการหล่อลื่นซึ่งทำให้พื้นผิวมีความหนืดเพิ่มขึ้นทำ ให้เกิดแรงเสียดทานที่มีขนาดขึ้นกับความเร็ว เรียกแรงนี้ว่า แรงเสียดทานเชิงความหนืด (viscous friction) ในระยะต่อมาก็ได้มีการพิจารณาแรงเสียดทานในย่านความเร็วใกล้หยุดนิ่ง ก็ได้พบว่าแรง เสียดทานในสภาวะหยุดนิ่งมีขนาดสูง เรียกแรงเสียดทานนี้ว่า แรงเสียดทานสถิตย์ (static friction) จากนั้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นแรงเสียดทานมีการเปลี่ยนอย่างฉับพลัน จนความเร็วเพิ่มขึ้นมาถึงระดับ หนึ่งแรงเสียดทานมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับความเร็ว เรียกสภาวะการเปลี่ยนแปลงนี้เป็น ผล ของสตรายเบ็ค (Stribeck effect) ดังรูปที่ 2.1 โดยแบ่งการพิจารณาผลของสตรายเบ็คออกเป็น 3 ช่วง ในช่วงที่ 3 เป็นที่รู้จักกันดีคือ ความหนืด (viscosity) หรือบางครั้งเรียกว่า ช่วงอีลาสโตรไฮ ไดรไดนามิก (elastro-hydrodynamic) เมื่อความเร็วลดลงถึงช่วงที่ 2 เป็นช่วงแรงเสียดทาน เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เป็นรอยต่อไปยังช่วงที่ 1 โดยในช่วงที่ 1 เป็นย่านที่มีความซับซ้อนที่สุด และยังคงเป็นปัญหาที่ต้องศึกษาเพิ่มเติมอีกมากมายในวิทยาการทางด้านแรงเสียดทาน ความ ซับซ้อนเริ่มต้นนับตั้งแต่ความเร็วเป็นศูนย์ มวลที่ถูกแรงภายนอกมากระทำจะพยายามไถลไปตาม แนวแรง แต่อาจไม่ไถลหากแรงที่กระทำไม่มากเพียงพอจะเอาชนะแรงเสียดทานสถิตย์ ก่อให้เกิด

สภาวะติด (stiction) หรือสภาวะก่อนการไถล (presliding displacement) ดูรายละเอียดใน (Armstrong-Helouvry, 1993) ดังนั้นพลวัตที่ความเร็วเป็นศูนย์ ถ้าแรงที่กระทำมากพอที่จะส่งให้วัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วในช่วงที่ 1 และ 2 ไปได้ วัตถุจะไถลตัวตามปกติ แต่หากไม่พ้นช่วงที่ 2 วัตถุจะเกิดปรากฏการไถลตัวติดๆ ขัดๆ ไปเรื่อย ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การติด-ลื่น (stick-slip) มักเกิดขึ้นกับการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำมาก ซึ่งการติด-ลื่นนี้เป็นปัญหาสำคัญในเครื่องมือที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง



รูปที่ 2.1 ปรากฏการณ์ผลของสตรายเบ็ค

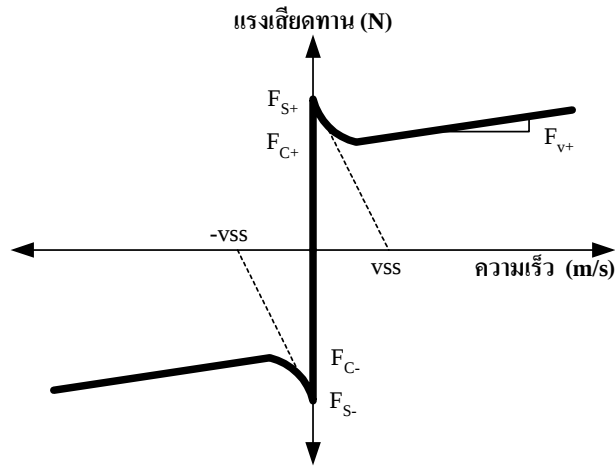
2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแรงเสียดทาน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแรงเสียดทานที่ครอบคลุมผลของสตรายเบ็คนี้ ได้แก่ แบบจำลองแรงเสียดทานซับซ้อน (complex model) ตาม (Du and Nair, 1999) ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงลดลงตามฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียลกำลังหนึ่ง ระหว่างแรงเสียดทานสถิตย์ กับแรงเสียดทานลูออมป์และแรงเสียดทานเชิงความหนืด แสดงดังรูปที่ 2.2 โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ(2-1)

$$F_f(v, F_{in}) = \begin{cases} F_{stick}(F_{in}) & , |v| = 0 \\ F_{slip}(v) & , |v| \neq 0 \end{cases} \quad (2-1)$$

จากสมการ (2-1) จะแบ่งแรงเสียดทานออกเป็นสองช่วงความเร็วคือสภาวะติด ($F_{stick}(F_{in})$) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับแรงที่กระทำต่อมวล (F_{in}) ดังสมการ (2-2) ซึ่งในสภาวะที่ติดแรงเสียดทานจะมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าแรงที่กระทำจึงทำให้ไม่มีการเคลื่อนที่ โดยจะมีค่าในช่วง F_{S-} ถึง F_{S+} ถ้าแรง

ที่กระทำมีค่ามากกว่าจะเปลี่ยนไปในช่วงที่สองคือ สภาวะลื่น ($F_{slip}(v)$) ค่าแรงเสียดทานจะมีขนาดความสัมพันธ์กับความเร็ว (v) ของมวล ดังสมการ (2-3)



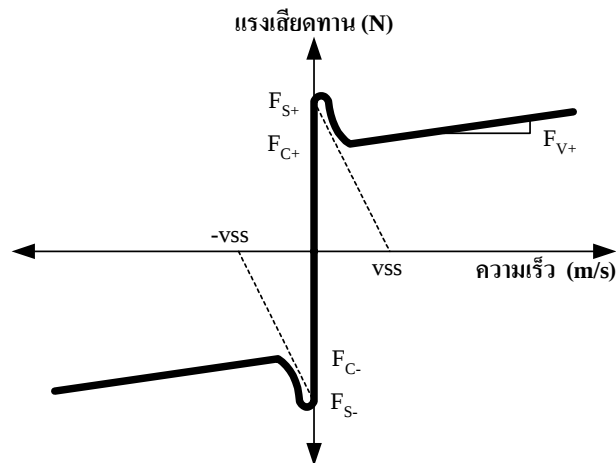
รูปที่ 2.2 แบบจำลองแรงเสียดทานแบบจับข้อ

$$F_{stick}(F_{in}) = \begin{cases} F_{S+} & , F_{in} > F_{S+} \\ F_{in} & , F_{S-} \geq F_{in} \geq F_{S+} \\ F_{S-} & , F_{in} < F_{S-} \end{cases} \quad (2-2)$$

$$F_{slip}(v) = \left(F_C + (F_S - F_C) e^{-\left(\frac{v}{v_{ss}}\right)^2} \right) \cdot \text{sgn}(v) + F_v \cdot v \quad (2-3)$$

แบบจำลองของลูเกร (LuGre model) ตาม (Gafvert,1997;Canudas de Wit,Olsson, Armstrong and Lischinsky ,1995) แสดงดังรูปที่ 2.3 มีความแตกต่างไปจากแบบจับข้อที่เพิกกำลังของฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียลเท่านั้น ทำให้ลักษณะเส้นโค้งบริเวณใกล้ศูนย์ ปราบกฎค่าแรงเสียดทานสถิตย์ในย่านความเร็วแคบๆและจะลดลงอย่างรวดเร็วกว่าแบบจับข้อโดยมีความแตกต่างในสภาวะลื่น ($F_{slip}(v)$) ดังสมการ (2-4)

$$F_{slip}(v) = \left(F_C + (F_S - F_C) e^{-\left(\frac{v}{v_{ss}}\right)^2} \right) \cdot \text{sgn}(v) + F_v \cdot v \quad (2-4)$$



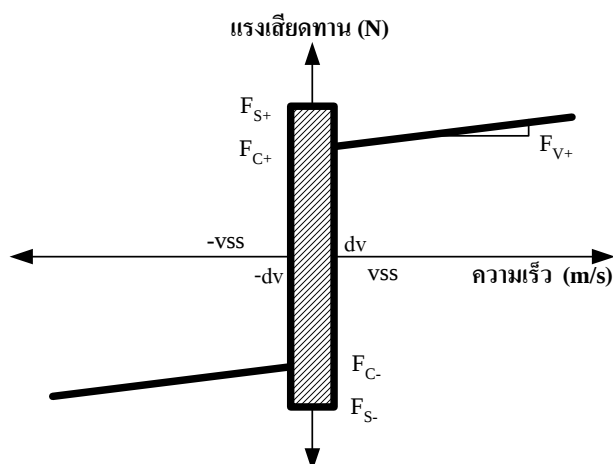
รูปที่ 2.3 แบบจำลองแรงเสียดทานของลูเกอร์

นอกเหนือจากแบบจำลองแรงเสียดทานที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีแบบจำลองที่ลดความซับซ้อนในการคำนวณ โดยพิจารณาแรงเสียดทานในช่วงความเร็ว $\pm dv$ เป็นช่วงหยุดนิ่งหรือแรงเสียดทานสถิต ส่วนนอกย่าน $\pm dv$ เป็นแรงเสียดทานคูลอมบ์รวมกับแรงเสียดทานเชิงความหนืด ดังรูปที่ 2.4 มีความสัมพันธ์ดังสมการ (2-5) แบบจำลองนี้มีชื่อเรียกว่า แบบจำลองของคาร์นอปป์ (Karnopp, 1985)

$$F_f(v, F_{in}) = \begin{cases} F_{stick}(F_{in}) & , |v| \leq dv \\ F_{slip}(v) & , |v| > dv \end{cases} \quad (2-5)$$

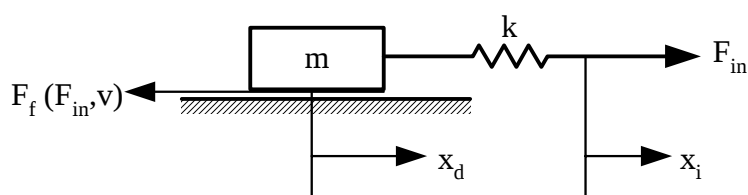
สมการ (2.5) มีความหมายว่าความเร็วในช่วง $\pm dv$ เป็นสภาวะติด ($F_{stick}(F_{in})$) ในช่วงนี้แรงเสียดทานจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับแรงที่กระทำ เช่นเดียวกับสมการ (2-1) ต่างกันที่ขยายช่วงความเร็วออกเป็นแถบแคบ ถ้าแรงที่กระทำมีขนาดมากกว่าแรงเสียดทาน การเคลื่อนที่จะข้ามไปในช่วงสภาวะลื่น ($F_{slip}(v)$) มีความสัมพันธ์ดังสมการ (2-6) ซึ่งเป็นแรงเสียดทานในช่วงอีลาสโตโรไฮโดรไดนามิก

$$F_{slip}(v) = (F_C + F_V \cdot |v|) \cdot \text{sgn}(v) \quad (2-6)$$



รูปที่ 2.4 แบบจำลองของแรงเสียดทานของคาร์นอนปี

แบบจำลองทั้งสาม เป็นที่นิยมใช้ในการจำลองสถานการณ์ เพื่อใช้ในการเรียนรู้พฤติกรรม การเคลื่อนที่ของระบบมวล-สปริง และเพื่อใช้ในการออกแบบตัวขับเคลื่อน แบบจำลองชนิดขับเคลื่อนนิยม ใช้กันมากในการเคลื่อนที่ของระบบไฮดรอนิกส์และนิวแมติกส์ ต่อมาแบบจำลองของลูกรินิยม ใช้ในระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ทั้งเชิงเส้นและเชิงมุม ส่วนแบบจำลองของคาร์นอนปีเป็น แบบจำลองใช้ง่าย เหมาะสำหรับการจำลองสถานการณ์ของระบบและงานที่ต้องคำนวณด้วยเวลา สั้นๆ งานวิจัยนี้พิจารณาแบบจำลองของคาร์นอนปีเปรียบเทียบกับแบบจำลองของลูกร ในการ พิจารณาแบบจำลองแรงเสียดทานที่เหมาะสม โดยพิจารณาการจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่ของมวล ไกล ที่ปรากฏแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น ตามการจำลองสถานการณ์ของ (Karnopp,1985; Canudas de Wit et.al,1995) ดังรูปที่ 2.5 มีแผนภาพแสดงการทำงานดังในรูปที่ 2.6

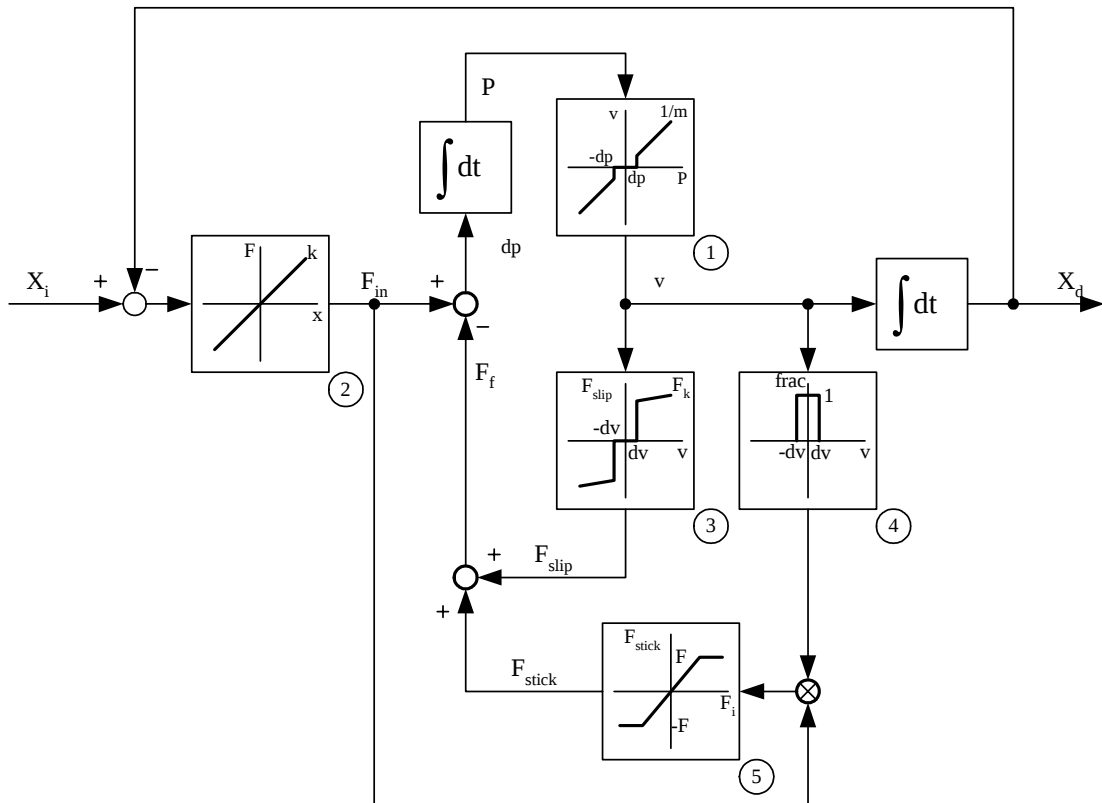


รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงมวลไกลที่ปรากฏแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น

การจำลองสถานการณ์การไหลของมวล แสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งมวลมีน้ำหนัก m ต่อกับสปริง ที่มีค่า k เคลื่อนที่ด้วยการจัด x_i แต่ไม่เท่ากับการจัดของมวล x_d โดยขณะไหลประสบกับแรง

เสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น F_f ที่เป็นฟังก์ชันของความเร็ว v และแรงกระทำต่อมวล F_{in} ดังที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น และสามารถเขียนสมการพลวัตการไหลของมวลได้ดังนี้

$$m\ddot{x}_d = k(x_i - x_d) - F_f(v, F_{in}) \quad (2-7)$$



รูปที่ 2.6 แผนผังการจำลองสถานการณ์มวลไหลที่ปรากฏแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น

สมการแรงที่กระทำต่อมวล ซึ่งมีผลมาจากแรงของสปริง มีความสัมพันธ์ระหว่างระยะจัดศูนย์กลางของสปริง ดังสมการ (2-8) มีการทำงานดังในบล็อกที่ 2 ในรูปที่ 2.6

$$F_{in} = k(x_i - x_d) \quad (2-8)$$

จากสมการ (2-5) เป็นสมการเพื่อแบ่งการทำงานของแรงเสียดทานออกเป็นสองช่วงคือ แรงเสียดทานสภาวะติด ดังในบล็อกที่ 4 ส่วนแรงเสียดทานสภาวะลื่น ทำงานดังในบล็อกที่ 3 มีการคำนวณขนาดของแรงเสียดทานดังสมการ (2-6) และบล็อกที่ 5 ทำงานเสมือนดังสมการ (2-2)

ส่วนการทำงานในบล็อกที่ 1 เป็นการหาค่าความเร็วจากโมเมนต์ที่หารด้วยน้ำหนักของมวล โดยมี การคำนวณขนาดของความเร็วเฉพาะขนาดของโมเมนต์ P ค่ามากกว่า $m \cdot dv$ ซึ่งมีขนาดเท่ากับ dp แต่ถ้ามีขนาดน้อยกว่าจะให้ขนาดของความเร็วเป็นศูนย์ เสมือนที่ขนาดโมเมนต์น้อยๆ ให้ขนาด ความเร็วหยุดนิ่ง นั่นเองดังสมการ (2-9)

$$v = \begin{cases} 0 & , -dp < P < dp \\ \frac{P}{m} & , \text{otherwise} \end{cases} \quad (2-9)$$

จาก (Canudas de Wit et.al,1995) ได้มีการทดสอบระบบที่มีผลแรงเสียดทาน และให้ ค่าพารามิเตอร์แบบจำลองแรงเสียดทานของระบบ ดังกล่าวไว้อย่างครบถ้วน เพื่อใช้ในการ เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบ ที่ได้มีการพัฒนาโปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ของมวลไถล ที่มีผลของแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งในบทความดังกล่าวได้ให้ผลการเคลื่อนที่ของมวล ตำแหน่งอ้างอิงและลักษณะของแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้นตลอดการเคลื่อนที่ ใช้ในการ เปรียบเทียบผลที่ได้

บทที่ 3

กรอบแนวคิดของงานวิจัย

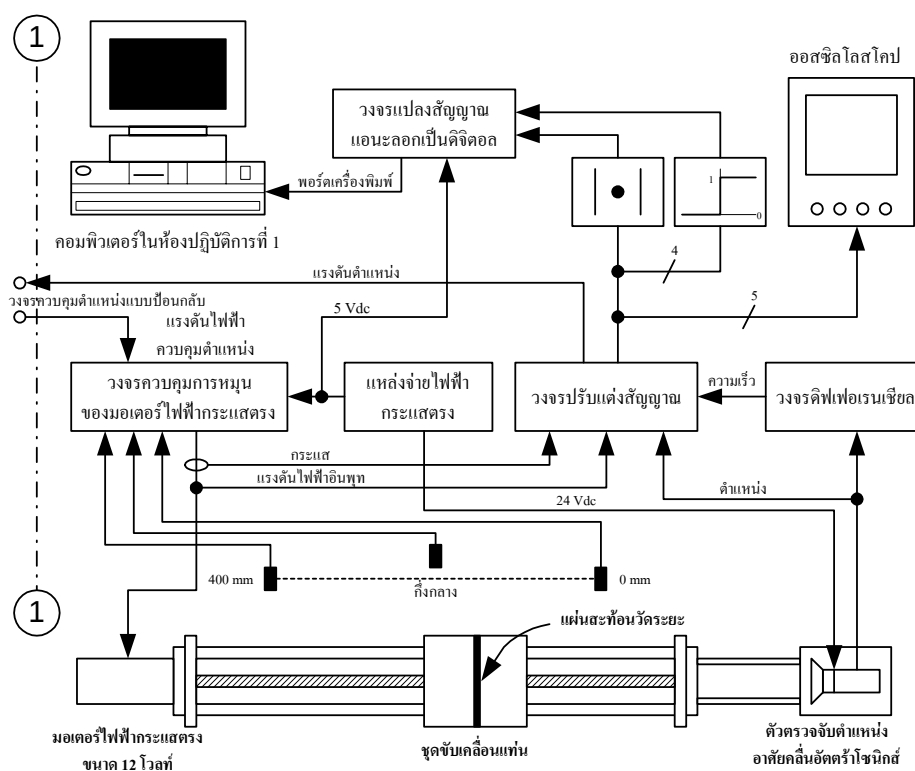
3.1 บทนำ

แนวทางการทำงานของการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบจำลองแรงเสียดทาน ของระบบขับเคลื่อนแท่นเชิงเส้น โดยวิธีปัญญาประดิษฐ์ทั้งแบบออฟไลน์และออนไลน์ มีผังแสดงการต่อวงจรควบคุมและตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ตัวตรวจจับสัญญาณบนชุดขับเคลื่อนแท่นเชิงเส้น ที่มีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นต้นกำลัง คิดตั้งชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า อาคารเครื่องมือที่ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อธิบายความสำคัญของการทำงานในแต่ละบล็อกการทำงาน ประกอบความเข้าใจในการทำงานต่อไป

3.2 กรอบแนวคิดของงาน

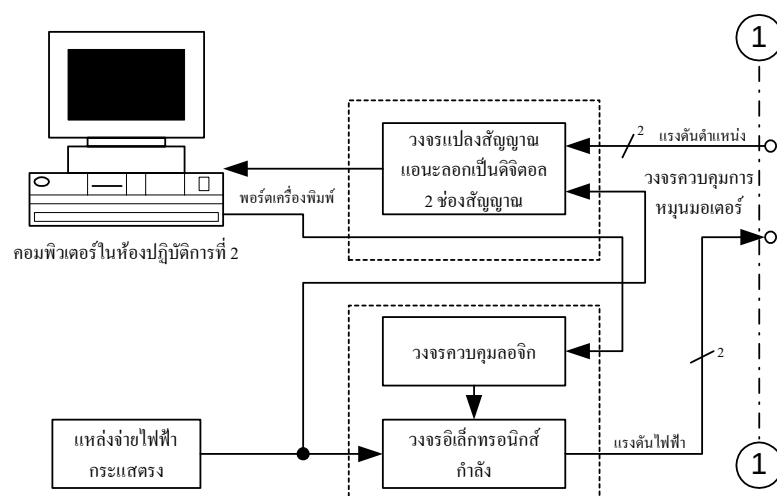
ในงานวิจัยนี้ได้นำชุดขับเคลื่อนแท่นเชิงเส้น มาจากฐานรองของแขนกลในห้องปฏิบัติการระบบควบคุมและเครื่องมือวัด มีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 โวลต์ เป็นตัวขับเคลื่อน ได้ทำการศึกษาและออกแบบวงจรควบคุมชุดขับเคลื่อนแท่นให้เคลื่อนที่ในทิศทางที่ต้องการได้ พร้อมติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งในการเคลื่อนที่ ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์กำหนดขอบเขตการทำงานผ่านพอร์ตอนุกรม คิดตั้งวงจรวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้า กระแสและวงจรแปลงความเร็ว ข้อมูลที่ได้จากการวัดสัญญาณมาเขียนและพัฒนาโปรแกรมจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่ระบบมวลไถล ที่มีผลกระทบของแรงเสียดทานไม่เชิงเส้น เพื่อนำโปรแกรมที่ได้มาเป็นฟังก์ชันเป้าหมายในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบ โดยวิธีปัญญาประดิษฐ์ต่อไป การวัดสัญญาณและการบันทึกข้อมูลได้มีการจัดเก็บ 2 ลักษณะ ดังรูปที่ 3.1 คือ ลักษณะแรกใช้ออสซิลโลสโคปขนาด 4 ช่องสัญญาณในห้องปฏิบัติการฯ บันทึกลงแผ่นดิสต์ขนาด 3.5 นิ้วในลักษณะของข้อมูลแบบแถวลำดับ เขียนโปรแกรมภาษาซีแปลงข้อมูลที่ให้กับโปรแกรม MATLAB วิเคราะห์ข้อมูลต่อไป ลักษณะที่สองใช้คอมพิวเตอร์ในห้องปฏิบัติการที่ 1 เก็บข้อมูล โดยเขียนโปรแกรมภาษาซีควบคุมการอ่านค่าจากพอร์ตเครื่องพิมพ์ ที่ต่ออาร์คแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ขนาด 4 ช่องสัญญาณระดับแรงดัน 0 – 5 โวลต์ ความละเอียด 12 บิต (ไอซีเบอร์ LTC1298 2 ตัว) ส่วนสัญญาณที่มีค่าทั้งบวกและลบ จะต้องผ่านวงจรสมบรูณ์ (แปลงสัญญาณที่ได้ให้เป็นบวก) ใช้วงจรเครื่องหมายเป็นการระบุสัญญาณเป็นบวกหรือลบ เข้าพอร์ตเครื่องพิมพ์โดยตรง (เป็นลอจิก “0” หรือ “1”) สัญญาณที่มีทั้ง

บวกและลบได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ป้อนมอเตอร์และความเร็วในการเคลื่อนที่ ส่วนที่เป็นบวกอย่างเดียวคือ ตำแหน่งของแท่น สัญญาณดังกล่าวผ่านวงจรปรับแต่งสัญญาณ เพื่อลดหรือขยายสัญญาณให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ที่ใช้วัด เนื่องจากต้องสัญญาณความเร็วในการเคลื่อนที่ แต่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร็ว จึงนำสัญญาณที่ได้จากวงจรอนุพันธ์สัญญาณตำแหน่งของแท่น ที่ได้จากตัวตรวจจับตำแหน่งแบบคลื่นอัลตราโซนิกส์ ติดตั้งไว้ตรงข้ามกับมอเตอร์ของชุดขับเคลื่อนแท่น ใช้แรงดันไฟเลี้ยง 24 โวลต์ อาศัยการสะท้อนคลื่นกับแผ่นวัดระยะที่ติดตั้งตรงกลางแท่น ส่วนวงจรควบคุมการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ทำหน้าที่กำหนดการทำงานของมอเตอร์ได้ 3 แบบ คือ การหยุดการทำงานของมอเตอร์ (ไม่ป้อนแรงดันไฟฟ้าให้มอเตอร์) เลือกใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้ภายใน (2 - 20 โวลต์ 2 แอมแปร์) สามารถควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้า ให้เคลื่อนที่ไป-กลับในขอบเขตที่กำหนดและสามารถหยุดตรงกลางได้ สุดท้ายยังสามารถป้อนแรงดันไฟฟ้าจากวงจรภายนอกที่ต้องการควบคุมมอเตอร์ได้ ในที่นี้ได้จากวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่สามารถปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ ดังรูปที่ 3.2 สามารถเคลื่อนที่ได้ในระยษที่น้อยกว่าแบบแหล่งจ่ายภายใน ซึ่งชุดขับเคลื่อนแท่นที่มีระยะในการเคลื่อนที่ได้ถึง 1200 มิลลิเมตร วงจรนี้จะลดระยะการทดสอบลงเหลือ 400 มิลลิเมตร (ช่วงกลางของแท่น)



รูปที่ 3.1 แผนผังการทำงานการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมชุดขับเคลื่อนแท่นเชิงเส้น

ในการทดสอบเพื่อการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานของระบบได้ จะทำการเพิ่มหรือลดแรงที่ป้อนให้กับแท่นเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ จึงจะสามารถทำการหาค่าแรงเสียดทานของระบบได้ ซึ่งแรงที่ป้อนให้ระบบมวลไถลได้จากแรงของมอเตอร์ ดังนั้นจึงออกแบบวงจรควบคุมตำแหน่งแบบป้อนกลับ ที่มีตัวชดเชยเป็นแบบสัดส่วน เป็นตัวควบคุมแรงที่ป้อนให้แท่นเคลื่อนที่ ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณตำแหน่งอ้างอิง กับตำแหน่งที่วัดได้ โดยเขียนโปรแกรมภาษาซีบนเครื่องคอมพิวเตอร์ในห้องปฏิบัติการที่ 2 ทำหน้าที่เป็นตัวชดเชย และกำเนิดสัญญาณอ้างอิง และอ่านค่าตำแหน่งของแท่น ผ่านการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล 2 ช่องสัญญาณ แสดงดังรูปที่ 3.2 มาประมวลผลในการควบคุมตำแหน่งโดยกำเนิดสัญญาณลอจิก 2 บิตผ่านพอร์ตเครื่องพิมพ์ ต่อกับวงจรควบคุมลอจิกเพื่อกำหนดทิศทางและความกว้างของพัลส์ ไปยังวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังทำการเปิด-ปิดจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงคงที่ ให้เปลี่ยนขนาดแรงดันไฟฟ้าได้ นำรูปทั้งสองต่อกันโดยให้รูปที่ 3.2 อยู่ด้านซ้ายมือและรูปที่ 3.1 อยู่ทางขวา เป็นการแสดงผังการทำงานทั้งหมดในการควบคุมและจัดเก็บข้อมูลของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

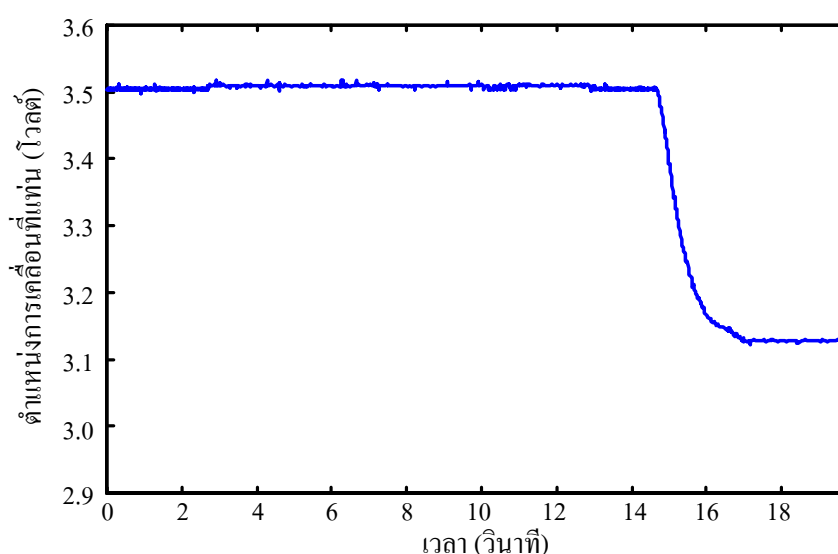


รูปที่ 3.2 แพนผังการทำงานวงจรถวลตำแหน่งแบบป้อนกลับ

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบแบบออฟไลน์ จะนำข้อมูลที่ได้ออกฮิสโตแกรมที่จัดเก็บ ผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรมภาษาซีจัดรูปแบบข้อมูลใหม่ ไปยังโปรแกรม MATLAB ที่มีโปรแกรมจำลองสถานการณ์ของมวลไถล ที่มีผลกระทบของแรงเสียดทานไม่เชิงเส้น เป็นฟังก์ชันเป้าหมายในการค้นหาค่าโดยวิธีปัญญาประดิษฐ์ได้แก่ วิธีการค้นหาแบบตาบอด และหลักการจินเนติกส์อัลกอริทึม (ที่มีฟังก์ชันเรียกใช้ในโปรแกรม MATLAB) ความเร็วในการวิเคราะห์ช่วงที่เกิดการติดลื่นของแท่น เพื่อการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบ ส่วนเครื่อง

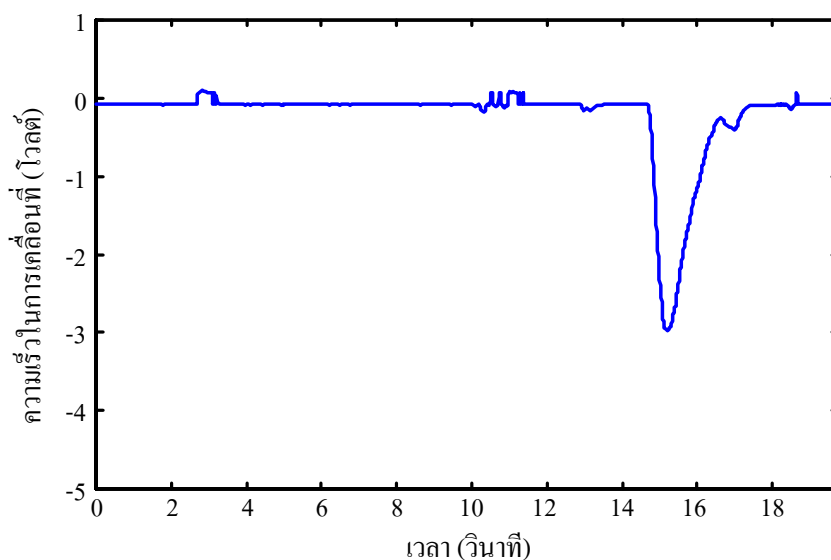
คอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 3.1 เขียนโปรแกรมภาษาซีควบคุมการอ่านค่าจากพอร์ตเครื่องพิมพ์ ที่ต่อการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบ 4 ช่องสัญญาณ เพื่อทำหน้าที่เป็นโปรแกรมปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เชิงเส้นแบบออนไลน์ โดยวิธีฟuzzyลอจิก โดยมีข้อมูลเริ่มต้นมาจากการประมาณค่าแบบออฟไลน์

การออกแบบวงจรควบคุม วงจรปรับแต่งสัญญาณ และการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ มีรายละเอียดดังภาคผนวก ก มีการทดสอบการควบคุมและสัญญาณจากวงจรปรับแต่งสัญญาณต่างๆ โดยมีการเปรียบเทียบโดยออสซิลโลสโคป 4 ช่องสัญญาณ รุ่น DL1540 กับวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล 4 ช่องสัญญาณ ในช่วงท้ายของภาคผนวก ก หัวข้อ ก.7.6 เพื่อประกอบความเข้าใจการควบคุมการเคลื่อนที่แท่นเชิงเส้น เพื่อนำผลไปดำเนินการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เชิงเส้น มีการดำเนินการวัดสัญญาณดังนี้ รันโปรแกรมควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแท่นบนเครื่องคอมพิวเตอร์ รูปที่ 3.2 ควบคุมแท่นให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที และดำเนินการวัดสัญญาณตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแท่น แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ กระแสไฟฟ้าของมอเตอร์และความเร็วในการเคลื่อนที่แท่น จากวงจรปรับแต่งสัญญาณโดยออสซิลโลสโคป 4 ช่องสัญญาณ รุ่น DL1540 ผ่านโปรแกรมภาษาซีเพื่อดำเนินการแยกข้อมูลออกเป็น 4 แฟ้มข้อมูล ดังในรูปที่ ก.27 และนำมาแสดงรูปคลื่นสัญญาณผ่านโปรแกรม MATLAB ได้สัญญาณตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของแท่นลดลงจากตำแหน่ง 352 มิลลิเมตร ถึง 312 มิลลิเมตร ได้ขนาดแรงดันดังรูปที่ 3.3 จากการออกแบบสัญญาณกำหนดให้ขนาดแรงดัน 1 โวลต์ เท่ากับระยะทาง 100 มิลลิเมตร ที่จุดกำเนิดมีขนาดแรงดัน 0 โวลต์ ดูรายละเอียดหัวข้อ ก.6.1

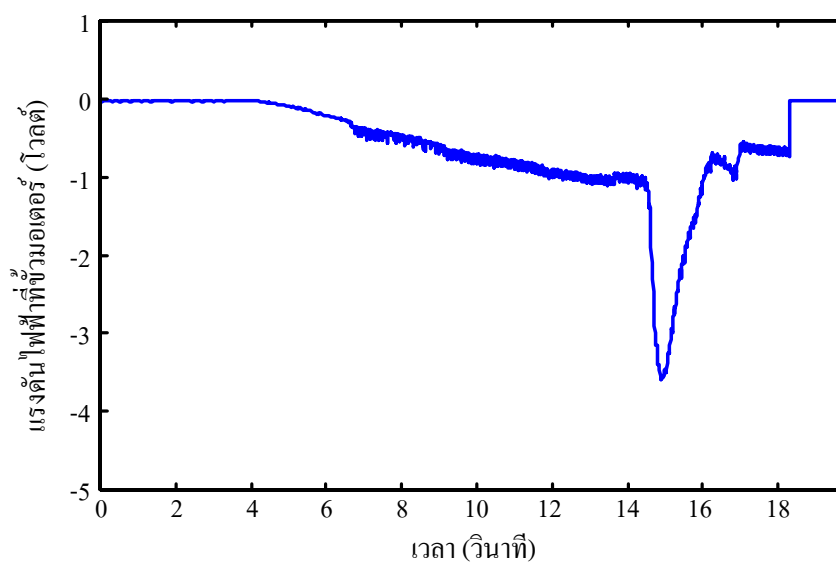


รูปที่ 3.3 สัญญาณตำแหน่งการเคลื่อนที่แท่นที่ควบคุมความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที

สัญญาณความเร็วในการเคลื่อนที่แทนได้ความเร็วเริ่มต้นจากหยุดนิ่ง จนถึงความเร็วสูงสุดที่ 125.03 มิลลิเมตรต่อวินาที และลดลงจนหยุดนิ่ง ในช่วงเวลา 14.5 – 17.5 วินาที ดังรูปที่ 3.4 จากการออกแบบแรงดัน 1 โวลต์ เท่ากับความเร็ว 13.33333 มิลลิเมตรต่อวินาที ดูรายละเอียดหัวข้อ ก.6.1 ประกอบ



รูปที่ 3.5 สัญญาณความเร็วในการเคลื่อนที่แทนที่ควบคุมความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที

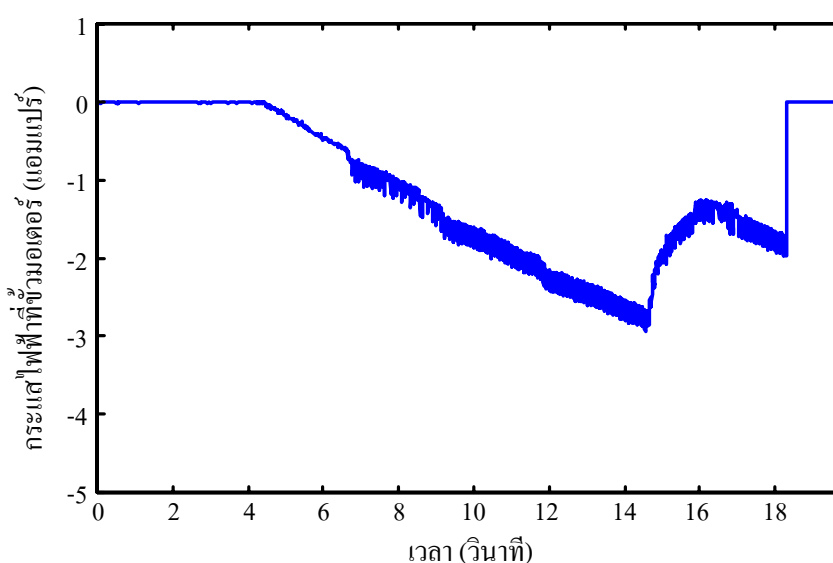


รูปที่ 3.5 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ที่ควบคุมความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที

สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์เริ่มจาก 0 โวลต์ จนถึง 7.2 โวลต์ ดังรูปที่ 3.4 จากการออกแบบขนาดแรงดัน 1 โวลต์ เท่ากับแรงดันที่ขั้วมอเตอร์ 2 โวลต์ ดูรายละเอียดการออกแบบหัวข้อ ก.6.3 ประกอบ

สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ไฟฟ้า วัดแรงดันไฟฟ้าเริ่มจาก 0 โวลต์ ลดลงจนถึง -1.48 โวลต์ มีค่าเท่ากับกระแส -1.48 แอมแปร์ และเมื่อแท่นเริ่มเคลื่อนที่ขนาดกระแสไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์เริ่มลดลง ได้ดังรูปที่ 3.6 จากผลการออกแบบกำหนดขนาดแรงดัน 1 โวลต์ เท่ากับกระแสที่ขั้ว 1 แอมแปร์ รายละเอียดหัวข้อ ก.6.2 ประกอบ

จากสัญญาณต่างๆ ที่ได้นำไปดำเนินการแปลงเป็นข้อมูลเพื่อนำไปใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้นแบบออฟไลน์ โดยนำกระแสไฟฟ้าไปแปลงเป็นแรงที่กระทำต่อระบบการเคลื่อนที่แท่นเชิงเส้น รายละเอียดของการจำลองสถานการณ์มวลไหลดังในบทที่ 4



รูปที่ 3.6 สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ที่ควบคุมความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที

บทที่ 4

การค้นหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองแบบออฟไลน์ ด้วยหลักการจินเนติกอัลกอริทึม

4.1 บทนำ

บทนี้เป็นการกล่าวถึง หลักการและวิธีการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของระบบแบบออฟไลน์ (offline) เพื่อให้ได้ความมั่นใจในผลลัพธ์ที่เป็นพารามิเตอร์ของแบบจำลอง จึงได้ใช้การค้นหาสองวิธีเพื่อเปรียบเทียบกันคือ วิธีการค้นหาด้วยจินเนติกอัลกอริทึมและวิธีการค้นหาแบบตาบ (ดูรายละเอียดในบทที่ 5) ซึ่งทั้งสองวิธีต้องพึ่งพาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีในการค้นหา ที่ได้มาจากการจำลองสถานการณ์การไหลของแท่น ที่มีผลกระทบจากแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีการอธิบายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ไว้พร้อมแผนผังการทำงาน เพื่อให้เกิดความเข้าใจในระบบที่ใช้งาน นอกจากนั้นได้มีการเปรียบเทียบผลการค้นหา กับลักษณะการเคลื่อนที่ของแท่นที่ได้รับผลกระทบจากแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น ที่หลายความเร็วในการเคลื่อนที่ เปรียบเทียบกับการเคลื่อนที่ที่บันทึกผลไว้ได้

4.2 จินเนติกอัลกอริทึม

4.2.1 หลักการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึม

จินเนติกอัลกอริทึม (genetic algorithm : GA) เป็นเครื่องมือหนึ่งที่ใช้กับปัญหาเพื่อการหาค่าเหมาะที่สุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ แนวทางการดำเนินงานนั้นเลียนแบบกระบวนการทางพันธุกรรมในธรรมชาติ หลักการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึม ประกอบด้วย 3 ส่วน กล่าวคือ

- 1) การคัดเลือก (selection) หมายถึง กระบวนการคัดเลือกพ่อแม่พันธุ์ (parents) จากการสุ่มประชากร (population) เริ่มต้น โดยการพิจารณาถึงค่าความเหมาะสม (fitness) เป็นสิ่งสำคัญ จากนั้นจะนำพ่อแม่พันธุ์ที่ได้จากการเลือกไปดำเนินการทางจินเนติกอัลกอริทึม

- 2) ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ (genetic operation) แบ่งออกเป็นสองส่วนใหญ่ๆ คือ คrossover (crossover) และ มิวเทชัน (mutation) เป็นขั้นตอนที่ใช้สำหรับนำพ่อแม่พันธุ์ที่ผ่านการคัดเลือกตามหัวข้อที่ 1 มาทำการขยายพันธุ์เกิดโครโมโซมลูกหลาน (offspring) ออกมา

ชุดใหม่ การดำเนินการค้นหาด้วยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมนั้นอาจมีทั้งการทำ คrossover และมิวเทชัน ควบคู่ไปด้วยกันอย่างเหมาะสม ต่อการแก้ปัญหาเป็นรายการนี้

3) การแทนที่ (replacement) หมายถึง กระบวนการนำโครโมโซมลูกหลานที่มีความเหมาะสมมากนำไปแทนที่ในประชากรเริ่มต้น เพื่อจะดำเนินการตามปฏิบัติการทางสายพันธุ์ในชั่วอายุต่อไป

4.2.2 ขั้นตอนการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึม

หัวข้อนี้จะได้กล่าวโดยย่อ ถึงขั้นตอนทั่วไปในการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึม เพื่อทำการค้นหาคำตอบที่ต้องการ คำตอบของระบบที่ต้องการให้จินเนติกอัลกอริทึมทำการค้นหาจะต้องอยู่ในรูปของโครโมโซมในกลุ่มประชากร ซึ่งคำตอบที่ต้องการจะเป็นคำตอบที่ดีที่สุดในกลุ่ม ดังนั้นระบบจะสามารถรู้ได้ว่าคำตอบที่มีอยู่ในจินเนติกอัลกอริทึม ณ เวลาหนึ่งๆ นั้นดีหรือไม่ดีอย่างไรด้วยการประเมินค่าของโครโมโซมผ่านฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งมีขั้นตอนในการทำงานดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 สร้างประชากรเป็นแบบเลขฐานสอง (binary string) โดยปกติจะใช้การสุ่มข้อมูล เป็นจำนวน n ชุด

ขั้นตอนที่ 2 ประเมินค่าโครโมโซมของกลุ่มประชากรทั้งหมด ด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เนื่องจากระบบไม่สามารถเข้าใจค่าของโครโมโซมภายในจินเนติกอัลกอริทึม ดังนั้นโครโมโซมจะต้องผ่านการถอดรหัสก่อน ซึ่งวิธีการถอดรหัสที่ใช้เป็นแบบเลขฐานสอง โครโมโซมนั้นได้มาจากการเรียงกันของคำตอบของระบบแบบบิตต่อบิต เมื่อถอดรหัสแล้วจะได้ค่าจริงของคำตอบของระบบ เพื่อนำค่าที่ได้ไปแทนในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้ได้ค่าความเหมาะสมของโครโมโซมนั้นๆ

ขั้นตอนที่ 3 นำค่าความเหมาะสมมาทำการคัดเลือกโครโมโซมบางกลุ่มจากกลุ่มประชากร มาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ โดยจะเป็นตัวแทนในการถ่ายทอดสายพันธุ์ให้กับรุ่นถัดไป ขั้นตอนนี้จะต้องพึ่งพาวิธีการคัดเลือกแบบกระบวนการสุ่มครอบจักรวาล (stochastic universal sampling : SUS)

ขั้นตอนที่ 4 นำต้นกำเนิดสายพันธุ์ที่ได้มาทำปฏิบัติการทางสายพันธุ์ โดยโครโมโซมต้นกำเนิดผ่านการทำ crossover และทำมิวเทชัน ซึ่งเสมือนเป็นการตัดต่อพันธุกรรม เพื่อให้เกิดการ กลายพันธุ์ของโครโมโซม เป็นโครโมโซมลูกหลานต่อไป

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาค่าความเหมาะสมจากโครโมโซมลูกหลาน โดยกระทำเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 2

ขั้นตอนที่ 6 โครโมโซมในประชากรเดิมจะถูกแทนที่ด้วยโครโมโซมลูกหลาน ที่ได้จากขั้นตอนที่ 5 จะมีประชากรเพียงบางส่วนเท่านั้นที่จะถูกแทนที่ด้วยกลวิธีเฉพาะสำหรับขั้นตอน

ของการแทนที่โดยใช้ค่าความเหมาะสม เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจ และจะได้กลุ่มประชากรใหม่ที่ดีขึ้น

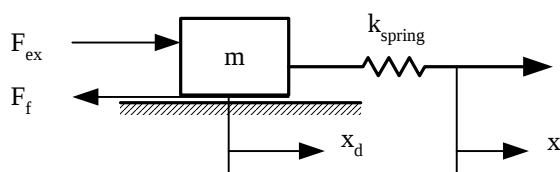
ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบค่าความเหมาะสมของคำตอบที่ได้ ว่าเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่ ถ้าไม่ ให้ไปเริ่มทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 3 ต่อไป แต่ถ้าได้คำตอบที่ต้องการจากโครโมโซมที่ดีที่สุดแล้ว การค้นหาคำตอบก็จะสิ้นสุด

รายละเอียดการค้นหาคำตอบด้วยหลักการจินเนติกอัลกอริทึมในแต่ละขั้นตอนสามารถหาข้อมูลเพิ่มเติมได้จาก (อาทิตย์,2545) และ (Man,1996)

4.3 การจำลองสถานการณ์มวลไหลที่มีผลกระทบจากแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น

การจำลองสถานการณ์สำหรับมวลไหล เมื่อปรากฏแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น นับว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการทำความเข้าใจพลวัตของมวลไหล และการแก้ไขปรับปรุงพลวัต เพราะระบบไม่เป็นเชิงเส้นไม่อาจหาผลเฉลยในรูปตายตัวเสมอไปได้ ดังนั้น เทคนิคเฉพาะในการจำลองสถานการณ์ ที่ต้องดำเนินงานโดยละเอียดรอบคอบด้วยความระมัดระวัง จึงได้รับการนำเสนอในหัวข้อนี้

ระบบมวลไหลที่ใช้เพื่อการจำลองสถานการณ์ในครั้งนี้แสดงดังรูปที่ 4.1 ปลายทางขวาของสปริงเคลื่อนที่ด้วยการจัด x_i ซึ่งไม่เท่ากับการจัดของมวล m คือ x_d ขณะไหล มีแรงภายนอก F_{ex} ช่วยกระทำ ให้เกิดการไหล แรงดังกล่าวมีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ขับเคลื่อนแทนเป็นอุปกรณ์กำเนิดแรง การเคลื่อนที่ประสบกับแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้นใดๆ F_f ที่เป็นฟังก์ชันของความเร็ว v และแรงกระทำ F_{in} เราอาจเขียนสมการพลวัตได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 การยึดมวลติดกับสปริงที่มีค่า k_{spring} ไหลไปทางขวามีแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น

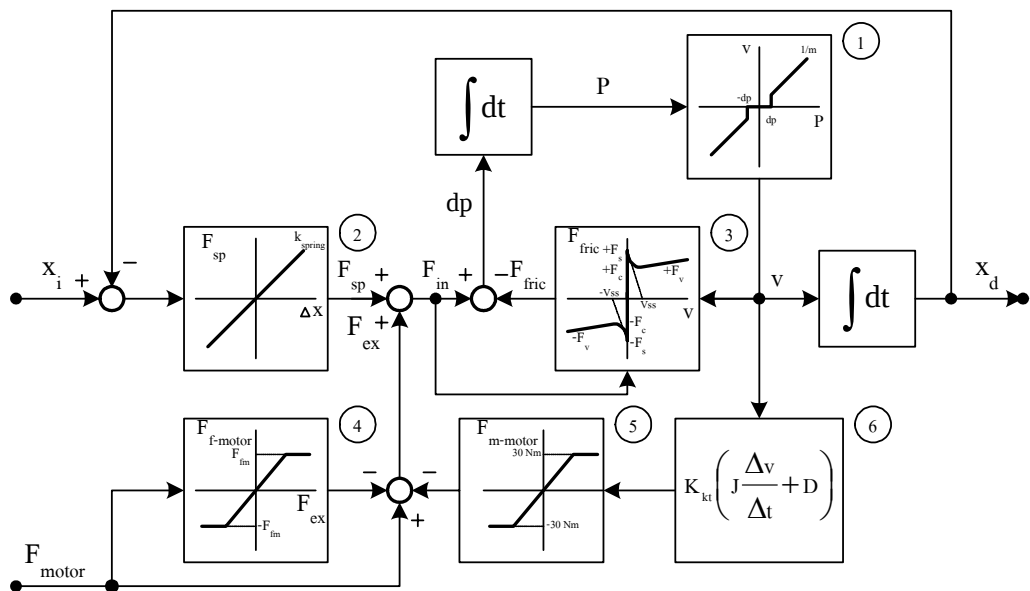
F_f กับแรงกระทำภายนอก F_{ex}

$$m\ddot{x} = k_{spring} (x_i - x_d) - F_f(v, F_{in}) + F_{ex} \quad (4-1)$$

ในการจำลองสถานการณ์เพื่อที่จะหาการขจัด x_d ของมวล การใช้กลไกการอินทิเกรตนั้นให้ผลที่น่าเชื่อถือมากกว่าการอนุพันธ์ ซึ่งถือเป็นหลักการที่ดีในการสร้างโปรแกรมการจำลองสถานการณ์ ดังนั้นจึงตั้งต้นที่ความเข้าใจว่า

$$v = \dot{x}_d \quad \text{หรือ} \quad x_d = \int v dt \quad (4-2)$$

ซึ่งอาจสังเกตได้จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.2 ที่ปรากฏบล็อก $\int dt$ ทางขวาสุดของรูปที่ให้เอาต์พุตเป็น x_d ในการจำลองสถานการณ์โปรแกรมจะต้องสร้างความเร็ว v เป็นอินพุตให้แก่บล็อก $\int dt$ นี้ให้ได้อย่างถูกต้อง ผลการคำนวณทั้งหมดจึงจะน่าเชื่อถือและถูกต้อง



รูปที่ 4.2 แผนผังโครงสร้างการจำลองสถานการณ์มวลสปริง

พิจารณาสมการ (4-1) ทราบได้ว่า F_{in} ในที่นี้คือ $F_{sp} + F_{ex}$ โดยกำหนดให้ $F_{sp} = k_{spring}(x_i - x_d)$ ดังนั้นอาจเขียนสมการ (4-3) ได้ใหม่ให้อยู่ในรูปของ v ได้ดังนี้

$$v = \frac{1}{m} \int (F_{in} - F_f(v, F_{in})) dt = \frac{P}{m} \quad (4-3)$$

ซึ่ง P คือโมเมนต์ และจากสมการ (4-3) เราอาจเขียนแสดงอัตราเปลี่ยนของ P ต่อเวลาได้ว่า

$$\frac{dP}{dt} = F_{in} - F_f(v, F_{in}) \quad (4-4)$$

บล็อก (2) ของแผนภาพการทำงานในรูปที่ 4.2 ใช้ช่วยให้ความหมายการสร้าง F_{sp} ในโปรแกรมสัญลักษณ์ ภายในบล็อกใช้แทนค่านิจของสปริง อินพุตของบล็อก (2) เป็น $(x_i - x_d)$ เมื่อผ่านบล็อกก็จะถูกคูณ k_{spring} ข้อดีของการใช้โครงสร้างเป็นบล็อกเช่นนี้ก็คือ รูปภาพภายในบล็อกจะให้ความเข้าใจระดับหนึ่ง การพัฒนาโปรแกรมจะทำงานเป็นบล็อกๆ ในอนาคตหากมีการเปลี่ยนแปลง (ดังเช่นค่านิจ k_{spring} อาจเปลี่ยนเป็นไม่เชิงเส้น) ก็ทำการแก้ไขโปรแกรมที่สอดคล้องกับบล็อกและแก้ไขรูปภาพได้สะดวก

เมื่อนำ F_{in} มารวมกับ $-F_f$ และ F_{ex} จะเกิดเป็น $\frac{dP}{dt}$ (หรือ dp ในภาพ) และ $\int dP$ จะได้ผลเป็น P โดยจะต้องผ่านบล็อก (1) เพื่อทำการหารด้วย m ดังสมการ (4-3) จะได้ผลลัพธ์เป็น v แต่ถ้า P มีค่าอยู่ระหว่าง $-dp$ ถึง dp ที่ได้มาจากผลคูณของ m กับ dv จะทำให้ผลลัพธ์ความเร็ว v มีค่าเป็นศูนย์ แสดงได้ด้วยความสัมพันธ์ดังนี้

$$v = \begin{cases} 0 & , -dp < P < dp \\ \frac{P}{m} & , \text{otherwise} \end{cases} \quad (4-5)$$

กระบวนการตามบล็อก (4) (5) และ (6) เป็นการหาแรงที่ได้มาจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยค่า F_{motor} ได้มาจากผลคูณระหว่าง กระแสของมอเตอร์ (i) ค่าคงที่สำหรับเปลี่ยนจากกระแสเป็นแรงบิดจากข้อมูลจำเพาะของมอเตอร์นี้ (K_t) และค่าคงที่สำหรับเปลี่ยนจากแรงบิดเป็นแรงที่กระทำ (K_v) ดังสมการ (4-6)

$$F_{motor} = K_t \cdot K_v \cdot i \quad (4-6)$$

กำหนดให้ K_t เท่ากับ 18.2 มิลลินิวตันต่อแอมแปร์

$$K_v = \frac{2\pi}{1} \eta_b \eta_c a = \frac{2\pi}{5 \times 10^{-3}} (0.81)(0.925)(5.9) \quad (4-7)$$

โดยการหาค่า K_v มาจากสมการเปลี่ยนแนวแรงจากแรงบิดเป็นแรงกระทำของเฟืองแบบเกลิวหนอน มีค่า η_b คือประสิทธิภาพของเฟืองทดรอบของมอเตอร์ ค่า η_c เป็นประสิทธิภาพของเฟืองเกลิวหนอนแบบลูกปืน (W.Stadler, 1995) ค่า a คืออัตราทดของเฟืองที่ติดกับมอเตอร์ และ 1 คือระยะร่อนของเฟืองแบบเกลิวหนอนในหนึ่งรอบ

บล็อก (4) เป็นการหาค่าแรงเสียดทานภายในมอเตอร์ไฟฟ้า F_{f_motor} จากที่ข้อมูลจำเพาะของมอเตอร์ได้โดยค่าแรงเสียดทานนี้จะมีความสัมพันธ์กับ F_{motor} มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$F_{f_motor}(F_{motor}) = \begin{cases} F_{fm+} & , F_{motor} \geq F_{fm+} \\ F_{motor} & , F_{fm-} < F_{motor} < F_{fm+} \\ F_{fm-} & , F_{motor} \leq F_{fm-} \end{cases} \quad (4-8)$$

จากสมการ (4-8) ค่า F_{fm+} กับ F_{fm-} มีขนาดเท่ากันแต่มีค่าด้านบวกกับด้านลบ โดยมีขนาดเท่ากับผลคูณของแรงเสียดทานของมอเตอร์ 2.4 มิลลินิวตันเมตร กับค่า K_v ดังสมการ (4-7)

ส่วนบล็อก (5) กับ (6) เป็นการคำนวณแรงเฉื่อยในการหมุนของมอเตอร์ที่คำนวณย้อนกลับมาจากความเร็วในการเคลื่อนที่ของแท่นดังนี้ในบล็อก (6) ได้ดังนี้

$$F_{m_motor}(v) = K_{kt} \left(J_m \frac{dv}{dt} + D_m v \right) \quad (4-9)$$

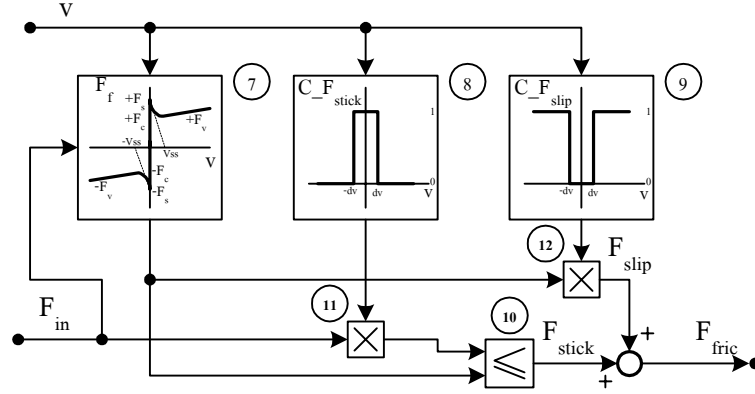
ในบล็อก (5) เป็นการจำกัดค่าไม่ให้เกิน ± 30 นิวตัน ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหาแรงกระทำภายนอกได้ดังนี้

$$F_{ex} = F_{motor} - F_{f_motor}(F_{motor}) - F_{m_motor}(v) \quad (4-10)$$

บล็อก (3) ในรูปที่ 4.2 เป็นแบบจำลองของแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น ที่ได้มีการพัฒนามาจากแบบจำลองของคาร์นอปป์ปรับให้ไม่สมมาตร มีรายละเอียดเพิ่มเติมภายในบล็อกนี้แสดงดังรูปที่ 4.4 เป็นอธิบายการทำงานของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น

บล็อก (7) ในรูปที่ 4.3 เป็นแบบจำลองแรงเสียดทานชนิดผลรวมสไตรเบ็ค (stribeck) และความหนืด มีความสัมพันธ์กับความเร็วและแรงที่กระทำ โดยมีขนาดของแรงเสียดทานขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน ด้านบวกคือ F_{S+} , F_{C+} , F_{V+} ด้านลบ F_{S-} , F_{C-} , F_{V-} และ vss ซึ่ง

ในงานวิจัยนี้จะทำการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ทั้งเจ็ดของแรงเสียดทาน ที่ได้รับการทดสอบระบบแท่นเคลื่อนที่ แบบจำลองแรงเสียดทานดังกล่าวแสดงได้สมการ (4-11)



รูปที่ 4.3 แผนผังของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น

$$F_f(v, F_{in}) = \begin{cases} F_{C+} + (F_{S+} - F_{C+}) e^{-\left|\frac{v}{v_{ss}}\right|} + F_{V+} |v| & , v > 0 \\ F_{S+} & , v = 0 \text{ และ } F_{in} > 0 \\ F_{S-} & , v = 0 \text{ และ } F_{in} < 0 \\ F_{C-} + (F_{S-} - F_{C-}) e^{-\left|\frac{v}{-v_{ss}}\right|} + F_{V-} |v| & , v < 0 \end{cases} \quad (4-11)$$

ในบล็อก (8) ค่า C_F_{stick} เป็นลอจิกแสดงแรงเสียดทานในสภาวะติด (stick) และสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$C_F_{stick}(v) = \begin{cases} 1 & , -dv < v < dv \\ 0 & , \text{otherwise} \end{cases} \quad (4-12)$$

ส่วนในบล็อก (9) ค่า C_F_{slip} เป็นลอจิกแสดงแรงเสียดทานในสภาวะลื่น (slip) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$C_F_{slip}(v) = \begin{cases} 0 & , -dv < v < dv \\ 1 & , \text{otherwise} \end{cases} \quad (4-13)$$

บล็อก (11) เป็นการคูณกันระหว่างผลที่ได้จากบล็อก (7) และบล็อก (8) นำผลที่ได้จากบล็อก (11) ไปเปรียบเทียบกับ F_{in} ในบล็อก (10) ซึ่งเป็นการหาค่าต่ำสุดระหว่างแรงทั้งสอง เพื่อนำผลที่ได้ไปเป็นแรงเสียดทานในสถานะติด F_{stick} ซึ่งสามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้

$$F_{stick}(F_{in}, F_f(v, F_{in})) = \begin{cases} F_{in} & , |F_{in}| \leq |C_{stick}(v) \times F_f(v, F_{in})| \\ C_{stick}(v) \times F_f(v, F_{in}) & , \text{otherwise} \end{cases} \quad (4-14)$$

ส่วนบล็อก (12) เป็นการคูณกันระหว่างผลที่ได้จากบล็อก (7) กับลอจิกจากบล็อก (9) ได้เป็นแรงเสียดทานในสถานะลื่น F_{slip} สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$F_{slip}(v) = C_{slip}(v) \times F_f(v, F_{in}) \quad (4-15)$$

ดังนั้นแบบจำลองแรงเสียดทานชนิดผลรวมสตรายเบ็คและความหนืด จากรูปที่ 4.4 มีสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$F_{fric} = F_{stick}(F_{in}, F_f(v, F_{in})) + F_{slip}(v) \quad (4-16)$$

โปรแกรมจำลองสถานการณ์ของมวลไถล ได้พัฒนาขึ้นด้วย MATLAB ดังมีรายละเอียดในซีดีรอม ชื่อแฟ้มข้อมูล Obj_modelx1.m

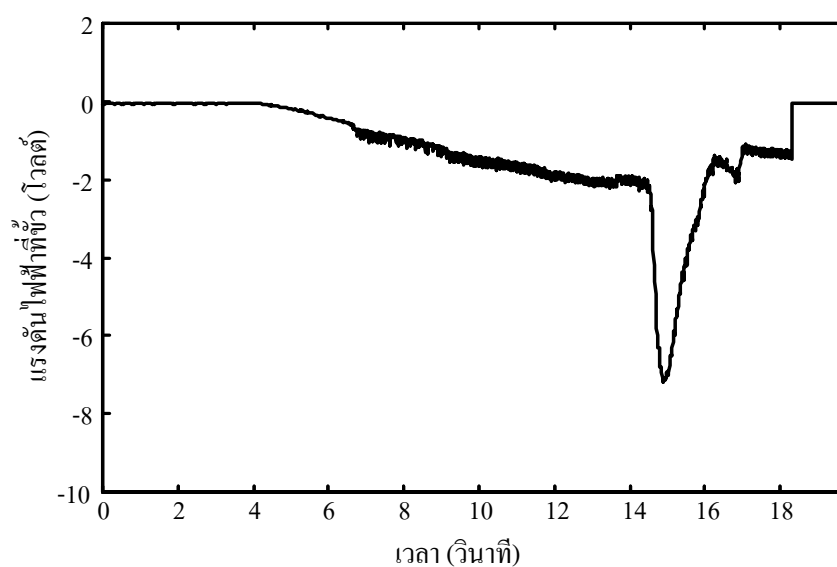
4.4 การค้นหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทาน

การค้นหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานชนิดผลรวมสตรายเบ็คและความหนืด ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมด 7 ค่า ดังสมการ (4-11) โดยในการค้นหาพารามิเตอร์จะทำสองวิธีการเปรียบเทียบกับ แต่ในบทนี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีการค้นหาด้วยจินเนติกอัลกอริทึม

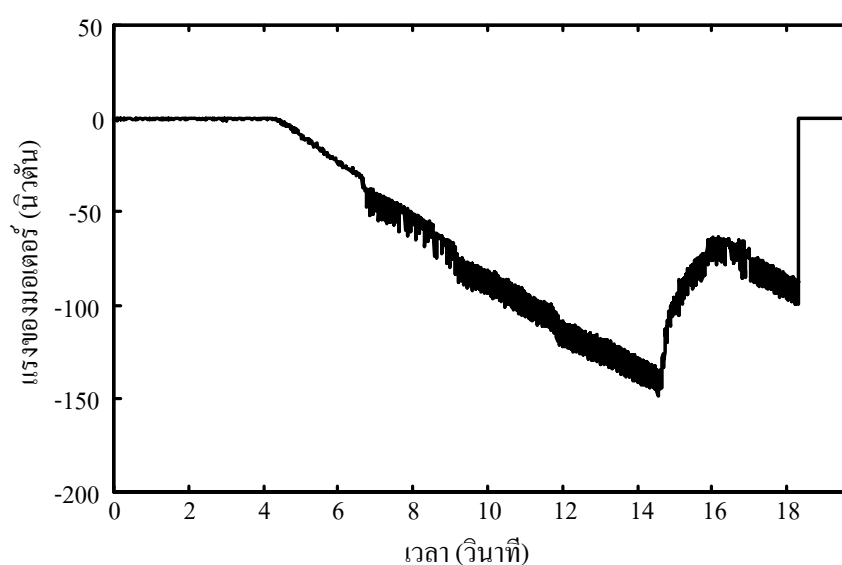
4.4.1 ขั้นตอนทดสอบและจัดเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการค้นหาแบบจำลองแรงเสียดทาน

เนื่องจากการทดสอบระบบขับเคลื่อนแท่นแนวตรงให้เคลื่อนที่ ทำได้โดยการควบคุมตำแหน่งแบบป้อนกลับที่คอมพิวเตอร์ในห้องปฏิบัติการที่ 2 ดังที่ได้เคยอธิบายผ่านมาแล้วในบทที่ 3 โดยมีรูปที่ 3.2 ใช้ร่วมพิจารณาประกอบกัน การกำหนดความเร็วเพื่อทดสอบการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสถานะติดลื่น ได้แก่ความเร็ว 3 , 5 และ 8 มิลลิเมตรต่อวินาที มีการจัดเก็บข้อมูลแบบแถวลำดับ ด้วยการบันทึกผ่านออสซิลโลสโคป 4 ช่องสัญญาณ รุ่น DL1540 ของ YOKOGAWA นำ

ข้อมูลเหล่านั้นมาผ่านกระบวนการแยกข้อมูลจากดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ ก.7.6 ข้อมูลที่ได้จากการกระบวนการแยกข้อมูล นำไปป้อนให้โปรแกรม MATLAB ที่ได้พัฒนาขึ้นสำหรับการค้นหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทาน ซึ่งฟังก์ชันการจำลองสถานการณ์มวลไถ ที่มีผลแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น ดังที่ได้กล่าวถึงไว้ในหัวข้อ 4.4 รูปที่ 4.4



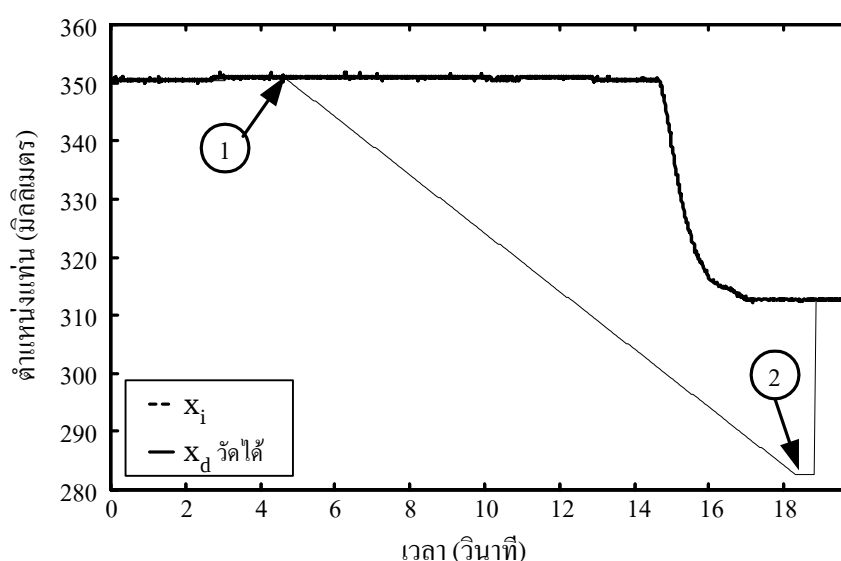
รูปที่ 4.4 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์สัมพันธ์กับฐานเวลา



รูปที่ 4.5 แรงของมอเตอร์สัมพันธ์กับฐานเวลา

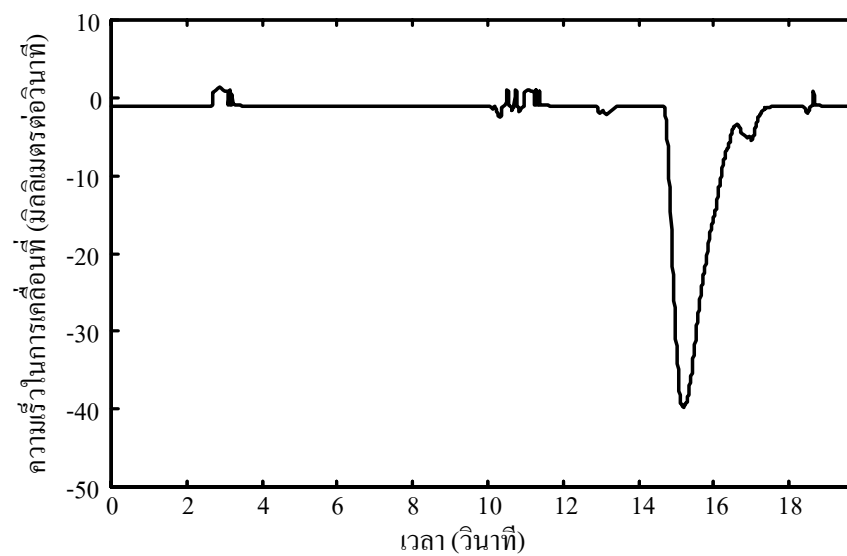
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ขั้วมอเตอร์กับฐานเวลา ขนาดของข้อมูลกับแรงดันคั่นที่ขั้วจริงคือ 1 โวลต์ที่อ่านได้ เท่ากับ 2 โวลต์ของแรงดันที่ขั้ว ซึ่งรูปนี้เป็นตัวอย่างในการแสดงข้อมูลที่มีความเร็ว -5 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่ช่วงตำแหน่ง 350 – 319 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.5 เป็นรูปที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงของมอเตอร์กับฐานเวลา ซึ่งขนาดของแรงได้มาจากขนาดของกระแสที่ป้อนมอเตอร์ ผ่านกระบวนการถ่ายโอนแรงจากกระแสไปเป็นแรงบิดของมอเตอร์ (1 แอมแปร์ เท่ากับ 18.2 มิลลินิวตัน-เมตร) ถ่ายทอดผ่านเฟืองทด 5.9:1 เป็นแรงในแนวตรงกระทำกับแท่นดั่งสมการ (4-6) จากรูปจุดที่ 1 คือจุดที่แรงของมอเตอร์มีขนาดมากกว่า 3 นิวตัน ซึ่งเป็นช่วงเวลาเริ่มต้นในการสร้างสัญญาณตำแหน่งอ้างอิงตามค่าความเร็วที่กำหนด ในตัวอย่างนี้เป็นความเร็ว -5 มิลลิเมตรต่อวินาที และจุดที่ 2 เป็นจุดสิ้นสุดในการคำนวณสัญญาณตำแหน่งอ้างอิง เนื่องจากขนาดแรงของมอเตอร์มีขนาดน้อย 3 นิวตัน ซึ่งสัมพันธ์กับกราฟเส้นประรูปที่ 4.6 ส่วนสัญญาณตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแท่นเป็นกราฟเส้นสีดำ สัมพันธ์กับข้อมูลที่วัดได้ คือ ขนาดสัญญาณที่วัด 1 โวลต์ มีค่าเท่ากับแท่นเคลื่อนที่ไป 100 มิลลิเมตร ดังรูป

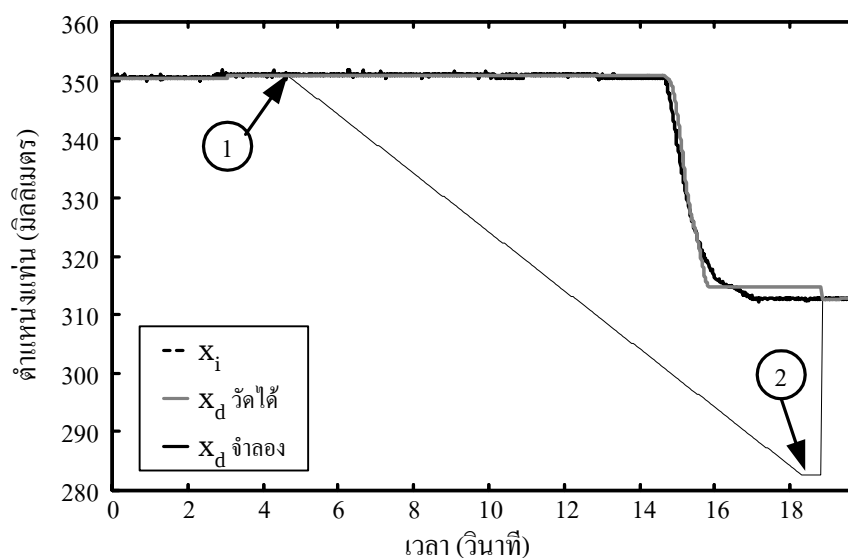


รูปที่ 4.6 ตำแหน่งอ้างอิงและตำแหน่งของแท่นสัมพันธ์กับฐานเวลา

จากรูปที่ 4.6 เมื่อแท่นมีการเคลื่อนที่จะทำให้ปรากฏความเร็วในการเคลื่อนที่ของแท่นดังรูปที่ 4.7 โดยมีขนาดความเร็วสัมพันธ์กับข้อมูลที่วัดได้ คือขนาดสัญญาณ 15 โวลต์เท่ากับความเร็วในการหมุน 80π เรเดียนต่อวินาที และ 1 รอบการหมุนได้ระยะทางเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ดังนั้น ข้อมูล ขนาด 1 โวลต์จะมีค่าเท่ากับ 13.33333 มิลลิเมตรต่อวินาที



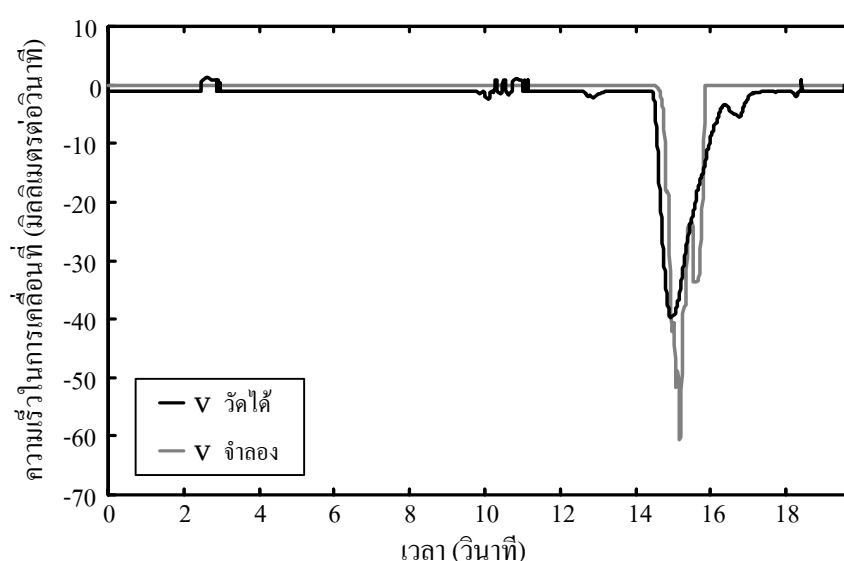
รูปที่ 4.7 ความเร็วในการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับฐานเวลา



รูปที่ 4.8 ตำแหน่งจากการจำลองสถานการณ์เทียบกับตำแหน่งที่ได้จากการทดสอบ

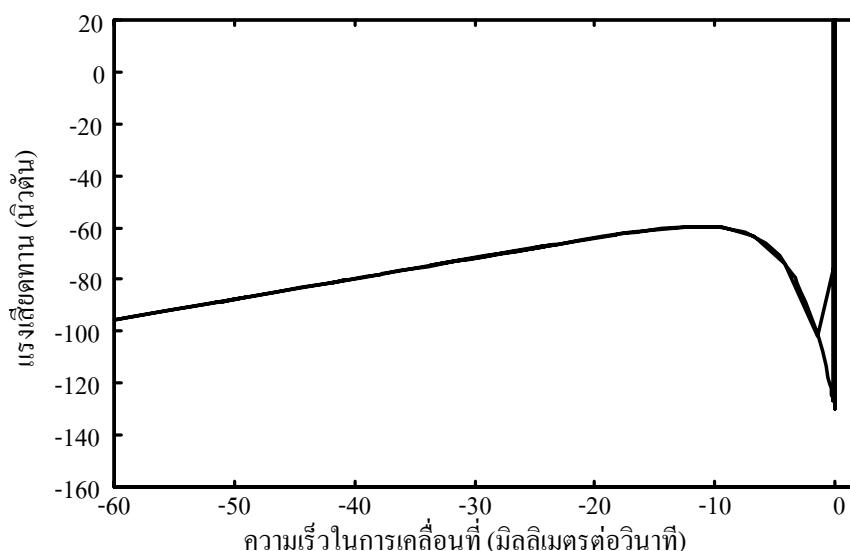
รูปที่ 4.5 ถึงรูปที่ 4.7 แสดงข้อมูลที่ได้จากออสซิลโลสโคป และผ่านกระบวนการเปลี่ยนขนาดตามการออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณ เพื่อนำมาป้อนให้กับการจำลองสถานการณ์ มวลไถ ที่มีผลของแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น ได้ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของแท่นดังรูปที่ 4.9 เส้นกราฟสีเทาเป็นตำแหน่งที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ ส่วนกราฟเส้นสีดำและเส้นประ แสดงตำแหน่งของแท่นที่ได้จากการทดสอบและตำแหน่งอ้างอิงตามลำดับ ได้จากการควบคุมตำแหน่ง

แบบป้อนกลับตามลำดับ เช่นเดียวกับรูปที่ 4.6 ดังนั้นจากรูปที่ 4.8 เมื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่างกราฟเส้นสีดำกับกราฟเส้นสีเทา จะได้ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างเส้นกราฟทั้งสอง จะคำนวณได้จากผลรวมของผลต่างกำลังสองระหว่างตำแหน่งของแท่นจากการจำลองสถานการณ์ กับตำแหน่งของแท่นจากการทดสอบระหว่างจุดต่อจุด จากรูปที่ 4.8 มีจำนวนข้อมูลทั้งหมด 1,947 ข้อมูล และได้คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนได้ 1,772.64 มิลลิเมตร² ระหว่างเส้นกราฟทั้งสอง ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนที่มีค่าน้อย จะมีความหมายว่าตำแหน่งจากการจำลองสถานการณ์ใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบผลของความเร็วจากการจำลองสถานการณ์กับความเร็วของแท่นที่วัดได้

ดังนั้นจากการจำลองสถานการณ์มวลไหล เมื่อแท่นมีการเคลื่อนที่จะได้ผลของความเร็วและแรงเสียดทานจากแบบจำลองแรงเสียดทานดั่งสมการ (4-11) ซึ่งรูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบความเร็วที่ได้จากการจำลองสถานการณ์เป็นกราฟเส้นสีเทา กับความเร็วที่ได้จากการทดสอบเป็นกราฟเส้นสีดำ รูปที่ 4.10 แสดงตัวอย่างของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้นที่ได้จากผลลัพธ์ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ โดยมีความสัมพันธ์กับความเร็ว จากรูปที่นำเสนอในหัวข้อนี้ เป็นตัวอย่างของข้อมูลที่ความเร็วในการเคลื่อนที่เป็นลบหรือตำแหน่งเคลื่อนที่ลดลง จะได้แบบจำลองแรงเสียดทานทางลบ ซึ่งผลต่างๆ ที่ได้จะได้นำไปใช้กับการค้นหาทั้งสองวิธีเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของระบบมวลไหลนี้ต่อไป



รูปที่ 4.10 แรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้นที่ได้จากการค้นหาสัมพันธ์กับความเร็ว

4.4.2 การหาค่าพารามิเตอร์แบบจำลองแรงเสียดทานด้วยจินเนติกอัลกอริทึม

การหาค่าพารามิเตอร์แบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น ด้วยหลักการจินเนติกอัลกอริทึม ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้ใช้โปรแกรม MATLAB Toolbox โดยมีขั้นตอนของการเขียนโปรแกรม 7 ขั้นตอน ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวเป็นขั้นตอนการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึมที่แสดงไว้ในหัวข้อ 4.2.2 และก่อนที่จะเริ่มเขียนโปรแกรมในขั้นตอนที่ 1 ควรจะทำการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับจินเนติกอัลกอริทึมมีทั้งหมด 4 ค่าได้แก่ จำนวนประชากรเริ่มต้น , จำนวนรอบการทำงาน ของ จินเนติกอัลกอริทึม , จำนวนค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ทำการค้นหา และร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์ ที่จะเลือกเป็นจำนวนเท่าใดจากประชากรเริ่มต้นที่กำหนด ซึ่งในโปรแกรม MATLAB ได้ใช้ตัวแปรเพื่อบ่งบอกปริมาณค่าเริ่มต้นดังต่อไปนี้

NIND	คือ จำนวนประชากรที่สร้างใหม่
MAXGEN	คือ จำนวนรอบการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึม
NVAR	คือ จำนวนค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ทำการค้นหา
GGAP	คือ ร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์

การออกแบบโปรแกรม ที่ใช้จินเนติกอัลกอริทึม ควรทำการเลือกค่า NIND , MAXGEN และ GGAP ให้เหมาะสมกับลักษณะงานที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของแบบจำลอง โดยมีการทดลองและผลของการทดลองเพื่อหาค่าเริ่มต้นของจินเนติกอัลกอริทึม ได้นำเสนอรายละเอียดดังในหัวข้อที่ 4.5 และเมื่อได้ค่าเริ่มต้นของจินเนติกอัลกอริทึม ที่เหมาะสมแล้ว จะทำ

การเขียนโปรแกรมขั้นตอนการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึม เพื่อหาค่าพารามิเตอร์แบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิง ซึ่งอธิบายขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การสร้างประชากรเริ่มต้นให้กับจินเนติกอัลกอริทึม โดยใช้คำสั่งของโปรแกรม MATLAB ดังนี้

Chrom = crtbp(NIND, LONG);

เมื่อ LONG คือ ความยาวของโครโมโซม ซึ่งแต่ละโครโมโซมจากประชากรเริ่มต้น จะมีความยาวเท่ากับผลรวมของจำนวนบิตแต่ละตัวแปรรวมกันได้ 112 บิต โดยมีการกำหนดค่าความละเอียดของตัวแปรในการค้นหา 6 ตัว ดังตารางที่ 4.1

Chrom คือ กลุ่มของโครโมโซมเริ่มต้น มีลักษณะเป็นไบนารี (binary) มีจำนวนเท่ากับ NIND ตามที่กำหนด

ตารางที่ 4.1 ค่าความละเอียดของตัวแปรของแบบจำลองแรงเสียดทาน

ตัวแปร	F_s	F_c	F_v	vss	k_{spring}	m
ความละเอียด (บิต)	24	24	16	16	16	16

ขั้นตอนที่ 2 การประเมินค่าโครโมโซมของกลุ่มประชากรทั้งหมดด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเนื่องจากระบบไม่สามารถเข้าใจค่าของโครโมโซมที่เป็นไบนารี ดังนั้นโครโมโซมจะถูกถอดรหัสเป็นค่าจำนวนจริง ก่อนที่จะถูกประเมินด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ใช้คำสั่งของโปรแกรม MATLAB ดังนี้

Phen = bs2rv(Chrom, FieldD)

เมื่อ Phen คือ ค่าจำนวนจริงที่จะถูกประเมินด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์

FieldD คือ รูปแบบของการกำหนด ค่าในการถอดรหัสจากโครโมโซมที่เป็นรูปแบบไบนารีเป็นรูปแบบค่าจำนวนจริง

การกำหนดรูปแบบของ FieldD จะมีโครงสร้างของรูปแบบ ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

$$\text{FieldD} = \begin{bmatrix} \text{length} \\ \text{lower limit} \\ \text{upper limit} \\ \text{code} \\ \text{scale} \\ \text{lower bound} \\ \text{upper bound} \end{bmatrix} \quad (4-17)$$

ความสัมพันธ์ (4-17) แสดงการกำหนดโครงสร้างของ FieldD แบบเมตริกซ์ แต่ละอิลิเมนต์มีความหมายและมีกรอบการใช้งานดังต่อไปนี้

- length เป็นโครงสร้างสำหรับกำหนดความยาวในแต่ละโครโมโซม ซึ่งกำหนดจากจำนวนพารามิเตอร์ที่ต้องการค้นหาและความละเอียดของพารามิเตอร์แต่ละตัว มีการกำหนดโครงสร้างของ length ในงานวิจัย จากตารางที่ 4.1 เรียงตามลำดับของพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$$\text{length} = [24 \ 24 \ 16 \ 16 \ 16 \ 16];$$

- lower limit คือ ขอบเขตของค่าต่ำสุดที่เป็นไปได้ในแต่ละพารามิเตอร์ของระบบที่ต้องการค้นหา ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดโครงสร้างของ lower limit ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ขอบเขตของค่าต่ำสุดและสูงสุดของพารามิเตอร์ระบบมวล-สปริง

ตัวแปร (หน่วย)	F _s (N)	F _c (N)	F _v (N.s/mm)	v _{ss} (mm/s)	k _{spring} (N/mm)	m (kg)
lower limit	70	30	0.75	2.5	0.2	6.0
upper limit	200	60	0.85	4.5	0.5	15.0

- upper limit คือขอบเขตของค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ในแต่ละพารามิเตอร์ของระบบที่ต้องการค้นหา ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดโครงสร้างของ upper limit ดังนี้

- code เป็นโครงสร้างสำหรับการเลือกรหัสที่ใช้ โดยในโปรแกรม MATLAB ให้เลือกการเข้ารหัสอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือ ถ้า code มีค่าเท่ากับศูนย์ หมายถึง การเข้ารหัสแบบไบนารีมาตรฐาน (standard binary) และถ้า code มีค่าเท่ากับหนึ่ง หมายถึง การเข้ารหัสแบบรหัสเกรย์ (gray code) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกการเข้ารหัสแบบไบนารีมาตรฐาน

- scale เป็นโครงสร้างสำหรับเลือกเทคนิคการสเกลค่า ในช่วงระหว่างขอบเขตของค่าต่ำสุดที่เป็นไปได้และขอบเขตค่า สูงสุดที่เป็นไปได้ตามที่อธิบายแล้วข้างต้น ซึ่งในโปรแกรม MATLAB ให้เลือกเทคนิคการสเกลอยู่ 2 แบบ คือ การสเกลเชิงเลขคณิต (arithmetic scaling) โดยกำหนดค่า scale เป็นศูนย์ และการสเกลเชิงลอการิทึม (logarithmic scaling) จะกำหนดค่า scale เป็นหนึ่ง ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกเทคนิคการสเกลเชิงเลขคณิต

- lower bound เป็นการกำหนดรูปแบบว่าจะนำค่าขอบเขตต่ำสุด (lower limit) ไปร่วมพิจารณาด้วยหรือไม่ ถ้าต้องการพิจารณาคำตอบที่ค่าดังกล่าวด้วยจะกำหนดค่า lower bound เป็นหนึ่ง แต่ถ้าไม่ต้องการพิจารณาคำตอบที่ค่าขอบเขตต่ำสุด จะกำหนดค่า lower bound เป็นศูนย์ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกที่จะพิจารณาคำตอบที่ค่าขอบเขตต่ำสุดด้วย จึงกำหนดค่า lower bound ให้มีค่าเป็นหนึ่ง

- upper bound ความหมายเช่นเดียวกันกับ lower bound แต่สำหรับ upper bound จะพิจารณาที่ค่าขอบเขตสูงสุดที่เป็นไปได้ (lower limit) จึงกำหนดค่า upper bound ให้มีค่าเป็นหนึ่ง

จากการอธิบายโครงสร้างของ FieldD ที่กล่าวทั้งหมดข้างต้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดโครงสร้างของ FieldD ตามความเหมาะสมของงานดังต่อไปนี้

```
FieldD      =      [ 24 24 16 16 16 16 ;
                    70 30 0.75 2.5 0.2 6.0 ;
                    200 60 0.85 4.5 0.5 15.0 ;
                    0 0 0 0 0 0 ;
                    0 0 0 0 0 0 ;
                    1 1 1 1 1 1 ;
                    1 1 1 1 1 1 ];
```

ขั้นตอนที่ 3 ประเมินผลคำตอบของระบบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และคำนวณหาค่าความเหมาะสมส่งกลับไปเพื่อใช้ในการคัดเลือกโครโมโซมที่ดีสำหรับการขยายพันธุ์ ซึ่งงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำแผนภาพการทำงานดังรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 เขียนเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยให้ชื่อฟังก์ชันของโปรแกรม MATLAB คือ obj_moTex1 ซึ่งจะนำเสนอในซีดีรอมโปรแกรมที่ใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการจำลองสถานการณ์มัลติโกล โดยกำหนดค่าของพารามิเตอร์ระบบ 6 ค่าดังตารางที่ 4.1 ค่าความเร็วในการควบคุม (cvel) ตำแหน่งแท่นเคลื่อนที่จริง (dpr1) และแรงของมอเตอร์กระทำแท่น (F_EX) และได้ผลในการจำลองสถานการณ์ได้ค่าความ

คลาดเคลื่อน (error) ตำแหน่งแท่นที่จำลองได้ (Xd) ตำแหน่งแท่นควบคุมเคลื่อนที่ (Xi) ความเร็วในการเคลื่อนที่แท่น (Vcal) และแรงที่กระทำแท่นที่ได้ (fin) มีการเลือกใช้ดังนี้

$$[\text{error}, \text{Xd}, \text{Xi}, \text{Vcal}, \text{fin}] = \text{obj_moTex1}(\text{fs}, \text{fc}, \text{fv}, \text{m}, \text{k_spring}, \text{vss}, \text{T}, \text{cvel}, \text{dpr1}, \text{F_EX})$$

จากโปรแกรมฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ได้คำนวณค่าความคลาดเคลื่อน (error) มาจากผลรวมของผลต่างยกกำลังสองระหว่างค่าตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแท่นที่วัดได้ กับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแท่นที่จำลองสถานการณ์ได้ จากค่าความคลาดเคลื่อนนำไปคำนวณค่าความเหมาะสมโดยใช้คำสั่งโปรแกรม MATLAB ใช้วิธีการจัดลำดับ (ranking selection) สำหรับกำหนดค่าความเหมาะสม มีการใช้ดังนี้

$$\text{FitnV} = \text{ranking}(\text{error})$$

เมื่อ FitnV คือ ค่าความเหมาะสมที่ได้จากวิธีการจัดอันดับ

ขั้นตอนที่ 4 ใช้ค่าความเหมาะสมที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 เพื่อคัดเลือกโครโมโซมบางกลุ่มมาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ ซึ่งการคัดเลือกดังกล่าวในโปรแกรม MATLAB มีให้เลือกอยู่ 2 วิธี คือ วิธีการชักตัวอย่างของวงล้อรูเล็ต (roulette wheel sampling : RWS) และวิธีการชักตัวอย่างของกระบวนการเฟ้นสุ่มครอบจักรวาล (stochastic universal sampling : SUS) โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้วิธีการชักตัวอย่างของกระบวนการเฟ้นสุ่มครอบจักรวาล เนื่องจากวิธีการดังกล่าวมีความเหมาะสมกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ซึ่งดูได้จากผลการทดสอบในหัวข้อที่ 4.5 คำสั่งในโปรแกรม MATLAB สำหรับขั้นตอนนี้ คือ

$$\text{SelCh} = \text{select}('sus', \text{Chrom}, \text{FitnV}, \text{GGAP})$$

เมื่อ SelCh คือ ต้นกำเนิดสายพันธุ์ที่ได้จากการคัดเลือกเพื่อเตรียมที่จะสร้างลูกหลานด้วยปฏิบัติการทางสายพันธุ์ในขั้นตอนต่อไป

sus คือ เป็นการกำหนด การใช้วิธีการชักตัวอย่างของกระบวนการเฟ้นสุ่มครอบจักรวาล แต่ถ้าเลือกใช้วิธีการชักตัวอย่างของวงล้อรูเล็ตจะใช้ชื่อว่า rws แทน

สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้กำหนดร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์จากประชากรเริ่มต้น (GGAP) มีค่าเท่ากับ 0.7 เนื่องจากค่าดังกล่าวมีค่าเหมาะสมที่สุด ซึ่งได้จากการทดสอบดังที่กล่าวถึงไว้ในหัวข้อที่ 4.5

ขั้นตอนที่ 5 นำต้นกำเนิดสายพันธุ์มาทำการสร้างลูกหลาน ด้วยปฏิบัติการทางสายพันธุ์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อย คือ การทำครอสโอเวอร์กับการทำมิวเทชัน โดยมีคำสั่ง MATLAB สำหรับการทำครอสโอเวอร์ เป็นดังนี้

$$\text{SelCh1} = \text{recombin}(\text{'xovmp'}, \text{SelCh}, \text{Pc})$$

เมื่อ SelCh1 คือ โครโมโซมหลังจากการทำครอสโอเวอร์ของต้นกำเนิดสายพันธุ์ SelCh

xovmp คือ การทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุด (multiple-point crossover)

Pc คือ ความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์

สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้กำหนดค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.6 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมมากที่สุด โดยค่าดังกล่าวได้จากการทดสอบตามที่นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.5

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกการทำครอสโอเวอร์แบบจุดหลาย เนื่องจากมีความเหมาะสมกับลักษณะงานมากที่สุด โดยดูได้จากผลการทดสอบในหัวข้อที่ 4.5 หลังจากทำการครอสโอเวอร์แล้ว จะทำการมิวเทชันอีกกระบวนการหนึ่ง โดยใช้คำสั่ง MATLAB ดังนี้

$$\text{SelCh2} = \text{mut}(\text{SelCh1})$$

เมื่อ SelCh2 คือ โครโมโซมลูกหลานที่ได้จากปฏิบัติการทางสายพันธุ์ของต้นกำเนิดสายพันธุ์

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณค่าความเหมาะสมของโครโมโซมลูกหลานซึ่งจะใช้วิธีการเดียวกับขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 7 โครโมโซมในประชากรเดิมจะถูกแทนที่ ด้วยโครโมโซมลูกหลานที่ได้จากขั้นตอนที่ 5 ซึ่งประชากรเพียงบางส่วนเท่านั้นที่จะถูกแทนที่ด้วยกลวิธีเฉพาะสำหรับขั้นตอนของการแทนที่ โดยใช้ค่าความเหมาะสมในการตัดสินใจ ซึ่งคำสั่งในโปรแกรม MATLAB ที่ใช้สำหรับขั้นตอนนี้ คือ

$$[\text{Chrom error}] = \text{reins}(\text{Chrom}, \text{SelCh2}, 1, 1, \text{error}, \text{error1})$$

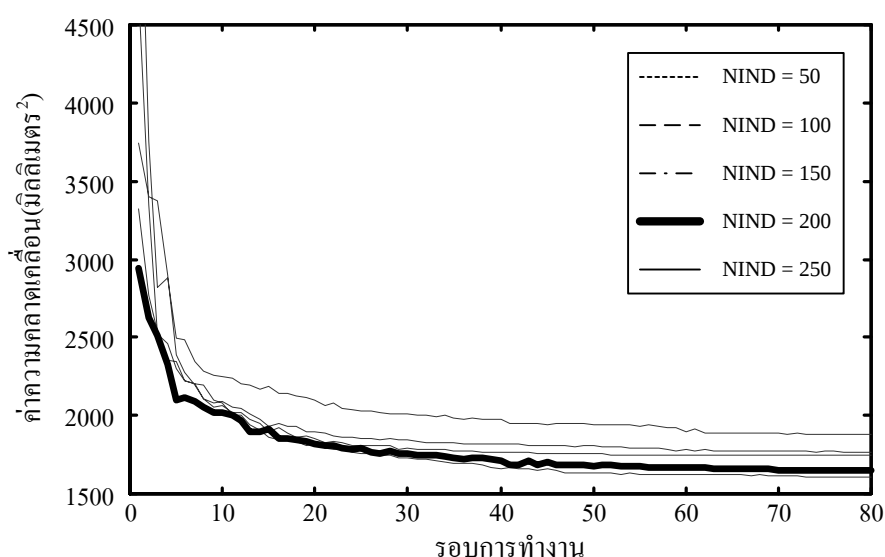
เมื่อ error1 คือ ค่าการประเมิน ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการคำนวณของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในขั้นตอนที่ 6

ขั้นตอนที่ 8 เริ่มต้นทำซ้ำจากขั้นตอนที่ 2 ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้คำตอบที่ต้องการ โปรแกรม MATLAB ที่ใช้สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น ด้วยจินเนติกอัลกอริทึมในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ที่ครอบคลุมการอธิบายดังกล่าวทั้งหมดข้างต้นอาจดูได้จากซีดีรอม ในชื่อแฟ้ม sea_modelx_ad.m

4.5 ผลการทดสอบค่าตัวแปรของจินเนติกอัลกอริทึมที่ใช้ในโปรแกรม MATLAB

จากการอธิบายขั้นตอนการทำงานของจินเนติกอัลกอริทึมดังกล่าวข้างต้น การค้นหาค่าที่ดีที่สุดต้องพึ่งค่าตัวแปรอยู่จำนวนหนึ่ง สำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ มีผลการทดสอบค่าตัวแปรต่างๆ ของจินเนติกอัลกอริทึมดังต่อไปนี้

4.5.1 การทดสอบเพื่อหาค่าจำนวนประชากรเริ่มต้นที่เหมาะสม



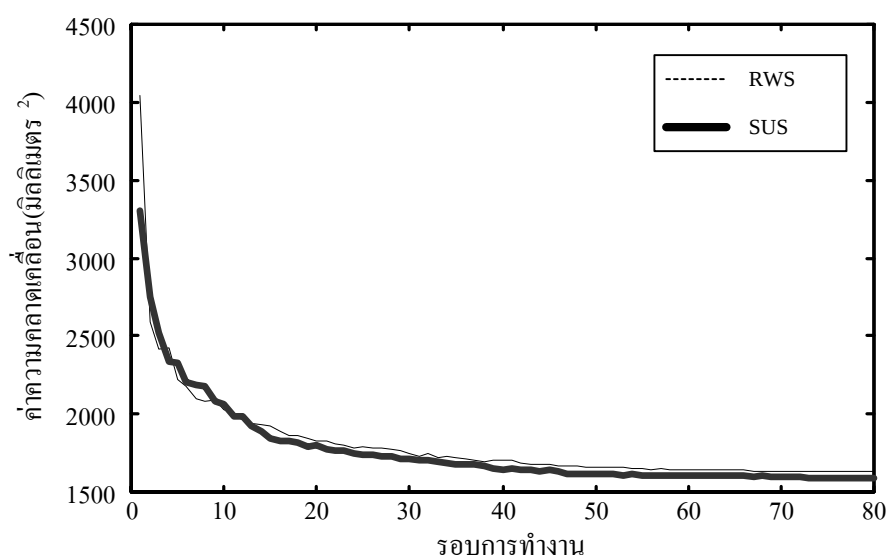
รูปที่ 4.11 ผลการดูเข้าค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบจำนวนประชากรเริ่มต้น

การทดสอบเพื่อหาค่าจำนวนประชากรเริ่มต้น (NIND) ที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ เนื่องจากพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทาน 6 ค่าต่อหนึ่งชุดข้อมูลในการค้นหา มีการกำหนดจำนวนประชากรเริ่มต้นทั้งหมด 5 ค่าได้แก่ NIND = 50, NIND = 100, NIND = 150, NIND = 200 และ NIND = 250 ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.11 จากผลการทดสอบสังเกตผลการดูเข้าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยที่สุดเท่ากับ 1,593.83 มิลลิเมตร² ที่จำนวนประชากรเริ่มต้น 250 โครโมโซม รอบการทำงานที่ 38 และผลการดูเข้าค่าความคลาดเคลื่อน

รองลงมาเท่ากับ 1,638.42 มิลลิเมตร² ที่จำนวนประชากรเริ่มต้น 200 โครโมโซม เนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนต่างกันไม่มาก แต่ถ้าเลือกจำนวนประชากรเริ่มต้น 250 โครโมโซม จะใช้เวลาในการดำเนินการมากกว่า ดังนั้นจากการทดสอบจำนวนประชากรเริ่มต้น ที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เลือกเท่ากับ 200 โครโมโซม เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น ด้วยวิธีจินแนติกอัลกอริทึม

4.5.2 การทดสอบเพื่อหาวิธีการคัดเลือกสายพันธุ์ที่เหมาะสม

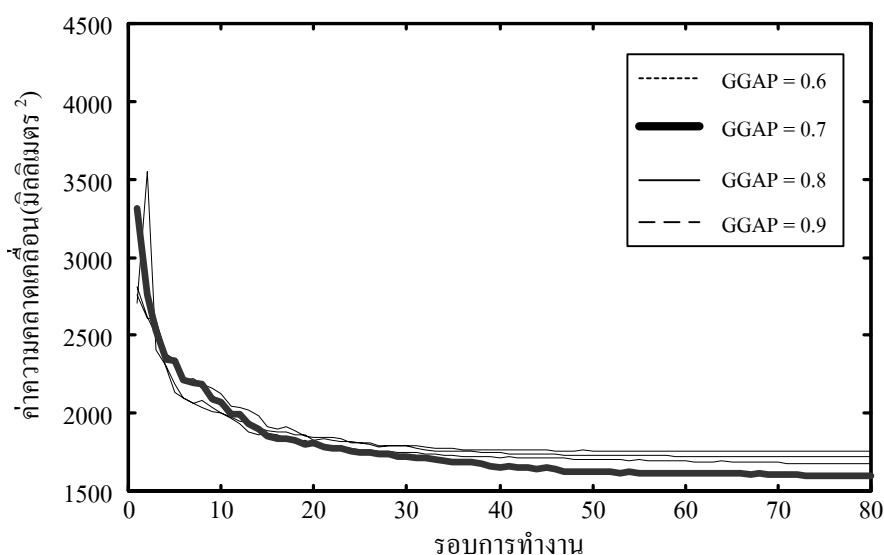
การทดสอบเพื่อหาวิธีการคัดเลือกสายพันธุ์ที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบอยู่ 2 วิธีด้วยกัน คือ วิธีการชักตัวอย่างของกระบวนการเฟ้นสุ่มครอบจักรวาล และวิธีการชักตัวอย่างของวงล้อรูเล็ต ได้ผลการทดสอบหาวิธีการคัดเลือกแสดงดังรูปที่ 4.12 จากผลการคู่เข้าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยที่สุดเท่ากับ 1,593.83 มิลลิเมตร² ที่วิธีการชักตัวอย่างของกระบวนการเฟ้นสุ่มครอบจักรวาล รอบการทำงานที่ 73 ส่วนวิธีการชักตัวอย่างของวงล้อรูเล็ตมีผลการคู่เข้าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 1,638.83 มิลลิเมตร² ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกวิธีการชักตัวอย่างของกระบวนการเฟ้นสุ่มครอบจักรวาล จากการพิจารณาการคู่เข้าของคำตอบที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนในการค้นหาน้อยที่สุด เป็นวิธีการคัดเลือกที่เหมาะสมในการค้นหาค่าพารามิเตอร์แบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 4.12 ผลการคู่เข้าค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบวิธีการคัดเลือกสายพันธุ์

4.5.3 การทดสอบเพื่อหาร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์ที่เหมาะสม

การทดสอบเพื่อหาร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์จากประชากรเริ่มต้น (GGAP) ที่เหมาะสม สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 4 ค่าด้วยกัน คือ $GGAP = 0.6$, $GGAP = 0.7$, $GGAP = 0.8$, และ $GGAP = 0.9$ ซึ่งผลการทดสอบการลู่เข้าค่าความคลาดเคลื่อนแสดงดังรูปที่ 4.13 จากการทดสอบสังเกตผลการลู่เข้าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยที่สุดเท่ากับ 1,638.42 มิลลิเมตร² ที่ค่าร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์จากประชากรเริ่มต้นที่มีค่าเท่ากับ 0.7 มีผลการลู่เข้าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยที่สุด เริ่มจากรอบการทำงานที่ 30 ดังนั้นค่าร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์จากประชากรเริ่มต้นที่มีค่าเท่ากับ 0.7 จึงเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการค้นหาคำกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์

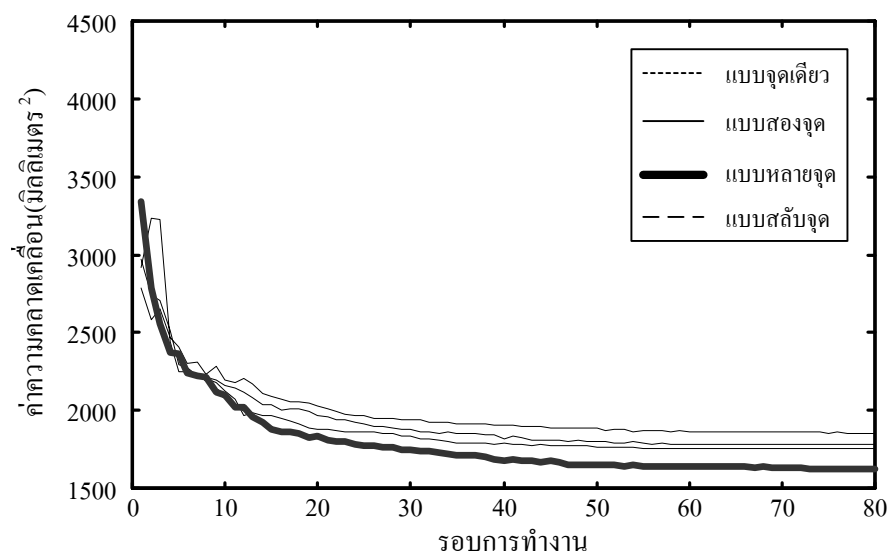


รูปที่ 4.13 ผลการลู่เข้าค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบค่าร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์

4.5.4 การทดสอบเพื่อหาชนิดของการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสม

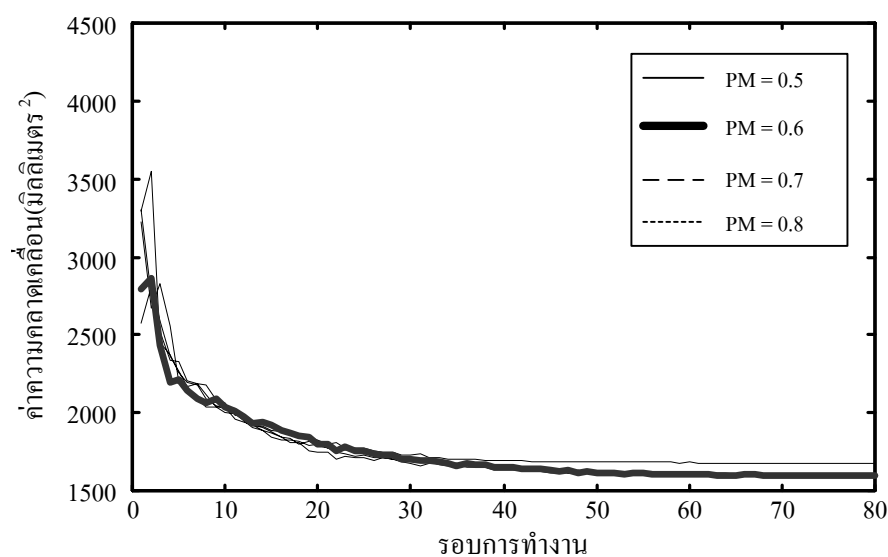
การทดสอบเพื่อหาชนิดของการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสม ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 4 ชนิดด้วยกัน คือ การทำครอสโอเวอร์แบบจุดเดียว , การทำครอสโอเวอร์แบบสองจุด, การทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุด และการทำครอสโอเวอร์แบบสลับที่ ซึ่งได้ผลการทดสอบการลู่เข้าค่าความคลาดเคลื่อนแสดงดังรูปที่ 4.14 จากการทดสอบลักษณะการลู่เข้าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยที่สุดเท่ากับ 1,593.83 มิลลิเมตร² ที่ชนิดของการทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุด เริ่มมีค่าน้อยที่สุดจากรอบการทำงานที่ 12 ส่วนค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยรองลงมาเท่ากับ 1,734.05 มิลลิเมตร² ที่ชนิดของการครอสโอเวอร์แบบสลับจุด ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกการทำครอสโอเวอร์แบบ

หลายจุด เป็นชนิดของการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสม สำหรับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทาน



รูปที่ 4.14 ผลการหาค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบชนิดของการทำครอสโอเวอร์

4.5.5 การทดสอบเพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสม



รูปที่ 4.15 ผลการหาค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์

การทดสอบเพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสม ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 4 ค่า คือ ค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.5, 0.6, 0.7 และ 0.8 ซึ่งผลการรู้เข้าค่าความคลาดเคลื่อนแสดงดังรูปที่ 4.15 เป็นจากการทดสอบสังเกตได้ว่าค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.6 มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยที่สุดเท่ากับ 1,593.83 มิลลิเมตร² และค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.7 มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยที่สุดเท่ากับ 1,606.25 มิลลิเมตร² มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยใกล้เคียงกัน มีการรู้เข้าค่าความคลาดเคลื่อนเริ่มพร้อมกันทั้งสามค่าคือ 0.6 – 0.8 ดังนั้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เลือกค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.6 เป็นค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์ที่เหมาะสม มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยที่สุด

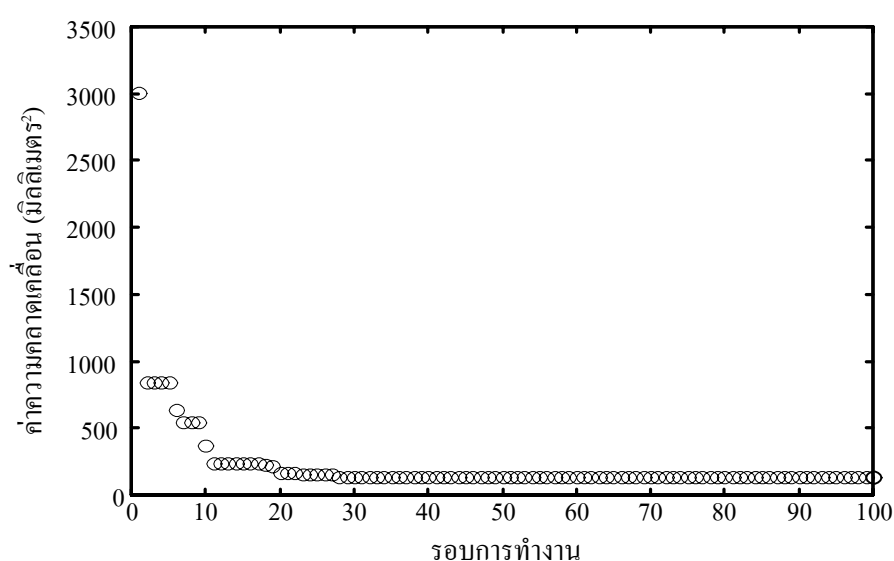
4.6 การค้นหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานโดยวิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึม

ในการค้นหาพารามิเตอร์ของระบบโดยวิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึม ได้มีการดำเนินการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของระบบแบ่งออกเป็น 4 ช่วง เพื่อเป็นการระบุขอบเขตค่าพารามิเตอร์ของระบบ ที่เป็นค่าคงที่ เพื่อเป็นการลดขอบเขตให้สามารถค้นหาค่าที่สามารถใช้ร่วมกันระหว่างข้อมูลหลายๆ ชุด เพื่อทำการระบุค่าพารามิเตอร์ของระบบ พร้อมทำการระบุพารามิเตอร์ที่เป็นค่าคงที่ เช่น มวลสมมูลของระบบ ค่านิยของสปริง ค่าความเร็วของอัตราลดระหว่างแรงเสียดทานสถิตกับแรงเสียดทาน คูลอมบ์ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคูลอมบ์และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเชิงความหนืด เพื่อเป็นการลดภาระการค้นหา เนื่องจากพารามิเตอร์ของระบบบางตัวมีผลกับแบบจำลองแรงเสียดทานที่ได้

ดังนั้นในการค้นหาช่วงแรกเป็นการหาขอบเขตที่เหมาะสมของมวลสมมูลของระบบ และค่านิยของสปริงของระบบ ส่วนช่วงที่สองเป็นการระบุค่ามวลสมมูลของระบบ (m) และค่านิยของสปริงเป็นค่าคงที่ (k_{spring}) เพื่อหาขอบเขตของค่าความเร็วของอัตราลด (vss) ช่วงที่สามเป็นการระบุค่าความเร็วของอัตราลด และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคูลอมบ์ (F_{C+}, F_{C-}) เป็นค่าคงที่ช่วงที่สี่เป็นการระบุสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต (F_{S+}, F_{S-}) ในแต่ละจุดของการเคลื่อนที่ของข้อมูลแต่ละชุด สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเชิงความหนืด (F_{V+}, F_{V-}) ซึ่งจากการทดสอบค่าตัวแปรของวิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึมโดยมีค่าต่างๆ สรุปดังตารางที่ 4.3 ได้มาจากการทดสอบในหัวข้อ 4.5 เพื่อเป็นการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น มีผลการรู้เข้าของค่าความคลาดเคลื่อนค่าตอบที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ -5 มิลลิเมตรต่อวินาที เป็นค่าความคลาดเคลื่อนชุดที่ต่ำที่สุดจากกลุ่มข้อมูล 9 ชุด แสดงดังรูปที่ 4.16 มีค่าความคลาดเคลื่อนเริ่มที่ 2,980 มิลลิเมตร² แล้วลดลงจนมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 131.75 มิลลิเมตร² เริ่มที่รอบที่ 31 เป็นต้นไป

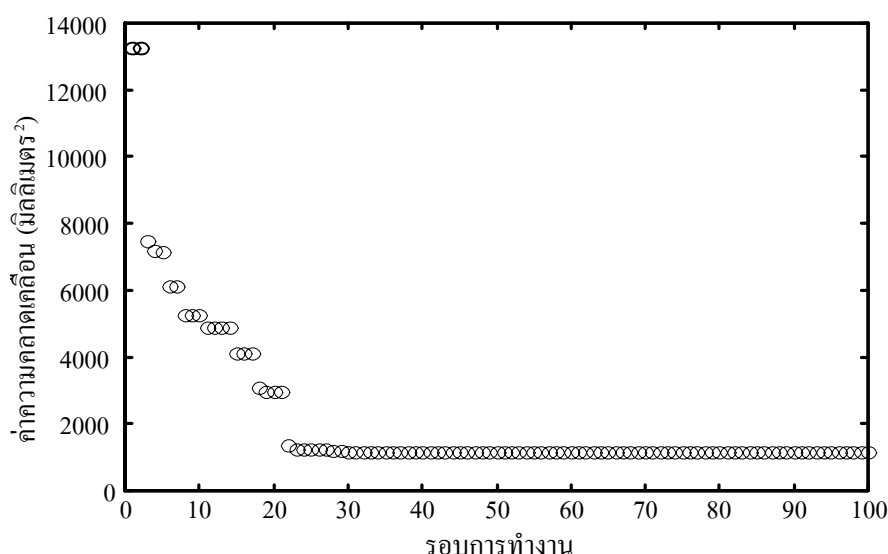
ตารางที่ 4.3 ค่าตัวแปรของเงินเนติกอัลกอริทึมที่ใช้ในโปรแกรม MATLAB สำหรับงาน
วิจัยวิทยานิพนธ์

ตัวแปรของเงินเนติกอัลกอริทึมที่ใช้ในโปรแกรม MATLAB	ค่าของตัวแปรเงินเนติกอัลกอริทึมที่ได้ จากการทดสอบ
ค่าจำนวนประชากรเริ่มต้น(NIND)	200
วิธีการคัดเลือกสายพันธุ์	วิธีการชักตัวอย่างของกระบวนการเฟ้นสุ่ม ครอบจักรวาล (SUS)
ชนิดของการทำครอสโอเวอร์	การทำครอสโอเวอร์แบบหลายจุด (multi-point crossover)
ร้อยละของการคัดเลือกสายพันธุ์(GGAP)	0.7
ค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์	0.6
จำนวนรอบสูงสุดในการทำงานของ เงินเนติกอัลกอริทึม(MAXGEN)	300



รูปที่ 4.16 ผลการลู่เข้าค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อทดสอบที่ความเร็ว -5 มิลลิเมตรต่อวินาที

จากการทดสอบการลู่เข้าของค่าความคลาดเคลื่อนที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ 5 มิลลิเมตรต่อวินาที นำชุดข้อมูลที่มีค่าความคลาดเคลื่อนชุดที่ต่ำที่สุดจากกลุ่มข้อมูล 8 ชุด แสดงดังรูปที่ 4.17 มีค่าความคลาดเคลื่อนเริ่มต้นที่ 13,450 มิลลิเมตร² แล้วลดลงเรื่อยๆ จนถึงค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1,133.35 มิลลิเมตร² เริ่มที่รอบที่ 35 เป็นต้นไป



รูปที่ 4.17 ผลการรู้เข้าค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อทดสอบที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที

4.6.1 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้นช่วงแรก

การค้นหาค่าพารามิเตอร์แบบจำลองแรงเสียดทาน ช่วงแรก โดยมีการกำหนดขอบเขตของพารามิเตอร์ในการค้นหาของมวลสมมูลกับค่านิจของสปริงดังตารางที่ 4.4 เป็นขอบเขต ทางต่ำสุด ขอบเขตทางสูงสุดและค่าความละเอียดเป็นจำนวนบิต โดยการค้นหานี้เป็นการค้นหาค่าพารามิเตอร์เพื่อกำหนดขอบเขตของพารามิเตอร์แต่ละพารามิเตอร์แต่ละตัว ทำการรันโปรแกรมมีรอบการทำงานสูงสุด 300 รอบ ได้ผลลัพธ์จากการค้นหาค่าพารามิเตอร์ค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด และต่ำสุด ดังตารางที่ 4.5 รายละเอียดของผลแสดงดังตารางที่ ข.1 ในภาคผนวก ข

จากผลที่ได้มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในด้านการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น หรือเคลื่อนที่ทางบวกมีค่าเท่ากับ 1,893.811 มิลลิเมตร² และค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในด้านการเคลื่อนที่ลดลง หรือการเคลื่อนที่ทางลบมีค่าเท่ากับ 495.821 มิลลิเมตร² ส่วนค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละชุดข้อมูลแสดงดังตารางที่ ข.1

4.6.2 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้นช่วงที่สอง

การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น ช่วงที่สอง ซึ่งผลจากตารางที่ 4.5 กับการค้นหาวิธีตามดังในตารางที่ 5.2 ได้ค่าเฉลี่ยของค่านิจสปริงเท่ากับ 0.376 นิวตันต่อมิลลิเมตร จากค่าเฉลี่ยของค่านิจสปริงการเลือกย่านในการค้นหาค่าในช่วงนี้โดยเพิ่มและลดค่าด้านละ 0.03 นิวตันต่อมิลลิเมตร มวลสมมูลมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 10.91 กิโลกรัม จากค่าเฉลี่ยเลือกย่านบวกเพิ่มและลดลง 0.5 กิโลกรัม ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_c มีค่าเฉลี่ยรวมประมาณ 50 นิวตัน เลือกกำหนดค่าเพิ่มขึ้นและลดลงด้านละ 4 นิวตัน และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_v มี

ค่าเฉลี่ยรวมจากขนาดเป็น 0.809 นิวตันวินาทีต่อมิลลิเมตร เลือกกำหนดค่าเพิ่มขึ้นและลดลงด้านละ 0.01 นิวตันวินาทีต่อมิลลิเมตร จากขอบเขตดังกล่าวแสดงดังตารางที่ 4.6 เป็นขอบเขตใหม่ในการค้นหา และได้ผลสรุปแสดงดังตารางที่ 4.7 รายละเอียดแสดงในตารางที่ ข.3

ตารางที่ 4.4 ขอบเขตของพารามิเตอร์ระบบช่วงแรก

ค่า/พารามิเตอร์ (หน่วย)	F_{S+} (N)	F_{C+} (N)	F_{V+} (Ns/mm)	F_{S-} (N)	F_{C-} (N)	F_{V-} (Ns/mm)	vss (mm/s)	k_{spring} (N/mm)	m (kg)
ขอบเขตต่ำสุด	90.0	45.0	0.75	-200.0	-60.0	-0.85	2.50	0.20	6.0
ขอบเขตสูงสุด	200.0	60.0	0.85	-90.0	-45.0	-0.75	4.50	0.50	15.0
ค่าความละเอียด	24	24	16	24	24	16	16	16	16

ตารางที่ 4.5 ผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของระบบช่วงแรก

ค่า/พารามิเตอร์ (หน่วย)	F_{S+} (N)	F_{C+} (N)	F_{V+} (Ns/mm)	F_{S-} (N)	F_{C-} (N)	F_{V-} (Ns/mm)	vss (mm/s)	k_{spring} (N/mm)	m (kg)
ค่าเฉลี่ย	135.60	49.133	0.824	-124.71	-47.883	-0.797	3.265	0.383	10.983
ค่าสูงสุด	140.00	59.785	0.841	-104.61	-42.158	-0.751	5.206	0.497	14.664
ค่าต่ำสุด	130.26	45.014	0.781	-135.04	-57.956	-0.846	2.525	0.212	6.669

ตารางที่ 4.6 ขอบเขตของพารามิเตอร์ระบบช่วงที่สอง

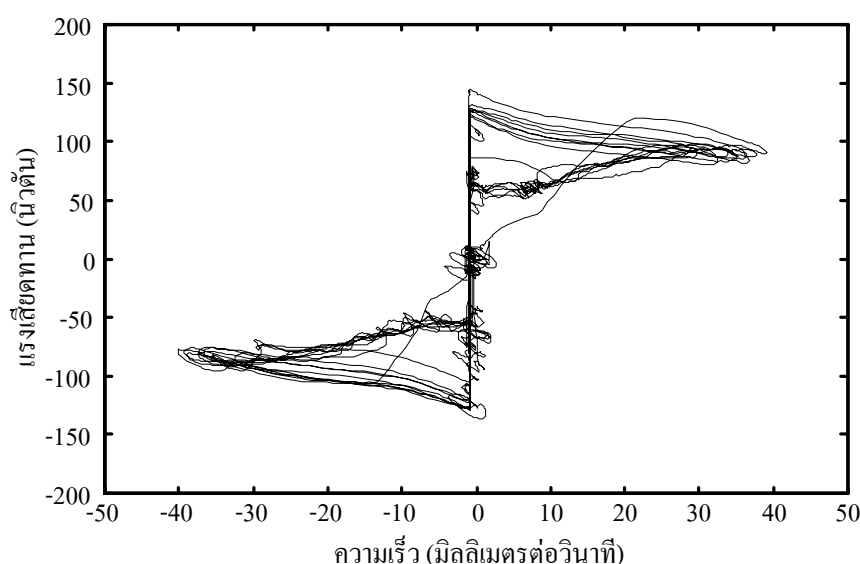
ค่า/พารามิเตอร์ (หน่วย)	F_{S+} (N)	F_{C+} (N)	F_{V+} (Ns/mm)	F_{S-} (N)	F_{C-} (N)	F_{V-} (Ns/mm)	vss (mm/s)	k_{spring} (N/mm)	m (kg)
ขอบเขตต่ำสุด	90.0	46.0	0.79	-160.0	-54.0	-0.81	2.50	0.34	10.4
ขอบเขตสูงสุด	160.0	54.0	0.81	-90.0	-46.0	-0.79	4.50	0.40	11.4
ค่าความละเอียด	24	24	16	24	24	16	16	16	16

จากผลที่ได้มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในด้านการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น หรือเคลื่อนที่ทางบวกมีค่าเท่ากับ 1,684.391 มิลลิเมตร² และในด้านการเคลื่อนที่ลดลง หรือการเคลื่อนที่ทางลบมีค่าเท่ากับ 401.603 มิลลิเมตร² ส่วนค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละชุดข้อมูลแสดงดังตารางที่ ข.3 ประกอบ ดังเมื่อเทียบกับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ช่วงแรก ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมีค่าน้อยลง หรือมีค่าดีขึ้น จากเดิมดังนั้นค่าในการค้นหาชุดนี้ เป็นที่ยอมรับได้

ตารางที่ 4.7 ผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของระบบช่วงที่สอง

ค่า/พารามิเตอร์ (หน่วย)	F_{S+} (N)	F_{C+} (N)	F_{V+} (Ns/mm)	F_{S-} (N)	F_{C-} (N)	F_{V-} (Ns/mm)	vss (mm/s)	k_{spring} (N/mm)	m (kg)
ค่าเฉลี่ย	131.47	47.972	0.800	-123.63	-47.807	-0.804	3.149	0.371	10.876
ค่าสูงสุด	140.15	53.781	0.806	-103.15	-46.000	-0.791	4.499	0.399	11.345
ค่าต่ำสุด	124.09	46.465	0.795	-134.08	-53.999	-0.810	2.524	0.343	10.401

4.6.3 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้นช่วงที่สาม

รูปที่ 4.18 แรงเสียดทานเทียบกับความเร็วในช่วงความเร็ว ± 5 มิลลิเมตรต่อวินาที

การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น ช่วงที่สาม ซึ่งผลจากตารางที่ 4.7 กับการค้นหาวิธิตามดังในตารางที่ 5.3 ได้มาหาค่าคงที่ของค่านิจสปริงจากค่าเฉลี่ยจากการค้นหาช่วงที่สองให้เท่ากับ 0.37 นิวตันต่อมิลลิเมตร และกำหนดค่าคงที่ของมวลสมมูลจากค่าเฉลี่ยได้เท่ากับ 10.89 กิโลกรัม จึงขอปัดขึ้นเป็น 10.9 กิโลกรัม ส่วนค่าอื่นๆ ยังคงขอบเขตเมื่อเดิม ดังนั้นขอบเขตในการค้นหาแสดงดังตารางที่ 4.8 เป็นขอบเขตใหม่ในการค้นหา และได้ผลสรุปแสดงดังตารางที่ 4.9 รายละเอียดแสดงในตารางที่ ข.5 และนำค่ามวลสมมูล 10.9 กิโลกรัม กับค่านิจของสปริง 0.37 นิวตันต่อมิลลิเมตร นำค่าแทนในการจำลองสถานการณ์มวลไถลเพื่อคำนวณค่าแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ โดยข้อมูลที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตร

ต่อวินาที จำนวน 8 ชุดข้อมูล ที่ความเร็ว -5 มิลลิเมตรต่อวินาที จำนวน 9 ชุดข้อมูล ได้ลักษณะแรงเสียดทานดังรูปที่ 4.18

ตารางที่ 4.8 ขอบเขตของพารามิเตอร์ระบบช่วงที่สาม

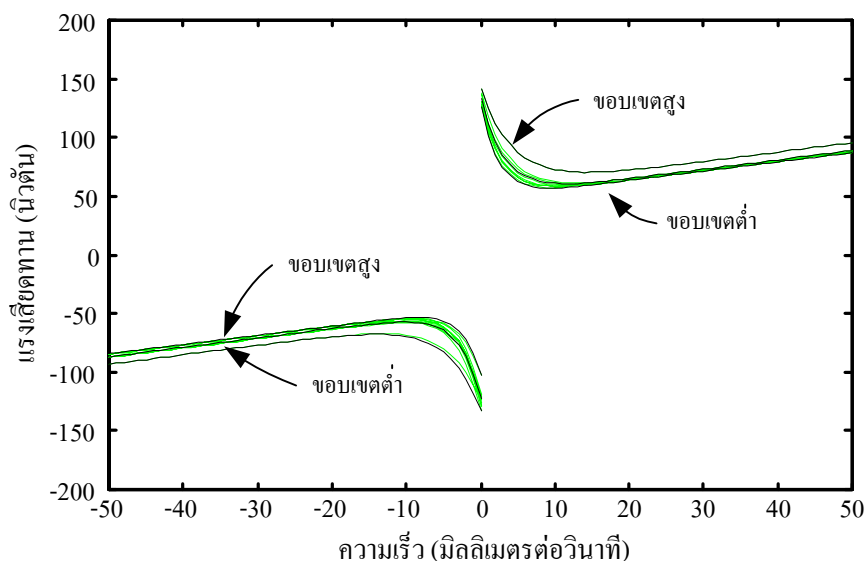
ค่า/พารามิเตอร์ (หน่วย)	F_{S+} (N)	F_{C+} (N)	F_{V+} (Ns/mm)	F_{S-} (N)	F_{C-} (N)	F_{V-} (Ns/mm)	vss (mm/s)	k_{spring} (N/mm)	m (kg)
ขอบเขตต่ำสุด	90.0	46.0	0.79	-160.0	54.0	-0.81	2.50	0.37	10.9
ขอบเขตสูงสุด	160.0	54.0	0.81	-90.0	-46.0	-0.79	4.50	0.37	10.9
ค่าความละเอียด	24	24	16	24	24	16	16	1	1

จากผลที่ได้มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในด้านการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น หรือเคลื่อนที่ทางบวกมีค่าเท่ากับ 1,964.348 มิลลิเมตร² และในด้านการเคลื่อนที่ลดลง หรือการเคลื่อนที่ทางลบมีค่าเท่ากับ 389.089 มิลลิเมตร² ส่วนค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละชุดข้อมูลแสดงดังตารางที่ ข.5 ประกอบ ดังเมื่อเทียบกับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ช่วงแรก ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยทางลบมีค่าน้อยลง แต่ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยทางบวกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ยังคงอยู่ในย่านที่ยอมรับค่าความคลาดเคลื่อนได้ในการค้นหาในช่วงต่อไป

ตารางที่ 4.9 ผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของระบบช่วงที่สาม

ค่า/พารามิเตอร์ (หน่วย)	F_{S+} (N)	F_{C+} (N)	F_{V+} (Ns/mm)	F_{S-} (N)	F_{C-} (N)	F_{V-} (Ns/mm)	vss (mm/s)
ค่าเฉลี่ย	131.478	47.722	0.800	-123.966	-47.978	-0.802	3.105
ค่าสูงสุด	140.613	53.996	0.810	-103.719	-46.004	-0.792	4.499
ค่าต่ำสุด	125.337	46.358	0.791	-134.252	-53.993	-0.810	2.513

ผลจากการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานดังตารางที่ ข.5 ได้ผลลัพธ์เป็นแบบจำลองเฉลี่ยปกติ (nominal model) ดังเส้นกราฟสีดำ แบบจำลองขอบเขตสูง (upper limit model) ดังเส้นกราฟสีแดงและแบบจำลองขอบเขตต่ำ (lower limit model) ส่วนเส้นกราฟสีเทาเป็นแบบจำลองที่ได้จากการค้นหาทั้งหมดจำนวน 17 เส้นกราฟ แสดงดังรูปที่ 4.19 ช่วงความเร็วเป็นบวก เส้นกราฟแบบจำลองเฉลี่ยปกติ ใกล้กับแบบจำลองขอบเขตต่ำ ส่วนช่วงความเร็วลบ เส้นกราฟแบบจำลองเฉลี่ยปกติ ใกล้กับแบบจำลองขอบเขตสูง



รูปที่ 4.19 แบบจำลองแรงเสียดทานที่ได้จากการค้นหาช่วงที่สาม

4.6.4 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้นช่วงที่สี่

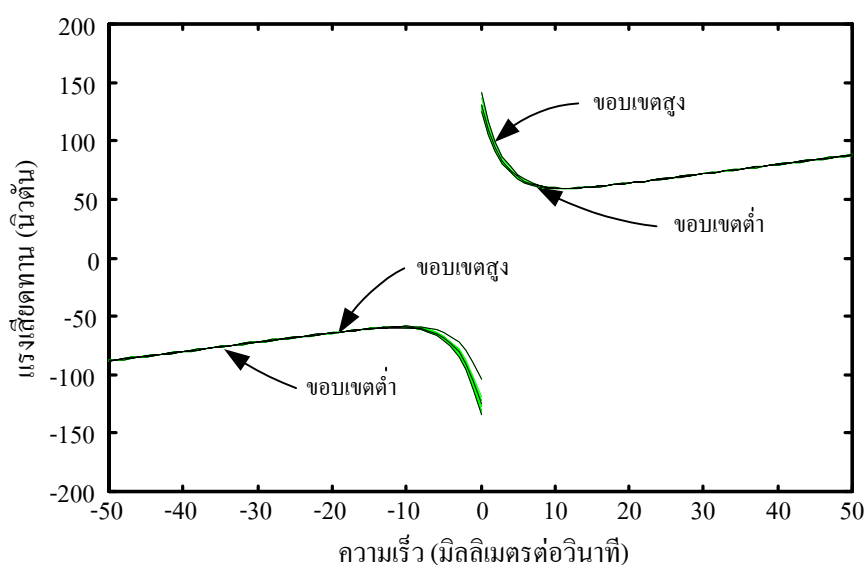
การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น ช่วงที่สี่ ซึ่งผลจาก ตารางที่ 4.9 กับการค้นหาวิธีตามดังในตารางที่ 5.4 ได้นำค่ามากำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_C และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน v_{ss} เป็นค่าคงที่ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{C+} เหลือเท่ากับ 47.75 นิวตัน ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{C-} เหลือเท่ากับ -48.32 นิวตัน และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน v_{ss} เหลือเท่ากับ 3.198 มิลลิเมตรต่อวินาที ดังนั้นขอบเขตส่วนที่เหลือในการค้นหาแสดงดังตารางที่ 4.10 เป็นขอบเขตในการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_S ในแต่ละชุดข้อมูล และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_V ได้ผลแต่ละช่วงดังตารางที่ 4.11 รายละเอียดแสดงในตารางที่ ข.7 ผลจากการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานดังตารางที่ ข.7 ได้ผลลัพธ์เป็นแบบจำลองเฉลี่ยปกติ แบบจำลองขอบเขตสูง และแบบจำลองขอบเขตต่ำ จากการค้นหาในช่วงที่สี่ทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 4.20 ช่วงความเร็วบวก ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตยมีช่วงค่าต่างน้อย ส่วนช่วงความเร็วลบ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตยมีช่วงค่าต่างมาก ทำให้แบบจำลองขอบเขตสูง ห่างจากแบบจำลองขอบเขตต่ำ ดังนั้นช่วงความเร็วบวกแบบจำลองทั้งสามมีค่าใกล้เคียงกันมาก

ตารางที่ 4.10 ขอบเขตของพารามิเตอร์ระบบช่วงที่สี่

ค่า/พารามิเตอร์ (หน่วย)	F_{S+} (N)	F_{C+} (N)	F_{V+} (Ns/mm)	F_{S-} (N)	F_{C-} (N)	F_{V-} (Ns/mm)	vss (mm/s)
ขอบเขตต่ำสุด	90.0	47.75	0.79	-160.0	-48.32	-0.81	3.198
ขอบเขตสูงสุด	160.0	47.75	0.81	-90.0	-48.32	-0.79	3.198
ค่าความละเอียด	24	1	16	24	1	16	1

ตารางที่ 4.11 ผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของระบบช่วงที่สี่

ค่า/พารามิเตอร์ (หน่วย)	F_{S+} (N)	F_{V+} (Ns/mm)	F_{S-} (N)	F_{V-} (Ns/mm)
ค่าเฉลี่ย	131.118	0.802	-124.421	-0.799
ค่าสูงสุด	141.235	0.810	-103.834	-0.790
ค่าต่ำสุด	125.261	0.794	-134.723	-0.810



รูปที่ 4.20 แบบจำลองแรงเสียดทานที่ได้จากการค้นหาช่วงที่สี่

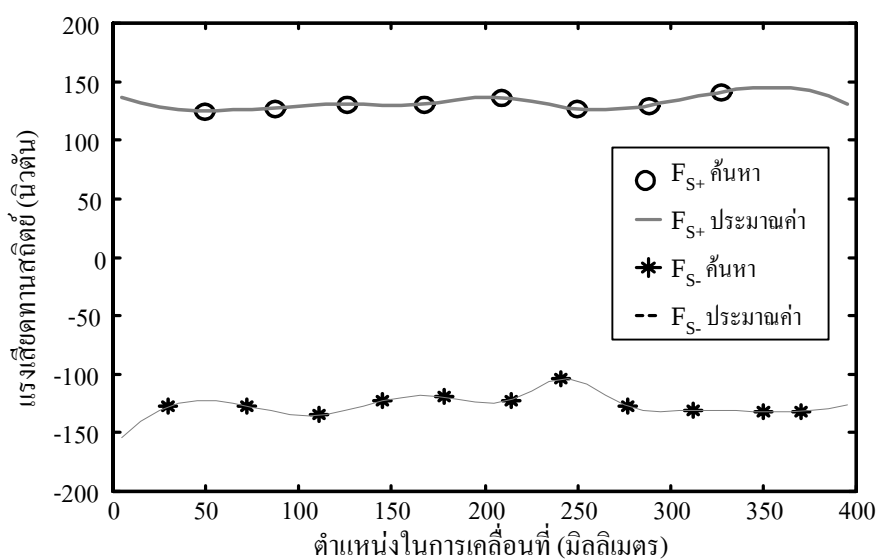
จากผลที่ได้มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในด้านการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น หรือเคลื่อนที่ทางบวกมีค่าเท่ากับ 2,565.302 มิลลิเมตร² และในด้านการเคลื่อนที่ลดลง หรือการเคลื่อนที่ทางลบมีค่าเท่ากับ 650.007 มิลลิเมตร² ส่วนค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละชุดข้อมูลแสดงดังตารางที่ ข.7

ประกอบ ดังเมื่อเทียบกับการค้นหาพารามิเตอร์ทุกช่วงที่ผ่านมา ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยทางลบ และทางบวกมีค่ามากขึ้น ซึ่งมีค่าที่ยังคงยอมรับได้และได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_s ใกล้เคียงเดิมกับการค้นหาที่ผ่านมา ซึ่งตารางที่ 4.12 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{s+} ตลอดย่านจาก 50 – 350 มิลลิเมตร และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{s-} ตลอดย่านจาก 350 - 50 มิลลิเมตร แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับตำแหน่งในการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 4.21

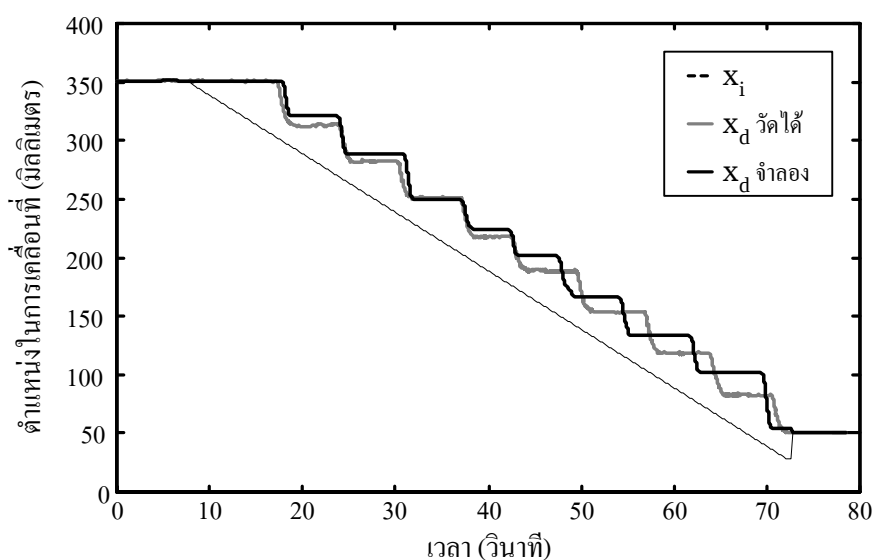
ตารางที่ 4.12 ผลการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียด F_{s+} , F_{s-} ในแต่ละชุดการเคลื่อนที่

ช่วงตำแหน่งในการเคลื่อนที่ (mm)	F_{s+} (N)	ช่วงตำแหน่งในการเคลื่อนที่ (mm)	F_{s-} (N)
49 – 87	125.26	350 – 312	-131.68
87 – 126	127.60	312 – 277	-130.64
126 – 168	130.78	277 – 241	-127.23
168 – 208	130.81	241 – 214	-103.83
208 – 249	136.83	214 – 178	-122.52
249 – 288	126.70	178 – 145	-119.35
288 – 327	129.73	145 – 111	-122.86
327 – 350	141.24	111 – 72	-134.72
		72 – 49	-126.94

จากรูปที่ 4.21 กราฟจุดวงกลมเป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{s+} ส่วนกราฟจุดดอกจันเป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{s-} ส่วนกราฟเส้นสี่เหลี่ยมเป็นค่าการประมาณแบบเส้นโค้งของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{s+} และกราฟเส้นประสี่เหลี่ยมเป็นค่าการประมาณแบบเส้นโค้งของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{s-} เพื่อนำค่าที่ได้นำไปหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{s+} และ F_{s-} ในแต่ละช่วงค่าโดยแต่ละช่วงค่ามีค่าระยะห่างของตำแหน่งเท่ากับ 10 มิลลิเมตร เพื่อนำค่าไปทดสอบกับสัญญาณที่วัดการควบคุมการเคลื่อนที่แบบตลอดย่านการเคลื่อนที่ที่หลายความเร็วเช่น ความเร็ว 5 , 6 , 8 , -5 , -6 และ -8 มิลลิเมตรต่อวินาที เนื่องจากค่าความเร็วดังกล่าวเป็นย่านความเร็วในสภาวะการคิดค้น ได้ผลการจำลองสถานการณ์มวลโกล ที่ปรากฏแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น ได้ดังรูปที่ 4.22 เป็นค่าความเร็ว -5 มิลลิเมตรต่อวินาที และรูปที่ 4.23 เป็นการควบคุมที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที



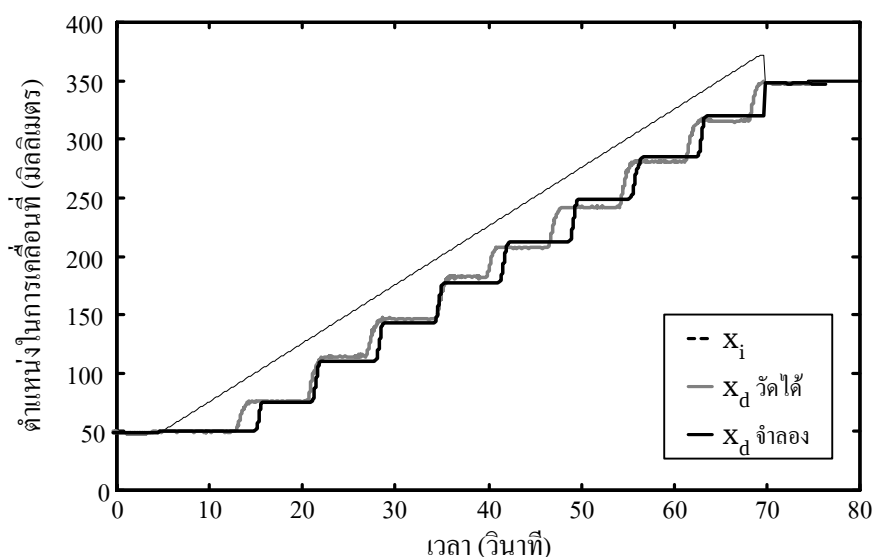
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของวิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึม



รูปที่ 4.22 ผลการจำลองสถานการณ์มวลไหลที่ความเร็ว -5 มิลลิเมตรต่อวินาที
จากวิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึม

จากรูปที่ 4.22 ได้ผลความคลาดเคลื่อนจากการจำลองสถานการณ์มวลไหลเท่ากับ 10.11 มิลลิเมตรต่อจุด ซึ่งได้กราฟเส้นสีดำ ส่วนกราฟเส้นสีเทาเป็นตำแหน่งในการเคลื่อนที่ที่วัดได้ และกราฟเส้นประเป็นการจัดของการควบคุมให้ตำแหน่งเคลื่อนที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที ในช่วงการเคลื่อนที่จากระยะ 350 มิลลิเมตร ลงถึง 225 มิลลิเมตร มีค่าการเคลื่อนที่ใกล้เคียงกัน ส่วน

ในช่วง 225 มิลลิเมตรมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_c มีขนาดมากกว่าความเป็นจริง ทำให้การเคลื่อนได้น้อย ส่วนในช่วงที่เหลือมีระยะการเคลื่อนที่ขนาดใกล้เคียงกัน ถ้าระยะในช่วง 225 เคลื่อนที่ได้ใกล้เคียงที่วัดได้



รูปที่ 4.23 ผลการจำลองสถานการณ์มวลไหลที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที
จากวิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึม

จากรูปที่ 4.23 ความหมายของเส้นกราฟเช่นเดียวกับรูปที่ 4.22 โดยจากรูปมีค่าความคลาดเคลื่อนของการเคลื่อนที่เท่ากับ 9.86548 มิลลิเมตรต่อจุด จากการจำลองสถานการณ์มวลไหลที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที มีค่าตำแหน่งในการเคลื่อนที่ใกล้เคียงกัน และสอดคล้องกันอย่างดีตลอดการเคลื่อนของแท่น มีช่วงตำแหน่งระหว่าง 180 – 250 มิลลิเมตร มีการเคลื่อนที่ช้าไปบ้าง เนื่องจากสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในช่วงนี้มีค่ามากไปบ้าง ทำให้เกิดการเคลื่อนที่มีการเริ่มต้นที่ช้าไปในช่วงนี้ ดังนั้นจากผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์แรงเสียดทานที่ได้ เป็นที่น่าพอใจในการจำลองสถานการณ์มวลไหล เพื่อใช้ร่วมกับผลการค้นหาในบทที่ 5 ต่อไป

บทที่ 5

การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแบบออฟไลน์ ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบอด

5.1 บทนำ

บทนี้เป็นการกล่าวถึง หลักการและวิธีการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของระบบแบบออฟไลน์ วิธีการค้นหาแบบตาบอด อธิบายหลักการทำงานของวิธีการค้นหาแบบตาบอด การปรับแต่งค่าตัวแปรในการค้นหาแบบตาบอดเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด ที่เพื่อนำผลที่ได้ไปรวมเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการหาค่าพารามิเตอร์แบบจำลองแรงเสียดทานด้วยหลักการจิ้นเนติกอัลกอริทึม ในตอนท้ายเป็นการนำค่าที่ได้จากทั้งสองวิธีมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อนำเป็นค่าตั้งต้นการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ โดยโปรแกรมภาษาซีต่อไป

5.2 การค้นหาแบบตาบอด

ในหัวข้อนี้เป็นการกล่าวถึงหลักการทำงานของวิธีการค้นหาแบบตาบอด อธิบายการพัฒนาโปรแกรมการค้นหาค่าพารามิเตอร์แรงเสียดทานด้วยโปรแกรม MATLAB การปรับแต่งตัวแปรเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด

5.2.1 หลักการทำงานของวิธีการค้นหาแบบตาบอด

การค้นหาแบบตาบอด (tabu search : TS) เป็นขั้นตอนวิธีการแบบตรรกะที่นำมาประยุกต์เกี่ยวกับการหาคำตอบที่ดีที่สุดเชิงผสมผสาน (combinatorial optimization) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ องค์ประกอบวิธีการค้นหาแบบตาบอดที่แตกต่างจากวิธีการค้นหาแบบอื่นๆ ก็คือมีการใช้เกณฑ์ความเป็นตาบอด (tabu list criterion) และเกณฑ์ความปรารถนา (aspiration criterion)

“เกณฑ์ความเป็นตาบอด” เป็นส่วนที่คอยเก็บข้อมูลของคำตอบในอดีตของกระบวนการค้นหานี้ๆ เพื่อเป็นตัวกำหนดการค้นหาคำตอบว่าจะมีทิศทางไปทางใด การออกแบบเกณฑ์ความเป็นตาบอด นั้นเป็นอิสระของผู้ออกแบบว่า จะออกแบบลักษณะใดก็ได้ให้เหมาะสมกับปัญหาแต่ละปัญหา

“เกณฑ์ความปรารถนา” เป็นเงื่อนไขที่อาจจะต้องใช้ในบางครั้งเมื่อจำเป็นต้องเลือกคำตอบที่อยู่ในเกณฑ์ความเป็นตาบอด ปัญหาที่ไม่ซับซ้อนมากนักอาจไม่จำเป็นต้องพึ่งพารูปแบบนี้ก็ได้

เกณฑ์ความเป็นตามอย่างเดียวกันก็เพียงพอที่จะค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด ขั้นตอนดำเนินการค้นหาด้วยวิธีตาม (กองพัน,2545) อาจกล่าวโดยสรุปได้ว่ามีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 หาค่าเริ่มต้น S_0 จากการสุ่มคำตอบจากขอบเขตทั้งหมดของคำตอบ โดยกำหนดให้ S_0 เป็นคำตอบที่ดีที่สุดจากคำตอบที่สุ่มทั้งหมด ดังนั้น $best_global = S_0$

ขั้นตอนที่ 2 ดำเนินการเคลื่อนย้ายในลักษณะสุ่มคำตอบรอบๆ S_0 ภายใน radius ที่กำหนด จนได้จำนวนคำตอบใกล้เคียงของ S_0 เท่ากับจำนวน $number_neighbor$ ได้เซตของสมาชิกที่จากการสุ่มคำตอบ คือ $S_1(r)$

ขั้นตอนที่ 3 นำค่าจากเซตสมาชิกแต่ละตัว $S_1(r)$ มาคำนวณหาค่า $cost$ จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และเลือกคำตอบที่ดีที่สุด กำหนดให้เป็น $best_local$

ขั้นตอนที่ 4 พิจารณาค่า $cost$ ของ $best_local$ ถ้ามีค่าน้อยกว่าค่า $cost$ ของ $best_global$ กำหนดให้ค่า $best_global = best_local$ ถ้าไม่สามารถหาสมาชิกตัวใดใน $S_1(r)$ ที่ให้ค่า $cost$ ดีกว่า $cost$ ของ S_0 ให้ไปทำขั้นตอนที่ 6

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดให้ $S_0 = best_global$ เพื่อเป็นการเคลื่อนย้ายจุดในการค้นหาไปทีใหม่ เพื่อหาคำตอบที่ดีกว่า

ขั้นตอนที่ 6 ถ้าค่า $best_local$ ไม่มีอยู่ใน $neighbor_list$ ให้เก็บค่า $best_local$ ไว้ใน $neighbor_list$ เพื่อเป็นการเก็บข้อมูลของคำตอบที่ดีในอดีต

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบเงื่อนไขการยุติการค้นหา ถ้าเป็นไปตามเงื่อนไขจึงหยุดการค้นหา และคำตอบของการค้นหาล่าสุดจะถือว่าเป็นคำตอบที่ดีที่สุด แต่เมื่อตรวจสอบแล้วไม่เป็นไปตามเงื่อนไข ให้ไปเริ่มต้นทำขั้นตอนที่ 2 ใหม่

เนื่องจากในสถานะที่นำมาใช้ในการค้นหาต้องการให้ได้ค่าที่ดีที่สุด จะต้องเพิ่มกระบวนการย้อนรอยการค้นหา (back tracking) เมื่อการสุ่มค่าใน radius นั้นๆ ไม่มีค่าที่ดีกว่าเดิม เพื่อให้ได้พื้นที่ใหม่ในการสุ่มค่าตาม radius ที่ต้องการ จากที่ย้อนกลับได้มาจากค่าที่เก็บใน $neighbor_list$ ทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายออกจากจุดเดิมๆ และได้ค่าที่เหมาะสมจากการค้นหารอบใหม่ต่อไป รายละเอียดต่างๆ ของขั้นตอนทั้งหมดที่กล่าวมาได้นำมาจาก (กองพัน,2545)

5.2.2 การค้นหาค่าพารามิเตอร์แบบจำลองแรงเสียดทาน ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาม

การค้นหาค่าพารามิเตอร์แบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาม ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้มีการพัฒนาโปรแกรมการค้นหาค่าด้วยโปรแกรม MATLAB โดยมีขั้นตอนการพัฒนาโปรแกรม 7 ขั้นตอน ซึ่งได้มีการกล่าวมาในข้างต้น ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์โดยวิธีนี้ ต้องมีการปรับค่าตัวแปรที่มีผลต่อการค้นหา ได้แก่ จำนวนในการสุ่มค่าตั้งต้นจากขอบเขตทั้งหมด ขนาดของรัศมีในการเคลื่อนย้าย (radius) จำนวนชุดข้อมูลของการสุ่มในรัศมีในแต่ละรอบ ($number_neighbor$) จำนวนรอบในการทำงานสูงสุด (MAXGEN)

จำนวนรอบในย้อนรอยการค้นหา (back tracking) ดังนั้นในการเขียนโปรแกรม MATLAB ในการค้นหาแบบตาม มีการอธิบายขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 หาค่าเริ่มต้น S_0 จากการสุ่มคำตอบจากขอบเขตทั้งหมดของคำตอบ โดยกำหนดให้ S_0 เป็นคำตอบที่ดีที่สุดจากคำตอบที่สุ่มทั้งหมด มีการกำหนดขอบเขตในการค้นหา (xlimit) ค่าดังนี้

```
xlimit    =    [ 200      60      0.85      4.5      0.5      15 ;
                  70      30      0.75      2.5      0.2      6 ];
```

การสุ่มคำตอบจากขอบเขตทั้งหมดของคำตอบ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ มีการกำหนดจำนวนชุดข้อมูลตั้งต้นเท่ากับ 500 ชุดข้อมูล มีคำสั่งการทำงานดังนี้

```
for r = 1 : 500
```

```
    S(r,:) = ((xlimit(1,:) - xlimit(2,:)).*rand(1,n_para))+xlimit(2,:);
```

```
end
```

ค่า xlimit(1,:) เป็นค่าขอบเขตทางสูงสุด ส่วน xlimit(2,:) เป็นค่าขอบเขตต่ำสุด โดยผลกระบวนการสุ่มค่า มีค่าตัวแปรในการค้นหา n_para เท่ากับ 6 ตัวแปร ทำงานหาคำตอบที่ดีที่สุด ในจำนวน 500 ชุดข้อมูล เป็นค่าตั้งต้น best_global = S_0 โดยกำหนดให้ best_neighbor = S_0 กำหนดให้ค่า cost ของ S_0 เก็บใน best_error

ขั้นตอนที่ 2 ดำเนินการเคลื่อนย้ายในลักษณะสุ่มคำตอบรอบๆ S_0 ภายใน radius ที่กำหนด โดยมีค่าปรับค่าให้เหมาะสมได้ค่าเท่ากับ 0.15 ของขอบเขตทั้งหมด มีรายละเอียดการทดสอบดังหัวข้อ 5.2.3 และมีการสุ่มค่าจนได้จำนวนคำตอบใกล้เคียงของ S_0 เท่ากับจำนวน number_neighbor ได้เซตของสมาชิกที่จากการสุ่มคำตอบ ซึ่งจากการทดสอบการปรับค่าได้จำนวน number_neighbor เท่ากับ 150 ชุดข้อมูล มีรายละเอียดการทดสอบดังในหัวข้อ 5.3.4 ค่าในการสุ่มคำตอบใกล้เคียง S_0 คือ $S_1(r)$ โดยคำสั่งการสุ่มคำตอบรอบๆ S_0 ดังนี้

```
S1(1:number_neighb,:) = random_neigh_mo(number_neighb,radius,xlimit,S0);
```

ขั้นตอนที่ 3 นำค่าจากเซตสมาชิกแต่ละตัว $S_1(r)$ มาคำนวณหาค่า cost จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามหัวข้อ 4.3 (obj_model1_x) และการเลือกคำตอบที่ดีที่สุด โดยมีกลุ่มคำสั่งในการประเมินดังนี้ ซึ่งการหาค่าแต่ละชุดกำหนดให้มีจำนวนทศนิยมไม่เป็น 6 หลัก จำนวนรอบในการประเมินเท่ากับ number_neighbor การหาค่าที่ดีในแต่ละรอบใช้คำสั่งการหาค่าต่ำสุดและตำแหน่งค่าต่ำสุดเพื่อค่ามาเป็น best_local เก็บใน best_neighbor1 ส่วนค่า cost ที่ต่ำสุดเก็บที่ best_error1 นำค่าไปตรวจสอบต่อไปในขั้นตอนที่ 4

```
[best_error1,index] = min(error1);
best_neighbor1      = S1(index,:);
```

ขั้นตอนที่ 4 ดำเนินการเปรียบเทียบระหว่างค่า cost ของ best_local ใน best_error1 กับค่า cost ของ best_global ใน best_error ถ้ามีขนาดน้อยกว่าให้ค่า best_global = best_local ในการเขียนโปรแกรมได้ให้ best_neighbor=best_neighbor1 และเก็บค่า cost ของ best_local เป็นค่า cost ของ best_global โดยให้ best_error = best_error1 ดำเนินการเปรียบเทียบค่าระหว่างค่า cost ของ best_global กับค่า cost ของ และดำเนินการในขั้นตอนที่ 5 ต่อไป ส่วนถ้ามีขนาดมากกว่า ให้ไปทำในขั้นตอนที่ 6 ต่อไปเพื่อตรวจสอบค่าเพื่อการจัดเก็บใน neighbor_list ต่อไป

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดให้ $S_0 = \text{best_global}$ เพื่อเป็นการเคลื่อนย้ายจุดในการค้นหาไปที่ใหม่ เพื่อหาคำตอบที่ดีกว่า และไปทำต่อในขั้นตอนที่ 7 เพื่อตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดต่อไป

ขั้นตอนที่ 6 ถ้าค่า best_local ไม่มีอยู่ใน neighbor_list ให้เก็บค่า best_local ไว้ใน neighbor_list เพื่อเป็นการเก็บข้อมูลของคำตอบที่ดีในอดีต และทำการตรวจสอบการเคลื่อนย้ายตัว มีจำนวนการเคลื่อนย้ายไปถึงครั้งถ้าครบตามจำนวน n_back จะให้เริ่มต้นอ่านค่าก่อนหน้าเพื่อทำการย้อนถอย (back tracking) โดยมีการเลือกคำตอบที่เก็บใน neighbor_list มาเป็นค่าตั้งต้นใหม่ กำหนดการเลือกคำตอบที่เก็บไว้ lb ซึ่งจากการทดสอบในหัวข้อที่ 5.3.3 ได้ค่า n_back เท่ากับ 5 และการทดสอบในหัวข้อ 5.3.4 ได้ค่า lb เท่ากับ -1 คือนำค่าก่อนหน้า 1 ค่ามาทำการดำเนินการใหม่ต่อไป

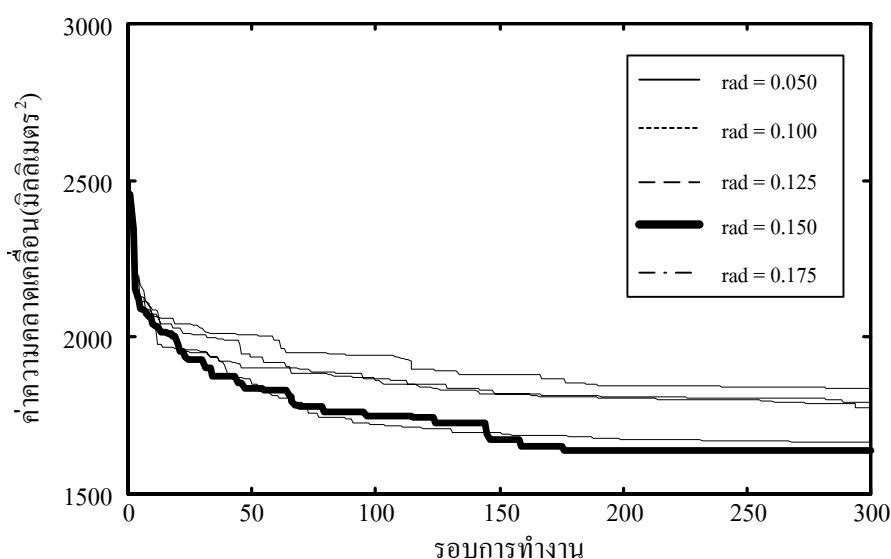
ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบเงื่อนไขการยุติการค้นหา ถ้าเป็นไปตามเงื่อนไขจึงหยุดการค้นหา และคำตอบของการค้นหารอบล่าสุดจะถือว่าเป็นคำตอบที่ดีที่สุด แต่เมื่อตรวจสอบแล้วไม่เป็นไปตามเงื่อนไข ให้ไปเริ่มต้นทำขั้นตอนที่ 2 ใหม่ หรือเมื่อมีรอบในการทำงานเท่ากับค่ากำหนดรอบการทำงานสูงสุดก็จะหยุดการค้นหา คือ 300 รอบ ในการค้นหา

5.3 ผลการทดสอบค่าตัวแปรของวิธีการค้นหาแบบตาบอด

จากการอธิบายขั้นตอนการทำงานของวิธีการค้นหาแบบตาบอดในข้างต้น การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานที่ดี ต้องพึ่งพาตัวแปรต่างๆ จำนวนหนึ่ง ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการทดสอบค่าตัวแปรต่างๆ กับข้อมูลเพื่อพิจารณาการลู่เข้าของคำตอบที่ดีนำมาใช้ โดยมีการทดสอบต่างๆ ดังนี้

5.3.1 การทดสอบเพื่อหาค่าขนาดรัศมีในการสุ่มคำตอบที่เหมาะสม

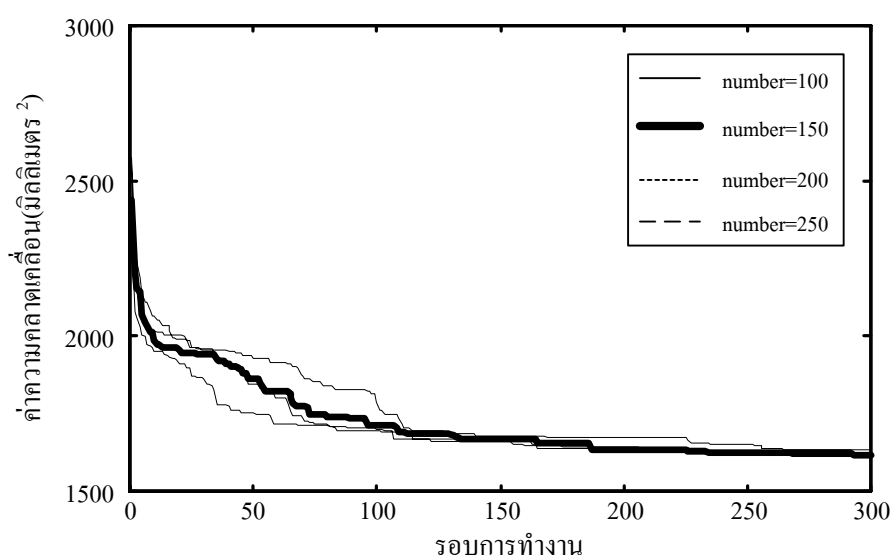
การทดสอบเพื่อหาค่าขนาดรัศมีในการสุ่มคำตอบที่เหมาะสม มีการทำงานค้นหาค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด 300 รอบ มีจำนวนการสุ่มคำตอบเริ่มต้นเท่ากับ 50 ค่าต่อรอบการค้นหา โดยมีการกำหนดขนาดรัศมีการสุ่มคำตอบ (radius) ในการทดสอบคิดเป็นสัดส่วนของขอบเขตของพารามิเตอร์ในการค้นหา คือ $\text{radius} = 0.050$, $\text{radius} = 0.100$, $\text{radius} = 0.125$, $\text{radius} = 0.150$ และ $\text{radius} = 0.175$ มีผลลู่เข้าค่าความคลาดเคลื่อนแสดงดังรูปที่ 5.1 จากผลการทดสอบทั้ง 5 ขนาด ค่า ขนาดรัศมีในการสุ่มคำตอบที่มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 1,647.615 มิลลิเมตร² เริ่มทจากรอบการทำงานที่ 145 มีค่าขนาดรัศมีในการสุ่มคำตอบเท่ากับ 0.150 ของขอบเขตพารามิเตอร์ ส่วนผลการลู่เข้าค่าความคลาดเคลื่อนรองลงมาที่รัศมีในการสุ่มคำตอบเท่ากับ 0.175 มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1,677 มิลลิเมตร² ดังนั้นค่าขนาดรัศมีในการสุ่มคำตอบที่เหมาะสมกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เลือกรัศมีในการสุ่มคำตอบเท่ากับ 0.150 ของขอบเขตพารามิเตอร์



รูปที่ 5.1 ผลการลู่เข้าค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบรัศมีในการสุ่มคำตอบ

5.3.2 การทดสอบเพื่อหาค่าจำนวนการสุ่มคำตอบที่เหมาะสม

การทดสอบเพื่อหาค่าจำนวนการสุ่มคำตอบ `number_neighbor` ที่เหมาะสม ในการทดสอบนี้มีการกำหนดค่าจำนวนการสุ่มคำตอบเพิ่มอีก 4 ค่า คือ `number_neighbor = 100`, `number_neighbor = 150`, `number_neighbor = 200` และ `number_neighbor = 250` มีผลการรู้เข้าค่าความคลาดเคลื่อนแสดงดังรูปที่ 5.2 จากการทดสอบเพื่อหาค่าจำนวนการสุ่มคำตอบ สังเกตที่ค่าจำนวนการสุ่มคำตอบเท่ากับ 150 ค่า มีการรู้เข้าค่าความคลาดเคลื่อนต่างจากที่ค่าจำนวนการสุ่มคำตอบเท่ากับ 200 ค่า เพียงเล็กน้อย ในช่วงแรกของการทำงานที่ 140 มีค่าความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกันและเริ่มลดลงพร้อมกัน มีค่าความคลาดเคลื่อนที่ของค่าจำนวนการสุ่มคำตอบเท่ากับ 200 ค่า เท่ากับ 1,613.96 มิลลิเมตร² ที่ค่าจำนวนการสุ่มคำตอบเท่ากับ 150 ค่า มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1,618.41 มิลลิเมตร² ดังนั้นจากการพิจารณาเลือกค่าจำนวนการสุ่มคำตอบ เท่ากับ 150 ค่า เป็นค่าจำนวนการสุ่มคำตอบที่เหมาะสมกับการค้นหาค่าพารามิเตอร์แบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เนื่องจากใช้เวลาในการค้นหาน้อยกว่า ได้ค่าความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกันกับค่าจำนวนการสุ่มคำตอบที่มีจำนวนมากกว่านี้

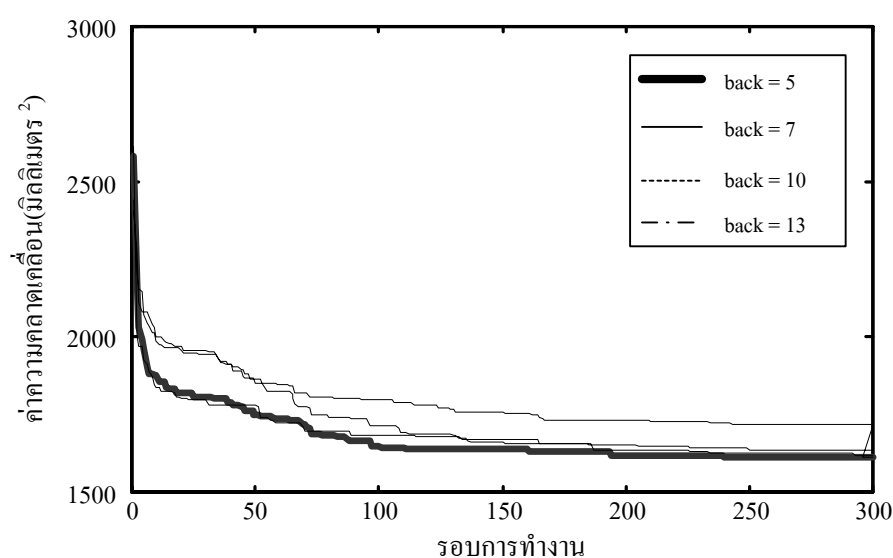


รูปที่ 5.2 ผลการรู้เข้าค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบค่าจำนวนการสุ่มคำตอบ

5.3.3 การทดสอบเพื่อหาค่าจำนวนรอบก่อนการย้อนรอยที่เหมาะสม

การทดสอบเพื่อหาค่าจำนวนรอบก่อนการย้อนรอยที่เหมาะสม ในกรณีที่มีการสุ่มค่าในรอบนั้นมีค่า `cost` ของ `best_local` มีค่ามากกว่าค่า `cost` ของ `best_global` แต่มีความ

จำเป็นต้องเคลื่อนที่ต่อไปสู่ `best_neighbor` ในบริเวณใหม่ โดยมีจำนวนรอบในการนับเมื่อค่าคำตอบที่ได้ยังไม่ปรากฏคำตอบที่ดีเกิดขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการย้อนรอย (back tracking) เพื่อย้อนกลับมีนำค่าที่ผ่านมาแล้วเป็น s_0 ในการสุ่มค่าคำตอบใหม่ให้ออกสู่คำตอบ `best_global` ต่อไป ในการทดสอบนี้มีการกำหนดจำนวนรอบการเคลื่อนย้ายก่อนการย้อนรอย (back) ให้ในการทดสอบ 4 จำนวน คือ $back = 5$, $back = 7$, $back = 10$ และ $back = 13$ มีผลการรู้เข้าค่าความคลาดเคลื่อนแสดงดังรูปที่ 5.3 จากการสังเกตค่าความคลาดเคลื่อนที่ค่าจำนวนรอบการย้อนรอยเท่ากับ 5 รอบ มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 1,612.819 มิลลิเมตร² เริ่มจากรอบการทำงานที่ 187 ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยที่สุดในการทดสอบ ซึ่งมีความหมายว่าถ้าการเคลื่อนย้าย $S_1(r)$ ได้ค่าคำตอบไม่ดีกว่า S_0 ให้ทำงานเคลื่อนย้ายไป 5 รอบแล้ว ได้คำตอบไม่ดีขึ้นจึงจำเป็นต้องมีการย้อนรอย เพื่อหาค่าคำตอบในบริเวณใหม่ต่อไป ดังนั้นจากการทดสอบในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เลือกค่าจำนวนรอบก่อนการย้อนรอยเท่ากับ 5 รอบ เป็นค่าที่เหมาะสมในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ระบบ

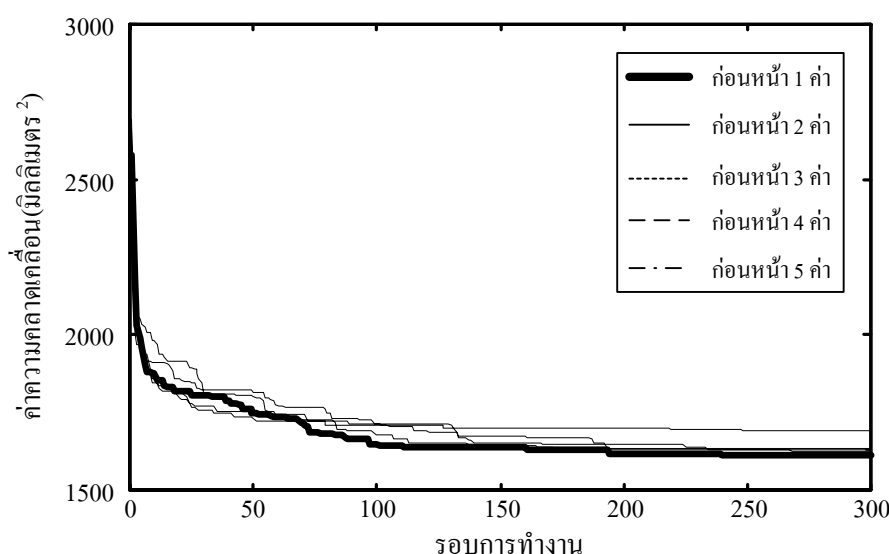


รูปที่ 5.3 ผลการรู้เข้าค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบจำนวนรอบก่อนการย้อนรอย

5.3.4 การทดสอบเพื่อหาค่าคำตอบชุดที่เก็บไว้ก่อนหน้าที่เหมาะสม

การทดสอบเพื่อหาค่าที่เลือกคำตอบที่เก็บไว้ มาทำงานย้อนรอยในการเริ่มค้นหาคำตอบที่เหมาะสม จากการทดสอบให้หัวข้อที่ 5.3.3 ได้เลือกค่าจำนวนรอบก่อนการย้อนรอยเท่ากับ 5 รอบ จึงมีค่าที่จัดเก็บไว้ 5 ค่า ดังนั้นในการทดสอบการนำค่าจาก table ที่เก็บไว้ย้อนหลัง คือ ค่าคำตอบก่อนหน้า 1 ค่า, ค่าคำตอบก่อนหน้า 2 ค่า, ค่าคำตอบก่อนหน้า 3 ค่า, ค่าคำตอบก่อนหน้า 4 ค่า และค่าคำตอบก่อนหน้า 5 ค่า มีผลการรู้เข้าค่าความคลาดเคลื่อนแสดงดังรูปที่ 5.4 จากผลการ

ทดสอบผลค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำที่สุดเท่ากับ 1,612.819 มิลลิเมตร² ที่รอบในการทำงานเฉลี่ยที่ 167 เป็นการนำค่าคำตอบก่อนหน้า 1 ค่า ส่วนเป็นการนำค่าคำตอบก่อนหน้า 4 ค่า มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยรองลงมาเท่ากับ 1,627.51 มิลลิเมตร² มีรอบการทำงานใกล้เคียงกัน ดังนั้นจากผลการดูเข้าค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุดที่ค่าคำตอบก่อนหน้า 1 ค่าเป็นค่าเริ่มต้นในการย้อนรอยเพื่อค้นหาค่าที่ดีต่อไป ที่เหมาะสมกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้



รูปที่ 5.4 ผลการดูเข้าค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบค่าคำตอบชุดที่เก็บไว้ก่อนหน้า

5.4 การค้นหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทาน โดยวิธีการค้นหาแบบตาบอด

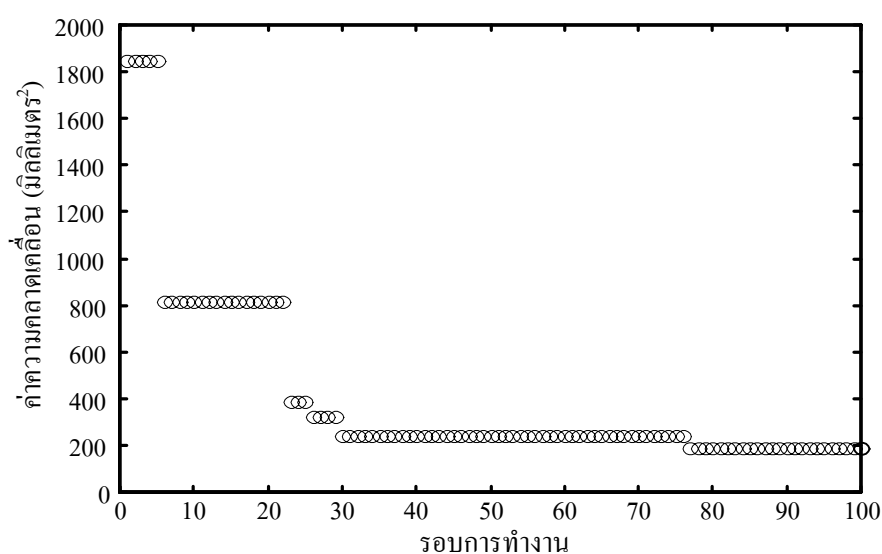
จากการค้นหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานชนิดผลรวมสตายเบ็คและความหนืด มีการดำเนินการเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.6 เนื่องจากในหารหาขอบเขตร่วมของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานนั้นต้องมีการวิเคราะห์ร่วมกับ เพื่อนำมาเป็นค่าขอบเขตใหม่หรือนำค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานบางค่าให้เป็นค่าคงที่ เป็นการดำเนินการค้นหาในช่วงถัดไป ทำให้คำตอบที่ได้เป็นไปในแนวทางเดียวกันและเปรียบเทียบกันตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ในการค้นหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทาน โดยวิธีการค้นหาแบบตาบอดมีการกำหนดค่าต่างๆ เพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดในการค้นหานั้น แสดงดังตารางที่ 5.1

จากค่าต่างๆ ดังตารางที่ 5.1 มาทำการค้นหาค่าพารามิเตอร์แบบจำลองแรงเสียดทาน ได้ผลการทดสอบของการดูเข้าของคำตอบที่ความเร็ว -5 มิลลิเมตรต่อวินาที แสดงดังรูปที่ 5.5 มีค่าความคลาดเคลื่อนเริ่มต้นเท่ากับ 1,848.67 มิลลิเมตร² และเริ่มลดลงเป็นช่วงๆ จนถึงรอบที่ 77 ได้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดเท่ากับ 186.66 มิลลิเมตร² ส่วนการทดสอบการดูเข้าของคำตอบที่ความเร็ว 5

มิลลิเมตรต่อวินาที แสดงดังรูปที่ 5.6 โดยมีค่าความเคลื่อนเริ่มต้นเท่ากับ 8689.59 มิลลิเมตร² และลดลงมาถึง 3799.61 มิลลิเมตร² ในช่วงรอบที่ 8 – 32 ลดลงสู่ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดเท่ากับ 2421.42 มิลลิเมตร² ในช่วงรอบที่ 36 เป็นต้นไป

ตารางที่ 5.1 ค่าตัวแปรของวิธีการค้นหาแบบตามูสำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์

ตัวแปรของวิธีการค้นหาแบบตามู	ค่าของตัวแปรของวิธีการค้นหาแบบตามูที่ได้จากการทดสอบ
ขนาดของรัศมีในการสุ่มคำตอบ	0.150
จำนวนคำตอบในการสุ่มต่อครั้ง	150
จำนวนรอบการเคลื่อนย้ายก่อนการย้อนถอย	5
คำตอบที่ใช้ในการย้อนถอย	ค่าคำตอบก่อนหน้า 1 ค่า
จำนวนรอบสูงสุดในการทำงานของวิธีการค้นหาแบบตามู(MAXGEN)	300

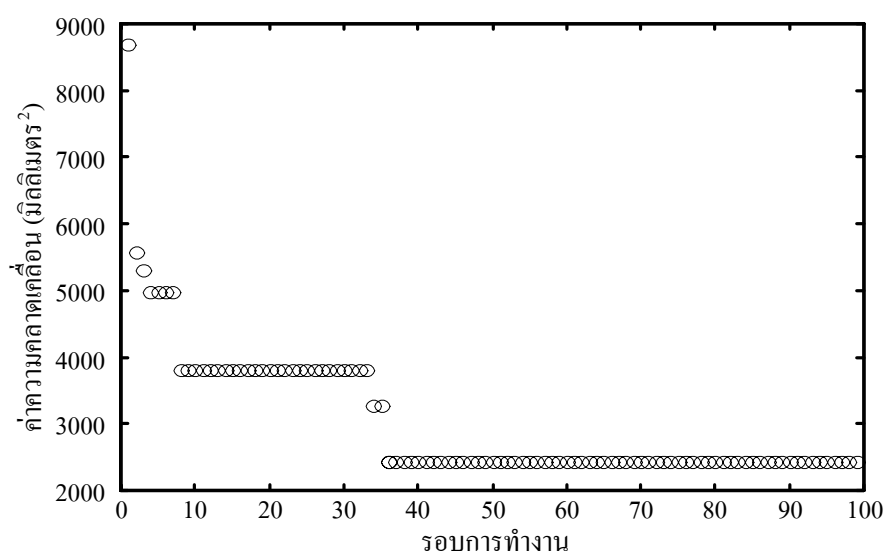


รูปที่ 5.5 ผลการใส่ค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อทดสอบที่ความเร็ว -5 มิลลิเมตรต่อวินาที

5.4.1 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้นช่วงแรก

การค้นหาค่าพารามิเตอร์แบบจำลองแรงเสียดทาน ช่วงแรก โดยมีการกำหนดขอบเขตของพารามิเตอร์ในการค้นหาเช่นเดียวกับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ด้วยจินเนติกอัลกอริทึม ดังหัวข้อ 4.6.1 ดังตารางที่ 4.4 โดยใช้ค่าในส่วนขอบเขตทางต่ำสุด ขอบเขตทางสูงสุด โดยการค้นหา

เป็นการค้นหาค่าพารามิเตอร์เพื่อกำหนดขอบเขตของพารามิเตอร์แต่ละพารามิเตอร์แต่ละตัว ทำการรันโปรแกรมมีรอบการทำงานสูงสุด 300 รอบ ได้ผลแสดงค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุดและต่ำสุดดัง ตารางที่ 5.2 รายละเอียดของผลแสดงดังตารางที่ ข.2 ในภาคผนวก ข.



รูปที่ 5.6 ผลการดูเข้าค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อทดสอบที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที

ตารางที่ 5.2 ผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของระบบช่วงแรก

ค่า/พารามิเตอร์ (หน่วย)	F_{S+} (N)	F_{C+} (N)	F_{V+} (Ns/mm)	F_{S-} (N)	F_{C-} (N)	F_{V-} (Ns/mm)	vss (mm/s)	k_{spring} (N/mm)	m (kg)
ค่าเฉลี่ย	132.20	48.935	0.803	-125.31	-49.597	-0.805	3.452	0.368	10.832
ค่าสูงสุด	140.49	59.642	0.841	-105.27	-46.976	-0.774	4.264	0.499	14.676
ค่าต่ำสุด	121.84	45.332	0.755	-135.49	-58.650	-0.844	2.536	0.211	7.394

จากผลที่ได้มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในด้านการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น หรือเคลื่อนที่ทางบวกมีค่าเท่ากับ 2,237.035 มิลลิเมตร² และในด้านการเคลื่อนที่ลดลง หรือการเคลื่อนที่ทางลบมีค่าเท่ากับ 500.889 มิลลิเมตร² ส่วนค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละชุดข้อมูลแสดงดังตารางที่ ข.2 ประกอบ โดยมีค่านิจสปริงเท่ากับ 0.368 นิวตันต่อมิลลิเมตร และค่ามวลสมมูลเฉลี่ยเท่ากับ 10.832 กิโลกรัม ซึ่งมีขนาดต่ำกว่าผลจากตารางที่ 4.5 เล็กน้อยดังค่าที่ได้เป็นที่ยอมรับได้ทั้งสองวิธี

5.4.2 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้นช่วงที่สอง

การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้นช่วงที่สอง การกำหนดขอบเขตที่ได้เช่นเดียวกับค่าในตารางที่ 4.6 เป็นขอบเขตใหม่ในการค้นหาโดยวิธีค้นหาแบบตาบ และได้ผลการค้นหาแสดงดังตารางที่ 5.3 รายละเอียดแสดงในตารางที่ ข.4 จากผลที่ได้มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในด้านการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นหรือเคลื่อนที่ทางบวกมีค่าเท่ากับ 2,023.281 มิลลิเมตร² และในด้านการเคลื่อนที่ลดลง หรือการเคลื่อนที่ทางลบมีค่าเท่ากับ 410.268 มิลลิเมตร² ส่วนค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละชุดข้อมูลแสดงดังตารางที่ ข.4 ประกอบ ดังเมื่อเทียบกับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ช่วงแรก ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมีค่าน้อยลงหรือมีค่าดีขึ้น ค่านิจของสปริงเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.369 นิวตันต่อมิลลิเมตร และมวลสมมูลเฉลี่ยเท่ากับ 10.904 กิโลกรัม มีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงเดิมจากทั้งช่วง ดังนั้นจากการพิจารณาจึงกำหนดให้ค่าทั้งสองเป็นค่าคงที่ ในการค้นหาพารามิเตอร์ในช่วงต่อไป

ตารางที่ 5.3 ผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของระบบช่วงที่สอง

ค่า/พารามิเตอร์ (หน่วย)	F _{S+} (N)	F _{C+} (N)	F _{V+} (Ns/mm)	F _{S-} (N)	F _{C-} (N)	F _{V-} (Ns/mm)	vss (mm/s)	k _{spring} (N/mm)	m (kg)
ค่าเฉลี่ย	132.09	47.283	0.800	-123.43	-48.271	-0.800	3.095	0.369	10.904
ค่าสูงสุด	140.45	51.380	0.807	-103.18	-46.169	-0.792	4.427	0.394	11.274
ค่าต่ำสุด	126.00	46.276	0.791	-133.21	-53.976	-0.808	2.531	0.345	10.630

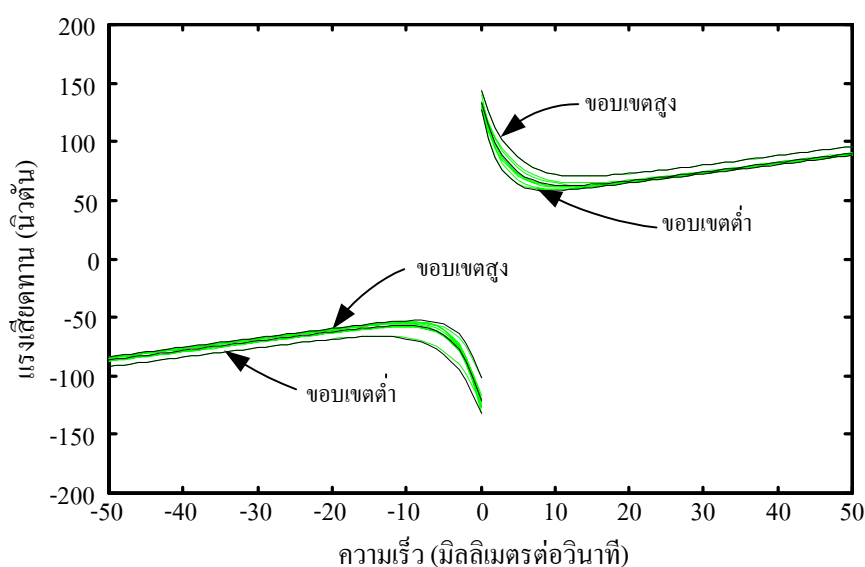
5.4.3 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้นช่วงที่สาม

การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้นช่วงที่สาม เป็นการกำหนดให้ค่านิจของสปริง ค่ามวลสมมูลเป็นค่าคงที่ และมีขอบเขตในการค้นหาเช่นเดียวกับตารางที่ 4.8 ได้ผลต่างๆ แสดงดังตารางที่ 5.4 จากผลที่ได้มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในด้านการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น หรือเคลื่อนที่ทางบวกมีค่าเท่ากับ 2,264.434 มิลลิเมตร² และในด้านการเคลื่อนที่ลดลง หรือการเคลื่อนที่ทางลบมีค่าเท่ากับ 498.118 มิลลิเมตร² ส่วนค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละชุดข้อมูลแสดงดังตารางที่ ข.6 ประกอบ เมื่อเทียบกับการค้นหาพารามิเตอร์ช่วงที่ผ่านมา ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมีค่าต่างกันเล็กน้อย ซึ่งค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{C+} เท่ากับ 47.773 นิวตัน และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{C-} เท่ากับ -48.482 นิวตัน สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน vss เท่ากับ 3.547 มิลลิเมตรต่อวินาที มีขนาดที่ได้้อยู่ระหว่างช่วงข้อมูลที่ได้ทั้งสองช่วง ซึ่งผลสอดคล้องกันทั้งสองวิธีจึงมีการกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานทั้งสามค่าเป็นค่าคงที่ในการค้นหาต่อไป

ตารางที่ 5.4 ผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของระบบช่วงที่สาม

ค่า/พารามิเตอร์ (หน่วย)	F_{S+} (N)	F_{C+} (N)	F_{V+} (Ns/mm)	F_{S-} (N)	F_{C-} (N)	F_{V-} (Ns/mm)	vss (mm/s)
ค่าเฉลี่ย	131.228	47.773	0.802	-123.829	-48.482	-0.801	3.547
ค่าสูงสุด	140.766	53.455	0.807	-103.773	-46.066	-0.793	4.280
ค่าต่ำสุด	125.102	46.421	0.793	-134.324	-53.982	-0.808	2.523

ผลจากการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานดังตารางที่ ข.6 ได้แบบจำลองทั้งหมดที่ค้นหา แบบจำลองเฉลี่ยปกติ แบบจำลองขอบเขตสูงและแบบจำลองขอบเขตต่ำ ดังรูปที่ 5.7 แบบจำลองเฉลี่ยปกติช่วงความเร็วบวกมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองขอบเขตต่ำ ต่างที่ค่าของ vss มีขนาดมากกว่า ส่วนช่วงความเร็วลบแบบจำลองเฉลี่ยปกติมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองขอบเขตสูงต่างกันที่ค่าของ F_{C-} มีขนาดน้อยกว่าเนื่องจากความสั่นเท่ากับ

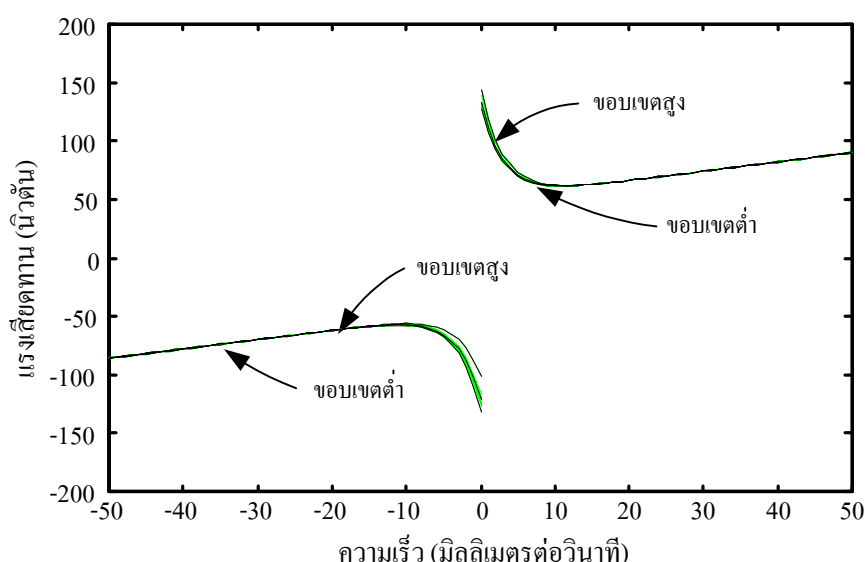


รูปที่ 5.7 แบบจำลองแรงเสียดทานที่ได้จากการค้นหาช่วงที่สาม

5.4.4 การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้นช่วงที่สี่

การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น ช่วงที่สี่ กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{C+} เท่ากับ 47.75 นิวตัน ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{C-} เท่ากับ -48.32 นิวตัน และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน vss เท่ากับ 3.198 มิลลิเมตรต่อวินาที เป็นค่าคงที่ ดังนั้นขอบเขตส่วนที่เหลือในการค้นหาเช่นเดียวกันตารางที่ 4.10 เป็นขอบเขตในการหา

ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_s ในแต่ละชุดข้อมูล และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_v ได้ผลแต่ละช่วงดังตารางที่ 5.5 รายละเอียดแสดงในตารางที่ ข.8 และผลจากการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทานดังตารางที่ ข.8 ได้แบบจำลองทั้งหมดที่ค้นหา แบบจำลองเฉลี่ยปกติ แบบจำลองขอบเขตสูงและแบบจำลองขอบเขตต่ำดังรูปที่ 5.8 มีผลเช่นเดียวกับรูปที่ 4.20



รูปที่ 5.8 แบบจำลองแรงเสียดทานที่ได้จากการค้นหาช่วงที่สี่

ตารางที่ 5.5 ผลการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของระบบช่วงที่สี่

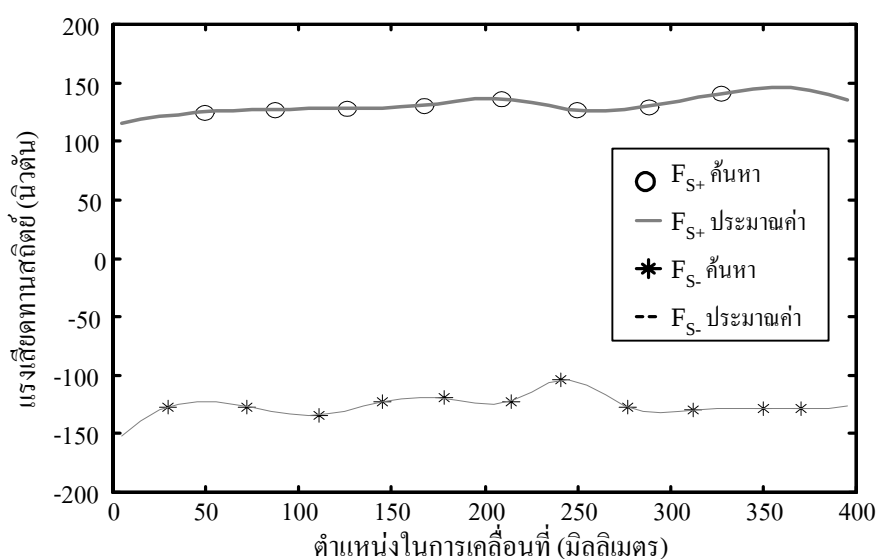
ค่า/พารามิเตอร์ (หน่วย)	F_{s+} (N)	F_{v+} (Ns/mm)	F_{s-} (N)	F_{v-} (Ns/mm)
ค่าเฉลี่ย	130.771	0.800	-123.902	-0.800
ค่าสูงสุด	141.041	0.806	-103.577	-0.792
ค่าต่ำสุด	125.040	0.794	-133.975	-0.810

จากผลที่ได้มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในด้านการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น หรือเคลื่อนที่ทางบวกมีค่าเท่ากับ 2,602.713 มิลลิเมตร² และในด้านการเคลื่อนที่ลดลง หรือการเคลื่อนที่ทางลบมีค่าเท่ากับ 609.011 มิลลิเมตร² ส่วนค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละชุดข้อมูลแสดงดังตารางที่ ข.8 ประกอบ ดังเมื่อเทียบกับการค้นหาค่าพารามิเตอร์ทุกช่วงที่ผ่านมา ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยทางลบและทางบวกมีค่ามากขึ้น ซึ่งมีค่าที่ยังคงยอมรับได้และได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_s ใกล้เคียงเดิมกับการค้นหาที่ผ่านมา ซึ่งตารางที่ 5.6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{s+} ตลอดย่านจาก

50 – 350 มิลลิเมตร และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{s-} ตลอดย่านจาก 350 - 50 มิลลิเมตร แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับตำแหน่งในการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 5.9

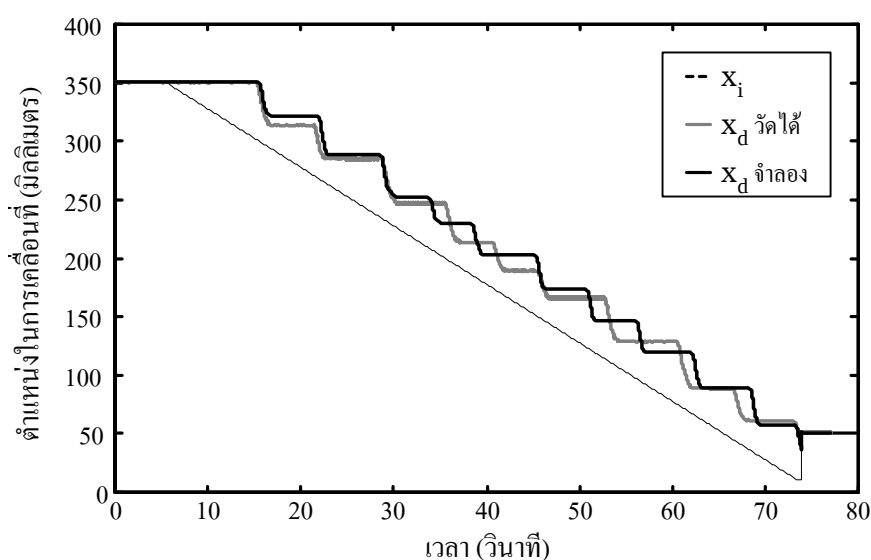
ตารางที่ 5.6 ผลการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียด F_{s+} , F_{s-} ในแต่ละชุดการเคลื่อนที่

ช่วงตำแหน่งในการเคลื่อนที่ (mm)	F_{s+} (N)	ช่วงตำแหน่งในการเคลื่อนที่ (mm)	F_{s-} (N)
49 – 87	125.040	350 – 312	-128.660
87 – 126	127.612	312 – 277	-130.014
126 – 168	128.047	277 – 241	-127.137
168 – 208	130.806	241 – 214	-103.577
208 – 249	136.904	214 – 178	-122.525
249 – 288	126.987	178 – 145	-119.398
288 – 327	129.728	145 – 111	-122.903
327 – 350	141.041	111 – 72	-133.975
		72 – 49	-126.930



รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของวิธีการค้นหาแบบตาม

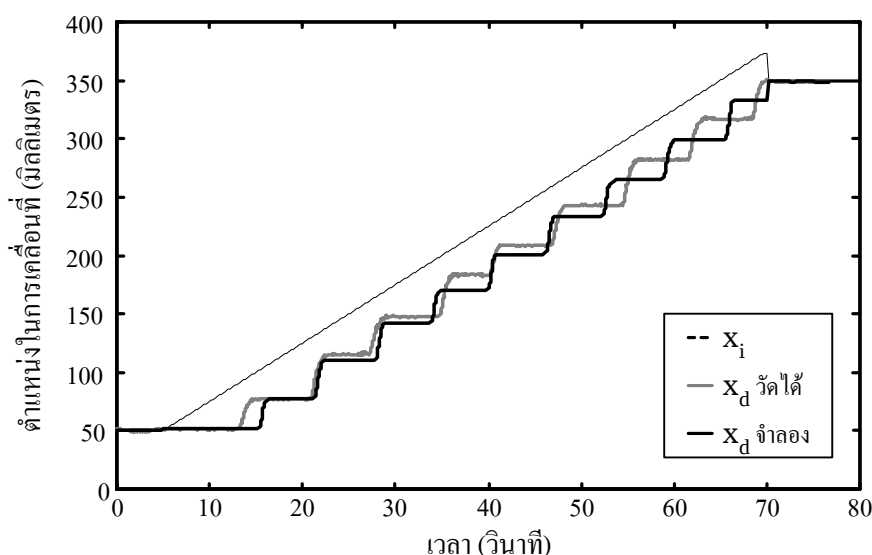
จากรูปที่ 5.9 กราฟจุดวงกลมเป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{S+} ส่วนกราฟจุดดอกจันเป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{S-} ส่วนกราฟเส้นสี่เหลี่ยมเป็นค่าการประมาณแบบเส้นโค้งของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{S+} และกราฟเส้นประสี่เหลี่ยมเป็นค่าการประมาณแบบเส้นโค้งของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{S-} เพื่อนำค่าที่ได้ไปหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{S+} และ F_{S-} ในแต่ละช่วงค่าโดยแต่ละช่วงค่ามีค่าระยะห่างของตำแหน่งเท่ากับ 10 มิลลิเมตร เพื่อนำค่าไปทดสอบกับสัญญาณที่วัดการควบคุมการเคลื่อนที่แบบตลอดย่านการเคลื่อนที่ที่หลายความเร็วเช่น ความเร็ว 5, 6, 8, -5, -6 และ -8 มิลลิเมตรต่อวินาที เนื่องจากค่าความเร็วดังกล่าวเป็นย่านความเร็วในสภาวะการเคลื่อนที่ได้ผลการจำลองสถานการณ์มวลไหล ที่ปรากฏแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น ดังรูปที่ 5.10 เป็นค่าความเร็ว -5 มิลลิเมตรต่อวินาที และรูปที่ 5.11 เป็นการควบคุมที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที



รูปที่ 5.10 ผลการจำลองสถานการณ์มวลไหลที่ความเร็ว -5 มิลลิเมตรต่อวินาที
จากวิธีการค้นหาแบบตาบอด

จากรูปที่ 5.10 ได้ผลความคลาดเคลื่อนจากการจำลองสถานการณ์มวลไหลเท่ากับ 9.355 มิลลิเมตรต่อจุด ซึ่งได้กราฟเส้นสีดำ ส่วนกราฟเส้นสีเทาเป็นตำแหน่งในการเคลื่อนที่ที่วัดได้ และกราฟเส้นประเป็นการจัดของการควบคุมให้ตำแหน่งเคลื่อนที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที ในช่วงการเคลื่อนที่จากระยะ 350 มิลลิเมตร ลงถึง 250 มิลลิเมตร มีค่าการเคลื่อนที่ใกล้เคียงกัน ส่วนในช่วง 225 มิลลิเมตรมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{S-} มีขนาดเล็กกว่าความเป็นจริง ทำให้การเคลื่อนที่เกิดขึ้นก่อนแทนเคลื่อนที่ ทำให้ช่วงการเคลื่อนที่จากระยะ 200 – 120 มิลลิเมตร มีความคลาด

เคลื่อนไป ในช่วงการเคลื่อนที่ 120 มีค่า F_{S-} น้อยกว่าที่เป็นจริงจึงทำให้การเคลื่อนที่กลับมา สอดคล้องกันต่อมาจนถึง ช่วง 52 มิลลิเมตร เริ่มมีการเคลื่อนอีก แต่ในการควบคุมแล้วถึงระยะที่ กำหนดจึงต้องหยุดตามกันจึงมีรูปกราฟเป็นปลายเหลี่ยมขึ้นมาในตอนท้ายของการเคลื่อนที่



รูปที่ 5.11 ผลการจำลองสถานการณ์มวลโกลที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที
จากวิธีการค้นหาแบบตาบอด

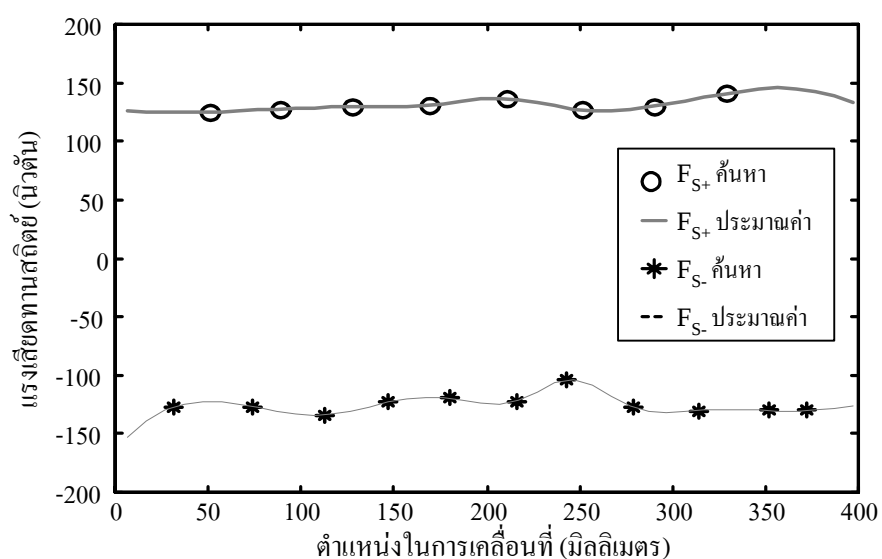
จากรูปที่ 5.11 ความหมายของเส้นกราฟเช่นเดียวกับรูปที่ 5.10 โดยจากรูปมีค่าความคลาดเคลื่อนของการเคลื่อนที่เท่ากับ 10.2277 มิลลิเมตรต่อจุด จากการจำลองสถานการณ์มวลโกลที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที มีค่าตำแหน่งในการเคลื่อนที่ใกล้เคียงกัน และสอดคล้องกันอย่างดีตลอดการเคลื่อนที่ของแท่น มีช่วงตำแหน่งระหว่าง 140 มิลลิเมตร มีการเคลื่อนที่เร็วไปบาง เนื่องจากค่า F_{S+} มีค่าน้อยกว่าที่เป็นจริง ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ได้ระยะทางน้อย ทำให้ระยะทางการเคลื่อนที่ที่ลดลง และที่ในช่วง 225 มิลลิเมตรเช่นเดียวเกิดลักษณะแบบเดียวกัน ทำให้การเคลื่อนที่ลดต่ำลงมาเพิ่มขึ้น

จากการค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{S+} , F_{S-} ในแต่ละชุดการเคลื่อนที่ จากตารางที่ 4.12 กับตารางที่ 5.6 นำค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{S+} , F_{S-} ทั้งสองมาหาค่าเฉลี่ยและนำค่าที่ได้มาแสดงดังค่าในตารางที่ 5.7 เป็นที่นำไปใช้ในบทที่ 6 โดยการนำค่าที่ได้ไปประมาณค่าแบบเส้นโค้ง ให้มีค่าเริ่มจาก 5 มิลลิเมตร ห่างช่วงละ 10 มิลลิเมตร ได้ค่าสัมประสิทธิ์ F_{S+} , F_{S-} ชุดละ 40 ค่า จากข้อมูลในตารางที่ 5.7 แสดงเป็นกราฟจุดวงกลม แทนค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{S+} กราฟจุดดอกจัน ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{S-} ส่วนกราฟเส้นสีเทาต่อเนื่องแทนค่าได้จากการประมาณ

แบบเส้นโค้งของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{S+} และกราฟเส้นสี่เหลี่ยมแทนค่าได้จากการประมาณแบบเส้นโค้งของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{S-} ดังแสดงในรูปที่ 5.12

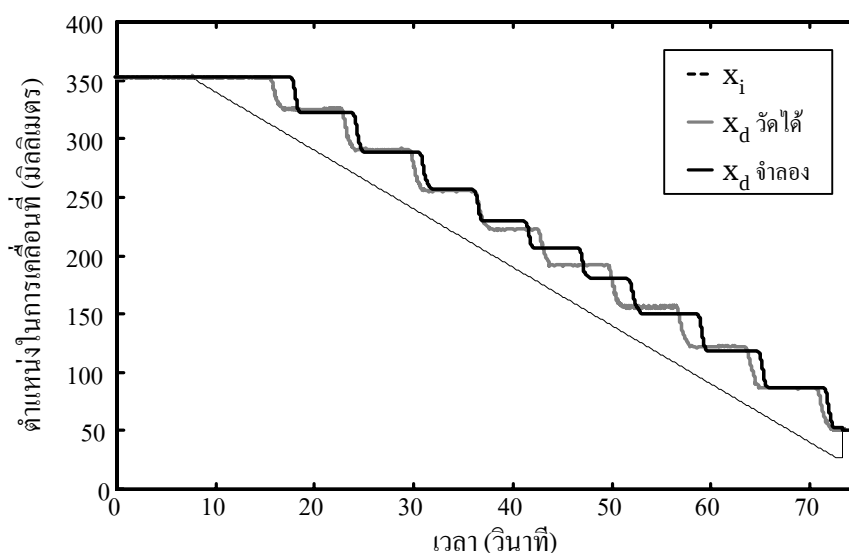
ตารางที่ 5.7 ผลการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียด F_{S+} , F_{S-} ในแต่ละชุดการเคลื่อนที่

ช่วงตำแหน่งในการเคลื่อนที่ (mm)	F_{S+} (N)	ช่วงตำแหน่งในการเคลื่อนที่ (mm)	F_{S-} (N)
49 – 87	125.15	350 – 312	-130.17
87 – 126	127.61	312 – 277	-130.33
126 – 168	129.41	277 – 241	-127.18
168 – 208	130.81	241 – 214	-103.71
208 – 249	136.87	214 – 178	-122.52
249 – 288	126.84	178 – 145	-119.38
288 – 327	129.73	145 – 111	-122.88
327 – 350	141.14	111 – 72	-134.35
		72 – 49	-126.93



รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับตำแหน่งในการเคลื่อนที่เฉลี่ยทั้งสองวิธี

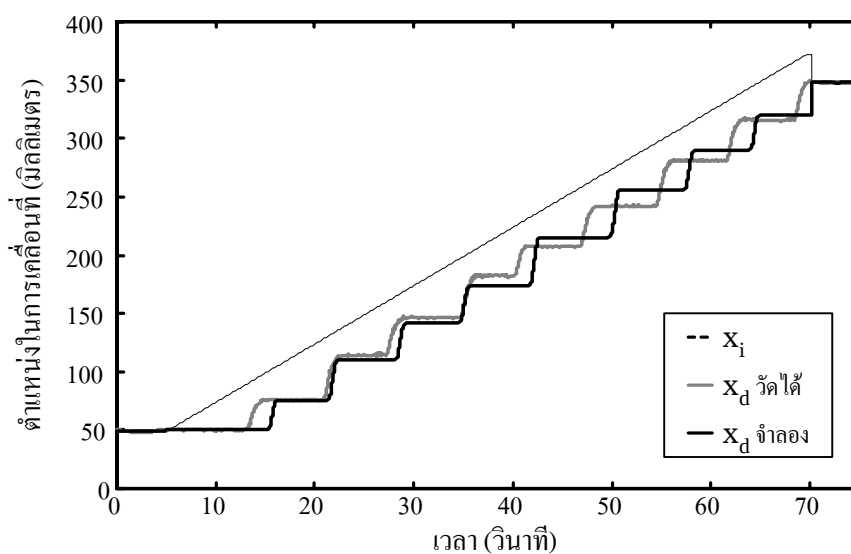
จากผลในตารางที่ 5.7 เมื่อเทียบกับค่าในตารางที่ 5.6 มีค่าที่ต่างกันมากที่สุดสองจุดคือ ที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{S-} ที่ช่วง 350 – 312 มิลลิเมตร มีค่าต่างกันอยู่ประมาณ 1.5 นิวตัน และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียด F_{S+} ที่ช่วง 126 – 168 มิลลิเมตร มีค่าต่างกันอยู่ประมาณ 1.3 นิวตัน ส่วนที่เหลือมีค่าต่างกันน้อยกว่า 0.5 นิวตัน แต่เมื่อเทียบกับการค้นหาโดยหลักการจินเนติก อัลกอริทึม ดังตารางที่ 4.12 ค่าที่ได้มีส่วนต่างน้อยกว่า 0.5 มิลลิเมตร ดังนั้นจากการในการค้นหาที่ได้มีค่าที่ได้ไปในแนวทางเดียวกันดังจากตารางที่ 5.7 นำค่าไปทำการทดสอบกับชุดข้อมูลที่มีการเคลื่อนตลอดย่านการเคลื่อนที่ที่ความเร็วเท่ากับ -5 มิลลิเมตรต่อวินาที ได้ผลแสดงดังรูปที่ 5.13 และทดสอบการควบคุมความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที แสดงดังรูปที่ 5.14



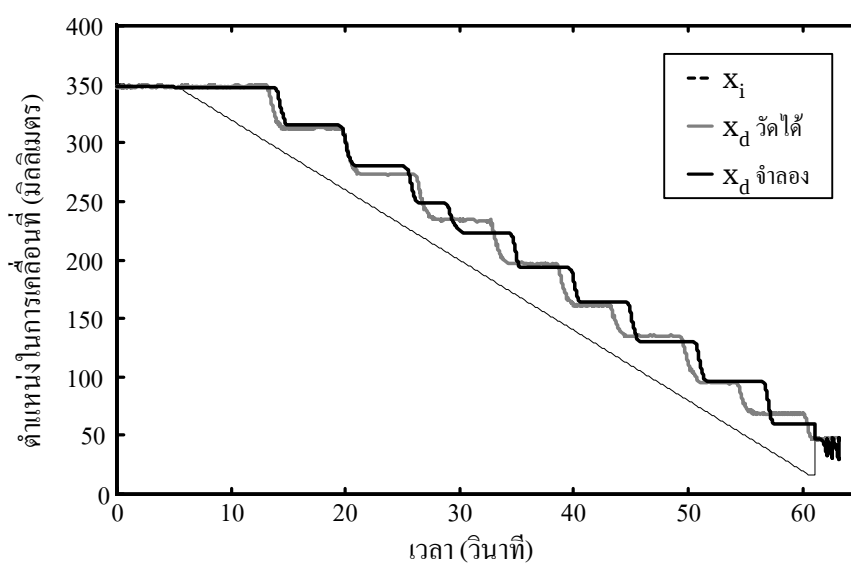
รูปที่ 5.13 ผลการจำลองสถานการณ์มวลโกลที่ความเร็ว -5 มิลลิเมตรต่อวินาที
จากการค้นหาทั้งสองวิธี

จากรูปที่ 5.13 มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 10.0778 มิลลิเมตรต่อจุด มีผลการจำลองสถานการณ์มวลโกลสอดคล้องกัน แต่มีช่วงการเคลื่อนระหว่าง 225 – 140 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{S-} มีค่าน้อยที่ตำแหน่ง 225 มิลลิเมตรจึงทำให้เคลื่อนที่ได้ระยะทางน้อยและเคลื่อนที่ขึ้นก่อน

ส่วนรูปที่ 5.14 เป็นการควบคุมการเคลื่อนที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที ได้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 11.5065 มิลลิเมตรต่อจุด ซึ่งมีผลการเคลื่อนที่ช่วงแรกสอดคล้องกัน เริ่มต่างช่วงระยะ 170 – 350 มิลลิเมตร ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานบางช่วงมากกว่าและบางช่วงน้อยกว่าทำให้การเคลื่อนที่เริ่มเคลื่อนที่ต่างกันและได้ระยะไม่เท่ากันบ้าง



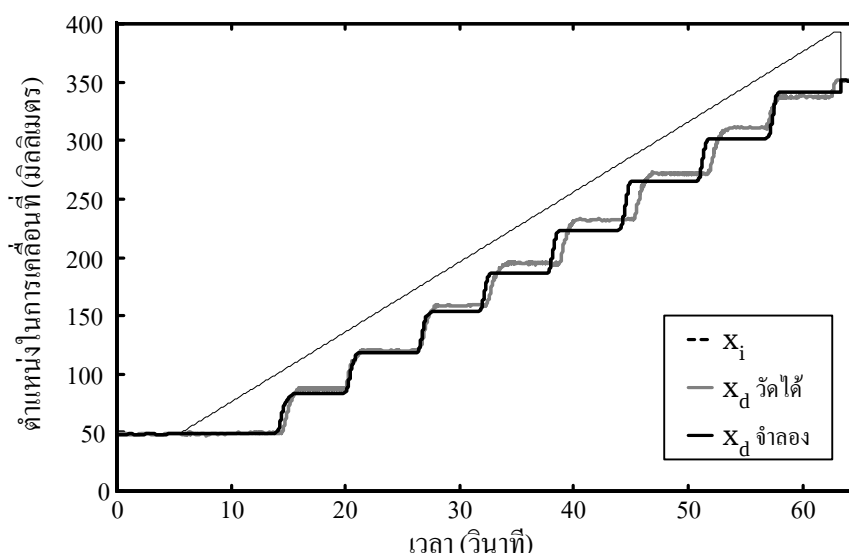
รูปที่ 5.14 ผลการจำลองสถานการณ์มวลไหลที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที
จากการค้นหาทั้งสองวิธี



รูปที่ 5.15 ผลการจำลองสถานการณ์มวลไหลที่ความเร็ว -6 มิลลิเมตรต่อวินาที
จากการค้นหาทั้งสองวิธี

นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบที่ความเร็วในการเคลื่อนที่เท่ากับ -6 , 6 , -8 และ 8 มิลลิเมตรต่อวินาที ได้ผลการเคลื่อนที่จากการจำลองสถานการณ์มวลไหลแสดงดังรูปที่ 5.15 – 5.18 ตามลำดับ มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 9.3325 , 11.3366 , 10.9553 และ 13.9139 มิลลิเมตร

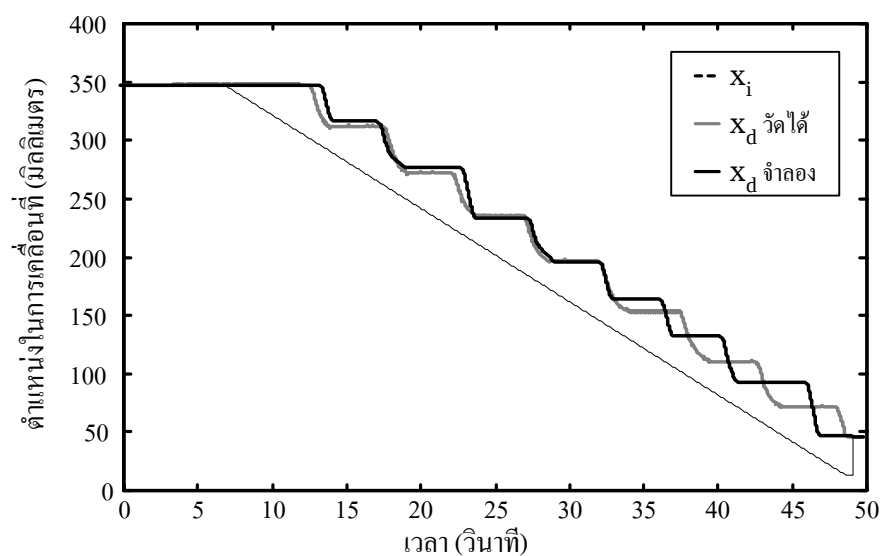
ต่อจุดตามลำดับ จากรูปที่ 5.11 ผลการเคลื่อนที่ในสองครั้งมีการเคลื่อนที่ใกล้เคียงกัน การเคลื่อนที่ตำแหน่ง 250 มิลลิเมตร มีการเคลื่อนที่ก่อนในระยะสั้น ทำให้การเคลื่อนที่ที่มีความผิดพลาด ส่วนการเคลื่อนที่ระยะ 200 มิลลิเมตร เริ่มใกล้เคียงกันใหม่ แต่โดยรวมมีการเคลื่อนที่เข้าการประมาณ 2 วินาที



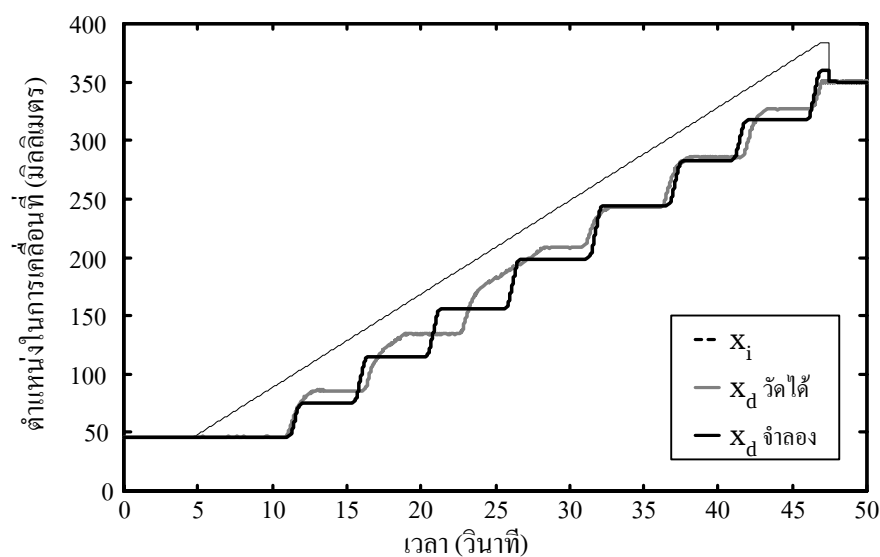
รูปที่ 5.16 ผลการจำลองสถานการณ์มวลโกลที่ความเร็ว 6 มิลลิเมตรต่อวินาที
จากการค้นหาทั้งสองวิธี

จากรูปที่ 5.16 ผลการเคลื่อนที่ในช่วงสามครั้งแรกมีการเคลื่อนที่ใกล้เคียงกัน ส่วนในช่วง 160 มิลลิเมตรมีการเคลื่อนที่เริ่มก่อนโดยมีค่าเวลาเริ่มก่อนประมาณ 2 – 3 วินาที แต่มีการเคลื่อนที่ได้ระยะทางน้อยกว่าแบบสม่ำเสมอประมาณ 10 มิลลิเมตร จนกระทั่งตำแหน่ง 300 มิลลิเมตร มีการเคลื่อนที่ได้ระยะเท่ากัน มีความหมายว่าช่วงระยะ 150 มิลลิเมตรมีค่า F_{S+} น้อยกว่าค่าจริง จึงทำให้มีการเคลื่อนที่ก่อน

ส่วนรูปที่ 5.17 เป็นรูปที่มีการเคลื่อนที่แบบติดกัน และลื่นเป็นช่วงๆ ที่ความเร็ว 8 มิลลิเมตรต่อวินาที ซึ่งในช่วงการตีครั้งแรกมีการเคลื่อนที่ใกล้เคียงกัน ส่วนครั้งที่ห้า มีการเคลื่อนที่พร้อมกันแต่ได้ระยะทางน้อยกว่า เสมือนมีค่า F_{C-} มีค่ามากกว่าค่าจริง ณ จุดนี้ ส่วนการเคลื่อนที่ช่วง 170 มิลลิเมตรลงมา มีการเคลื่อนที่ได้ก่อนประมาณ 2 วินาที สะสมต่อกันไปตลอดช่วง จนหยุดนิ่ง ทำให้ค่า F_{S-} ในช่วงนี้มีน้อยกว่าค่าจริงจึงทำให้มีการเคลื่อนที่ก่อนตลอดเวลา และในช่วง 150 มิลลิเมตรลงไปถึง 100 มิลลิเมตรมีการลื่นต่อระยะสั้น ทำให้การจำลองสถานการณ์มวลโกลคลาดเคลื่อนไปในช่วงนี้ด้วย ส่วนช่วง 100 มิลลิเมตรสภาวะนี้มีค่าของ F_{S-} มีค่ามากกว่าค่าจริง จึงการเคลื่อนที่ได้ระยะทางมากในช่วงสุดท้ายนี้



รูปที่ 5.17 ผลการจำลองสถานการณ์มวลไหลที่ความเร็ว -8 มิลลิเมตรต่อวินาที
จากการค้นหาทั้งสองวิธี



รูปที่ 5.18 ผลการจำลองสถานการณ์มวลไหลที่ความเร็ว 8 มิลลิเมตรต่อวินาที
จากการค้นหาทั้งสองวิธี

จากรูปที่ 5.18 เป็นการเคลื่อนที่ที่มีทั้งการติดลิ้น และการลื่นไหลเป็นช่วงๆ ทั้งสั้นบ้าง และยาวบ้าง ในช่วงแรกเริ่มเคลื่อนที่พร้อมกันแต่จากการจำลองหยุดก่อน ส่วนของจริงมีการลื่นแบบสั้นๆ และมีการไหลช่วงยาวต่อกันอีกสองช่วง ทำให้การเคลื่อนที่ในช่วงนี้มีค่าแตกต่างกันมาก ส่วน

ช่วง 200 – 350 มิลลิเมตรเป็นการเคลื่อนที่แบบติดลื่นจึงมีผลการเคลื่อนที่ใกล้เคียงกัน ทำให้ได้ผลการเคลื่อนที่ดังรูป

ดังนั้นจากผลการทดสอบแบบจำลองแรงเสียดทานกับความเร็วต่างๆ มีผลที่ได้คล้ายกันทั้งสามชุดการแสดงผลทั้งจากการค้นหาค่าด้วยหลักการจินเนติกอัลกอริทึม วิธีการค้นหาแบบตาบ และค่าเฉลี่ยทั้งสองวิธี ดังนั้นหมายถึงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้สามารถนำไปทดสอบกับการเคลื่อนที่ผ่านความเร็วสภาวะติดลื่นได้ ส่วนในสภาวะไถลแบบจำลองสถานการณ์นี้ยังได้ค่าที่มีความแตกต่างอยู่ จากการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ของระบบที่มีที่น่าสนใจ และสามารถนำไปใช้ในการประมาณค่าแบบออนไลน์ต่อไปในบทที่ 6

บทที่ 6

การปรับแต่งพารามิเตอร์ของแบบจำลองแบบออนไลน์

6.1 บทนำ

บทนี้เป็นการกล่าวถึง หลักการและวิธีการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของระบบแบบออนไลน์ (online) ได้นำผลที่ได้จากการค้นหาค่าพารามิเตอร์แบบออฟไลน์ในบทที่ 5 มาเป็นค่าตั้งต้นในกระบวนการปรับแต่งแบบออนไลน์ได้พึ่งพาหลักการทางพีชคณิตเชิงเส้น ซึ่งจะได้นำเสนอวิธีการออกแบบการทดสอบและนำเสนอผลที่ได้จากการทดสอบ เพื่อให้ได้มาซึ่งพารามิเตอร์ของระบบที่เป็นค่าปัจจุบัน

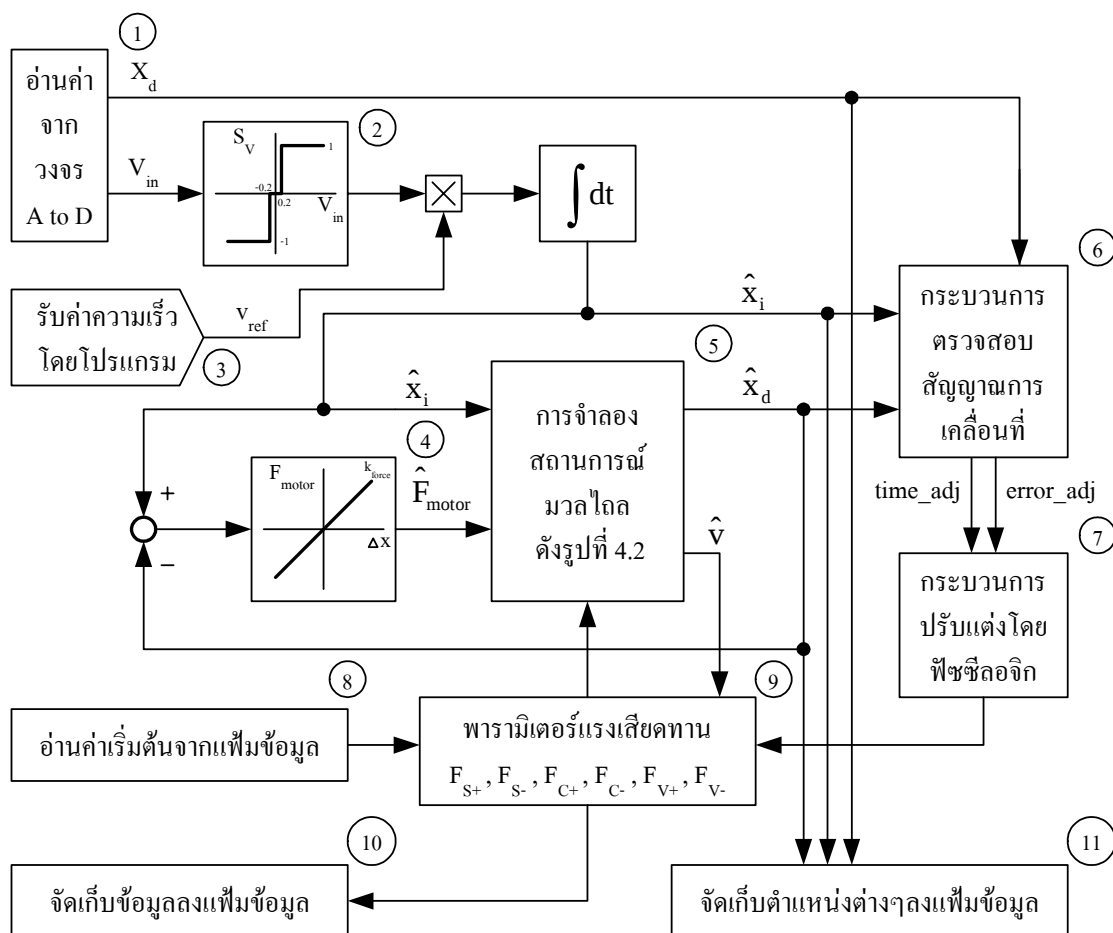
6.2 หลักการปรับแต่งพารามิเตอร์แบบออนไลน์

มีกระบวนการทำงานในการปรับแต่งพารามิเตอร์แบบออนไลน์ โดยพึ่งพาการเขียนโปรแกรมด้วยโปรแกรมภาษาซีให้ทำการอ่านค่าจากวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล 4 ช่องสัญญาณที่เครื่องคอมพิวเตอร์ในห้องปฏิบัติการที่ 2 โดยให้เครื่องคอมพิวเตอร์ในห้องปฏิบัติการที่ 1 เป็นเครื่องควบคุมการเคลื่อนที่ของแท่นเช่นเดียวกับการเก็บข้อมูลแบบออฟไลน์ ซึ่งหลักการทำงานภายในโปรแกรมปฏิบัติการบนเครื่องคอมพิวเตอร์ตัวที่ 2 มีหลักการทำงานดังรูปที่ 6.1 ประกอบด้วยการทำงานภายใน 9 ส่วนด้วยกันดังนี้

ส่วนที่ 1 เป็นวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล 4 ช่องสัญญาณ ที่รับสัญญาณจากวงจรปรับแต่งสัญญาณต่างๆ ที่ต่อกับพอร์ตเครื่องพิมพ์ของคอมพิวเตอร์โดยมีโปรแกรมการอ่านสัญญาณที่ได้มีการทดสอบถึงคุณสมบัติสัญญาณต่างๆ เทียบกับเครื่องมือวัดโดยทำการอ่านค่าสัญญาณตำแหน่งในการเคลื่อนที่ x_d เพื่อดำเนินการเปรียบเทียบกับค่าปรับแต่งสัญญาณและสัญญาณแรงดันไฟฟ้า V_{in} เพื่อใช้ต่อกับส่วนที่ 2

ส่วนที่ 2 เป็นกระบวนการของโปรแกรมที่ทำการตรวจสอบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้า เพื่อเป็นการตรวจสอบการทำงานของสัญญาณควบคุมจากเครื่องคอมพิวเตอร์ตัวที่ 2 ให้สัมพันธ์กับการกำหนดสัญญาณตำแหน่งอ้างอิง โดยมีการตรวจสอบทิศทางในการเคลื่อนที่มีอยู่ 3 สถานะการเคลื่อนที่ทิศทางเพิ่มขึ้น ทิศทางลดลงและหยุด โดยมีหลักการทำงานดังสมการ (6-1)

$$S_v(V_{in}) = \begin{cases} -1 & , V_{in} < -0.2V \\ 0 & , -0.2V \leq V_{in} \leq 0.2 \\ 1 & , V_{in} > 0.2 \end{cases} \quad (6-1)$$



รูปที่ 6.1 แผนผังการทำงานของโปรแกรมการปรับแต่งพารามิเตอร์

ส่วนที่ 3 เป็นกระบวนการรับค่าความเร็วอ้างอิงในการควบคุมเพื่อมาทำการสร้างสัญญาณตำแหน่งอ้างอิงให้สอดคล้องกับ โปรแกรมการควบคุมตำแหน่งแบบป้อนกลับให้มีค่าความเร็วอ้างอิงเท่ากัน โดยจะทำการป้อนค่าความเร็วอ้างอิงในช่วงเริ่มต้นเข้าโปรแกรมเท่านั้น

ส่วนที่ 4 เป็นกระบวนการคำนวณแรงที่กระทำกับมวลไถล ได้จากผลต่างระหว่างตำแหน่งอ้างอิงที่ได้จากการคำนวณ กับตำแหน่งที่แทนเคลื่อนที่ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์มวลไถล โดยมีสมการความสัมพันธ์ระหว่าง แรงที่กระทำ F_{motor} กับผลต่างของตำแหน่งทั้งสอง Δx

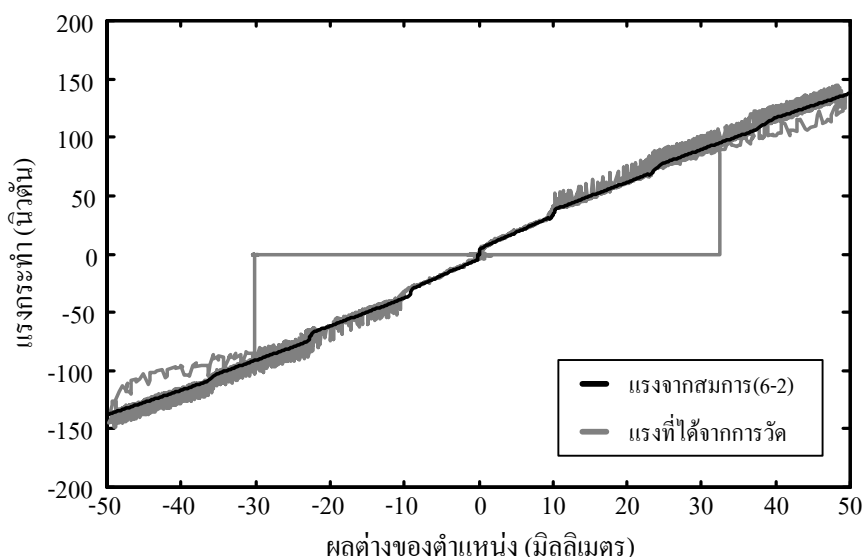
ดั่งสมการ (6-2) ผลการเปรียบเทียบผลที่ได้กับแรงกระทำที่ได้จากการวัด กับแรงกระทำที่ได้จากสมการ (6-2) ดังรูปที่ 6.2

$$F_{\text{motor}}(\Delta x) = \begin{cases} 2.1000 \cdot \Delta x - 32.9850, & -36.50 \leq \Delta x \\ 6.3889 \cdot \Delta x + 123.5444, & -36.50 < \Delta x \leq -35.60 \\ 2.2714 \cdot \Delta x - 23.1555, & -35.60 < \Delta x \leq -23.00 \\ 14.8000 \cdot \Delta x + 265.0000, & -23.00 < \Delta x \leq -22.50 \\ 2.3842 \cdot \Delta x - 14.3119, & -22.50 < \Delta x \leq -9.51 \\ 10.8467 \cdot \Delta x + 65.7046, & -9.51 < \Delta x \leq -9.01 \\ 2.8362 \cdot \Delta x - 4.6680, & -9.01 < \Delta x \leq -0.10 \\ 0.00000, & -0.10 < \Delta x \leq 0.10 \\ 2.8243 \cdot \Delta x + 3.9957, & 0.10 < \Delta x \leq 9.60 \\ 9.6293 \cdot \Delta x - 62.4742, & 9.60 < \Delta x \leq 10.20 \\ 2.3879 \cdot \Delta x + 13.5495, & 10.20 < \Delta x \leq 22.90 \\ 6.0000 \cdot \Delta x - 70.0000, & 22.90 < \Delta x \leq 24.50 \\ 2.2781 \cdot \Delta x + 21.1717, & 24.50 < \Delta x \leq 37.50 \\ 3.7740 \cdot \Delta x - 34.2651, & 37.50 < \Delta x \leq 40.00 \\ 2.1142 \cdot \Delta x + 32.0000, & 40.00 < \Delta x \end{cases} \quad (6-2)$$

ส่วนที่ 5 เป็นการจำลองสถานการณ์มวลไหลเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.2 มีการทำงานดังรูปที่ 4.3 ทำการเขียนโปรแกรมเพื่อให้ได้ค่าตำแหน่งในการเคลื่อนที่จากการจำลองสถานการณ์มวลไหล $\hat{x}_d$ ซึ่งได้ค่าตำแหน่งอ้างอิง $\hat{x}_i$ จากการอินทิเกรตค่าสัญญาณเครื่องหมายจากส่วนที่ 2 คูณกับค่าขนาดความเร็วที่ป้อนจากค่าเริ่มต้น v_{ref} และรับค่าแรงกระทำ $\hat{F}_{\text{motor}}$ จากส่วนที่ 4 ดังสมการ (6-2)

ส่วนที่ 6 เป็นกระบวนการตรวจสอบสัญญาณการเคลื่อนที่ เพื่อหาค่าของเวลาการเริ่มเคลื่อนที่ระหว่างตำแหน่งที่ได้อ่านค่า x_d กับตำแหน่งที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ $\hat{x}_d$ โดยให้ค่าเวลา time_adj มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0 วินาที แล้วมีการคำนวณค่า time_adj โดยถ้าสัญญาณ x_d เคลื่อนที่ก่อนค่า time_adj นับค่าเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนรอบที่ต่างกันจนกว่าค่า $\hat{x}_d$ เริ่มเคลื่อนที่ตามจะได้ค่า time_adj มีค่าเป็นบวกจากผลคูณระหว่าง time_adj กับค่าเวลาแต่ละรอบมีค่าเท่ากับ 0.0098 วินาที ส่วนถ้าค่า $\hat{x}_d$ เริ่มเคลื่อนที่ก่อน ค่า time_adj นับค่าลดลงหน่วยเป็นรอบจนกว่าสัญญาณ x_d เริ่มเคลื่อนที่ถึงนั้นมาคำนวณค่า time_adj ซึ่งค่าเป็นลบมีความหมายถึงมีการ

เคลื่อนที่พร้อมกันมากน้อยเพียงใด ส่วนการคำนวณค่า $error_adj$ ดำเนินการหลังจากมีการเคลื่อนที่แล้วของทั้งสองสัญญาณ มีการทำงานจากการตรวจสอบค่า $\hat{x}_d$ มีค่าคงที่นาน 50 รอบและตรวจสอบค่า x_d มีค่าคงที่นาน 50 รอบเมื่อเป็นค่าคงที่ทั้งสองแล้วนำค่าตำแหน่งที่ได้มาหาค่าส่วนต่างค่า x_d เทียบกับค่า $\hat{x}_d$ หมายถึงสัญญาณทั้งสองเคลื่อนที่ทับกันมากน้อยเพียงใด เพื่อนำค่าทั้งสองไปปรับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในส่วนที่ 7 ต่อไป โดยมีรูปที่ 6.3 เป็นตัวอย่างสัญญาณที่ได้รับการคำนวณค่า $time_adj$ และค่า $error_adj$ สองช่วง กราฟเส้นสีเทาคือค่าตำแหน่งแท้จริง ส่วนกราฟเส้นสีดำเป็นตำแหน่งจากการจำลองสถานการณ์มวล์ไถล จากหลักการคำนวณค่าได้ดังในรูป

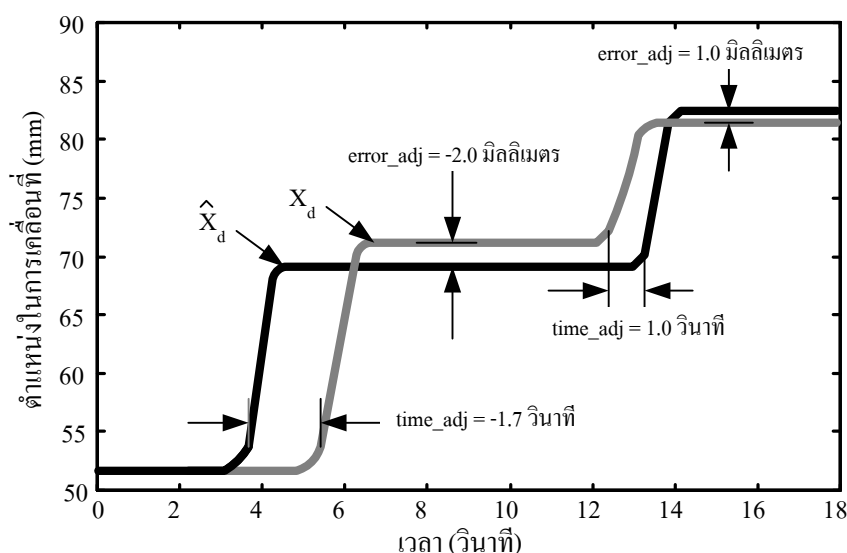


รูปที่ 6.2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแรงกระทำที่ได้จากการวัดกับที่ได้จากสมการ (6-2)

ส่วนที่ 7 ปรับแต่งค่าโดยมีตัวแปรในการรับค่า 2 ส่วนคือค่า $time_adj$ และค่า $error_adj$ เพื่อมาทำการตัดสินใจ ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของระบบมีการพิจารณาเป็นร้อยละส่วนต่างที่ต้องการเพิ่มหรือลด โดยหลักการฟัซซี่ลอจิก ซึ่งจะให้ผลการตัดสินใจในการปรับแต่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ค่าร้อยละในการปรับแต่งพารามิเตอร์ของ F_s , F_c และ F_v ไปผ่านกระบวนการที่ 9 โดยรายละเอียดในการออกแบบสมาชิกต่าง ๆ และกฎความสัมพันธ์ทางฟัซซี่ลอจิกดังในหัวข้อ 6.3

ส่วนที่ 8 เป็นกระบวนการอ่านข้อมูลเริ่มต้นจากการปรับแต่งค่าในครั้งที่ผ่านมา ในช่วงเริ่มต้นรันโปรแกรมจะมีการรับชื่อแฟ้มข้อมูลที่เก็บผ่านมา โดยจะทำการอ่านค่าจากแฟ้มข้อมูลชนิดข้อความแบบแถวลำดับ ซึ่งประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ของระบบทั้งหมด 84 ค่า ได้แก่ ค่าที่ 1 – 40

แรกเป็นค่า F_{S+} ที่ตำแหน่งต่างๆ ค่าที่ 41 – 80 เป็นค่า F_{S-} ที่ตำแหน่งต่างๆ และ ค่าที่ 81 – 84 เป็นค่า F_{C+} , F_{C-} , F_{V+} และ F_{V-} ตามลำดับ



รูปที่ 6.3 การคำนวณค่า time_adj และค่า error_adj จากส่วนที่ 6

ส่วนที่ 9 เป็นกระบวนการปรับแต่งค่าโดยจะทำการรับค่าจากส่วนที่ 7 และขนาดความเร็วในการเคลื่อนที่เพื่อเป็นการปรับแต่งพารามิเตอร์แยกออกเป็น 2 ส่วนคือที่ความเร็วเป็นบวก ให้ปรับแต่งพารามิเตอร์แบบจำลองแรงเสียดทานทางบวก (F_{S+} , F_{C+} , F_{V+}) และที่ความเร็วเป็นลบให้ปรับแต่งพารามิเตอร์แบบจำลองแรงเสียดทานทางลบ (F_{S-} , F_{C-} , F_{V-}) โดยมีข้อกำหนดในการปรับแต่งเมื่อมีการควบคุมตำแหน่งแบบป้อนกลับเท่านั้น หรือแท่นต้องมีการเคลื่อนที่อยู่ ดังนั้นหลังจากการปรับแต่งค่าเรียบร้อยแล้วจะทำการส่งค่าให้กับการจำลองสถานการณ์มวลไทดต่อไป

ส่วนที่ 10 เป็นกระบวนการจัดเก็บข้อมูลโดยจะจัดเก็บในช่วงสิ้นสุดการทำงานของโปรแกรม โดยจะมีการจัดเก็บค่าพารามิเตอร์โครงสร้างข้อมูลเช่นเดียวกับในส่วนที่ 8 โดยจะต้องทำการจัดเก็บชื่อแฟ้มข้อมูลที่ต่างจากชื่อแฟ้มข้อมูลเริ่มต้น เพื่อเป็นการสิ้นสุดโปรแกรม

ส่วนที่ 11 เป็นกระบวนการจัดเก็บค่าตำแหน่ง $\hat{x}_d$, ค่า x_d , ค่า $\hat{x}_i$ และค่าเวลาในการทำงานแต่ละรอบ T ที่ถ้าแถวข้อมูล มีการจัดเก็บตลอดการจำลองสถานการณ์ไปจนกว่าสิ้นสุดโปรแกรมถึงจะปิดแฟ้มข้อมูล โดยมีชื่อแฟ้มตัวอย่าง DF_XXXX.CSV โดยค่า XXXX เป็นตัวย่อของแฟ้มข้อมูลในส่วนที่ 8 มาเติมเป็นแฟ้มข้อมูลในส่วนนี้ เมื่อดำเนินการเสร็จจึงไปทำงานในส่วนที่ 10 เป็นขั้นตอนสุดท้ายการจบโปรแกรม

6.3 กระบวนการปรับแต่งพารามิเตอร์โดยฟังก์ชันการทางฟัซซี่ลอจิก

ในหัวข้อนี้จะกล่าวหลักการทำงานของฟัซซี่โดยสังเขป อันเนื่องจากเทคนิคเชิงฟัซซี่ลอจิก และกลไกการปฏิบัติการเชิงฟัซซี่ต่างๆ มีรายละเอียดที่ได้มีการนำเสนอใน (สราวุฒ ,2538) ซึ่งบทความดังกล่าวได้มีการอธิบายถึง ฟัซซี่เซต ฟัซซี่ลอจิก ฟัซซี่อัลกอริทึม การอนุมานเชิงฟัซซี่ และโครงสร้างของระบบควบคุมแบบฟัซซี่โดยละเอียด

ดังนั้น Zadeh ได้เสนอทฤษฎีของฟัซซี่เซต ซึ่งได้ขยายความสมาชิกแต่ละตัวของเซตให้มีความระดับของสมาชิกที่มีค่าต่อเนื่อง แทนที่จะมีค่าเพียงความหมาย “0” หรือ “1” เมื่อกำหนดให้เซต (set) ของสิ่งที่กล่าวถึงทั้งหมดเป็นเอกภพสัมพัทธ์ (universe of discourse) U ในเอกภพสัมพัทธ์นี้มีสมาชิกจำนวนมาก แต่ในสมาชิกจำนวนนี้มีสมาชิกอยู่ในเซตหนึ่งที่ไม่รู้ว่าสมาชิกจริงหรือไม่จริง หรือเป็นสมาชิกบางส่วนเซตที่ยังคลุมเครือว่าเซตหนึ่งที่ไม่รู้ว่า ฟัซซี่เซต (fuzzy set) สมาชิกในเซตที่แบ่งแยกการเป็นสมาชิกไม่เท่ากัน ดังนั้นต้องมีการวัดระดับหรือจัดระดับเพื่อหาค่าความเป็นสมาชิกของแต่ละสมาชิกในเซต เรียกว่า ฟังก์ชันสมาชิก (membership function) ของสมาชิกในฟัซซี่เซต มีลักษณะการกำหนดความเป็นสมาชิกของฟังก์ชันสมาชิกหลายลักษณะเช่น ฟังก์ชันแบบ S (S – function) ฟังก์ชันแบบ π (π – function) รูปแบบสามเหลี่ยม (triangular form) รูปแบบคางหมู (trapezoid form) และรูปแบบเอกซ์โปเนนเชียล (exponential form)

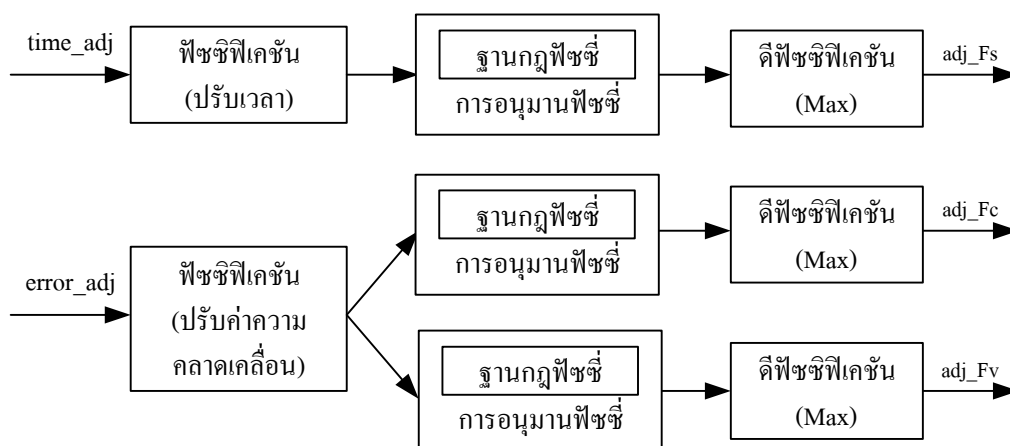
ส่วนการกระทำทางลอจิกของฟัซซี่เซต เรียกว่า ฟัซซี่ลอจิก (fuzzy logic) จะเสมือนเป็นการคำนวณแบบทางฟังก์ชันคณิตศาสตร์ เช่นการยูเนียน (fuzzy union) คือการหาค่าสูงสุดของสมาชิกในฟัซซี่เซตแต่ละตัวที่กระทำ การอินเตอร์เซกชัน (fuzzy intersection) คือการหาค่าต่ำสุดของสมาชิกในฟัซซี่เซตแต่ละตัวที่กระทำ และการคอมพลิเมนต์ (fuzzy complement) คือการนำค่า 1 ตัวและลบด้วยค่าความเป็นสมาชิกของตัวสมาชิกในฟัซซี่เซต เป็นต้น

ดังนั้นการนำปริมาณใดที่ต้องการนำมาประมวลผลโดยฟัซซี่ลอจิกนั้น ต้องมากระทำการฟัซซี่ไฟเออร์ (fuzzifier) ซึ่งจะเป็นตัวกระทำการเปลี่ยนถ่ายจุดคริสป์ (crisp) หรือปริมาณที่กำหนดเข้าสู่ฟัซซี่เซตที่ทำการแบ่งสมาชิกไว้ เพื่อมากระทำการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ทางฟัซซี่โดยใช้กฎที่เรียกว่า ฐานกฎฟัซซี่ (fuzzy rule base) เมื่อมีการพิจารณาและต้องมีการตีความกฎฟัซซี่ (fuzzy rule interpretation) เพื่อหาข้อสรุปของการอนุมานแบบฟัซซี่ (fuzzy inference) มีหลายวิธีเพื่อทำการสรุปความสำคัญของกฎฟัซซี่ที่กระทำโดย เช่น แบบหาค่าสูงสุด-ต่ำสุด (max-min) แบบตัดยอด (sup-min หรือ sub-product) และแบบหาค่าขนาดสัดส่วน (max-product) หลังจากนั้นเมื่อต้องการนำค่าไปใช้ต้องผ่านการกระทำการเปลี่ยนถ่ายจากฟัซซี่เซตในเอกภพสัมพัทธ์ไปเป็นค่าปริมาณหรือจุดคริสป์ที่ต้องการโดย การดีฟัซซี่ไฟเออร์ (defuzzifier) มีวิธีการหลายแบบเช่นการหาค่าสูงสุด (maximum defuzzifier) การหาค่าจากจุดศูนย์กลางเฉลี่ย (center

average defuzzifier) เป็นต้น เพื่อนำค่าที่ได้ไปนำเนื่องการค่าควบคุมหรือนำไปประมวลผลต่อไปในการตัดสินใจ

6.3.1 การออกแบบการปรับแต่งพารามิเตอร์แบบออนไลน์

การปรับแต่งพารามิเตอร์แบบออนไลน์มีลักษณะการทำงานดังรูปที่ 6.4 มีการรับค่า $time_adj$ และค่า $error_adj$ ผ่านขบวนการแปลงเป็นฟัซซี่เซต ที่ได้ทำการออกแบบไว้เพื่อทำการประมวลผลเพื่อทำการปรับแต่งค่า โดยคิดเป็นร้อยละของค่าในการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์แบบจำลองแรงเสียดทานของระบบที่ละด้านของความเร็ว มีกระบวนการตัดสินใจแบบฟัซซี่ลอจิกใช้ฐานกฎฟัซซี่ ผ่านกระบวนการอนุมานเชิงฟัซซี่ และผ่านการเปลี่ยนแปลงฟัซซี่เซตเป็นปริมาณจริงที่ใช้งาน เพื่อได้ค่าในการปรับแต่งพารามิเตอร์ของระบบทั้งสามค่า (adj_Fs , adj_Fc และ adj_Fv)



รูปที่ 6.4 กระบวนการปรับแต่งโดยฟัซซี่ลอจิก

การปรับแต่งพารามิเตอร์ ต้องมีการแบ่งฟัซซี่เซตต่างๆ ซึ่งได้แก่ การแบ่งฟัซซี่เซตขนาดของเวลาส่วนต่างของสัญญาณตำแหน่ง $time_adj$ การแบ่งฟัซซี่เซตค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณตำแหน่ง $error_adj$ และการแบ่งฟัซซี่เซตค่าการปรับแต่งพารามิเตอร์ F_s , F_c และ F_v ในการกำหนดแบ่งฟัซซี่เซตขนาดของเวลาส่วนต่างของสัญญาณตำแหน่ง พิจารณาจากค่าเวลาส่วนต่างจากการทดสอบ มีค่าอยู่ระหว่าง -6 ถึง 6 วินาที และมีการกำหนดสมาชิกฟัซซี่เซตขนาดของเวลาส่วนต่างแบ่งออกเป็น 24 เซตโดยมีพิสัยค่าเท่ากับ 1 วินาทีเท่าๆ กัน โดยมีฟังก์ชันความสัมพันธ์ของความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยมด้านเท่าดังรูปที่ 6.5 ซึ่งระดับความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซตมีระหว่าง 0 – 1 เช่นเดียวกับระดับของลอจิก มีสมาชิกของฟัซซี่เซตดังนี้

“Hkn” = “high k level negative” { k : 1...4} คือค่าเวลาส่วนต่างสูงทางลบ 4 ระดับ ระหว่าง น้อยกว่า (-5.25), -5.75 – -4.75 , -5.25 – -4.25 และ -4.75 – -3.75 วินาที

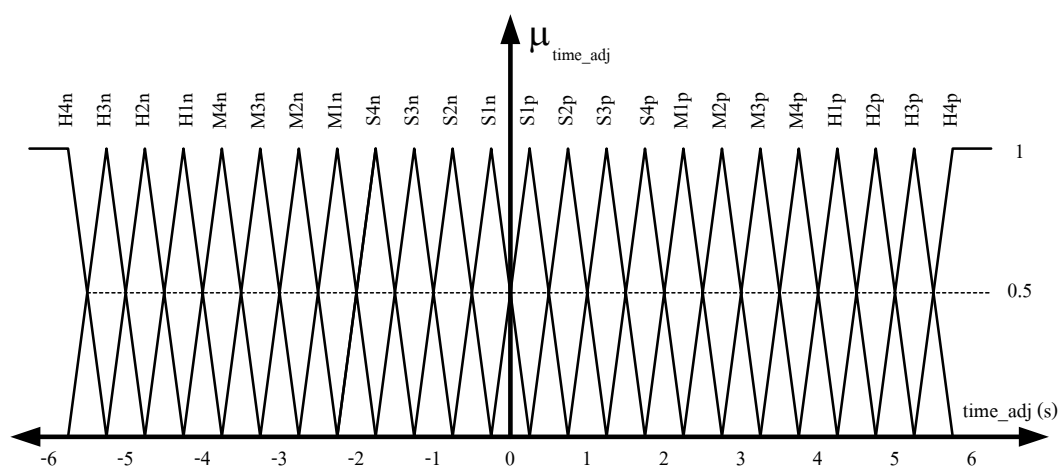
“Mkn” = “medium k level negative” { k : 1...4} คือค่าเวลาส่วนต่างปานกลางทางลบ 4 ระดับ ระหว่าง -4.25 – -3.25 , -3.75 – -2.75 , -3.25 – -2.25 และ -2.75 – -1.75 วินาที

“Skn” = “small k level negative” { k : 1...4} คือค่าเวลาส่วนต่างน้อยทางลบ 4 ระดับ ระหว่าง -2.25 – -1.25 , -1.75 – -0.75 , -1.25 – -0.25 และ -0.75 – 0.25 วินาที

“Skp” = “small k level positive” { k : 1...4} คือค่าเวลาส่วนต่างน้อยทางบวก 4 ระดับ ระหว่าง -0.25 – 0.75 , 0.25 – 1.25 , 0.75 – 1.75 และ 1.25 – 2.25 วินาที

“Mkp” = “medium k level positive” { k : 1...4} คือค่าเวลาส่วนต่างปานกลางทางบวก 4 ระดับ ระหว่าง 1.75 – 2.75 , 2.25 – 3.25 , 2.75 – 3.75 และ 3.25 – 4.25 วินาที

“Hkp” = “high k level positive” { k : 1...4} คือค่าเวลาส่วนต่างสูงทางบวก 4 ระดับ ระหว่าง 3.75 – 4.75 , 4.25 – 5.25 , 4.75 – 5.75 และมากกว่า 5.25 วินาที



รูปที่ 6.5 ลักษณะความเป็นสมาชิกฟัซซี่เซตของค่า time_adj

การกำหนดฟัซซี่เซตของค่าความคลาดเคลื่อนสัญญาณตำแหน่ง พิจารณาจากผลที่ได้ การจำลองสถานการณ์มวลไหลในภาคผนวก ข มีช่วงค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง -20 ถึง 20 มิลลิเมตร และมีการกำหนดแบ่งสมาชิกของฟัซซี่เซตของค่าความคลาดเคลื่อนสัญญาณตำแหน่ง แบ่งออกเป็น 22 ค่าแบบมีพิสัยค่าเท่ากับ 4 มิลลิเมตรเท่าๆ กัน โดยมีฟังก์ชันความสัมพันธ์ของความ

เป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า ดังรูปที่ 6.6 ซึ่งระดับความเป็นสมาชิกของฟuzzyเซตค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง 0 – 1 เช่นเดียวกับค่า $time_adj$ มีสมาชิกของฟuzzyเซตดังนี้

“Hkn” = “high k level negative” { $k : 1...4$ } คือค่าความคลาดเคลื่อนสูงทางลบ 4 ระดับ ระหว่าง น้อยกว่า (-19), -21 – -17, -19 – -15 และ -17 – -13 มิลลิเมตร

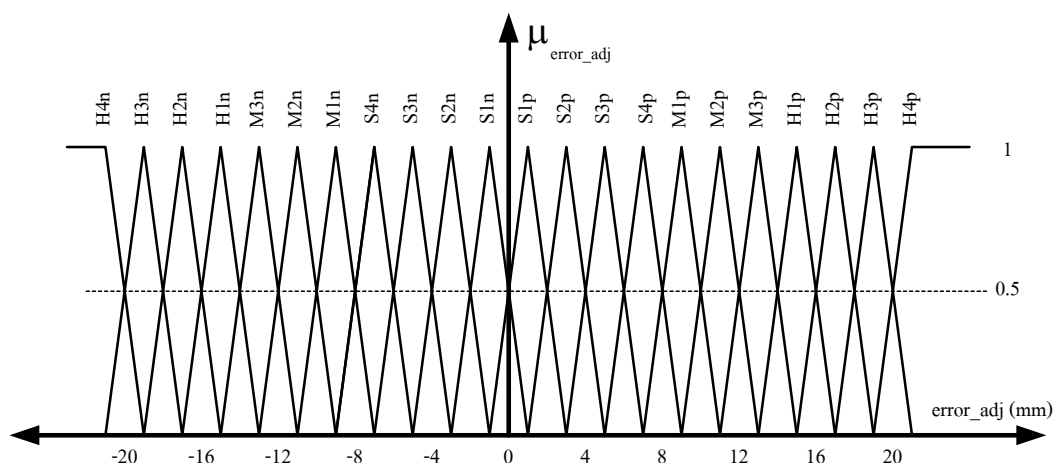
“Mkn” = “medium k level negative” { $k : 1...3$ } คือค่าความคลาดเคลื่อนปานกลางทางลบ 3 ระดับ ระหว่าง -15 – -11, -13 – -9 และ -11 – -7 มิลลิเมตร

“Skn” = “small k level negative” { $k : 1...4$ } คือค่าความคลาดเคลื่อนน้อยทางลบ 4 ระดับ ระหว่าง -9 – -5, -7 – -3, -5 – -1 และ -3 – 1 มิลลิเมตร

“Skp” = “small k level positive” { $k : 1...4$ } คือค่าความคลาดเคลื่อนน้อยทางบวก 4 ระดับ ระหว่าง -1 – 3, 1 – 5, 3 – 7 และ 5 – 9 มิลลิเมตร

“Mkp” = “medium k level positive” { $k : 1...3$ } คือค่าความคลาดเคลื่อนปานกลางทางบวก 3 ระดับ ระหว่าง 7 – 11, 9 – 13 และ 11 – 15 มิลลิเมตร

“Hkp” = “high k level positive” { $k : 1...4$ } คือค่าความคลาดเคลื่อนสูงทางบวก 4 ระดับ ระหว่าง 13 – 17, 15 – 19, 17 – 21 และมากกว่า 19 มิลลิเมตร



รูปที่ 6.6 ลักษณะความเป็นสมาชิกฟuzzyเซตของค่า $error_adj$

และกำหนดแบ่งฟuzzyเซตค่าการปรับแต่งพารามิเตอร์ F_s (adj_F_s) โดยจากการพิจารณาค่าในการปรับแต่งจะมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ -5 ถึง 5 และมีการกำหนดแบ่งสมาชิกของฟuzzyเซตค่าการปรับแต่งพารามิเตอร์ แบ่งออกเป็น 21 ฟuzzyเซตแบบมีพิสัยค่าเท่ากับร้อยละ 1 เท่าๆ กัน โดยมีฟังก์ชันความสัมพันธ์ของความเป็นสมาชิกเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 6.7 ซึ่งระดับความเป็นสมาชิก

ของฟuzzyเซตค่าการปรับแต่งพารามิเตอร์อยู่ระหว่าง 0 – 1 เช่นเดียวกัน ส่วนการกำหนดแบ่งฟuzzyเซตค่าการปรับแต่งพารามิเตอร์ F_c (adj_Fc) และ F_v (adj_Fv) มีลักษณะเช่นเดียวกับการกำหนดแบ่งฟuzzyเซต adj_Fs

“Hkn” = “high k level negative” { k : 1...3} คือค่าการปรับแต่งสูงทางลบ 3 ระดับ ระหว่างร้อยละน้อยกว่า (-4.5), -5 – -4 และ -4.5 – -3.5

“Mkn” = “medium k level negative” { k : 1...4} คือค่าการปรับแต่งปานกลางทางลบ 4 ระดับ ระหว่างร้อยละ -4 – -3, -3.5 – -2.5, -3 – -2 และ -2.5 – -1.5

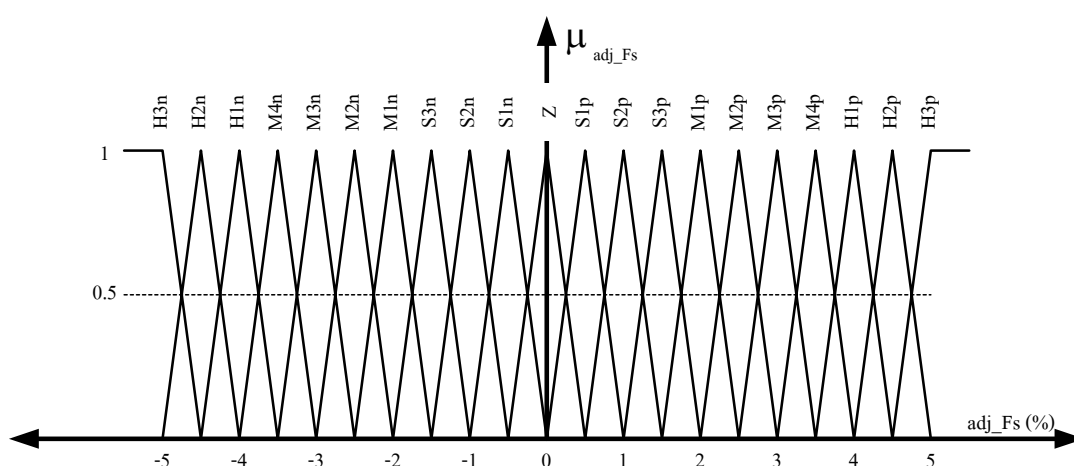
“Skn” = “small k level negative” { k : 1...3} คือค่าการปรับแตงน้อยทางลบ 3 ระดับ ระหว่างร้อยละ -2 – -1, -1.5 – -0.5 และ -1 – 0

“Z” = “zero” คือค่าการปรับแต่งเป็นศูนย์ ระหว่างร้อยละ (-0.5) - 0.5

“Skp” = “small k level positive” { k : 1...3} คือค่าการปรับแตงน้อยทางบวก 3 ระดับ ระหว่างร้อยละ 0 – 1, 0.5 – 1.5 และ 1 – 2

“Mkp” = “medium k level positive” { k : 1...4} คือค่าการปรับแต่งปานกลางทางบวก 4 ระดับ ระหว่างร้อยละ 1.5 – 2.5, 2 – 3, 2.5 – 3.5 และ 3 – 4

“Hkp” = “high k level positive” { k : 1...3} คือค่าการปรับแต่งสูงทางบวก 3 ระดับ ระหว่างร้อยละ 3.5 – 4.5, 4 – 5 และมากกว่า 4.5



รูปที่ 6.7 ลักษณะความเป็นสมาชิกฟuzzyเซตค่าการปรับแต่งพารามิเตอร์ F_s

การออกแบบกฎความสัมพันธ์ (fuzzy rule) ระหว่างฟuzzyเซตอินพุต (ค่าเวลาส่วนต่าง $time_adj$ และค่าความคลาดเคลื่อนสัญญาณตำแหน่ง $error_adj$) และเอาต์พุต (ค่าการ

ปรับแต่งพารามิเตอร์แบบจำลองแรงเสียดทาน adj_Fs , adj_Fc และ adj_Fv) ซึ่งในการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์แบบจำลองแรงเสียดทานของระบบมีหลักการปรับแต่งรายละเอียดดังนี้คือ

การปรับแต่งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_s จะมีการปรับแต่งค่าเมื่อค่าเวลาส่วนต่างระหว่างเวลาเริ่มเคลื่อนที่ของค่า x_d กับค่า $\hat{x}_d$ ถ้าค่า $time_adj$ มีค่าเวลาเป็นบวก คือการจำลองสถานการณ์เคลื่อนที่ช้าเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ณ จุดนี้มีค่าสูงกว่าค่าความเป็นจริง ดังนั้นต้องมีการปรับค่าให้มีขนาดลดลง ส่วนในทางกลับกันค่า $time_adj$ มีค่าเวลาเป็นลบ หมายถึงผลการจำลองสถานการณ์เคลื่อนที่เร็ว เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ณ จุดนี้มีค่าน้อยกว่าค่าความเป็นจริง ดังนั้นต้องมีการปรับค่าให้มีขนาดเพิ่มขึ้น ดังนั้นสามารถเขียนกฎความสัมพันธ์ระหว่างฟัซซี่เซต $time_adj$ กับฟัซซี่เซต adj_Fs ได้ 24 กฎ ดังนี้

กฎที่ 1	IF	$time_adj = H4n$	THEN $adj_Fs = H3p$
กฎที่ 2	IF	$time_adj = H3n$	THEN $adj_Fs = H2p$
กฎที่ 3	IF	$time_adj = H2n$	THEN $adj_Fs = H1p$
กฎที่ 4	IF	$time_adj = H1n$	THEN $adj_Fs = M4p$
กฎที่ 5	IF	$time_adj = M4n$	THEN $adj_Fs = M3p$
กฎที่ 6	IF	$time_adj = M3n$	THEN $adj_Fs = M2p$
กฎที่ 7	IF	$time_adj = M2n$	THEN $adj_Fs = M1p$
กฎที่ 8	IF	$time_adj = M1n$	THEN $adj_Fs = S3p$
กฎที่ 9	IF	$time_adj = S4n$	THEN $adj_Fs = S2p$
กฎที่ 10	IF	$time_adj = S3n$	THEN $adj_Fs = S1p$
กฎที่ 11	IF	$time_adj = S2n$	THEN $adj_Fs = Z$
กฎที่ 12	IF	$time_adj = S1n$	THEN $adj_Fs = Z$
กฎที่ 13	IF	$time_adj = S1p$	THEN $adj_Fs = Z$
กฎที่ 14	IF	$time_adj = S2p$	THEN $adj_Fs = Z$
กฎที่ 15	IF	$time_adj = S3p$	THEN $adj_Fs = S1n$
กฎที่ 16	IF	$time_adj = S4p$	THEN $adj_Fs = S2n$
กฎที่ 17	IF	$time_adj = M1p$	THEN $adj_Fs = S3n$
กฎที่ 18	IF	$time_adj = M2p$	THEN $adj_Fs = M1n$
กฎที่ 19	IF	$time_adj = M3p$	THEN $adj_Fs = M2n$
กฎที่ 20	IF	$time_adj = M4p$	THEN $adj_Fs = M3n$
กฎที่ 21	IF	$time_adj = H1p$	THEN $adj_Fs = M4n$

กฎที่	22	IF	time_adj = H2p	THEN adj_Fs = H1n
กฎที่	23	IF	time_adj = H3p	THEN adj_Fs = H2n
กฎที่	24	IF	time_adj = H4p	THEN adj_Fs = H3n

การปรับแต่งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_C จะมีการปรับแต่งค่าเมื่อค่าความคลาดเคลื่อนตำแหน่งทั้งสองครั้งที่ มีการปรับแต่งได้ดังนี้คือถ้าค่า error_adj มีค่าเวลาเป็นบวก คือการจำลองสถานการณ์เคลื่อนที่ได้ระยะทางน้อยกว่าที่เป็นจริง เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_C ณ จุดนี้มีค่าสูงกว่าค่าความเป็นจริง ดังนั้นต้องมีการปรับค่าให้มีขนาดลดลง ส่วนในทางกลับกันค่า error_adj มีค่าเวลาเป็นลบหมายถึงผลการจำลองสถานการณ์เคลื่อนที่ได้ระยะมากกว่าเนื่องมาจากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_C ณ จุดนี้มีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ดังนั้นต้องมีการปรับค่าให้มีขนาดเพิ่มขึ้น ดังนั้นสามารถเขียนกฎความสัมพันธ์ระหว่างฟิซซีเซต error_adj กับฟิซซีเซต adj_Fc ได้ 22 กฎ ดังนี้

กฎที่	1	IF	error_adj = H4n	THEN adj_Fc = H3p
กฎที่	2	IF	error_adj = H3n	THEN adj_Fc = H2p
กฎที่	3	IF	error_adj = H2n	THEN adj_Fc = H1p
กฎที่	4	IF	error_adj = H1n	THEN adj_Fc = M4p
กฎที่	5	IF	error_adj = M3n	THEN adj_Fc = M3p
กฎที่	6	IF	error_adj = M2n	THEN adj_Fc = M2p
กฎที่	7	IF	error_adj = M1n	THEN adj_Fc = M1p
กฎที่	8	IF	error_adj = S4n	THEN adj_Fc = S3p
กฎที่	9	IF	error_adj = S3n	THEN adj_Fc = S2p
กฎที่	10	IF	error_adj = S2n	THEN adj_Fc = S1p
กฎที่	11	IF	error_adj = S1n	THEN adj_Fc = Z
กฎที่	12	IF	error_adj = S1p	THEN adj_Fc = Z
กฎที่	13	IF	error_adj = S2p	THEN adj_Fc = S1n
กฎที่	14	IF	error_adj = S3p	THEN adj_Fc = S2n
กฎที่	15	IF	error_adj = S4p	THEN adj_Fc = S3n
กฎที่	16	IF	error_adj = M1p	THEN adj_Fc = M1n
กฎที่	17	IF	error_adj = M2p	THEN adj_Fc = M2n
กฎที่	18	IF	error_adj = M3p	THEN adj_Fc = M3n

กฎที่ 19	IF	error_adj = H1p	THEN adj_Fc = M4n
กฎที่ 20	IF	error_adj = H2p	THEN adj_Fc = H1n
กฎที่ 21	IF	error_adj = H3p	THEN adj_Fc = H2n
กฎที่ 22	IF	error_adj = H4p	THEN adj_Fc = H3n

ส่วนการออกแบบกฎการปรับแต่งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_V ดำเนินการเช่นเดียวกับกฎการปรับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_C มีการปรับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_V เมื่อแท่นมีการเคลื่อนนานกว่า 1000 จุดหรือประมาณ 10 วินาทีขึ้นไปจะมีการปรับค่าด้วยกฎชุดนี้หนึ่งครั้ง เนื่องจากในสภาวะการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่องผลของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_V มีผลต่อการเคลื่อนที่มากกว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_C ดังนั้นการปรับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_V เมื่อมีการควบคุมความเร็วในย่านอัตราโตไฮโดรไดนามิกส์ จึงมีการปรับถ่วงเคลื่อนที่ได้ระยะต่ำกว่าให้ปรับลดขนาดลง ส่วนถ้ามีการเคลื่อนที่ได้ระยะเกินขึ้นไปให้ทำการปรับขนาดเพิ่มขึ้นเพื่อให้มีขนาดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_V เพิ่มขึ้นนั่นเอง

การอนุมานค่าเชิงฟัซซีในการหาค่าเอาต์พุตของการปรับแต่งค่าจากการกฎที่ทำการเขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟัซซีเซตอินพุตกับเอาต์พุต โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการเลือกใช้วิธีการอนุมานค่าสูงสุดแบบซิเกลตัน ในการออกแบบเซตต่างๆ มีจุดตัดกันระหว่างค่าความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซตอินพุตที่ค่าเท่ากับ 0.5 ดังนั้นเมื่อมีการรับค่า time_adj และค่า error_adj เลือกค่าเซตในการปรับแต่งจากค่าความเป็นสมาชิกสูงสุดเพียงค่าเดียว ดังนั้นในดำเนินการปรับสามารถเลือกการปรับเพียงกฎเดียว มีขั้นตอนการปรับแต่งดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มตรวจสอบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าว่ามีการควบคุมการเคลื่อนที่หรือไม่ ถ้าไม่มีการควบคุมการเคลื่อนที่จะดำเนินการตรวจสอบสัญญาณแรงดันต่อไป ส่วนถ้ามีการเคลื่อนที่จะดำเนินการปรับแต่งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ทำต่อที่ขั้นตอนที่ 2

ขั้นตอนที่ 2 ตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแท่น กับตำแหน่งจากการจำลองสถานการณ์ ถ้ามีการเคลื่อนที่ให้เริ่มจับเวลาส่วนต่าง time_adj เมื่อทั้งสองเคลื่อนที่แล้วจะดำเนินการคำนวณค่าเวลาส่วนต่าง และดำเนินการปรับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_S ตามด้านของความเร็วที่เกิดขึ้น แล้วดำเนินการตรวจสอบขั้นที่ 3 ต่อไป

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบการเคลื่อนที่สถานะหยุดนิ่งทั้งสองตำแหน่งหรือไม่ ถ้ามีการเคลื่อนที่อยู่ให้ไปขั้นตอนที่ 4 ต่อไป ส่วนถ้าหยุดนิ่งให้คำนวณหาค่า error_adj เมื่อตำแหน่งทั้งสองหยุดนิ่ง เพื่อปรับแต่งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_C ในช่วงนี้ ดังนั้นถ้ามีการเริ่มเคลื่อนที่อีกให้กลับไปคำนวณเวลาส่วนต่างในขั้นตอนที่ 2 ใหม่ แต่ถ้าค่าแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่าที่กำหนดให้กลับไปขั้นตอนที่ 1

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบการเคลื่อนที่ ถ้ามีการเคลื่อนที่นานกว่า 10 วินาที ให้คำนวณค่า $error_adj$ เสร็จแล้วเพื่อทำการปรับแต่งพารามิเตอร์ F_V และดำเนินการเริ่มต้นตรวจสอบใหม่ เพื่อให้กลับไปทำงานขั้นตอนที่ 1 ต่อไป

6.4 การทดสอบและผลการทดสอบกระบวนการปรับแต่งพารามิเตอร์แบบออนไลน์

6.4.1 การคำนวณค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์แบบจำลองแรงเสียดทาน

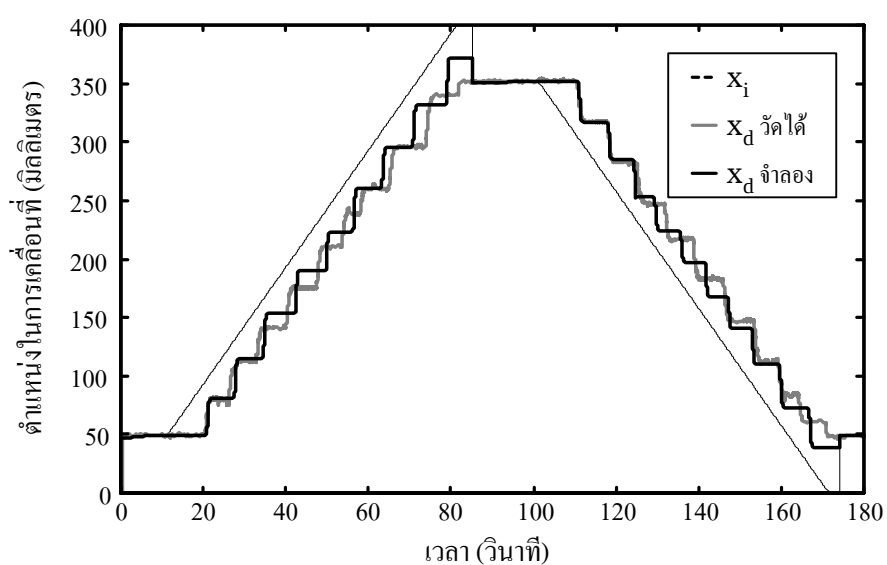
จากการประมาณค่าแบบออฟไลน์จากบทที่ 4 และบทที่ 5 มาทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_S ทั้งทางบวกและลบ กับตำแหน่งในการเคลื่อนที่ โดยกำหนดให้มีจำนวนข้อมูลตลอดย่านด้านละ 40 ค่า แสดงดังรูปที่ 5.6 เป็นผลเฉลี่ยที่ได้จากการค้นหาค่าทั้งสองวิธี โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{C+} เท่ากับ 47.773 นิวตัน F_{C-} เท่ากับ -48.482 นิวตัน , F_{V+} เท่ากับ 0.801 นิวตันวินาทีต่อมิลลิเมตร , F_{V-} เท่ากับ 0.799 นิวตันวินาทีต่อมิลลิเมตร และ vss เท่ากับ 3.198 มิลลิเมตรต่อวินาที

6.4.2 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในกระบวนการปรับแต่งพารามิเตอร์

การทดสอบกระทำเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 4.4.1 โดยทำการรันโปรแกรมควบคุมตำแหน่งป้อนกลับที่คอมพิวเตอร์ในห้องปฏิบัติการที่ 2 โดยควบคุมที่ความเร็วในการเคลื่อนที่เท่ากับ 5 มิลลิเมตรต่อวินาที และทำการรันโปรแกรมกระบวนการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ที่เครื่องคอมพิวเตอร์ตัวที่ 1 โดยจะดำเนินการตามขั้นตอนในหัวข้อที่ 6.2 ป้อนชื่อแฟ้มข้อมูลทำการจัดเก็บค่าตั้งต้นไว้เป็นตัวเลขไม่เกิน 5 ตัว เช่น 0500 ชื่อแฟ้มข้อมูลคือ D0500.CSV ที่ใดเรียกทอเรีย้อย C:\TC\BIN\FUZ2 และป้อนค่าความเร็วที่ต้องการควบคุมให้เท่ากับค่าที่ป้อนในโปรแกรมควบคุมตำแหน่งแบบป้อนกลับเช่น 5 มิลลิเมตรต่อวินาที มีการรอกดคีย์อีก 1 ครั้งเพื่อเริ่มทำงานจะมีเสียงดังหนึ่งครั้งก่อนเริ่มเพื่อดำเนินการนับเวลาเพื่อหาค่าเวลาในการทำงานแต่ละรอบ โดยในการทดสอบครั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้แบบไม่ปรับแต่งค่า จำนวน 10 รอบและบันทึกผลการเคลื่อนที่ทั้งจากค่าที่วัดได้ จำลองสถานการณ์ได้ ค่าตำแหน่งอ้างอิงและค่าเวลาในการทำงานแต่ละรอบ จัดเก็บลงแฟ้มข้อมูลชื่อแฟ้ม DF_XXXX.CSV เช่นในที่นี้คือ DF_0500.CSV โดยทำการควบคุมให้แท่นเริ่มเคลื่อนที่จาก 50 – 350 มิลลิเมตรก่อนและให้เคลื่อนกลับจาก 350 – 50 มิลลิเมตรเพื่อให้ได้มีการปรับค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองด้านความเร็ว เมื่อเคลื่อนที่ครบกด ENTER เพื่อจบการทำงานในรอบนี้ โดยที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที จะใช้เวลาในการทดสอบต่อครั้งประมาณ 170 วินาทีหรือ 17,000 กว่าข้อมูลที่เก็บได้ ก่อนจบโปรแกรมต้องตั้งชื่อแฟ้มข้อมูลใหม่ต่อไปเลื่อน เพื่อจัดเก็บค่าที่ได้ทำในรอบต่อไป จากการทดสอบได้ผลดังตารางที่ 6.1 เป็นผลการทดสอบค่าโดยไม่ปรับ

ตาราง 6.1 ผลทดสอบแบบจำลองแรงเสียดทานก่อนปรับแต่งพารามิเตอร์ของระบบแบบออนไลน์ที่
ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที

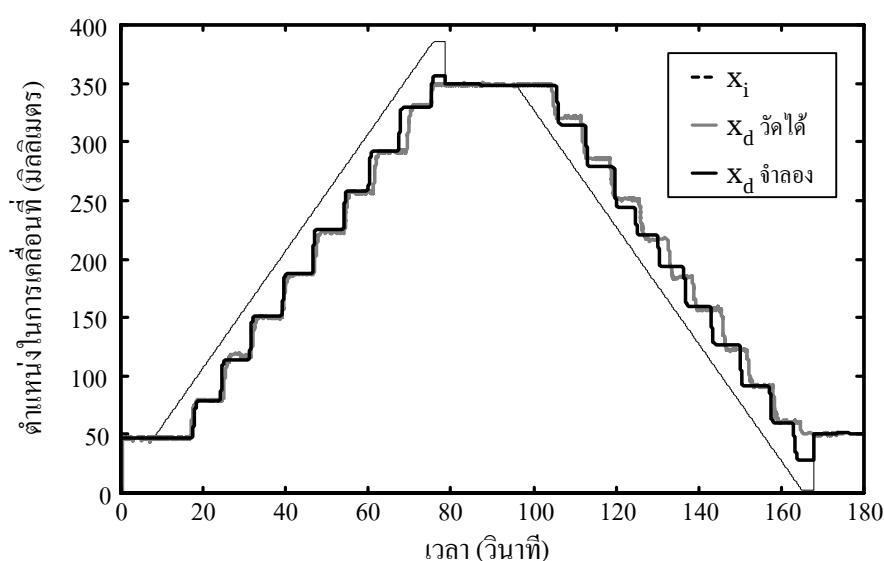
รอบใน การ ทดสอบ	ทางบวก				ทางลบ			
	Error (mm/จุด)	จำนวน (จุด)	F_{C+} (N)	F_{V+} (Ns/mm)	Error (mm/จุด)	จำนวน (จุด)	F_{C-} (N)	F_{V-} (Ns/mm)
1	12.086	667	47.75	0.801	10.223	681	-48.23	-0.799
2	12.402	669	47.75	0.801	4.694	664	-48.23	-0.799
3	10.815	651	47.75	0.801	7.184	680	-48.23	-0.799
4	6.946	661	47.75	0.801	8.436	659	-48.23	-0.799
5	8.817	653	47.75	0.801	9.014	658	-48.23	-0.799
6	10.228	727	47.75	0.801	7.955	717	-48.23	-0.799
7	11.715	691	47.75	0.801	9.895	679	-48.23	-0.799
8	8.838	672	47.75	0.801	10.133	669	-48.23	-0.799
9	8.041	683	47.75	0.801	6.080	673	-48.23	-0.799
10	6.397	689	47.75	0.801	10.010	703	-48.23	-0.799
11	4.836	693	47.75	0.801	8.842	708	-48.23	-0.799



รูปที่ 6.8 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยวิธีการประมาณค่าแบบออนไลน์รอบที่ 1

จากการทดสอบ 10 รอบได้ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ทางบวกมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 9.193 มิลลิเมตรและทางลบมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 8.406 มิลลิเมตร ได้ผลการเคลื่อนที่แสดงดังรูปที่ 6.8 เป็นผลการทดสอบรอบที่ 1 มีค่าความคลาดเคลื่อนสูง และรูปที่ 6.9 เป็นผลการทดสอบการเคลื่อนที่รอบที่ 11 มีค่าความคลาดเคลื่อนที่ดีที่สุด

รูปที่ 6.8 เห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ช่วงแรกใกล้เคียงกัน แต่ที่ตำแหน่ง 120 มิลลิเมตรมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{S+} สูงกว่าค่าจริงทำให้มีการเคลื่อนที่ช้าและได้ระยะทางมากกว่าที่วัดได้ทำให้ผลด้านท้ายมีการจำลองสถานการณ์ผิดไปแต่ในส่วนท้ายมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 6.9 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยวิธีการประมาณค่าแบบออนไลน์รอบที่ 11

จากรูปที่ 6.9 เป็นการเคลื่อนที่ที่กลับหรือเคลื่อนที่ลดลง มีผลช่วงแรกได้ใกล้เคียงกัน แต่ตรงกลางมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{S-} น้อยกว่าค่าจริงจึงเคลื่อนที่ก่อนในช่วงกลาง ในการเคลื่อนที่ช่วงต่อไปมีผลการเคลื่อนที่สอดคล้องกันตลอดการเคลื่อนที่ที่เหลือ ดังนั้นจากผลที่ได้โดยรวมมีการเคลื่อนที่ที่ยอมรับได้ และมีผลการเคลื่อนที่สอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของแท่น

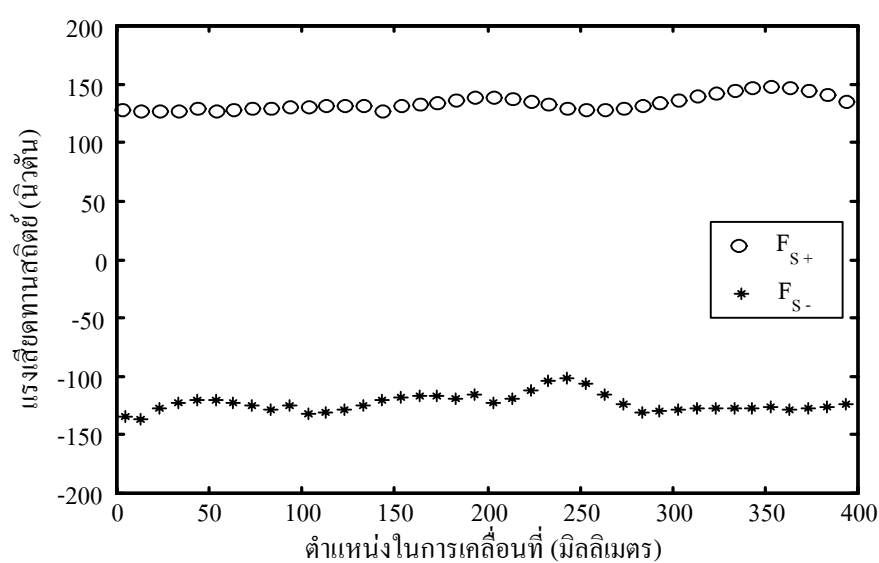
6.4.3 การทดสอบกระบวนการปรับแต่งพารามิเตอร์แบบออนไลน์

การทดสอบการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองแรงเสียดทาน แบบปรับค่าสัมประสิทธิ์แบบเฉลี่ย โดยมีขั้นตอนการทดสอบเช่นเดียวกับในหัวข้อ 6.4.2 และทำการทำสอบจำนวน 21 รอบแสดงดังตารางที่ 6.2 เพียง 10 รอบส่วนรายละเอียดให้ดูในภาคผนวก ค ตารางที่ ค.2 ได้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยทางบวกเท่ากับ 8.937 มิลลิเมตร และทางลบ 7.790 มิลลิเมตร ได้

แสดงผลการปรับแต่งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_s รอบที่ 1 ดังรูปที่ 6.10 และผลการเคลื่อนดังรูปที่ 6.11

ตาราง 6.2 ผลทดสอบการปรับแต่งพารามิเตอร์ของระบบแบบออนไลน์ที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที

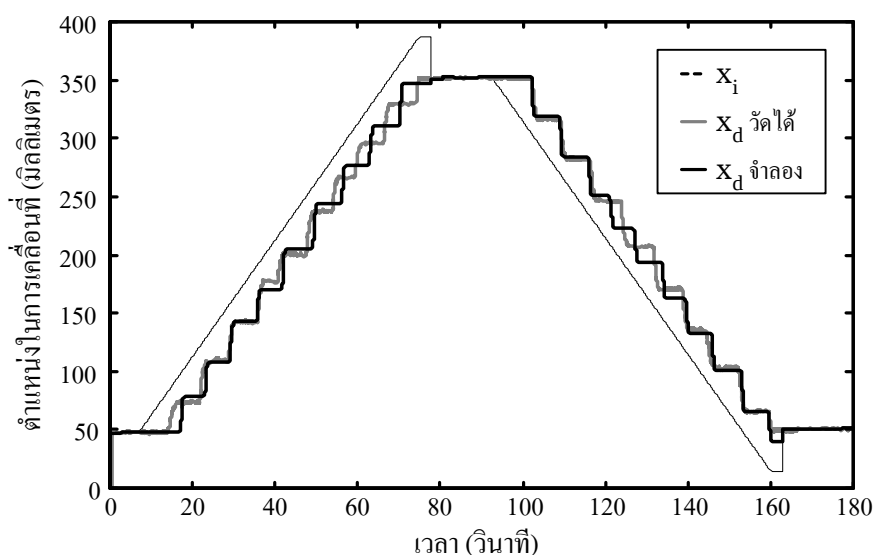
รอบในการทดสอบ	ทางบวก				ทางลบ			
	Error (mm/จุด)	จำนวน (จุด)	F_{C+} (N)	F_{V+} (Ns/mm)	Error (mm/จุด)	จำนวน (จุด)	F_{C+} (N)	F_{V+} (Ns/mm)
1	5.479	668	48.125	0.801	6.435	683	-48.471	-0.799
2	6.578	701	48.637	0.801	6.401	688	-48.824	-0.799
3	7.715	700	50.150	0.801	9.393	667	-49.637	-0.799
4	9.990	664	51.264	0.801	10.491	705	-50.035	-0.799
5	7.778	703	50.862	0.801	6.454	700	-50.160	-0.799
6	8.702	692	52.640	0.801	5.805	693	-50.438	-0.799
7	9.647	670	53.572	0.801	8.933	660	-51.587	-0.799
8	8.905	713	53.933	0.801	9.491	694	-52.103	-0.799
9	8.137	696	54.540	0.801	7.153	690	-53.041	-0.799
10	7.820	698	55.324	0.801	10.032	688	-53.689	-0.799



รูปที่ 6.10 ผลการปรับแต่งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_s รอบที่ 1

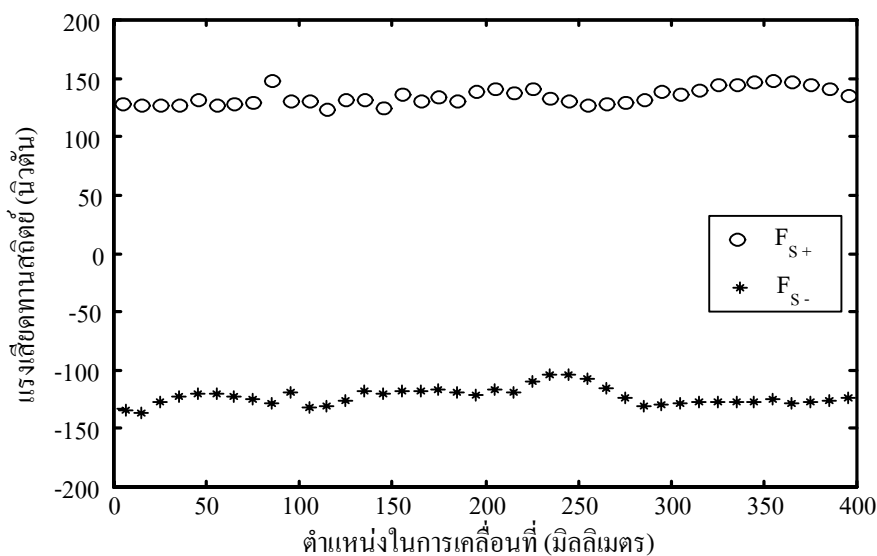
จากตารางที่ 6.2 การปรับแต่งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{C+} มีค่าที่ได้จากการปรับแต่งเพิ่มขึ้นจากรอบแรกไปเริ่มหยุดหรือคงตัวที่ค่าเท่ากับ 62.1 นิวตันและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{C-} ปรับลดลงมีค่าเริ่มคงตัวเท่ากับ 58.2 นิวตันส่วนค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_S ให้พิจารณาจากรูปที่ 6.10 เป็นการปรับรอบที่ 1 รูปที่ 6.12 เป็นการปรับค่าในรอบที่ 5 รูปที่ 6.14 เป็นการปรับค่าในรอบที่ 11 และรูปที่ 6.16 เป็นการปรับค่าในรอบที่ 20

จากรูปที่ 6.10 มีการปรับ 2 จุดที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{S-} ลดลงที่ 95 และ F_{S+} ที่ตำแหน่ง 45 มิลลิเมตร ผลการจำลองสถานการณ์มีผลทางบวกสอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของแท่นในการทดสอบและทางลบมีค่าผิดเพี้ยนในช่วงแรกแต่ในช่วงท้ายมีการเคลื่อนที่ใกล้เคียงกันซึ่งให้ผลเป็นที่ยอมรับได้ในการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์

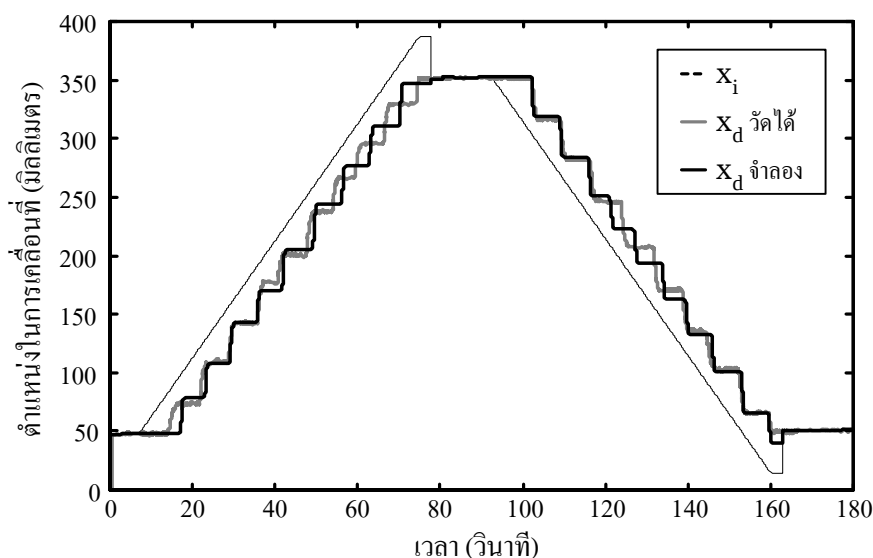


รูปที่ 6.11 ผลการเคลื่อนที่จากการจำลองสถานการณ์แบบออนไลน์รอบที่ 1

จากรูปที่ 6.12 มีการปรับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{S+} เพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง 85 เพิ่มขึ้นประมาณ 20 มิลลิเมตร ส่วนในตำแหน่งอื่นมีค่าใกล้เคียงเดิมหรือไม่มีการปรับค่า ซึ่งจากการผลการทดสอบการจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่ดังรูปที่ 6.13 การเคลื่อนที่ทางบวกช่วงแรกมีผลสอดคล้องแต่ช่วง 240 – 350 มิลลิเมตรมีการเคลื่อนที่ช้ากว่าที่วัดได้ควรมีการปรับค่าในช่วงนี้ลดลง ส่วนผลทางลบได้ผลการเคลื่อนที่ที่ดีขึ้น มีเพียงช่วง 250 – 150 มิลลิเมตรที่มีความผิดเพี้ยนบ้างไม่มาก ผลที่ได้เป็นที่ยอมรับในการปรับแต่งในรอบที่ 5 ผลโดยรวมค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_S มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ซึ่งค่าที่คลาดเคลื่อนมาจากการเคลื่อนที่แต่ครั้งการเคลื่อนที่ไม่เหมือนกัน



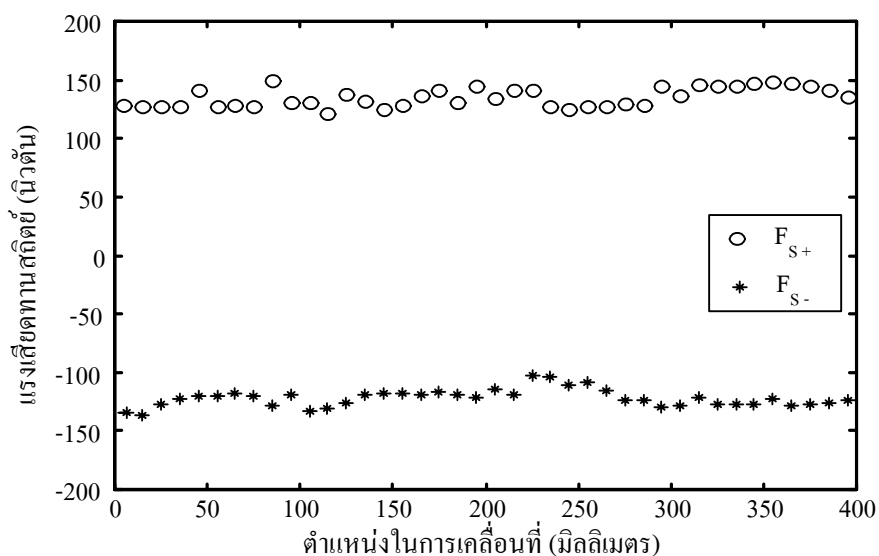
รูปที่ 6.12 ผลการปรับแต่งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_S รอบที่ 5



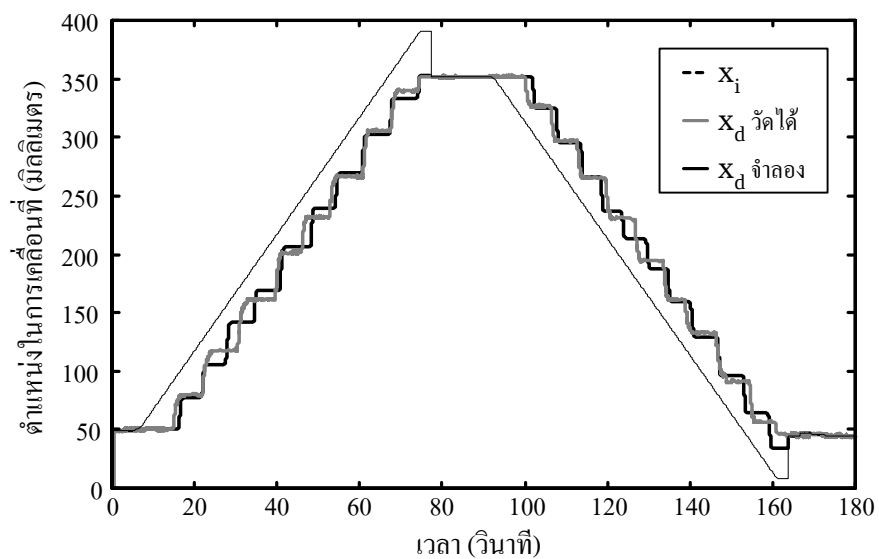
รูปที่ 6.13 ผลการเคลื่อนที่จากการจำลองสถานการณ์แบบออนไลน์รอบที่ 5

จากรูปที่ 6.14 การปรับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_S ในตำแหน่ง 225 มิลลิเมตรมีขนาดลดลงประมาณ 10 นิวตัน ส่วนที่ที่มีการเปลี่ยนไม่มาก ส่วนผลการจำลองสถานการณ์ในรอบนี้ ดังรูปที่ 6.15 มีผลต่างไปจากเดิมทางบวกช่วงแรกมีการเคลื่อนที่ช้ากว่าส่วนในช่วงท้ายมีการเคลื่อนที่สอดคล้องกัน ส่วนทางด้านลบในช่วงแรกมีการเคลื่อนที่ไปในแนวทางเดียวกันมาเพียงบ้างในช่วงทางมีการเคลื่อนที่ก่อนแทนเสมือนมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_S .

น้อยกว่าค่าความเป็นจริงในการเคลื่อนที่ ดังนั้นจากการปรับค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ในรอบนี้ ยังคงให้ผลที่ดีในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงบ้าง และค่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_S เปลี่ยนแปลงไม่มาก

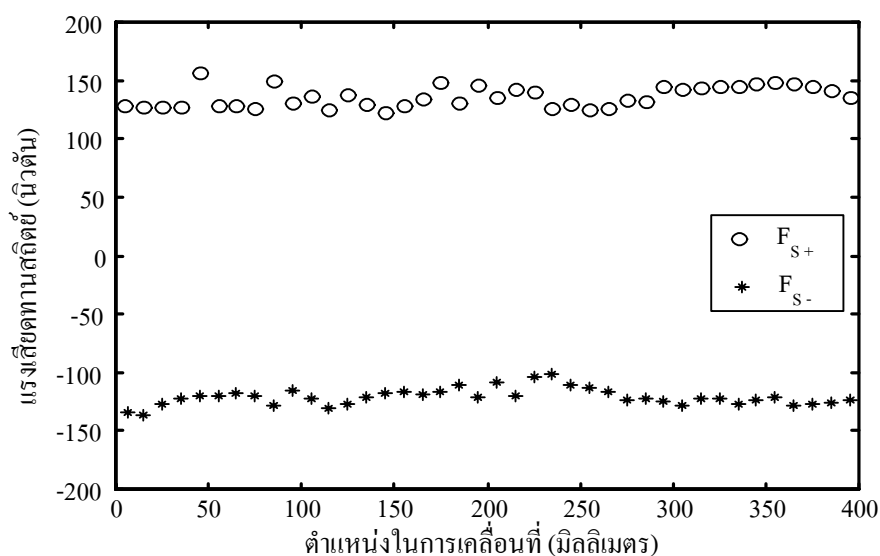


รูปที่ 6.14 ผลการปรับแต่งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_S รอบที่ 11

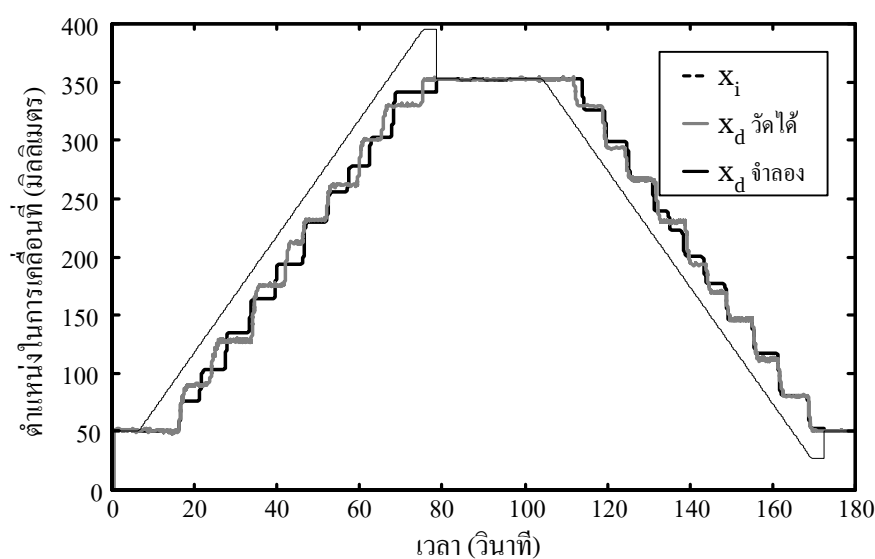


รูปที่ 6.15 ผลการเคลื่อนที่จากการจำลองสถานการณ์แบบออนไลน์รอบที่ 11

จากรูปที่ 6.16 ผลการปรับแต่งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_s ที่ได้มีผลต่างจากรอบที่ 11 ในช่วงสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{s+} ตำแหน่งที่ 45 มิลลิเมตรมีค่าเพิ่มขึ้น 20 นิวตัน ตำแหน่ง 135 มิลลิเมตร มีค่าเพิ่มขึ้น 5 นิวตัน ตำแหน่ง 245 มิลลิเมตรมีค่าเพิ่มขึ้น 5 นิวตัน และตำแหน่ง 305 มิลลิเมตรมีค่าเพิ่มขึ้น 5 มิลลิเมตร ส่วนค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{s-} ตำแหน่ง 335 มิลลิเมตร มีค่าลดลง 4 นิวตัน ตำแหน่ง 185 มิลลิเมตร มีค่าลดลง 6 นิวตันและตำแหน่ง 105 มิลลิเมตร มีค่าลดลง 10 นิวตัน ส่วนค่าตัวอื่นมีค่าเปลี่ยนแปลงมีค่าน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร

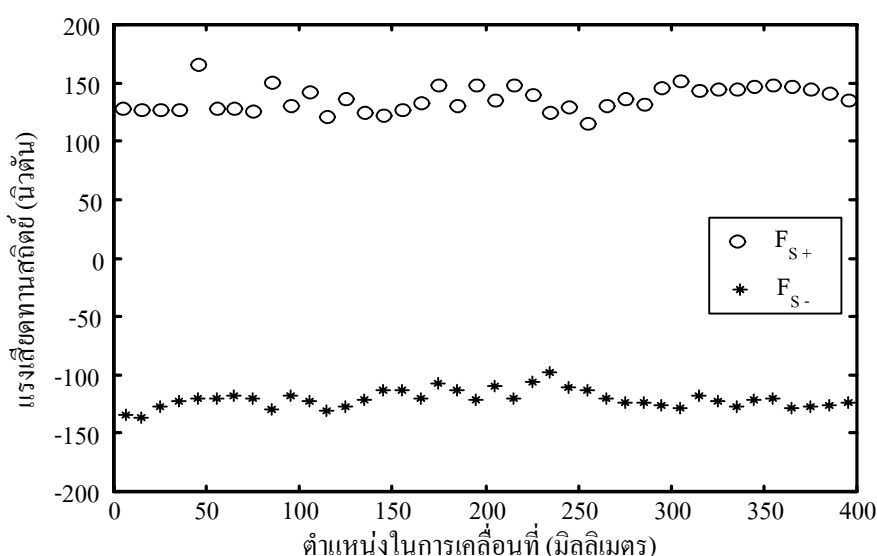


รูปที่ 6.16 ผลการปรับแต่งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_s รอบที่ 17



รูปที่ 6.17 ผลการเคลื่อนที่จากการจำลองสถานการณ์แบบออนไลน์รอบที่ 17

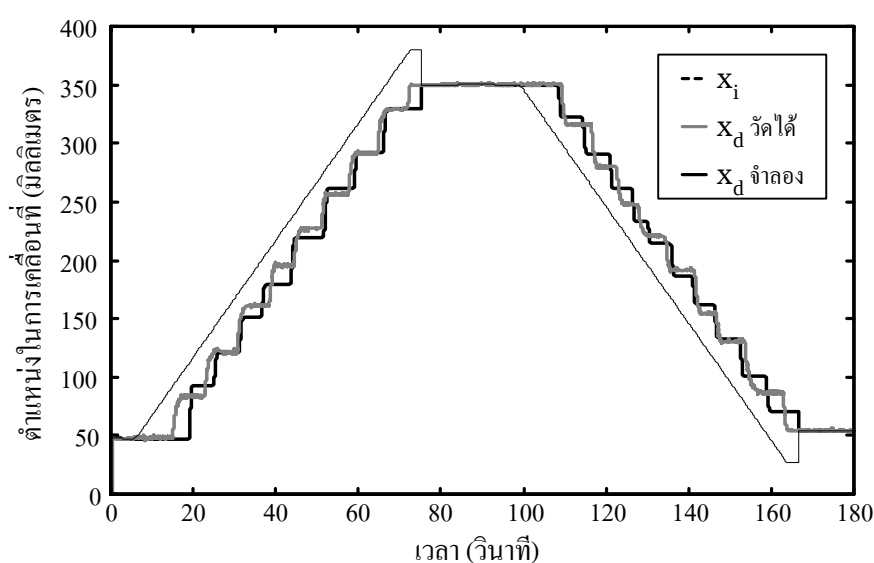
ผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์จากรูปที่ 6.17 การเคลื่อนที่ทางบวกมีการเคลื่อนที่เริ่มต้นพร้อมกัน แต่ได้ระยะทางน้อยกว่าหลังจากนั้นมีการเคลื่อนที่ก่อนการเคลื่อนที่จริง แต่มีตำแหน่งการเคลื่อนที่ เริ่มสอดคล้องกันจากตำแหน่ง 225 มิลลิเมตรขึ้นไป ส่วนการเคลื่อนที่ทางลบ มีผลการเคลื่อนที่สอดคล้องกันตลอดย่านการเคลื่อนที่ โดยมีการเคลื่อนที่ได้ระยะน้อยกว่าในแต่ละช่วง ซึ่งมีเวลาเริ่มเคลื่อนที่พร้อมกัน โดยจะมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดในช่วงกลางของการเคลื่อนที่



รูปที่ 6.18 ผลการปรับแต่งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_S รอบที่ 20

จากรูปที่ 6.18 มีการปรับผลการปรับแต่งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_S ที่ได้มีผลต่างจากรอบที่ 17 ในช่วงสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{S+} ตำแหน่งที่ 215 มิลลิเมตรมีค่าเพิ่มขึ้น 10 นิวตัน ตำแหน่ง 245 มิลลิเมตร มีค่าลดลง 10 นิวตัน ส่วนค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{S-} ตำแหน่ง 315 มิลลิเมตร มีค่าลดลง 6 นิวตัน ตำแหน่ง 235 มิลลิเมตร มีค่าลดลง 5 นิวตันและตำแหน่ง 185 มิลลิเมตร มีค่าเพิ่มขึ้น 5 นิวตัน ผลการเคลื่อนที่จากรูปที่ 6.19 มีการเคลื่อนที่ทางบวกมีลักษณะสอดคล้อง แต่มีช่วงต่างที่ตำแหน่งระหว่าง 145 – 215 มิลลิเมตรที่มีการเคลื่อนที่มากกว่าที่วัดได้ 1 ครั้ง ส่วนในช่วงการเคลื่อนที่ทางลบมีการเคลื่อนที่สอดคล้องกันตลอดย่านการเคลื่อนที่ ช่วงแรกมีการเคลื่อนที่เริ่มก่อน ส่วนในช่วงกลางมีการเคลื่อนที่ในเวลาเท่ากับแต่ละระยะในการเคลื่อนที่ได้น้อยกว่า ดังนั้นจากการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์แบบจำลองแรงเสียดทานมีการอยู่ในช่วงช่วงสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_{S+} ตำแหน่งที่ 45 มิลลิเมตรมีค่าเพิ่มขึ้น 20 นิวตัน ตำแหน่ง 135 มิลลิเมตร มีค่าเพิ่มขึ้น 5 นิวตัน ตำแหน่ง 245 มิลลิเมตรมีค่าเพิ่มขึ้น 5 นิวตัน และตำแหน่ง 305 มิลลิเมตรมีค่าเพิ่ม

ชั้น 5 มิลลิเมตร ส่วนค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_s ตำแหน่ง 335 มิลลิเมตร มีค่าลดลง 4 นิวตัน ตำแหน่ง 185 มิลลิเมตร มีค่าลดลง 6 นิวตันและตำแหน่ง 105 มิลลิเมตร มีค่าลดลง 10 นิวตันที่กำหนดและให้ผลการเคลื่อนที่ที่สอดคล้องกันที่วัดได้ จากพิจารณาผลโดยรวมจากการปรับแต่งค่าที่ได้การปรับแต่งค่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_s ทั้งทางบวกและลบมีผลในการปรับไปในแนวทางเดียว ส่วนการปรับค่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน F_c มีค่าเพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่ในช่วงท้ายของการปรับ ซึ่งอยู่ในขอบเขตที่เหมาะสมไม่มีค่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานตัวใดมีขนาดเกินขอบเขตที่กำหนดไว้ป้องกัน มีผลการปรับค่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานบันทึกไว้ในภาคผนวก ค



รูปที่ 6.19 ผลการเคลื่อนที่จากการจำลองสถานการณ์แบบออนไลน์รอบที่ 20

บทที่ 7

บทสรุป

7.1 สรุป

การวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ที่ดำเนินงานทดลองเก็บข้อมูลและประมาณค่าพารามิเตอร์แรงเสียดทานของระบบ แบบออฟไลน์ และการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ มีข้อสรุปดังต่อไปนี้

1) ผลการทดสอบวงจรควบคุมวงจรปรับแต่งสัญญาณ วงจรแปลงสัญญาณมีการทำงานที่ดีได้ผลเป็นไปตามที่ทำการออกแบบไว้ตลอดเวลาที่ใช้งาน แต่มีปัญหาบางประการที่อาจเกิดจากคุณสมบัติหรือขีดจำกัดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่มีการสลับการทำงานแบบทันทีทันใด ทำให้เกิดความเสียหายกับวงจรขยายสัญญาณที่วัดแรงดันไฟฟ้า จึงจำเป็นต้องรอให้ระดับสัญญาณอยู่ในสภาวะอยู่ตัวก่อนถึงจะสามารถสลับการวัดสัญญาณได้

2) ผลการทดสอบทางด้านการจัดเก็บข้อมูลผ่านออสซิลโลสโคป และผ่านวงจรแปลงสัญญาณที่จัดเก็บที่เครื่องคอมพิวเตอร์ มีการจัดเก็บได้ดี ได้จำนวนจุดของข้อมูลถึง 20056 จุด 4 ช่องสัญญาณ โดยมีโปรแกรมควบคุมการอ่านค่าและจัดเก็บที่เขียนด้วยภาษาซี จัดเก็บเป็นลักษณะแฟ้มข้อมูลแบบข้อความจึงสามารถอ่านข้อมูลที่จัดเก็บผ่านโปรแกรมสำเร็จอื่นได้เช่น โปรแกรม Microsoft EXCEL, Microsoft Word และโปรแกรม MATLAB เพื่อทำการแสดงค่าที่จัดเก็บได้เป็นทั้งตัวเลข และแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์

3) ผลการทดสอบโปรแกรมที่ใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบออฟไลน์ ที่มีฟังก์ชันเป้าหมายเดียวกันได้มีการพัฒนาและปรับปรุงองค์ประกอบเพื่อกระทำให้ผลการจำลองสถานการณ์มวลไหล ที่มีแรงกระทำจากภายนอกจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จนได้ผลการจำลองสถานการณ์สอดคล้องมีลักษณะเป็นไปตามที่ทดสอบดังได้แสดงไว้ในบทที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

4) ผลการทดสอบโปรแกรมในการปรับแต่งค่าได้ผลค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยลง ได้ค่าพารามิเตอร์แรงเสียดทานสถิตย์ตลอดย่านใช้งาน อยู่ระหว่าง 40 – 360 มิลลิเมตรหรือระหว่างค่าที่ 3 – 35 ทั้งทางบวกและลบ มีขนาดอยู่ในย่านที่กำหนด ส่วนขนาดของแรงเสียดทานคูลอมบ์ทั้งสองมีขนาดเพิ่มขึ้นจนคงที่ และอยู่ในย่านที่กำหนด ส่วนค่าแรงเสียดทานเชิงความหนืดมีขนาดคงที่ ดังในตารางที่ ก.2 ดังนั้นเพื่อพิจารณาองค์ประกอบดังกล่าวจึงสามารถสรุปได้ว่าการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์แบบจำลองแรงเสียดทานที่ออกแบบไว้สามารถใช้งานได้ และให้ผลจากการปรับแต่ง

มีค่าความคลาดเคลื่อนลดลง ถ้าได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมให้มีการปรับแต่งละเอียดกว่านี้ จะทำให้ได้ผลสัมฤทธิ์ที่สามารถนำไปใช้ในงานทางด้านอุตสาหกรรมต่อไป

5) มีกระบวนการแสดงการเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้จากการอ่านข้อมูลตำแหน่งจริง กับค่าที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ ในสถานะที่ทำการปรับแต่งค่าแบบออนไลน์ เพื่อสามารถวิเคราะห์ผลที่ได้จากข้อมูลที่จัดเก็บเป็นแฟ้มข้อมูลแบบแถวลำดับ นำมาสร้างกราฟโดยโปรแกรม MATLAB ได้และสามารถสร้างกราฟบนโปรแกรม Microsoft Excel ได้เช่นเดียวกัน

6) อาจสรุปได้ว่า แบบจำลองแรงเสียดทานไม่เป็นเชิงเส้น แบบซับซ้อน (สตรายเบ็ค, คาร์นอปป์) ที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้ มีความเหมาะสมในการใช้งานกับยานการเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที และ - 5 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยมีค่าพารามิเตอร์เฉลี่ยดังนี้

- การเคลื่อนที่ทางบวก : $F_{S+} = 133.07$ นิวตัน, $F_{C+} = 56.14$ นิวตัน, $F_{V+} = 0.801$ นิวตัน
วินาทีต่อมิลลิเมตร

- การเคลื่อนที่ทางลบ : $F_{S-} = -124.66$ นิวตัน, $F_{C-} = -53.61$ นิวตัน, $F_{V-} = -0.799$ นิวตัน
วินาทีต่อมิลลิเมตร

7.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานที่ผ่านมา ได้ประสบกับปัญหาทางด้านอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์อยู่บ้าง รวมถึงทางด้านของโปรแกรม ซึ่งมีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

1) เกี่ยวกับวงจรควบคุมต่าง ๆ

ควรมีการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ที่เป็นทรานซิสเตอร์ ให้สามารถขับเคลื่อนได้ เพื่อจะสามารถออกแบบเป็นวงจรชดเชยที่ตอบสนองตามที่สั่งงานได้ตามที่ต้องการ และควรทำให้ชุดสวิตช์ทางสัญญาณกราวด์ทำงานแบบต่อเนื่องช่วงที่มีการสับสัญญาณควบคุมเพื่อไม่ให้เกิดสัญญาณรบกวนที่สัญญาณกราวด์เนื่องจากกระแสมอเตอร์สูง

ควรมีการระมัดระวังจุดสวิตช์แสงใช้ป้องกันการเคลื่อนที่เกินอยู่ในลักษณะที่พร้อมใช้งานคือ ให้ช่องว่างตรงกลางอยู่ในแนวบรรทัดที่ติดแถบบังแสงไว้ โดยทำการทดสอบที่วงจรควบคุมการเคลื่อนที่มอเตอร์ไปในทางซ้าย จะทำให้แท่นเคลื่อนที่ไป-กลับ ซึ่งจะต้องไม่เคลื่อนที่เกินขอบเขตที่กำหนด

ควรระวังการสับสวิตช์ควบคุมวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ จากตำแหน่งที่ใช้แรงดันที่มาจาวงจรควบคุมตำแหน่งแบบป้อนกลับ ควรให้มอเตอร์หยุดการทำงานหรือแรงดันควรเป็นศูนย์แล้วค่อยโยกกลับเพื่อให้แท่นไปอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการได้

2) เกี่ยวกับโปรแกรมควบคุมการทำงานต่าง ๆ

ควรมีการพัฒนาโปรแกรมปรับแต่งค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ ให้มีฐานข้อมูลที่ผู้ใช้ให้มีค่ากว้างขึ้น และให้มีการประมวลผลพร้อมกันหลายกฎ ตลอดจนลดจำนวนกฎให้สามารถปรับแต่งสัญญาณได้ละเอียดขึ้น พร้อมทั้งควรสามารถแสดงสัญญาณตำแหน่งทั้งสาม บนหน้าจอขณะที่โปรแกรมทำงาน เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลได้ทันที

จากการทดสอบต้องดำเนินการรัน โปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ในห้องปฏิบัติการที่ 2 ควบคุมตำแหน่งแบบป้อนกลับ ควรมีการพัฒนาโปรแกรมให้สามารถส่งสัญญาณเริ่มต้นควบคุมตำแหน่งให้สามารถสั่งการโปรแกรมการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ บนคอมพิวเตอร์ในห้องปฏิบัติการที่ 1 เพื่อให้สามารถเริ่มต้นการทำงานได้พร้อมกัน โดยไม่ต้องพึ่งพาการตรวจสอบสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง

รายการอ้างอิง

- กองพัน อารีรักษ์ และคณะ. (2545). การระบุเอกลักษณ์ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการค้นหาแบบตามสำหรับระบบสองมวลความเฉื่อย. วารสารเทคโนโลยีสุรนารี 2 (3): 88–99.
- สราวุฒิ สุจิตจร. (2538). ฟิชเชิลจิกและระบบควบคุม. วารสารเทคโนโลยีสุรนารี 2 (3): 171–196.
- อาทิตย์ ศรีแก้ว. (2545). จินเนติกอัลกอริทึม ตอนที่ 1. วารสารเทคโนโลยีสุรนารี 9 (1): 69-83.
- Armstrong-Helouvry B. (1993). Stick slip and control in low-speed motion. **IEEE Transactions on Automatic Control**. 38(10):1483-1495.
- Armstrong-Helouvry B., Dupont P. and Cadudas de Wit C. (1994). A survey of model, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction. **Automatica**. 30(7):1083-1138.
- Cadudas de Wit C., Olsson H., Armstrong K.J. and Lischinsky P. (1995). A new model for control of systems with friction. **IEEE Transactions on Automatic Control**. 40(3):419-425.
- Du H. and Nair S.S. (1999). Modeling and compensation of low-velocity friction with bounds. **IEEE Transactions on Control System Technology**. 7(1):110-121.
- Gafvert M. (1997). Comparisons of two dynamic friction models. **Proceedings of IEEE International Conference on Control Applications**. :386-391.
- Iwasaki M. Shibata T. and Matsui N. (1999). Disturbance-observer-based nonlinear friction compensation in table drive system. **IEEE Transaction on Mechatronics**. 4(1):3-8.
- Li-Xin W. (1994). **Adaptive fuzzy systems and control: Design and stability analysis**. New Jersey: PTR Prentice Hall.

- Karnopp D. (1985). Computer simulation of stick-slip friction in mechanical dynamic systems. **Journal of Dynamics System, Measurement, and Control.** 107 :100-103.
- Man K. F., Tang K. S. and Kwong S. (1996). Gentic algorithms: concept and application. **IEEE Transaction on Industrial Electronics.** 43(5) :519-533.
- Traferro S. and Uncini A. (2000). Power-of-two adaptive filters using tabu search. **IEEE Transaction on Circuit and System II: Analog and Digital Signal Processing.** 47(6):566-569.

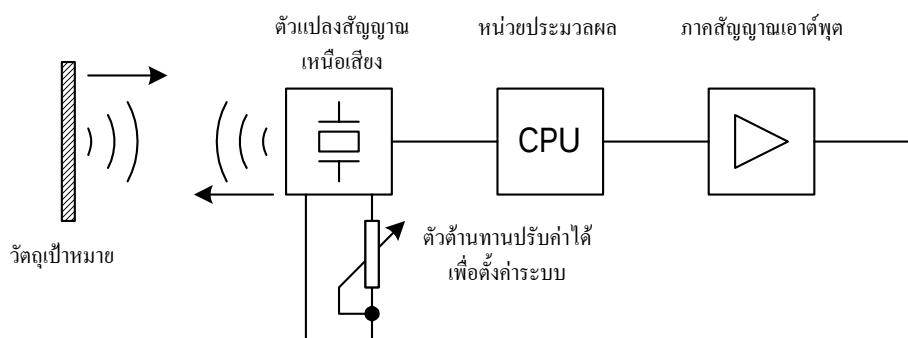
ภาคผนวก ก

วงจรควบคุมและวงจรปรับแต่งสัญญาณ

ก.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้อธิบายถึงการออกแบบและสร้างวงจรต่างๆ ที่ใช้ในการตรวจวัดและทดสอบระบบ ซึ่งจัดกลุ่มวงจรเป็นสองกลุ่ม ได้แก่กลุ่มวงจรควบคุมกับกลุ่มวงจรปรับแต่งสัญญาณ ประกอบด้วย วงจรควบคุมการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลผ่านพอร์ตคอมพิวเตอร์ วงจรควบคุมตัดต่อแรงดันไฟฟ้า วงจรปรับแต่งสัญญาณตำแหน่ง อนุพันธ์ความเร็ว กระแสและแรงดัน การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่ง ในบทได้กล่าวถึงหลักการทำงานของวงจรต่างๆ พร้อมมีผลการทดสอบสัญญาณในแต่ละส่วนตามลำดับ

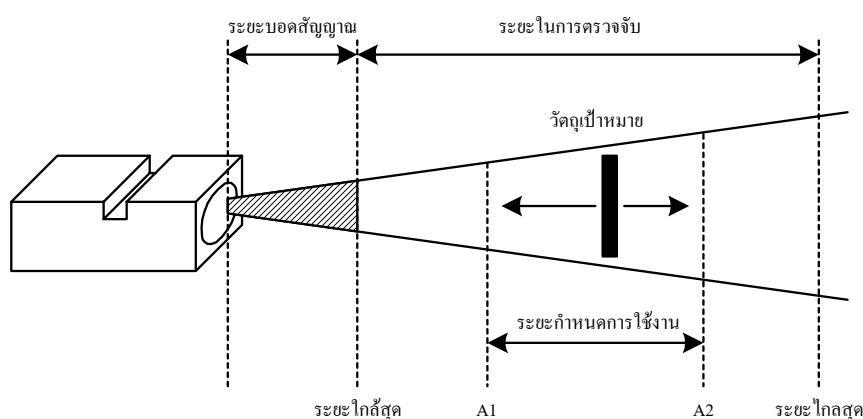
ก.2 การติดตั้งตัวตรวจวัดตำแหน่งชนิดอัลตราโซนิก



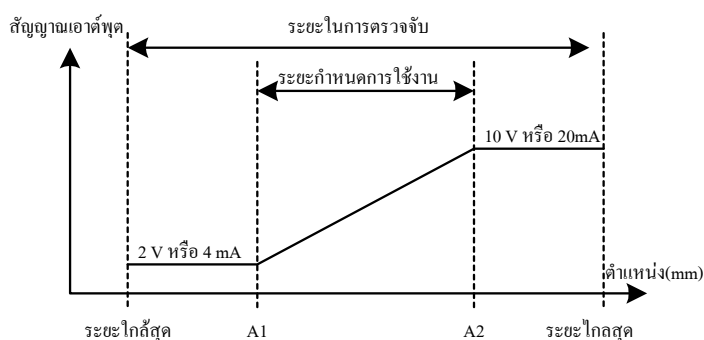
รูปที่ ก.1 การทำงานภายในตัวตรวจวัดตำแหน่งชนิดอัลตราโซนิก

ตัวตรวจวัดตำแหน่งชนิดอัลตราโซนิกส์ รุ่น UC3000+U9+IUE2+R2 ของ PEPPERL+FUCHS สามารถตรวจจับวัตถุได้เกือบทุกชนิด โดยไม่ขึ้นอยู่กับการรูปร่าง สี ของแข็งหรือของเหลว ยกเว้น วัตถุที่มีการดูดซับคลื่นเสียง โดยเป็นตัวตรวจวัดตำแหน่งแบบไม่มีส่วนใดไปสัมผัสกับแท่นภายในประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ตัวแปลงสัญญาณอัลตราโซนิก ทำหน้าที่เป็นตัวรับและตัวส่งคลื่นอัลตราโซนิก โดยการป้อนแรงดันกระตุ้นให้เป็นพัลส์ต่อเนื่องช่วงการส่งคลื่น แรงดันนี้จะถูกส่งไปยังตัวแปลงสัญญาณเพื่อเปลี่ยนเป็นคลื่นอัลตราโซนิกส่งไปยังวัตถุ คลื่นอัลตราโซนิกจะกระทบวัตถุเป้าหมายแล้วสะท้อนกลับมายังตัวแปลงสัญญาณ ซึ่งคลื่นนี้จะถูกวิเคราะห์ว่าเป็นคลื่นสะท้อนของคลื่นอัลตราโซนิกที่ส่งไปหรือไม่ โดยหน่วยประมวลผล ถ้าใช่จะทำการคำนวณระยะทางเดินทาง เพื่อนำค่าเวลาที่แปลงเป็นระยะทาง ส่งให้กับภาคเอาต์พุตแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าออกมา ดังรูปที่ ก.1

ระยะในการตรวจวัดแบ่งออกเป็น 3 ระยะ คือ ระยะบอดสัญญาณ เป็นระยะที่ไม่สามารถตรวจจับวัตถุได้ ระยะในการตรวจวัด เป็นระยะที่ตัวตรวจสามารถอ่านค่าได้เป็นเชิงเส้น และระยะกำหนดการใช้งานเป็นระยะที่ผู้ใช้กำหนดขอบเขตของสัญญาณเอาต์พุต โดยมีจุด A1 เป็นระยะใกล้สุดและจุด A2 เป็นระยะไกลสุดโดยมีจุดต่างๆ ดังรูปที่ ก.2 ส่วนสัญญาณไฟฟ้าเอาต์พุตมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งที่กำหนดระหว่าง A1 กับ A2 ที่กำหนดโดยมีรูปที่ ก.3 แสดงลักษณะระดับแรงดันที่ได้เป็นโหมคปกติ



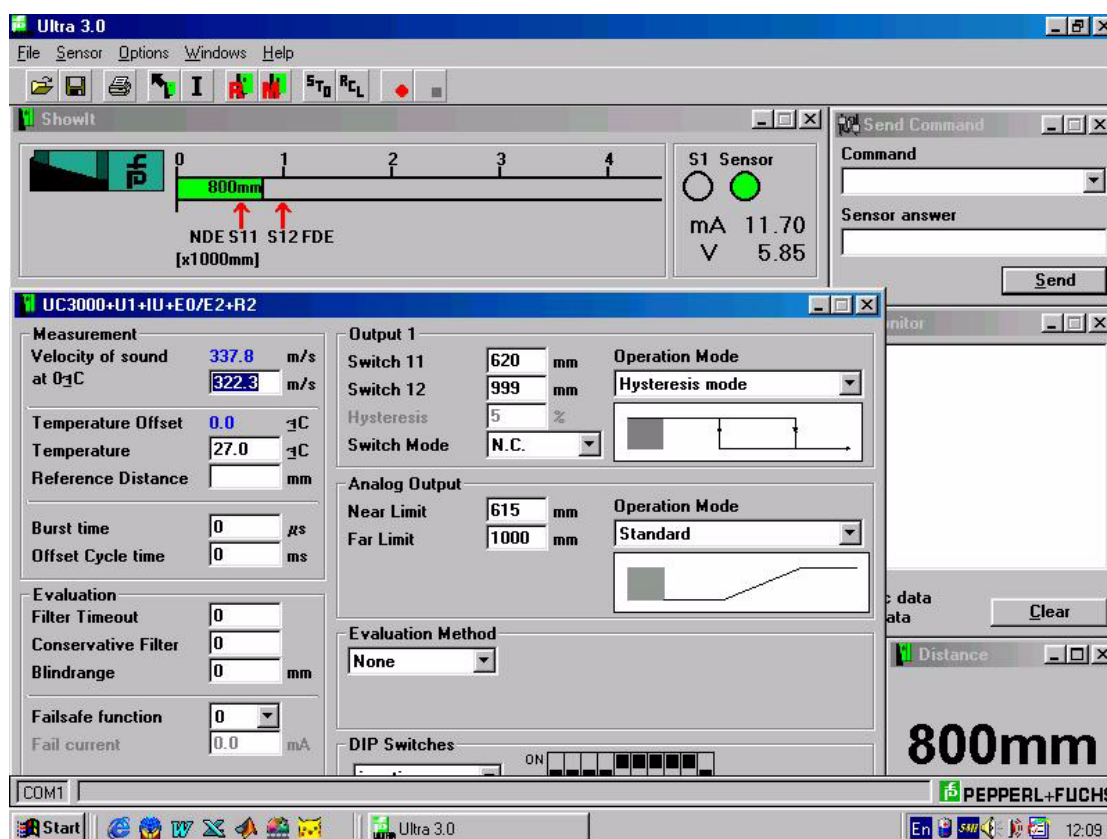
รูปที่ ก.2 การวัดระยะของตัวตรวจวัดตำแหน่งชนิดอัลตราโซนิก



รูปที่ ก.3 สัญญาณเอาต์พุตของตัวตรวจวัดตำแหน่ง

ตัวตรวจวัดตำแหน่งที่ใช้สามารถวัดระยะระหว่าง 300 ถึง 3,000 มิลลิเมตร กำหนดลักษณะการทำงานได้ 2 ลักษณะ กำหนดโดยสวิตช์ 10 ในตัวตรวจวัด คือ (1) สวิตช์ 10 เป็น “on” ทำให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นแบบแอนะล็อก ได้ทั้งแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 2 – 10 โวลต์หรือกระแสระหว่าง 4 – 20 มิลลิแอมแปร์ หน้าสัมผัสชนิด NPN 1 ชุด (2) สวิตช์ 10 เป็น “off” เพื่อเป็นการติดต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ตอนุกรม RS-232 เพื่อใช้ซอฟต์แวร์ Ultra 3.0 กำหนดค่า

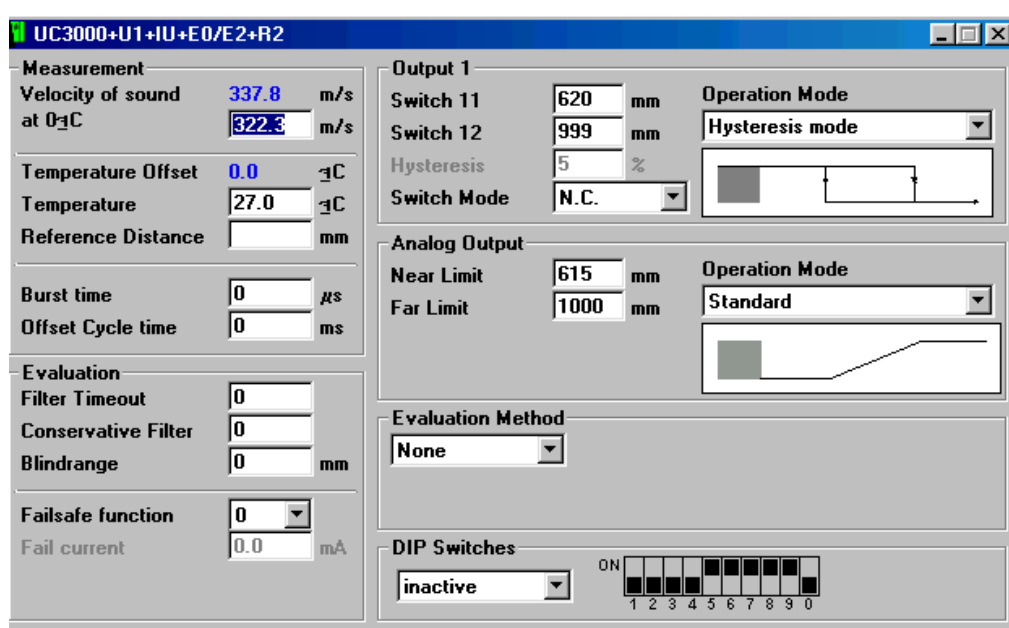
ต่าง ๆ ควบคุมและแสดงผลการทำงาน ดังนั้นในการติดตั้งตัวตรวจวัดตำแหน่งมีการกำหนดค่าต่าง ๆ ผ่านซอฟต์แวร์ Ultra 3.0 มีหน้าต่างการทำงานของซอฟต์แวร์ดังรูปที่ ก.4 แบ่งหน้าต่างการทำงานออกเป็น 5 ส่วน



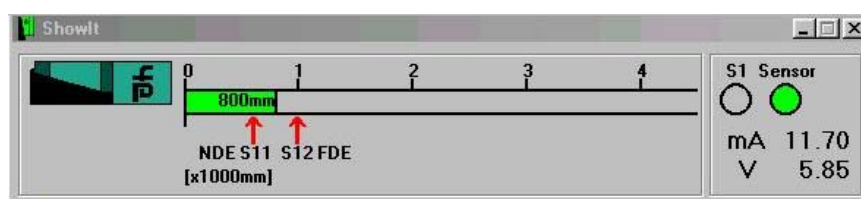
รูปที่ ก.4 หน้าต่างการทำงานของโปรแกรม ULTRA 3.0

หน้าต่างในการกำหนดค่าต่าง ๆ ดังรูปที่ ก.5 มีองค์ประกอบของหน้าต่างเป็น ส่วนการ แสดงค่าและกำหนดค่าอยู่ทั้งหมด 5 ส่วน ได้แก่ (1) ส่วนการวัด มีการวัดอุณหภูมิ ความเร็วของคลื่น และระยะเวลาที่ใช้ต่างๆ (2) ส่วนกำหนดการทำงานของสวิตช์เอาต์พุต (output 1) มีการกำหนด ระยะสวิตช์ 11 กับ 12 กำหนดลักษณะการทำงานปกติแบบเปิดหรือปิด กำหนดโหมดการทำงาน ต่างๆ โดยมี LED แสดงสถานะของสวิตช์เอาต์พุต (3) ส่วนสัญญาณเอาต์พุตแอนะล็อก (analog output) ใช้ในการกำหนดขอบเขตการวัดตำแหน่ง มีค่าที่ต้องกำหนด 2 ค่าคือ ขอบเขตใกล้ (near limit) กำหนดไว้ที่ 615 มิลลิเมตร ให้เป็นจุดเริ่มต้นที่ 0 มิลลิเมตรของระบบ ส่วนขอบเขตไกล (far limit) กำหนดไว้ที่ 1000 มิลลิเมตรเป็นระยะสูงสุดที่ 400 มิลลิเมตร และเลือกโหมดของสัญญาณ เป็นแบบมาตรฐานเพื่อให้แรงดันที่ได้ในระยะที่กำหนดเริ่มจาก 2 โวลต์เพิ่มขึ้นไปถึง 10 โวลต์ที่

ระยะใกล้สุด นอกจากระยะที่กำหนดจะเป็นแรงดันคงที่ที่ต่ำสุดหรือสูงสุด (4) วิธีการประมาณค่าในการวัดเลือกแบบปกติ และ(5) ส่วนสุดท้ายเป็นสถานะของสวิทช์กำหนดขอบเขตระยะที่ตัวตรวจวัด ในกรณีที่ไม่มีซอฟต์แวร์ โดยสวิทช์ที่ 1 – 4 เป็นตัวกำหนดระยะใกล้สุด สวิทช์ที่ 5 – 8 เป็นการกำหนดระยะใกล้สุด สวิทช์ที่ 9 กำหนดโหมดสวิทช์เอาต์พุต และสวิทช์ที่ 10 เป็นกำหนดสัญญาณเอาต์พุตในการติดต่อกับซอฟต์แวร์ผ่านพอร์ตอนุกรมหรือเป็นสัญญาณแอนะล็อก



รูปที่ ก.5 หน้าต่างการกำหนดค่าตัวตรวจวัด

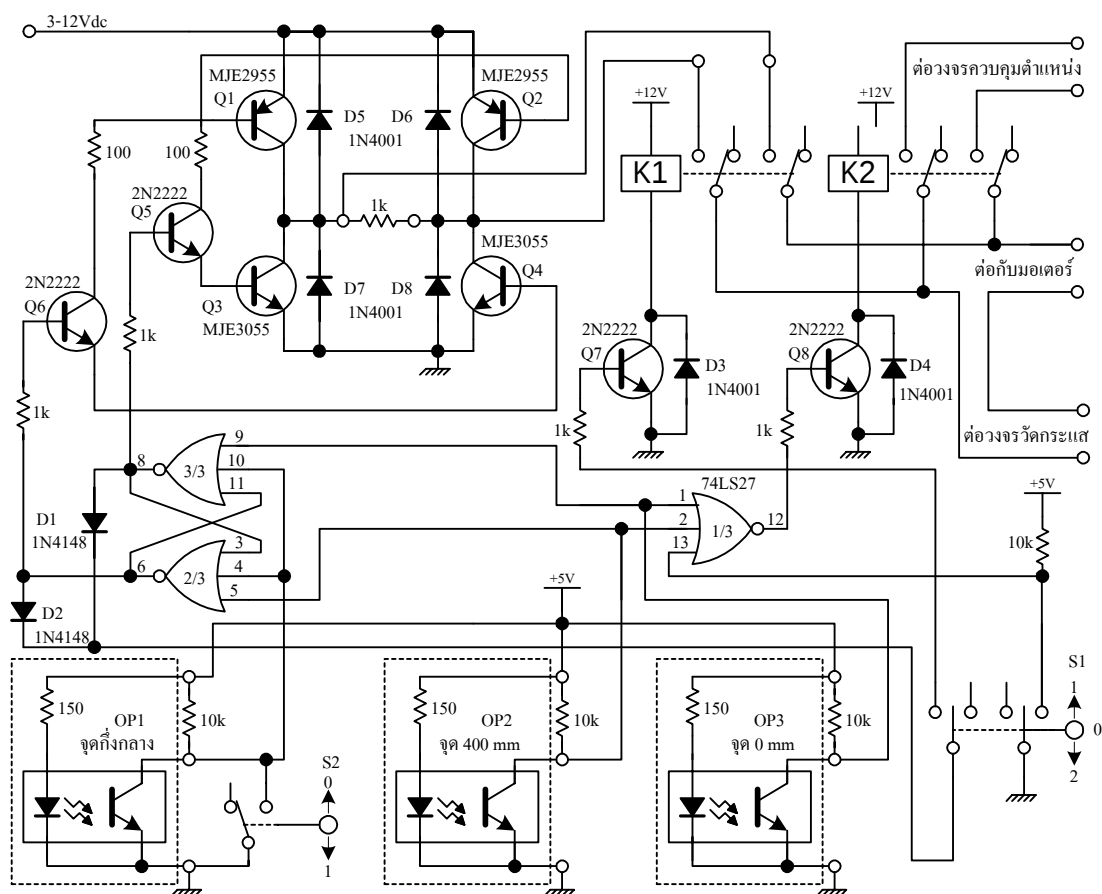


รูปที่ ก.6 หน้าต่างการวัดระยะและขนาดของแรงดันกับกระแสเอาต์พุต

จากการกำหนดค่าจากหน้าต่างการกำหนดค่าตัวตรวจวัด จะได้สัญญาณแอนะล็อกแสดงดังหน้าต่างการแสดงผลตำแหน่งที่วัดของตัวตรวจวัด แสดงดังรูปที่ ก.6 มีการแสดงระดับสัญญาณแอนะล็อกในรูปของแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 2 – 10 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าระหว่าง 4 – 20 มิลลิแอมป์ ขนาดมีความสัมพันธ์กับระยะที่วัดตามขอบเขตที่กำหนด มีการทำงานของสวิทช์เอาต์พุต

เป็นการเปิดหรือปิดวงจร และสถานะแรงดันของตัวตรวจเป็นแบบดับหรือสว่าง ดังนั้นหลังจากการกำหนดโดยซอฟต์แวร์แล้ว จะได้สัญญาณแอนะล็อกจากตัวตรวจวัดมีขนาดดังที่แสดงในหน้าตานี้

ก.3 การออกแบบและสร้างวงจรควบคุมการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ ก.7 วงจรควบคุมการหมุนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

การทำงานของวงจรก่อให้เกิดการควบคุมแรงดันไฟฟ้า ที่ป้อนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ขนาด 12 โวลต์ของชุดขับเคลื่อนแท่น กำหนดขอบเขตในการเคลื่อนที่ของแท่นให้ระยะ 400 มิลลิเมตร ช่วงกลางของแท่น วงจรจะต้องสนองต่อความต้องการใช้งานใน 3 ลักษณะ กล่าวคือ (1) หยุดหรือปลดแหล่งจ่ายออก (2) แหล่งจ่ายภายในคังที่มีวงจรอิเล็กทรอนิกส์สลับขั้วแหล่งจ่ายเพื่อควบคุมทิศทางการหมุนมอเตอร์ไฟฟ้าหมุนไปกลับในขอบเขตที่กำหนด สามารถกำหนดให้หยุดตรงกึ่งกลางแท่นได้ (ตำแหน่งอ้างอิง) และ (3) แหล่งจ่ายภายนอกควบคุมการหมุนมอเตอร์ให้เคลื่อนที่ ระยะในการเคลื่อนที่นี้จะได้น้อยกว่าแบบที่สอง(ถ้าถึงขอบแท่น วงจรจะสั่งปลด

แรงดันไฟฟ้าออก จึงทำให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้) เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้แท่นเคลื่อนที่เกินระยะที่กำหนด

จากความต้องการดังกล่าว ออกแบบโดยให้มีรีเลย์ 2 ตัว (ดูรูปที่ ก.7) คือ รีเลย์ K1 และรีเลย์ K2 ซึ่งเป็นแบบ 2 หน้าสัมผัส 6 ขั้ว ควบคุมด้วยสวิทช์ S1 แบบ 2 หน้าสัมผัส 6 ขั้ว 3 ตำแหน่ง มีตำแหน่งแสดงการทำงานดังนี้ ตำแหน่งที่ 0 เป็นหยุดมอเตอร์โดยรีเลย์ K1 และ K2 ปิดวงจร ตำแหน่งที่ 1 เป็นการเลือกให้วงจรควบคุมด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายในป้อนมอเตอร์ โดยรีเลย์ K1 ปิดวงจร และตำแหน่งที่ 2 เป็นการเลือกแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอกป้อนมอเตอร์ โดยรีเลย์ K2 ปิดวงจร และมีรายละเอียดการทำงานของสวิทช์ S1 เพิ่มเติมต่อไป

- สวิทช์ S1 ตำแหน่งที่ 1 เป็นการเลือกวงจรแหล่งจ่ายภายใน ให้การต่อสัญญาณที่ออกจากนอร์เกต 3 อินพุต ผ่านไดโอด D1 , D2 ทำหน้าที่เหมือนนอร์เกตคือ ถ้าเอาต์พุตของเกต 3/3 และเกต 2/3 มีลอจิก “1” จะทำให้ Q7 ทำงานให้รีเลย์ K1 ปิดวงจร ต่อแรงดันไฟฟ้าให้มอเตอร์ และได้ทำการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ขับเคลื่อนด้วยทรานซิสเตอร์ 4 ตัวคือ Q1 , Q2 เป็นทรานซิสเตอร์ชนิด PNP เบอร์ MJE2955 และ Q3 , Q4 เป็นทรานซิสเตอร์ชนิด NPN เบอร์ MJE3055 และควบคุมด้วยทรานซิสเตอร์ Q5 , Q6 เบอร์ 2N2222 ในการกลับขั้วแรงดันหรือหยุด มีการควบคุมเป็นคู่ดังนี้ Q1 , Q4 จะทำงานเมื่อ Q6 ทำงาน และ Q2 กับ Q3 จะทำงานเมื่อ Q5 ทำงาน ซึ่ง Q5 กับ Q6 ควบคุมด้วย ลอจิกจากนอร์เกต 3 อินพุต 2 ตัวได้แก่ เกตที่ 3/3 กับเกตที่ 2/3 ต่อวงจรให้ทำงานเสมือนเป็น อาร์-เอสฟลิปฟล็อปที่มีขาเรชเช็ตเอาต์พุต ถูกควบคุมลอจิกจากวงจรทรานซิสเตอร์ทำงานด้วยแสงที่มีหลอด LED ส่องสว่างทำหน้าที่เหมือนเป็น สวิทช์อาศัยหลักการบังแสงจะให้ลอจิก “1” ส่วนปกติเป็น “0” ได้แก่ OP1 , OP2 และ OP3 ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตของ OP1 เป็นลอจิก “1” เมื่อแท่นเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางจะทำให้มีการเรชเช็ตเอาต์พุตให้ของเกต 2/3 กับเกต 3/3 เป็นลอจิก “0” ส่งผลให้ Q5 , Q6 ไม่ทำงานแรงดันมีค่าเป็นศูนย์มอเตอร์จะหยุดหมุน แต่ถ้าสวิทช์ S2 ให้ปิดวงจรที่ตำแหน่ง 1 ทำให้สัญญาณเอาต์พุต OP1 เป็นลอจิก “0” ตลอดเวลา ทำให้มอเตอร์หมุนไปกลับตลอดเวลา ตามสัญญาณลอจิกของ OP2 , OP3

สัญญาณเอาต์พุตของ OP2 เป็นลอจิก “1” เมื่อแท่นเคลื่อนที่ถึงตำแหน่งไกลสุด 400 มิลลิเมตร ดังนั้นจะมีการเซตให้เอาต์พุตเกต 3/3 เป็นลอจิก “1” และเกต 2/3 เป็นลอจิก “0” ส่งผลให้ Q5 ทำงานพร้อมกับ Q2 , Q3 ทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าเป็นบวกป้อนมอเตอร์ให้หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา แท่นจะเคลื่อนที่กลับทางมีค่าตำแหน่งลดลง เมื่อแท่นเคลื่อนที่ตำแหน่งลดลงมาถึงตำแหน่งใกล้สุด 0 มิลลิเมตร ทำให้สัญญาณเอาต์พุต OP3 เป็นลอจิก “1” จะมีการเซตให้เอาต์พุตเกต 2/3 เป็นลอจิก “1” และเกต 3/3 เป็นลอจิก “0” ทำให้ Q6 ทำงานพร้อมกับ Q1 , Q4 ได้แรงดันไฟฟ้าเป็นลบป้อนให้มอเตอร์หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา แท่นเคลื่อนที่กลับทิศทางมีค่าตำแหน่งเพิ่มขึ้น ดังนั้นสภาวะที่สัญญาณเอาต์พุตของ OP2 , OP3 ทั้งคู่เป็นลอจิก “0” ก็คือแท่น

เคลื่อนที่อยู่ระหว่างตำแหน่งใกล้เคียงกับใกล้เคียง จะทำให้สภาวะลอจิกเอาต์พุตของเกตทั้งสองคงสถานะจนกว่าจะมีการเปลี่ยนแปลง

- ยกสวิตช์ S1 ตำแหน่งที่ 2 เป็นการให้ลอจิก “0” กับขาอินพุตของนอร์เกต 1/3 ดังนั้น สัญญาณเอาต์พุตของเกต 1/3 จะเป็นลอจิก “1” เมื่อสัญญาณเอาต์พุตของ OP2 , OP3 ต้องเป็นลอจิก “0” ทั้งคู่ ถึงจะทำให้ Q8 ทำงานส่งผลให้ รีเลย์ K2 ปิดวงจรต่อแรงดันภายนอกเข้ามอเตอร์ทำให้หมุน แทนเกิดการเคลื่อนที่ ดังนั้นถ้าแทนเคลื่อนที่เกินขอบเขตของ OP2 กับ OP3 จะทำให้สัญญาณเอาต์พุตตัวใดตัวหนึ่งเป็นลอจิก “1” ส่งผลให้เอาต์พุตของเกต 1/3 เป็นลอจิก “0” รีเลย์ K2 จะเปิดวงจรทันที จะทำให้แทนหยุดการเคลื่อนที่ เพื่อเป็นการป้องกันการเคลื่อนที่เกินขอบเขตที่กำหนด ดังนั้นการทำงานในลักษณะนี้ต้องเคลื่อนที่อยู่ภายในขอบเขตเท่านั้น ถึงจะทำการเคลื่อนที่ไปกลับได้

ก.4 การออกแบบและสร้างวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล

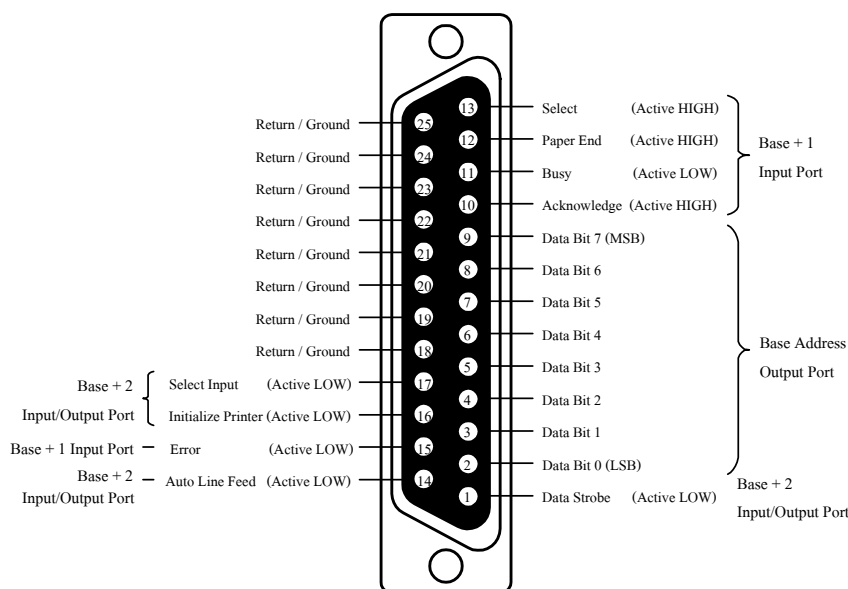
ก.4.1 การทำงานพอร์ตเครื่องพิมพ์ของเครื่องคอมพิวเตอร์

พอร์ตเครื่องพิมพ์หรือพอร์ตขนาน ของเครื่องคอมพิวเตอร์ ประกอบด้วยสัญญาณทั้งหมด 25 เส้นสัญญาณ โดยส่วนมากจะต่อผ่านหัวต่อแบบ DB25 ตัวเมีย แบ่งสัญญาณออกเป็น 3 กลุ่มตามลักษณะหน้าที่ของสัญญาณ แบ่งแยกกันเป็นตำแหน่งพอร์ตเป็น 3 ตำแหน่ง มีรายละเอียดของขาสัญญาณที่หัวต่อแบบ DB25 พอร์ตเครื่องพิมพ์ ดังรูปที่ ก.8

- พอร์ตข้อมูลขนาด 8 บิต เป็นรีจิสเตอร์เอาต์พุตขนาด 8 บิต ซึ่งมีหมายเลขพอร์ตในการติดต่อ คือ 0378H(LPT1) หรือ 0278H(LPT2) โดยสามารถส่งข้อมูลออกได้โดยคำสั่ง outportb โดยภาษาซี เพื่อนำข้อมูลส่งออกไปหาสัญญาณที่พอร์ตนี้ จะทำให้ขาสัญญาณมีค่าเหมือนกับข้อมูลที่เขียนออกมาทุกประการโดยมีบิตข้อมูล 0 - 7 ตรงกับขา 2 - 9 ที่หัวต่อแบบ DB25 ตามลำดับดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ความสัมพันธ์ของพอร์ตข้อมูลกับขาสัญญาณที่พอร์ตเครื่องพิมพ์

บิตข้อมูล	7	6	5	4	3	2	1	0
ขา DB25	9	8	7	6	5	4	3	2
ชื่อสัญญาณ	data bit 8	data bit 7	data bit 6	data bit 5	data bit 4	data bit 3	data bit 2	data bit 1



รูปที่ ก.8 ขาสัญญาณที่ตัวต่อแบบ DB25 พอร์ตเครื่องพิมพ์

- พอร์ตแสดงสถานะของเครื่องพิมพ์มีขนาด 5 บิต พอร์ตนี้มีหมายเลขพอร์ตในการติดต่อ คือ 0379H(LPT1+1) หรือ 0279H(LPT2+1) รับสัญญาณข้อมูลจากพอร์ตได้โดยคำสั่ง inportb ในภาษาซี ใช้สำหรับอ่านสถานะของสัญญาณอินพุต แบบสถานะปัจจุบันจากอุปกรณ์ภายนอก มีบิตสถานะ 7 – 3 กับขาสัญญาณที่ตัวต่อ DB25 มีรายละเอียดดังตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.2 ความสัมพันธ์ของพอร์ตแสดงสถานะกับขาสัญญาณที่พอร์ตเครื่องพิมพ์

บิตข้อมูล	7	6	5	4	3	2	1	0
ขา DB25	11*	10	12	13	15			
ชื่อสัญญาณ	Busy	ACK	paper end	select	error			

หมายเหตุ เครื่องหมาย * สัญญาณที่ได้จากการอ่าน มีการกลับสัญญาณ

- พอร์ตควบคุม ขนาด 4 บิต พอร์ตนี้มีหมายเลขพอร์ตในการติดต่อ คือ 37AH(LPT1+2) หรือ 027AH(PT2+2) สามารถเขียนและอ่านข้อมูลจากพอร์ตนี้ได้ สัญญาณของบิต 0 , 1 และ 3 จะถูกกลับสัญญาณสถานะเป็นตรงกันข้ามจากค่าของข้อมูลที่อ่านหรือเขียน ส่วนบิต 2 อ่านหรือเขียนได้ข้อมูลเหมือนกัน มีรายละเอียดดังตารางที่ ก.3

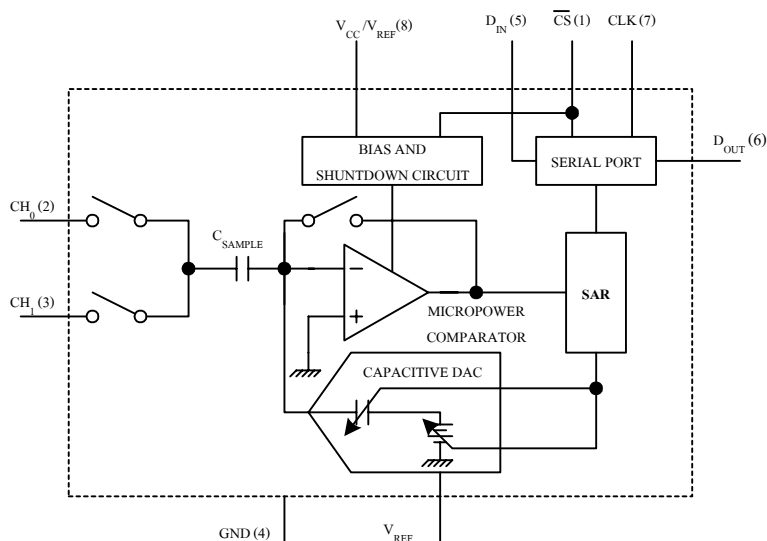
ตารางที่ ก.3 ความสัมพันธ์ของพอร์ตควบคุมกับขาสัญญาณที่พอร์ตเครื่องพิมพ์

บิตข้อมูล	7	6	5	4	3	2	1	0
ขา DB25					17*	16	14*	1*
ชื่อ สัญญาณ				IRQ Enable	select input	initialize	auto feed	strobe

หมายเหตุ เครื่องหมาย * สัญญาณที่ได้จากการอ่านหรือเขียน มีการกลับสัญญาณ

ก.ก.2 การทำงานของไอซีแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล 12 บิต เบอร์ LTC1298

LTC1298 เป็นไอซีแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 8 ขาแบบดินตะขาบ ความละเอียดขนาด 12 บิต ความถี่ในการใช้งาน 11.1 กิโลเฮิร์ตซ์ ความผิดพลาด ± 2 LSB ระดับแรงดันของแอนะล็อกอินพุต -0.05 โวลต์ถึง $+5.05$ โวลต์ มีช่องสัญญาณแอนะล็อก 2 ช่องสัญญาณแบบมัลติเพลกซ์ สามารถแปลงสัญญาณได้ที่ละช่องสัญญาณ มีการติดต่อด้วยสัญญาณการควบคุมทำงาน 4 เส้นสัญญาณแบบอนุกรม การแปลงสัญญาณโดยปรับค่าตัวเก็บประจุโดยสวิตช์แบบต่อเนื่องในการเปรียบเทียบ มีโครงสร้างการทำงานดังรูปที่ ก.9 และหน้าที่ขาสัญญาณต่างๆ



รูปที่ ก.9 โครงสร้างภายในของไอซี เบอร์ LTC1298

- ขา 1 คือ ขาควบคุมการทำงานของไอซี ต้องให้ลอจิก “0” ในการทำงาน
- ขา 2,3 คือ ขาสัญญาณแอนะล็อกช่องสัญญาณ 0,1 ขนาด -0.05 ถึง $+5.05$ โวลต์ตามลำดับ
- ขา 4 คือ ขาแรงดันกราวด์อ้างอิงของไอซีในการเปรียบเทียบ

ขา 5 คือ ขาข้อมูลอินพุตควบคุมแบบอนุกรม ในการกำหนดการทำงานของไอซี มีข้อมูลควบคุมขนาด 4 บิต เรียงตามลำดับในการส่งข้อมูลควบคุมดังนี้

บิต start คือ กำหนดการเริ่มทำงานในการแปลงสัญญาณลอจิก “0”

บิต SGL/DIFF คือ กำหนดแบบสัญญาณ

ลอจิก “1” แต่ละช่องเทียบกราวด์

ลอจิก “0” สองช่องเปรียบเทียบกัน

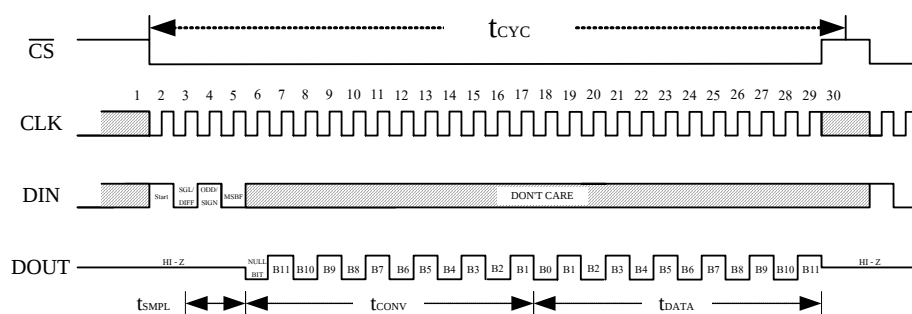
บิต ODD/SIGN คือ กำหนดช่องสัญญาณอินพุตแอนะลอกช่อง 0 / 1 หรือกำหนด

ขาสัญญาณอ้างอิงช่อง 0 / 1 มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0 โวลต์ เสมือน

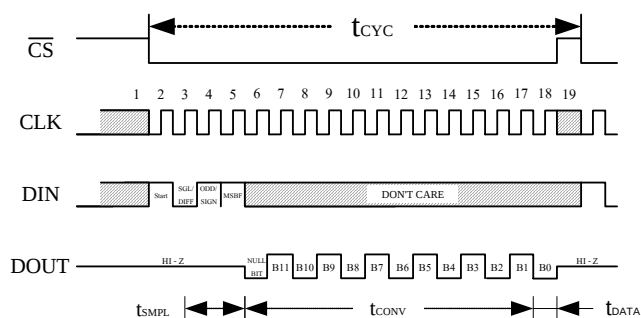
การสลับขั้วในการวัดในการวัด โดยใช้คู่กับบิต SGL/DIFF

ดังตารางที่ ก.4

บิต MSBF คือ การกำหนดการลำดับข้อมูลเอาต์พุตจากไอซี



(ก) ให้บิต MSBF เป็นลอจิก “0”



(ข) ให้บิต MSBF เป็นลอจิก “1”

รูปที่ ก.10 สัญญาณควบคุมและข้อมูลเอาต์พุตของไอซี LTC1298

- ขา 6 คือ ข้อมูลเอาต์พุตแบบอนุกรม ที่ได้จากการแปลงสัญญาณ 12 บิต
- ขา 7 คือ สัญญาณนาฬิกาอินพุตใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงในการควบคุมและอ่านข้อมูล
- ขา 8 คือ ไฟเลี้ยงของไอซีขนาด 5 โวลต์และเป็นแรงดันอ้างอิงในการแปลงสัญญาณ

ตารางที่ ก.4 สัญญาณอินพุตควบคุมไอซี LTC1298

บิต SGL/DIFF	บิต ODD/SIGN	ขา CH0	ขา CH1	ขา GND
1	0	ขั้วบวก	-	ขั้วลบ
1	1	-	ขั้วบวก	ขั้วลบ
0	0	ขั้วบวก	ขั้วลบ	-
0	1	ขั้วลบ	ขั้วบวก	-

การทำงานของขาสัญญาณการควบคุมของไอซีเบอร์ LTC1298 ในการควบคุมบิตที่ขา 5 ข้อมูลเอาต์พุตที่ขา 6 ควบคุมการทำงานของไอซีที่ขา 1 และการป้อนสัญญาณนาฬิกาที่ขา 7 ดังรูปที่ ก.10 ซึ่งมีความแตกต่างระหว่างบิตควบคุม MSBF เป็น “0” หรือ “1”

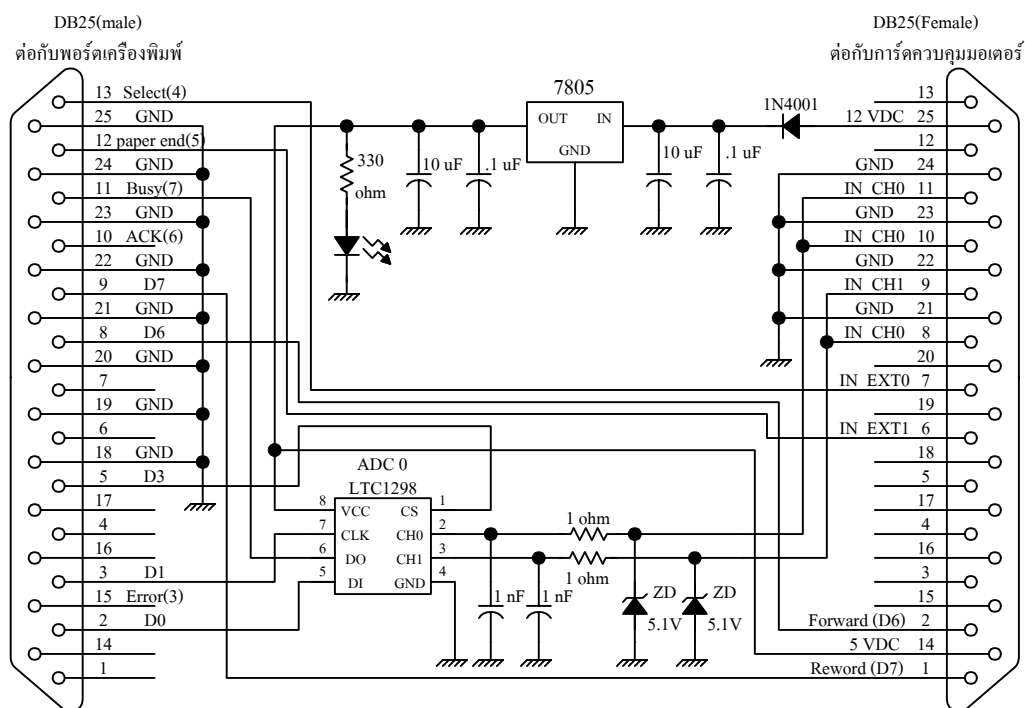
ก.4.3 การออกแบบวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลในการควบคุมตำแหน่ง

วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล 2 ช่องสัญญาณอินพุตใช้ไอซี LTC1298 ได้ทำการจัดซื้อจากบริษัทที่ที่ จำกัด มีการออกแบบวงจรควบคุมการต่อสัญญาณจากพอร์ตเครื่องพิมพ์ไปควบคุมและอ่านข้อมูลจากไอซี LTC1298 โดยแบ่งการต่อเป็น 2 ส่วน คือ

- พอร์ตข้อมูลของพอร์ตเครื่องพิมพ์ควบคุมการทำงานของไอซี LTC1298 แสดงดังรูปที่ ก.11 มีการต่อสัญญาณควบคุม 3 เส้นสัญญาณดังนี้ คือสัญญาณนาฬิกาขา 7 เข้ากับขาข้อมูล D1 สัญญาณข้อมูลอินพุตควบคุมขา 5 เข้ากับขาข้อมูล D0 และสัญญาณควบคุมการทำงานขา 1 เข้ากับขาข้อมูล D3 ซึ่งกำหนดขาสัญญาณแอนะล็อก CH0 ที่ขา 2 เป็นช่องสัญญาณที่ 0 และขาสัญญาณแอนะล็อก CH1 ที่ขา 3 เป็นช่องสัญญาณที่ 1 โดยกำหนดที่บิตควบคุม ODD/SIGN คือ เป็นลอจิก “0” คือช่องสัญญาณที่ 0 และเป็นลอจิก “1” คือช่องสัญญาณที่ 1 และกำหนดการอ่านข้อมูลที่ได้เป็นลักษณะดังรูปที่ ก.10 (ข) โดยกำหนดให้บิตควบคุม MSBF เป็นลอจิก “1” เพื่อให้การค่าใช้สัญญาณนาฬิกาในการควบคุมและอ่านข้อมูลน้อย คือ 18 ครั้ง ส่วนในการเขียนโปรแกรมจะให้ 20 ครั้งเพื่อในการคำนวณฐานเวลาได้สะดวก ซึ่งเพิ่มสถานะหยุดทำงานที่ขา CS ให้เป็นลอจิก “1” สองครั้ง ได้ทำการต่อขาข้อมูล D6 กับ D7 เป็นบิตควบคุมวงจรควบคุมตำแหน่งแบบป้อนกลับดังรูปที่ ก.13 ให้มอเตอร์เคลื่อนที่ในทิศทางที่ต้องการ ส่วนขนาดของแรงดันจะขึ้นอยู่กับความกว้างของสัญญาณลอจิก “1” กำหนดให้คาบเวลามีค่าคงที่ ขาข้อมูล D6 เป็นลอจิก “1” ควบคุมให้

มอเตอร์หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา แทนเคลื่อนที่ให้ตำแหน่งมีค่าเพิ่มขึ้น ขาข้อมูล D7 เป็นลอจิก “1” ควบคุมแทนเคลื่อนที่ให้ตำแหน่งมีค่าลดลง

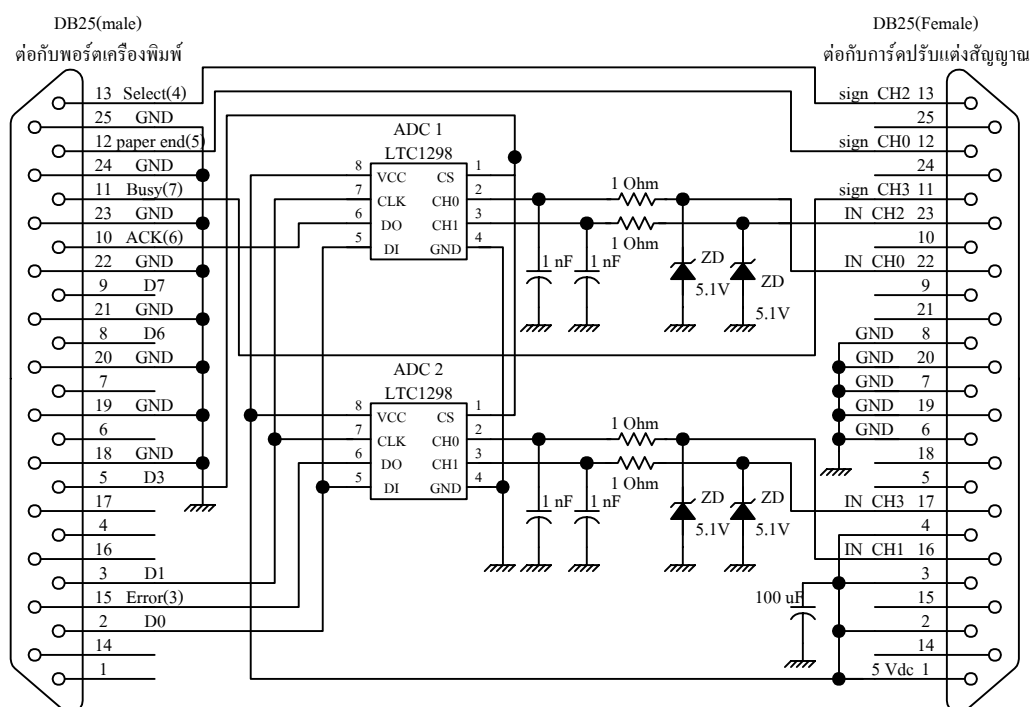
- พอร์ตแสดงสถานะของพอร์ตเครื่องพิมพ์รับข้อมูลจากไอซี LTC1298 มีการต่อสัญญาณข้อมูลเอาต์พุตที่ 6 ของไอซี ADC0 เข้าที่ขา busy เพื่อรับข้อมูลจากไอซี การอ่านค่าจากขา busy ซึ่งลอจิกที่ได้จากบิตนี้ต้องกลับสัญญาณก่อนการนำลอจิกไปใช้ในการวิเคราะห์



รูปที่ ก.11 วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลในการควบคุมตำแหน่ง

ออกแบบการกรองสัญญาณแอนะล็อกที่เข้าไอซี LTC1298 การต่อตัวความต้านทานขนาด 1 โอห์มอนุกรมกับตัวเก็บประจุขนาด 1 นาโนฟารัด เพื่อทำการขจัดสัญญาณรบกวน และป้องกันสัญญาณแรงดันเกิน 5 โวลต์ โดยต่อซีเนอร์ไดโอดขนานเส้นสัญญาณอินพุต ขนาด 5.1 โวลต์ ในการตรวจสอบนี้ต้องรับแรงดันไฟฟ้าขนาด 12 โวลต์ ผ่านไอซีรักษาระดับแรงดันเหลือ 5 โวลต์ มีโปรแกรมควบคุมการทำงานในภาคผนวก ก เป็นอธิบายการรับค่าและส่งสัญญาณควบคุมต่างๆ ของไอซีแปลงสัญญาณ และพร้อมส่งสัญญาณควบคุมการทำงานวงจรควบคุมตำแหน่งแบบป้อนกลับ

ก.4.4 การออกแบบวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล 4 ช่องสัญญาณ



รูปที่ ก.12 วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 4 ช่องสัญญาณ

วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล 4 ช่องสัญญาณอินพุต ใช้ไอซี LTC1298 จำนวน 2 ตัว รูปที่ ก.12 ประกอบ ในการออกแบบการกรองสัญญาณ และลักษณะของการต่อเส้นสัญญาณควบคุมไอซีจากพอร์ตเครื่องพิมพ์ เช่นเดียวกับวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลในการควบคุมตำแหน่ง ซึ่งต่อขนานกันระหว่าง ไอซีทั้งสอง มีการกำหนดขีดควบคุมเช่นเดียวกันเพื่อสะดวกในการเขียนโปรแกรมควบคุม ส่วนการอ่านข้อมูลจากไอซีทำการต่อสัญญาณข้อมูลเอาต์พุตที่ขา 6 ของไอซี ADC1 เข้าที่ขา ACK และจากไอซี ADC2 เข้าที่ขา error พอร์ตแสดงสถานะของพอร์ตเครื่องพิมพ์ และมีการต่อสัญญาณจากวงจรแสดงเครื่องหมาย 3 ช่องสัญญาณเข้าพอร์ตเครื่องพิมพ์มีดังนี้ คือ ช่องสัญญาณที่ 0 เป็นแรงดันเข้าที่ขา paper end ช่องสัญญาณที่ 2 เป็นความเร็วเข้าที่ขา select และช่องสัญญาณที่ 3 เป็นกระแสเข้าที่ขา busy จากช่องสัญญาณที่วัด 3 ช่องสัญญาณนี้มีระดับแรงดันทั้งบวกและลบ ดังนั้นสัญญาณแอนะล็อกที่ต่อเข้าไอซี ต้องผ่านวงจรสัณฐานสัญญาณก่อน การวัดวงจรนี้รับแรงดันไฟฟ้าขนาด 5 โวลต์ จากวงจรควบคุมการหมุนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มีโปรแกรมการทดสอบการทำงาน โดยเปรียบเทียบกับการบินที่ข้อมูลแบบแถวลำดับระหว่างวงจรแปลงสัญญาณ 4 ช่องสัญญาณกับออสซิลโลสโคป โปรแกรมใน

เมื่อ D7 เป็นลอจิก “1” ทำให้เอาต์พุตของเกต 2/4 เป็นลอจิก “1” และเอาต์พุตของแอนด์เกต 1/4 เป็นลอจิก “1” ทำให้ทรานซิสเตอร์ Q1 ทำงานส่งผลให้ Q4 กับ Q5 ทำงานพร้อมกัน เกิดแรงดันเป็นบวกป้อนมอเตอร์ให้หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา แท่นจึงเคลื่อนที่มีค่าตำแหน่งลดลง เมื่อขา D6 เป็นลอจิก “1” ทำให้เอาต์พุตของเกต 1/4 เป็นลอจิก “1” และเอาต์พุตของแอนด์เกต 2/4 เป็นลอจิก “1” ให้ทรานซิสเตอร์ Q2 ทำงานและส่งผลให้ Q3 กับ Q6 ทำงานพร้อมกัน เกิดแรงดันเป็นลบ ป้อนมอเตอร์หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา แท่นจึงเคลื่อนที่มีค่าตำแหน่งเพิ่มขึ้น ส่วนความเร็วการเคลื่อนที่ของแท่นขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดัน ซึ่งสามารถปรับได้จากการปรับความกว้างลอจิก “1” ที่ขา D6 หรือ D7 โดยกำหนดให้คาบเวลาคงที่เท่ากับ 180 สัญญาณนาฬิกา ที่ควบคุมไอซี LTC1298 หรืออาจสังเกตขนาดของแรงดันจากความสว่างของ LED ที่วงจรได้ ถ้าสว่างมากหมายถึงแรงดันสูง สว่างน้อยหมายถึงแรงดันต่ำ ซึ่งวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเหมือนกับในวงจรควบคุมการหมุนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่กล่าวมาแล้ว โดยมีตัวเก็บประจุขนาด 220 ไมโครฟารัด 6 ตัวในการกรองแรงดันให้เรียบในการป้อนมอเตอร์ ที่ต่อผ่านวงจรควบคุมการหมุนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง วงจรนี้ต่อแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟ 12 โวลต์ของเครื่องคอมพิวเตอร์

ก.6 การออกแบบและสร้างวงจรปรับแต่งสัญญาณ

วงจรปรับแต่งสัญญาณ ทำหน้าที่ ปรับขนาดสัญญาณให้เหมาะสมกับการวัด ยกหรือลดสัญญาณที่ได้เพื่อให้สะดวกต่อการอ่านค่า ประกอบด้วยวงจรวัดตำแหน่งและอนุพันธ์สัญญาณ ตำแหน่งเป็นความเร็ว วงจรวัดแรงดันที่มอเตอร์ และวงจรวัดกระแสของมอเตอร์

ก.6.1 การออกแบบวงจรวัดตำแหน่งและการอนุพันธ์สัญญาณตำแหน่งเป็นความเร็ว

การวัดตำแหน่งได้สัญญาณจากตัวตรวจจับตำแหน่งมีขนาดแรงดัน 2 ถึง 10 โวลต์ สอดคล้องกับตำแหน่งใกล้สุดที่ 0 มิลลิเมตร ถึงไกลสุดที่ 400 มิลลิเมตร จากการออกแบบจึงทำการลดขนาดของสัญญาณลงครึ่งหนึ่งเพื่อให้สัญญาณไม่เกิน 5 โวลต์ เพื่อป้อนเข้าไอซี LTC1298 ได้เหมาะสม พร้อมทำการปรับช่วงสัญญาณให้อยู่ในย่าน 0 ถึง 4 โวลต์ เพื่อหมายถึง 0 ถึง 400 มิลลิเมตร ในการอ่านตำแหน่ง รายละเอียดของวงจรแสดงดังรูปที่ ก.14 ออป-แอมป์ IC1 เป็นอุปกรณ์หลักของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ มีอัตราขยาย 0.5 ความต้านทานปรับค่าได้ขนาด 1 กิโลโอห์มแบบปรับละเอียด 10 รอบใช้เพื่อปรับให้แรงดัน 1 – 5 โวลต์ไปเป็นย่าน 0 – 4 โวลต์ ตามความต้องการ เมื่อปรับแล้วเสร็จแรงดันตกคร่อม 1 กิโลโอห์มนี้ มีแรงดันเท่ากับ 2 โวลต์ ที่ขาลบของ IC1 ส่วนออป-แอมป์ IC2/1 เป็นวงจรติดตามแรงดันเพื่อทำการแยกโคดทางไฟฟ้าระหว่างวงจรเปรียบเทียบกับวงจรอนุพันธ์สัญญาณ

การออกแบบวงจรอนุพันธ์สัญญาณพิจารณาจากคุณสมบัติของมอเตอร์ ชุดทดรอบ ชุดเปลี่ยนแนวแรงและสัญญาณของตัวตรวจวัดตำแหน่ง ดังนี้ มอเตอร์ไฟฟ้ามีความเร็วรอบสูงสุด 6,153 รอบต่อนาที ผ่านชุดทดรอบ 5.9:1 ชุดเปลี่ยนแนวแรง 1 รอบเท่ากับ 5 มิลลิเมตร และสัญญาณแรงดันจากตัวตรวจวัดตำแหน่ง 400 มิลลิเมตร ได้แรงดันเอาต์พุตส่วนต่าง 8 โวลต์ ดังนั้นคำนวณอัตราเปลี่ยนของแรงดันสูงสุดได้

$$\begin{aligned}\text{อัตราเปลี่ยนของแรงดัน} &= 6,153 \times \frac{1}{5.9} \times \frac{5}{1} \times \frac{8}{400} \times \frac{1}{60} \\ &= 1.7381 \text{ โวลต์ต่อวินาที}\end{aligned}$$

จากการคำนวณอัตราเปลี่ยนของแรงดันสูงสุดเลือกที่ 2 โวลต์ต่อวินาทีแทน เพื่อให้ได้แรงดันจากวงจรอนุพันธ์สัญญาณสูงสุดเท่ากับ 15 โวลต์(แหล่งจ่ายของอป-แอมป์) จะได้ค่าในการอนุพันธ์เท่ากับ 7.5 ดังนั้นจากการออกแบบ (Ramakant, 2000) ควรเลือกค่าไม่เกิน 1 ดังนั้นในการออกแบบนี้เลือกที่ .75 ก่อนมาต่อกับวงจรขยาย 10 เท่ากับ คำนวณค่าความต้านทาน R_f โดยเลือกค่าตัวเก็บประจุ C_c 10 ไมโครฟารัด จะได้

$$\text{ค่าความต้านทาน } R_f = \frac{0.75}{10 \times 10^{-6}} = 75 \text{ กิโลโอห์ม}$$

ทำการออกแบบวงจรกรองความถี่แบบต่ำผ่าน ให้มีความถี่ตัดอยู่ที่ 20 เท่าของความถี่การอนุพันธ์ เพื่อคำนวณหาค่าความต้านทาน R_1 และตัวเก็บประจุ C_1 จากสมการ

$$\text{ความถี่การอนุพันธ์} = \frac{1}{2\pi \cdot R_f \cdot C_c}$$

$$\text{ความถี่ตัด} = \frac{20}{2\pi \cdot R_f \cdot C_c} = \frac{1}{2\pi \cdot R_1 \cdot C_c} = \frac{1}{2\pi \cdot R_f \cdot C_1}$$

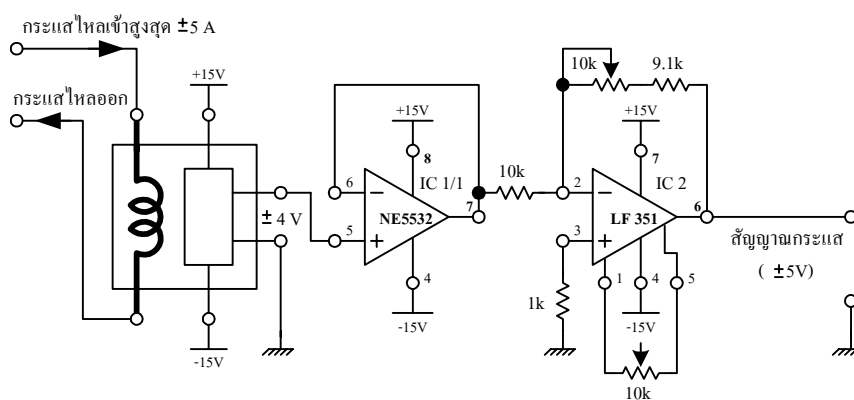
$$\text{ดังนั้น ความต้านทาน } R_1 = \frac{R_f}{20} = 3.75 \text{ กิโลโอห์ม}$$

$$\text{ตัวเก็บประจุ } C_1 = \frac{C_c}{20} = 0.5 \text{ ไมโครฟารัด}$$

$$= \frac{1}{2\pi \cdot 47e^{-6} \times 5} = 67.7 \text{ กิโลโหม์}$$

ดังนั้นเลือกค่าความต้านทานเท่ากับ 75 กิโลโหม์ และวงจรขยายต้องการ 1 เท่ากับแบบไม่กลับสัญญาณ จึงเลือกวงจรติดตามแรงดันมาใช้อย่างอินพุต-แอมป์ IC2/2 เพื่อปรับแต่งสัญญาณที่ได้ ให้สัญญาณรบกวนน้อยลง และมีการหน่วงเวลาของสัญญาณน้อย

ก.6.2 การออกแบบวงจรวัดกระแสไฟฟ้าเข้ามอเตอร์

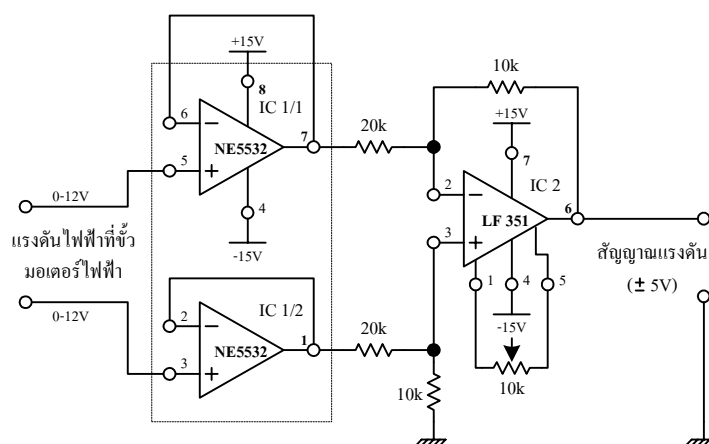


รูปที่ ก.15 วงจรวัดกระแสไฟฟ้าที่เข้ามอเตอร์

การออกแบบวงจรวัดกระแสใช้ตัวตรวจวัดกระแส โดยหลักการ ตัวตรวจวัดกระแสให้การวัดสนามแม่เหล็กพร้อมกับแยกกราวด์ของระบบ ในงานวิจัยใช้ตัวตรวจวัดกระแส HC-PSG50V4B15 ของ KOHSHIN มีรายละเอียดดังนี้คือ รับแรงดัน ±15 โวลต์ วัดกระแสได้ ±50 แอมแปร์ ได้แรงดันเอาต์พุต ±4 โวลต์ ได้ทำการปรับแต่งจำนวนรอบขดลวดและขนาดให้วัดกระแสลดลง ± 5 แอมแปร์ ได้แรงดันเอาต์พุตเท่าเดิม เนื่องจากกระแสพิกัดมอเตอร์ 2 แอมแปร์ มีรายละเอียดวงจรดังรูปที่ ก.15 ต่อผ่านวงจรติดตามแรงดันที่อินพุต-แอมป์ IC1/1 เป็นอุปกรณ์หลักเพื่อแยกสัญญาณออกจากกัน ก่อนต่อเข้ากับวงจรขยายสัญญาณแบบกลับสัญญาณโดยอินพุต-แอมป์ IC2 เป็นอุปกรณ์หลัก ที่มีค่าอัตราขยายระหว่าง -0.9 ถึง -1.9 เท่า ปรับที่ความต้านทานปรับค่าได้แบบละเอียด 10 กิโลโหม์ จะทำให้สัญญาณกระแสอินพุต 5 แอมแปร์ ได้แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 5 โวลต์ เพื่อสะดวกในการอ่านค่า โดยการต่อขั้วของกระแสให้ต่อกลับทิศทางกราวด์ของกระแสจริงเพื่อกลับสัญญาณกระแสก่อน จะทำให้อัตราขยายจริงกลับเป็นบวก

ก.6.3 การออกแบบวงจรวัดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์

การออกแบบการวัดแรงดันทำได้ โดยการเปรียบเทียบแรงดันระหว่างขั้วมอเตอร์ทั้งสอง เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนมอเตอร์ไม่มีกราวด์ที่ถาวรที่ขั้วมอเตอร์ เพราะแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ใช้ให้แรงดันบวกเท่านั้น จึงอาศัยหลักการสลับขั้วแรงดันให้มอเตอร์ไฟฟ้าเมื่อต้องการให้หมุนในทิศทางที่ต้องการ ดังนั้นในการวัดแรงดันที่ได้จะต้องมีสัญญาณแรงดันเป็นแบบอ้างอิงกับกราวด์ จึงออกแบบให้ออป-แอมป์ทำหน้าที่การเปรียบเทียบแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ พิจารณารูปที่ ก.16 ประกอบเนื่องจากแรงดันพิกัดมอเตอร์สูงสุดเท่ากับ 12 โวลต์ จึงทำการออกแบบวงจรเปรียบเทียบสัญญาณให้อัตราขยาย เท่ากับ 0.5 เท่า ที่ออป-แอมป์ IC2 เป็นอุปกรณ์หลัก เพื่อลดขนาดแรงดันลง ± 6 โวลต์ เหมาะสมกับการวัดสัญญาณแรงดันของวงจรแปลงสัญญาณ มีการแยกโคจรทางไฟฟ้าโดยวงจรติดตามแรงดันที่ใช้ออป-แอมป์ IC1/1 และ IC1/2 เป็นอุปกรณ์หลัก ทำให้สัญญาณเอาต์พุตของวงจรมีลักษณะเป็นแรงดันไฟฟ้าบวกลบ

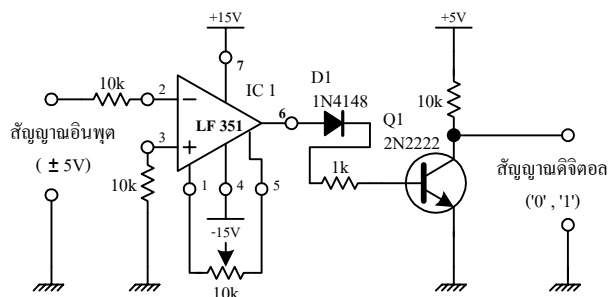


รูปที่ ก.16 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์

ก.6.4 การออกแบบวงจรเครื่องหมายสัญญาณ

วงจรเครื่องหมายสัญญาณ ดังรูปที่ ก.17 มีอัตราขยายแบบอนันต์เปรียบเทียบกับกราวด์ของระบบ คือ ถ้าแรงดันอินพุตเป็นบวก เอาต์พุตออป-แอมป์ IC1 เป็น 14 โวลต์ ส่วนถ้าเป็นลบ แรงดันเอาต์พุตออป-แอมป์เป็น -14 โวลต์ ต้องการสัญญาณที่ได้เป็นระดับลอจิก 5 โวลต์ เข้าที่พอร์ตเครื่องพิมพ์ จึงต้องลดสัญญาณโดยวงจรทรานซิสเตอร์ Q1 เบอร์ 2N2222 ทำงานเมื่อแรงดันเอาต์พุตออป-แอมป์เป็นบวก จะได้แรงดัน 0.2 โวลต์ เป็นลอจิก “0” ส่วนกรณีอินพุตเป็นแรงดันลบ Q1 ไม่ทำงานได้แรงดัน 5 โวลต์ เป็นลอจิก “1” โดยให้ไดโอด D1 ทำหน้าป้อนกัน

แรงดันลบเข้าที่ขาเบสของ Q1 เพื่อไม่ให้ Q1 เสียหาย ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าแรงดันบวกเป็นลอจิก “0” ถ้าแรงดันลบเป็นลอจิก “1”

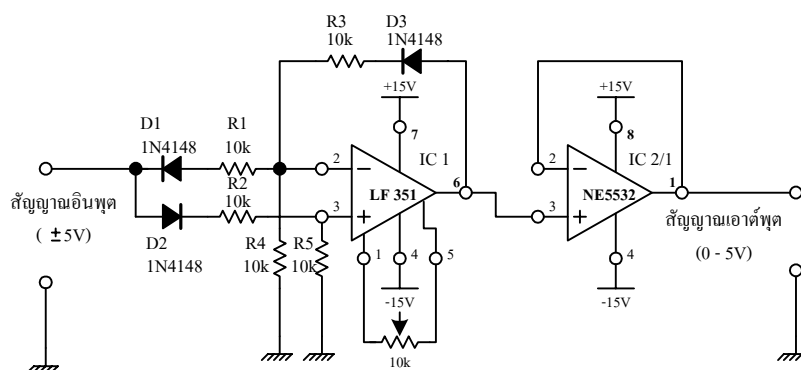


รูปที่ ก.17 วงจรเครื่องหมายสัญญาณ

ก.6.5 การออกแบบวงจรสับเปลี่ยนสัญญาณ

วงจรสับเปลี่ยนสัญญาณ โดยใช้โอป-แอมป์ IC1 เป็นอุปกรณ์หลัก ดังรูปที่ ก.18 แบ่งการทำงานออกเป็น 2 ช่องสัญญาณ ดังนี้คือ

- ช่องแรงดันบวก จะทำหน้าที่เป็นวงจรขยายแบบไม่กลับสัญญาณ โดยมีอุปกรณ์ทำงานได้แก่ ไดโอด D2 กับ D3 อัตราขยายเท่ากับ 2 เท่า จากความต้านทาน R3 กับ R4 แต่เนื่องจากสัญญาณอินพุตลดทอนโดยวงจรแบ่งแรงดันโดยความต้านทาน R2 กับ R5 ลงครึ่งหนึ่ง ทำให้อัตราขยายรวมเป็น 1 เท่า หมายถึง สัญญาณที่เข้าเป็นบวก สัญญาณที่ออกก็เป็นบวกเหมือนกัน



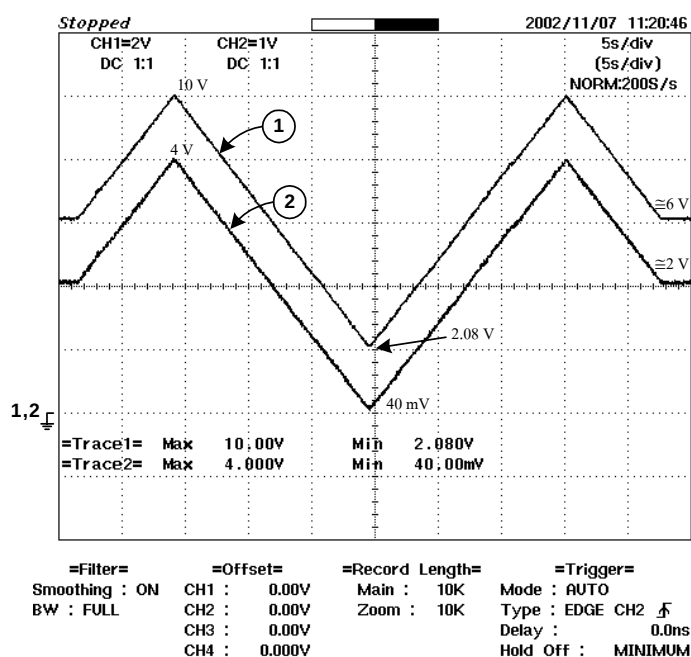
รูปที่ ก.18 วงจรสับเปลี่ยนสัญญาณ

- ช่องแรงดันลบ จะทำหน้าที่เป็นวงจรขยายแบบกลับสัญญาณ โดยมีอุปกรณ์ทำงาน ได้แก่ ไดโอด D1 กับ D3 อัตราขยายเท่ากับ -1 เท่า จากความต้านทาน R3 กับ R1 ส่วนความต้านทาน R4 กับ R5 เป็นตัวชดเชยในการต่อกราวด์ เมื่ออัตราขยาย -1 เท่า หมายถึง สัญญาณที่เข้าเป็นลบ สัญญาณที่ออกกลับเป็นบวกที่ขนาดเท่าเดิม

ดังนั้นจากวงจรสัญญาณเอาต์พุตของวงจรจะมีเฉพาะสัญญาณบวกออก เหมาะกับวงจรแปลงสัญญาณที่ต้องการเฉพาะสัญญาณบวกเหมือนกัน แต่เนื่องจากไอซีแปลงสัญญาณใช้กระแสพอสสมการ ทำให้ออป-แอมป์ IC1 จ่ายกระแสได้ไม่เพียงพอที่แรงดันต่ำจึงต้องพึ่งพาวงจรติดตามแรงดันมาช่วยในการจ่ายในที่นี้คือออป-แอมป์ IC2/1 และเป็นการลดค่าความผิดพลาดของระดับสัญญาณที่วัดด้วย

ก.7 การทดสอบและผลการทดสอบวงจรปรับแต่งสัญญาณต่าง ๆ

ก.7.1 วิธีการทดสอบและผลของวงจรปรับแต่งสัญญาณตำแหน่ง

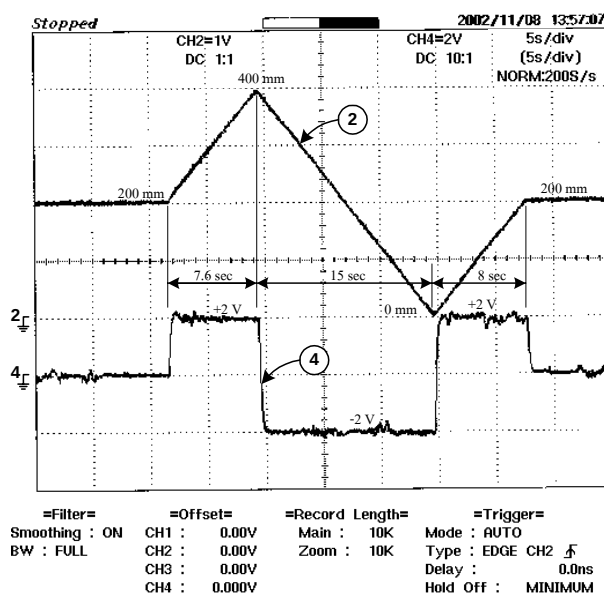


รูปที่ ก.19 ผลการทดสอบวงจรปรับแต่งสัญญาณตำแหน่ง

การทดสอบจากวงจรควบคุมการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจากรูปที่ ก.7 โดยการเลือกสวิตช์ให้มอเตอร์รับแรงดันจากแหล่งจ่ายภายใน เพื่อพิจารณาแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของขอบเขตการเคลื่อนที่ของแท่น ใช้ฮอสซิลโลสโคป รุ่น DL1540 ของ YOKOGAWA วัด

สัญญาณแรงดันที่ออกจากตัวตรวจวัดตำแหน่งที่ช่องสัญญาณ 1 จากรูปที่ ก.19 เส้นกราฟบนและแรงดันที่ออกจากวงจรปรับแต่งสัญญาณตำแหน่งที่ช่องสัญญาณ 2 เส้นกราฟล่าง จากรูปที่ ก.19 สัญญาณจากตัวตรวจวัดเริ่มจาก 6 โวลต์คือตำแหน่งกึ่งกลางของแท่นเคลื่อนที่ตำแหน่งเพิ่มขึ้นไปถึงตำแหน่ง 400 มิลลิเมตรได้แรงดัน 10 โวลต์และเคลื่อนที่กลับทิศทางตำแหน่งลดลง พร้อมปิดวงจรที่สวิตช์ 2 ของรูปที่ ก.7 แท่นจะเคลื่อนที่ลงมาถึงตำแหน่ง 0 มิลลิเมตรได้แรงดัน 2.08 โวลต์และจะกลับทิศทางการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นไปถึงตำแหน่งสูงสุด เปิดสวิตช์ 2 แท่นจะเคลื่อนที่ไปหยุดที่ตำแหน่งกึ่งกลาง เป็นการสิ้นสุดการทดสอบ ส่วนสัญญาณที่ออกจากวงจรปรับแต่งสัญญาณจะมีขนาดลดลง ที่ตำแหน่งสูงสุดจาก 10 โวลต์ลงเหลือ 4 โวลต์ ที่ตำแหน่งต่ำสุด 2.08 โวลต์ลงเหลือ 0.04 โวลต์ และจุดกึ่งกลางแรงดันประมาณ 6 โวลต์ลงเหลือ 2 โวลต์ แต่สัญญาณที่ออกจากวงจรปรับแต่งสัญญาณจะมีสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นบ้างเล็กน้อย โดยลักษณะของสัญญาณที่ได้สอดคล้องกับสัญญาณเดิม

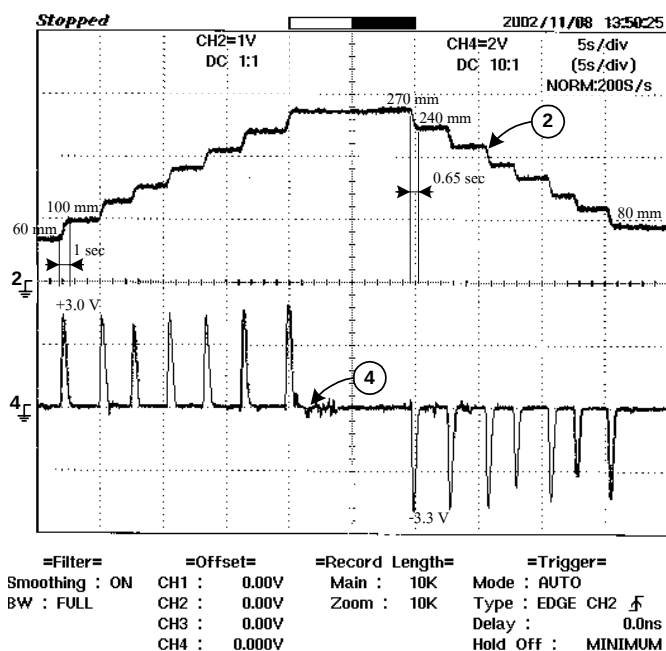
ก.7.2 วิธีการทดสอบและผลของวงจรอนุพันธ์สัญญาณความเร็ว



รูปที่ ก.20 สัญญาณความเร็วที่สัมพันธ์กับตำแหน่งที่เปลี่ยนแปลงแบบคงที่

การทดสอบสัญญาณความเร็วที่ได้จากการอนุพันธ์สัญญาณตำแหน่ง แบ่งการทำการทดสอบออกเป็น 2 กรณี โดยวัดสัญญาณตำแหน่งที่ออกจาก IC1 ของรูปที่ ก.14 ที่ช่องสัญญาณ 2 กับสัญญาณความเร็วที่ออกจาก IC2/2 ที่ช่องสัญญาณ 4 คือ กรณีแรกทำการทดสอบที่แหล่งจ่ายภายในให้เกิดการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่อง เพื่อพิจารณาสัญญาณความเร็วที่เกิดขึ้นกับตำแหน่งที่

เปลี่ยนแปลงไปจากการเคลื่อนที่แท่นเดิมขอบเขต 1 รอบดังรูปที่ ก.20 สัญญาณตำแหน่งช่องแรก เปลี่ยนแปลงเพิ่มในระยะ 200 มิลลิเมตรใช้เวลาประมาณ 7.6 วินาทีเป็นความเร็วเท่ากับ 26.32 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วได้แรงดันประมาณ 2 โวลต์มีค่าความเร็วประมาณ 26.66 มิลลิเมตรต่อวินาที (100 มิลลิเมตรต่อวินาทีเท่ากับ 15 โวลต์และผ่านวงจรลดตำแหน่งอีก 0.5 ทำให้ต้องคูณด้วย 1 โวลต์เท่ากับ $100/7.5$ ประมาณ 13.33 มิลลิเมตรต่อวินาที) ค่าความเร็วช่องลดลงประมาณ 26.66 มิลลิเมตรต่อวินาที ตำแหน่งเคลื่อนที่จาก 400 – 0 มิลลิเมตร ด้วยเวลา 15 วินาทีจะได้ความเร็วเท่ากับ 26.66 มิลลิเมตรต่อวินาที ช่วงสุดท้ายตำแหน่งจาก 0 – 200 มิลลิเมตรใช้เวลา 8 วินาทีความเร็วเท่ากับ 25 มิลลิเมตรต่อวินาที สัญญาณความเร็วได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2 โวลต์คือ 26.66 มิลลิเมตรต่อวินาที

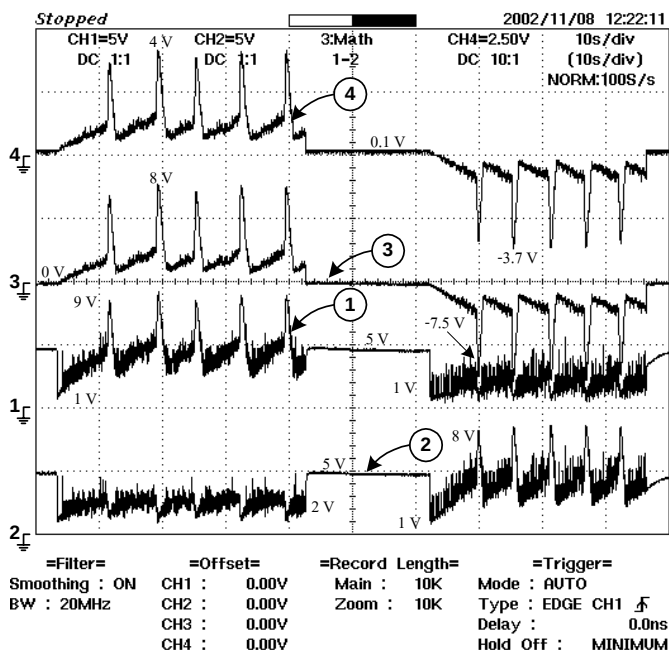


รูปที่ ก.21 สัญญาณความเร็วที่สัมพันธ์กับตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบติดลิ้น

กรณีที่สองสับสวิตช์ 1 ให้แหล่งจ่ายภายนอกควบคุมโดยวงจรควบคุมตำแหน่งแบบป้อนกลับที่ต้องการความเร็วในการเคลื่อนที่ 5 มิลลิเมตรต่อวินาที ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ ก.21 ทำให้แท่นมีการเคลื่อนที่แบบติดลิ้น จากตำแหน่ง 60 – 270 มิลลิเมตร จากสัญญาณความเร็วแรกได้แรงดันสูงสุดเท่ากับ 3 โวลต์ความเร็วเท่ากับ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที จากตำแหน่งเริ่มจาก 60 – 100 มิลลิเมตรใช้เวลา 1 วินาที ความเร็วสูงสุดเท่ากับ 40 มิลลิเมตรต่อวินาที และพิจารณาสัญญาณความเร็วแรกทางลบได้แรงดันสูงสุดเท่ากับ 3.3 โวลต์ได้ความเร็วสูงสุด 44 มิลลิเมตรต่อวินาที ตำแหน่งเคลื่อนที่จาก 270 – 240 มิลลิเมตรใช้เวลา 0.65 วินาทีได้ความเร็วสูงสุด 46 มิลลิเมตรต่อ

วินาที จากการทดสอบสัญญาณความเร็วมีขนาดเป็นไปตามการออกแบบ แต่มีผลการหน่วงเวลาประมาณ 50 มิลลิวินาทีโดยพิจารณาจากการจำลองสถานะการมอเตอร์ซึ่งจะกล่าวในบทที่ 4

ก.7.3 วิธีการทดสอบและผลของวงจรวัดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์



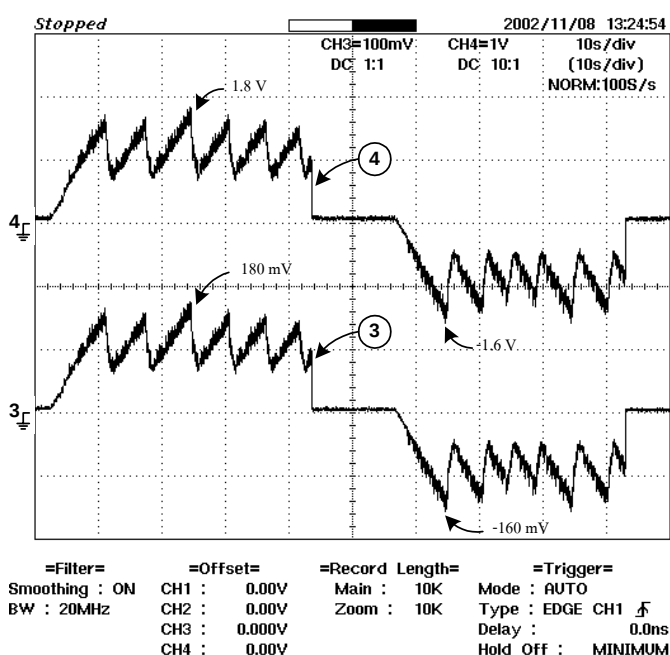
รูปที่ ก.22 การเปรียบเทียบแรงดันอินพุตกับเอาต์พุตของวงจรวัดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์

การทดสอบแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ใช้ออสซิลโลสโคป 3 ช่องสัญญาณ โดยแบ่งช่องสัญญาณที่ 1 วัดที่ขาบวกของ IC1/2 และช่องสัญญาณที่ 2 ที่ขาบวกของ IC1/1 จากรูปที่ ก.16 เพื่อวัดแรงดันที่ขั้วมอเตอร์แต่ขั้วเทียบกับกราวด์ นำข้อมูลที่ได้มาหักล้างกันเป็นช่องสัญญาณที่ 3 และช่องสัญญาณที่ 4 เป็นการวัดแรงดันที่ออกจาก IC2 เพื่อทำการเปรียบเทียบขนาดสัญญาณที่ได้ โดยสัญญาณที่ได้จากช่องสัญญาณที่ 4 จะมีขนาดเป็นครึ่งหนึ่งของช่องสัญญาณที่ 3 เนื่องจากวงจรผลที่ได้ดังรูปที่ ก.22 เริ่มทำการทดสอบให้ทำการควบคุมตำแหน่งด้วยความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที และกดสวิทช์ 1 เป็นการเลือกแหล่งจ่ายภายนอกเช่นเดียวกับการทดสอบในหัวข้อ ก.7.2 จากภาพมีเส้นสัญญาณบนสุดเป็นเอาต์พุตของวงจร ส่วน 2 เส้นสัญญาณด้านล่างเป็นสัญญาณอินพุตของวงจรทำการลบกันเป็นเส้นสัญญาณที่ 3 ช่องแรกแทนเคลื่อนที่ตำแหน่งเพิ่มขึ้น แรงดันเป็นบวกโดยขาลบของ IC2 ที่ช่องสัญญาณที่ 2 มีแรงดันประมาณ 2 โวลต์ ส่วนขาบวกที่ช่องสัญญาณที่ 2 มีแรงดันเริ่มจาก 1 – 9 โวลต์ ได้แรงดันที่ช่องสัญญาณที่ 3 จาก 0 – 8 โวลต์ แรงดันที่ช่องสัญญาณที่ 4 ได้จาก 0.1 – 4.0 โวลต์ ช่องสัญญาณที่สองสภาวะมอเตอร์หยุดแรงดันเอาต์พุตเป็น 0 โวลต์ แต่

แรงดันที่ช่องสัญญาณที่ 1 กับ 2 มีค่าแรงดันเท่ากับ 5 โวลต์ ช่องที่สามแรงดันที่ช่องสัญญาณที่ 3 เป็นลบ สัญญาณที่ 1 ระดับแรงดันประมาณ 1 โวลต์และสัญญาณที่ 2 ระดับแรงดันระหว่าง 1 – 8 โวลต์ ได้แรงดันที่ช่องสัญญาณที่ 3 ระหว่าง 0 – (-7.5) โวลต์ สัญญาณเอาต์พุตได้แรงดันระหว่าง 0.1 – (-3.7) โวลต์ จากสัญญาณดังกล่าวเป็นไปตามการออกแบบ

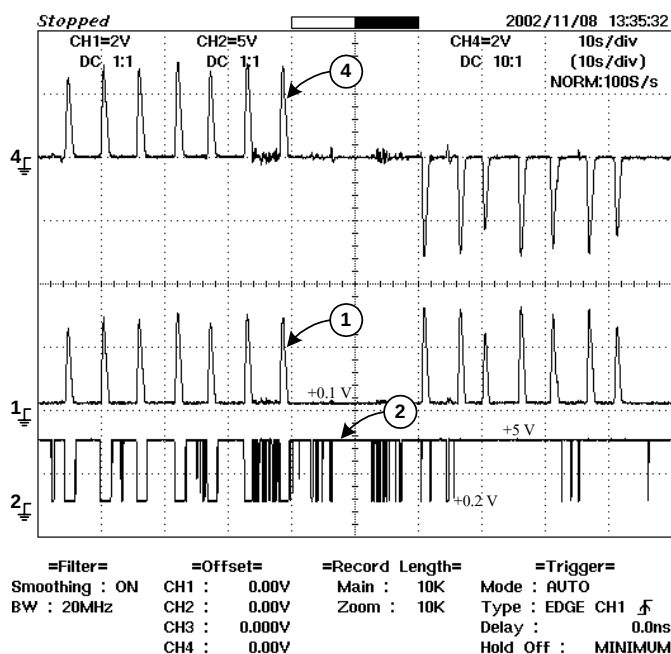
ก.7.4 วิธีการทดสอบและผลของวงจรวัดกระแสไฟฟ้าที่เข้ามอเตอร์

การทดสอบวงจรวัดกระแสทำการเช่นเดียวกับการทดสอบในหัวข้อ ก.7.3 โดยทำการวัดกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ เปรียบเทียบระหว่างตัววัดกระแสที่มีในห้องปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้ารุ่น HZ56 ของ HAMAG โดยสัญญาณเป็นแรงดัน 100 มิลลิโวลต์ต่อ 1 แอมแปร์ ส่วนในวงจรวัดกระแสทำการออกแบบไว้ 1 โวลต์ต่อ 1 แอมแปร์ ทำการวัดเปรียบเทียบใช้ช่องสัญญาณที่ 3 เป็นเครื่องวัดกระแสของห้องปฏิบัติการฯ ส่วนช่องสัญญาณที่ 4 เป็นเอาต์พุตของวงจรวัดกระแสที่ IC2 ของรูปที่ ก.15 ผลที่ได้จากการทดสอบดังรูปที่ ก.23 โดยเส้นสัญญาณบนเป็นแรงดันเอาต์พุตของ วงจรวัดกระแส ส่วนเส้นล่างเป็นแรงดันเอาต์พุตของเครื่องวัดกระแส ผลที่ได้มีความสอดคล้องกันมีสัดส่วนเช่นเดียวกัน



รูปที่ ก.23 การเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันจากวงจรวัดกระแสกับเครื่องวัดกระแส

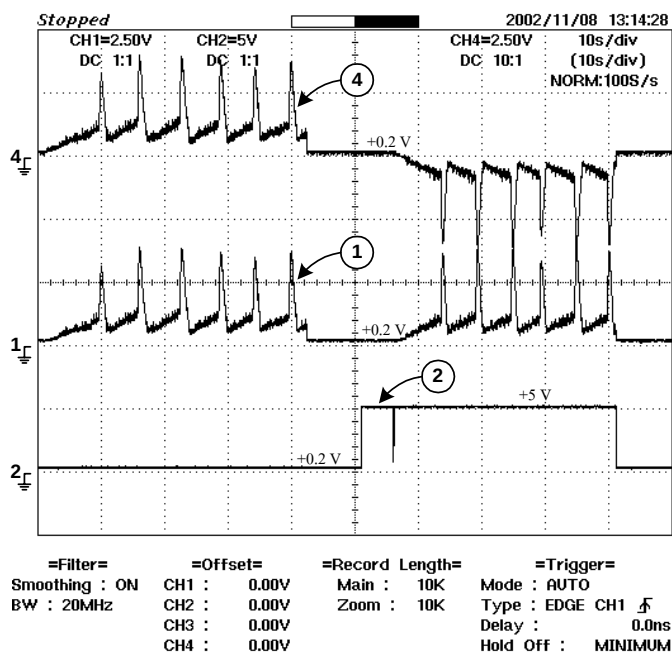
ก.7.5 วิธีการทดสอบและผลของวงจรสับเปลี่ยนสัญญาณกับวงจรเครื่องหมายสัญญาณ



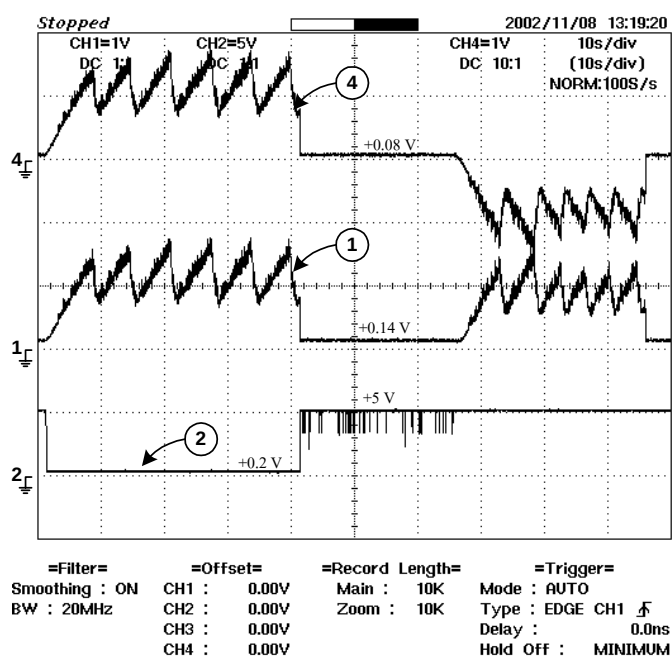
รูปที่ ก.24 สัญญาณความเร็วที่ผ่านวงจรสับเปลี่ยนสัญญาณและวงจรเครื่องหมายสัญญาณ

การทดสอบทำการวัดสัญญาณอินพุตที่เข้าวงจรสับเปลี่ยนสัญญาณและวงจรเครื่องหมาย ช่องสัญญาณที่ 4 เปรียบเทียบกับสัญญาณเอาต์พุตของวงจรสับเปลี่ยนสัญญาณ ช่องสัญญาณที่ 1 และสัญญาณเอาต์พุตลอจิกของวงจรเครื่องหมาย ช่องสัญญาณที่ 2 โดยมีการวัดสัญญาณต่าง ๆ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว กระแสของมอเตอร์ไฟฟ้าและความเร็วในการเคลื่อนที่ โดยทำการทดสอบเช่นเดียวกับหัวข้อที่ ก.7.3 ให้เกิดสภาวะการเคลื่อนที่แบบติดลื่นทำให้สัญญาณทั้งสามมีการเปลี่ยนแปลงขนาดตลอดเวลาการเคลื่อนที่ ทำให้สัญญาณเอาต์พุตของวงจรทั้งสามมีการเปลี่ยนแปลงเช่นกัน ผลที่ทำการวัดสัญญาณความเร็วได้ดังรูปที่ ก.24 มีเส้นสัญญาณบนสุดเป็นแรงดันอินพุตของวงจรทั้งสอง เส้นที่สองเป็นสัญญาณเอาต์พุตของวงจรสับเปลี่ยนสัญญาณ และเส้นสุดท้ายเป็นสัญญาณ ลอจิก 0 – 5 โวลต์ ของ วงจรเครื่องหมายจากภาพช่องแรกสัญญาณอินพุตมีค่าความเร็วเป็นบวก สัญญาณที่ได้ค่าความเร็วเป็นบวกแต่สภาวะความเร็วหยุดนิ่งได้แรงดันเอาต์พุตประมาณ 0.2 โวลต์เนื่องจากถ้าน้อยกว่านี้ บางครั้งทำให้สัญญาณที่ออกจากไอซีแปลงสัญญาณรับสัญญาณเป็นลบได้ทำให้ข้อมูลในการแปลงสัญญาณเกิดความผิดพลาดจึงต้องในสัญญาณสภาวะหยุดนิ่งมีค่าดังกล่าว และสัญญาณลอจิกในช่องนี้เป็นลอจิก “0” หรือแรงดันประมาณ 0.2 โวลต์ เป็นช่วงๆ ซึ่งความเร็วมีค่าน้อยกว่า 0.1 โวลต์ จึงเป็นลอจิก “1” หรือ 5 โวลต์ดังนั้นโดยปกติจะเป็นลอจิก

“1” ช่องที่สอง สัญญาณอินพุตเป็นลบ ได้สัญญาณเอาต์พุตเป็นบวกที่มีขนาดเท่าเดิม และสัญญาณลอจิกเป็นลอจิก “1” มากกว่าเฉพาะช่วงบวกชั่วขณะเป็นลอจิก “0”



รูปที่ ก.25 สัญญาณแรงดันที่เข้ามอเตอร์ที่ผ่านวงจรสับเปลี่ยนสัญญาณและวงจรเครื่องหมายสัญญาณ



รูปที่ ก.26 สัญญาณกระแสเข้ามอเตอร์ที่ผ่านวงจรสับเปลี่ยนสัญญาณและวงจรเครื่องหมายสัญญาณ

ทำการวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าโดยมีช่องสัญญาณต่าง ๆ เช่นเดิม และทำวิธีการทดสอบเช่นเดิมได้ผลดังรูปที่ ก.25 ช่องสถานะแรงดันอินพุตเป็นบวก แรงดันเอาต์พุตเป็นบวก แต่สถานะแรงดันอินพุตเป็น 0 โวลต์ แรงดันเอาต์พุตประมาณ 0.2 โวลต์เหตุผลเช่นเดิม ส่วนสัญญาณลอจิกที่ได้ปกติเป็นลอจิก “0” ตลอด ส่วนในช่องแรงดันอินพุตเป็นลบ แรงดันเอาต์พุตเป็นลบขนาดเท่าเดิม แต่สัญญาณลอจิกเป็น “1” เมื่อสิ้นสุดการทดสอบลอจิกจะกลับเป็น “0”

การทดสอบผลจากการวัดกระแสได้ผลดังรูปที่ ก.26 ให้ผลคล้ายกับสัญญาณแรงดันไม่ว่าจะเป็นสัญญาณเอาต์พุต และสัญญาณลอจิก โดยทำการทดสอบเช่นเดียวกัน

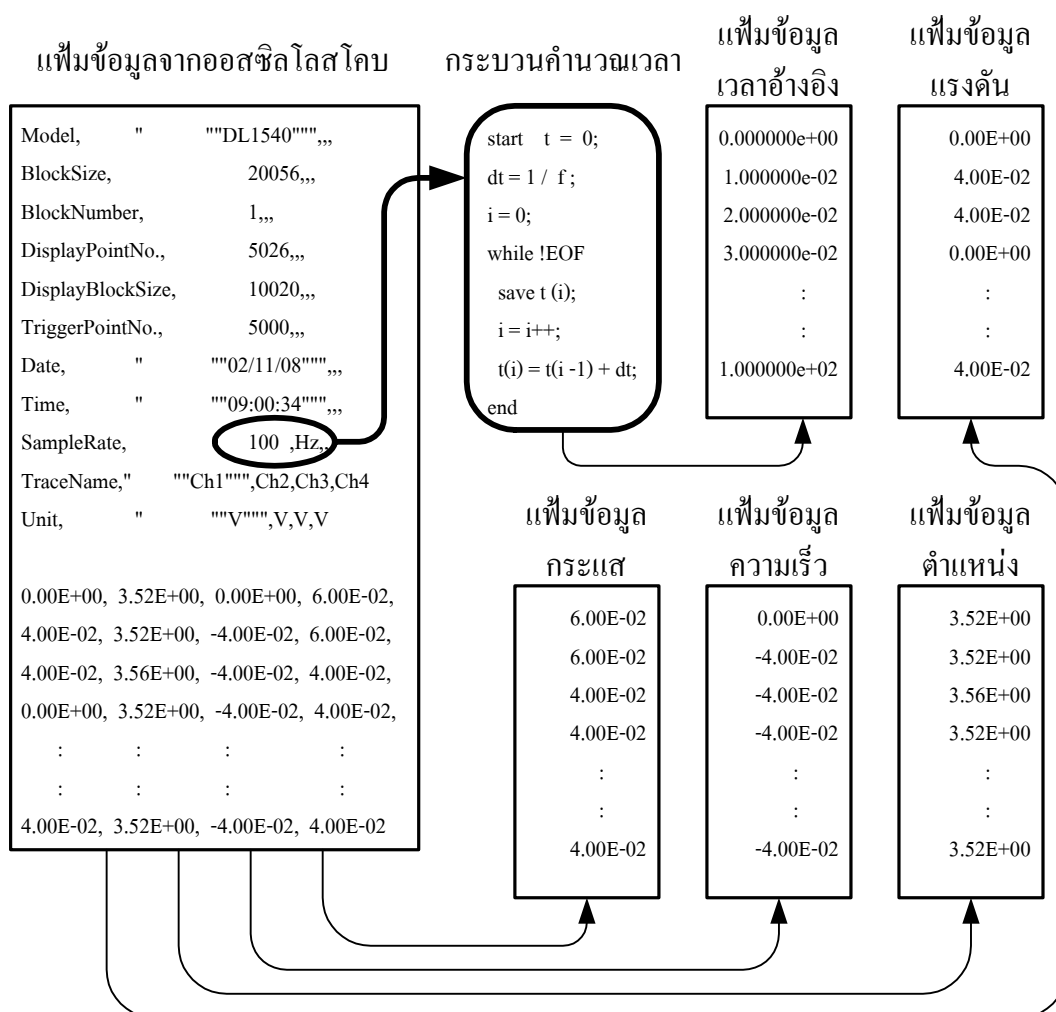
ก.7.6 วิธีการทดสอบและผลของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล 4 ช่องสัญญาณ

การทดสอบวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล 4 ช่องสัญญาณ ทำโดยการวัดสัญญาณเปรียบเทียบกับออสซิลโลสโคป มีการจัดเก็บเป็นแบบแถวลำดับลงเพิ่มข้อมูล ให้ช่องสัญญาณที่ 1 ทั้งสองวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ ช่องสัญญาณที่ 2 วัดสัญญาณตำแหน่งของแท่น ช่องสัญญาณที่ 3 วัดสัญญาณความเร็วในการเคลื่อนที่แท่น และช่องสัญญาณที่ 4 วัดสัญญาณกระแสไฟฟ้าไหลเข้ามอเตอร์ แต่เนื่องจากวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลวัดแรงดันได้เฉพาะแรงดันด้านบวก ดังนั้นช่องสัญญาณที่ 1 , 3 และ 4 ของวงจรต้องต่อวัดผ่านวงจรสมมูลสัญญาณ และต่อสัญญาณลอจิกแสดงเครื่องหมายผ่านวงจรแสดงเครื่องหมายเพื่อระบุแรงดันที่วัดว่าเป็นสัญญาณด้านบวกหรือลบ

จากนั้นทำการควบคุมแท่นให้เคลื่อนที่ด้วยวงจรควบคุมตำแหน่งแบบป้อนกลับ ต่อกับวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล ในการควบคุมตำแหน่งที่คอมพิวเตอรืในห้องปฏิบัติการที่ 2 จากรูปที่ 3.2 พร้อมพร้อมทำการรันโปรแกรมควบคุมตำแหน่งที่ความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที และทำการปรับค่าคาบเวลาของออสซิลโลสโคปมีค่า 10 วินาทีต่อช่อง จะได้ข้อมูลหนึ่งหน้าจอเท่ากับ 10,000 ข้อมูล จากนั้นทำการรันโปรแกรมการอ่านค่าจากวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล 4 ช่องสัญญาณจากภาคผนวก ก บนคอมพิวเตอร์ในห้องปฏิบัติการที่ 1 จากรูปที่ 3.1 กำหนดชื่อเพิ่มข้อมูล 4 ตัวอักษรท้าย และกำหนดค่าคาบเวลาเท่ากับ 10 วินาทีต่อช่อง ดังนั้นหนึ่งหน้าจอจะได้เวลาเท่ากับ 100 วินาทีเช่นเดียวกับออสซิลโลสโคปโดยจะจัดเก็บข้อมูลได้ประมาณ 10,000 ข้อมูล ± 5 เปอร์เซ็นต์ ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการเตรียมเครื่องมือ

ดังนั้นวิธีการจัดเก็บให้ทำการรันโปรแกรมที่คอมพิวเตอร์ในห้องปฏิบัติการที่ 1 โดยกดให้เริ่มต้นทำงานพร้อมกันระหว่างคอมพิวเตอร์ในห้องปฏิบัติการที่ 1 กับออสซิลโลสโคป เพื่อให้เกิดการเริ่มต้นเก็บข้อมูลพร้อมกัน เมื่อข้อมูลที่คอมพิวเตอร์ในห้องปฏิบัติการที่ 1 ได้หนึ่งหน้าจอหรือเวลาประมาณ 100 วินาที กดหยุดรูปที่ออสซิลโลสโคปพร้อมกับหยุดโปรแกรมที่คอมพิวเตอร์ในห้องปฏิบัติการที่ 1 จะทำให้ข้อมูลจากวงจรแปลงสัญญาณจัดเก็บลงดิสก์และค่อยหยุดการทำงาน

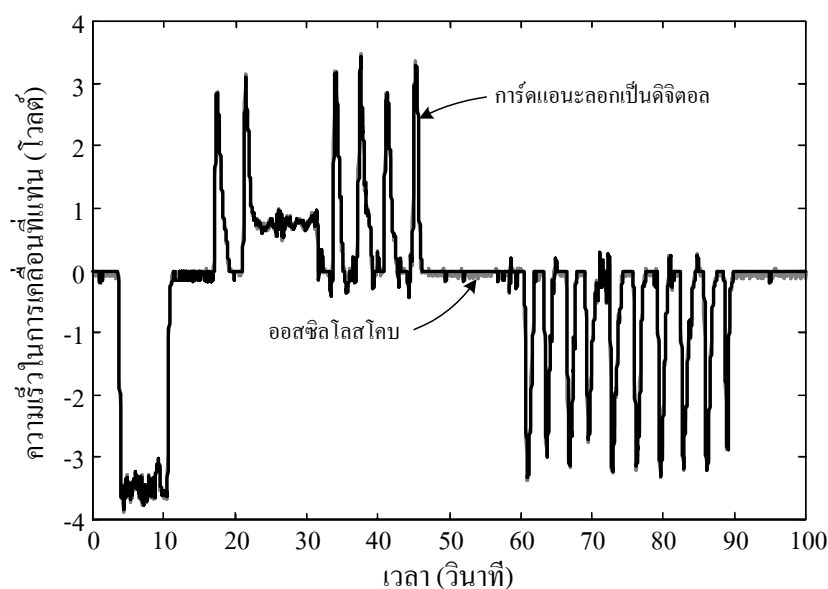
โปรแกรมควบคุมที่คอมพิวเตอร์ในห้องปฏิบัติการที่ 1 เพื่อหยุดการควบคุมแท่น จากนั้นทำการจัดการจัดเก็บข้อมูลของออสซิลโลสโคปลงดิสก์เป็นข้อมูลแบบแถวลำดับดังรูปที่ ก.27 เมื่อจัดเก็บเสร็จนำข้อมูลที่ได้ผ่านกระบวนการแยกแยะเพิ่มข้อมูล โดยโปรแกรมที่เขียนด้วยโปรแกรมภาษาซีออกเป็น 5 เพิ่มข้อมูล โดยเพิ่มข้อมูลเวลาได้จากการอ่านค่าความถี่ในการจัดเก็บ มาคำนวณเป็นเวลาส่วนต่างระหว่างข้อมูล มีกำหนดเวลาเริ่มต้นจาก 0 วินาที ดังกระบวนการคำนวณเวลา โดยจัดเก็บทีละครั้งพร้อมอ่านค่าข้อมูล 1 ชุด จนจบเพิ่มข้อมูล ส่วนข้อมูล 4 ช่องสัญญาณแยกออกเป็น 4 แถวสามารถแยกได้ 4 เพิ่มข้อมูลลงดิสก์ คือช่องสัญญาณละเพิ่มข้อมูลดังที่ปรากฏ



รูปที่ ก.27 กระบวนการแยกข้อมูลจากออสซิลโลสโคปออกเป็น 5 เพิ่มข้อมูล

ส่วนข้อมูลที่จัดเก็บจากวงจรแปลงสัญญาณจะมีลักษณะเช่นเดียวกับ 5 เพิ่มข้อมูลที่แยกออกมาดังภาพ ดังนั้นนำข้อมูลที่ได้ 10 เพิ่มข้อมูล มาทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณโดย

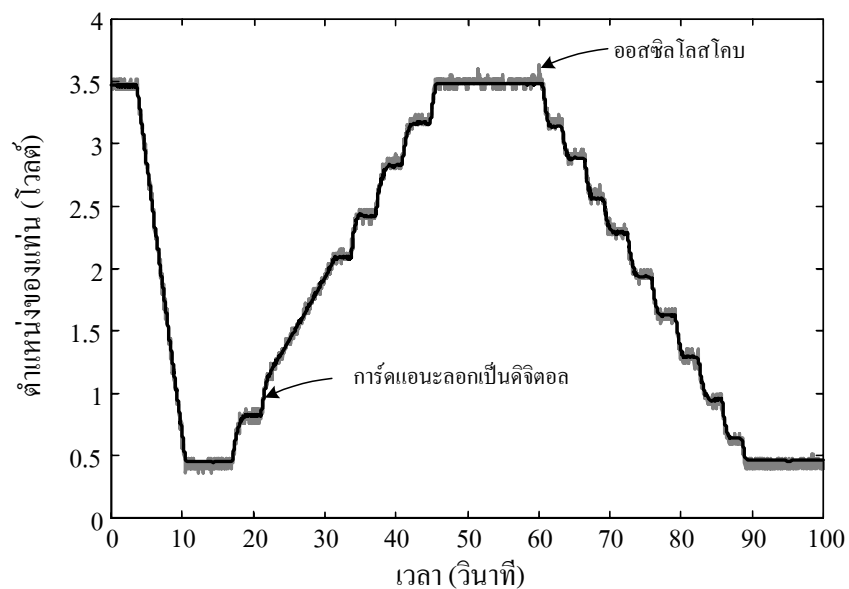
โปรแกรม MATLAB โดยการโหลดข้อมูลจากแฟ้มข้อมูลทั้ง 10 แฟ้มข้อมูล จัดเก็บไว้ที่ตัวแปรประกอบด้วยตัวแปรเวลา 2 ตัวเป็นฐานเวลาของแต่ละชุดข้อมูล และอีก 8 ตัวแปรเป็นข้อมูลของสัญญาณที่วัด 4 ช่องสัญญาณของแต่ละชุดข้อมูล เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาทำการพล็อตกราฟเปรียบเทียบทีละช่องสัญญาณ บนแกนเวลาระหว่างวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลกับออสซิลโลสโคป



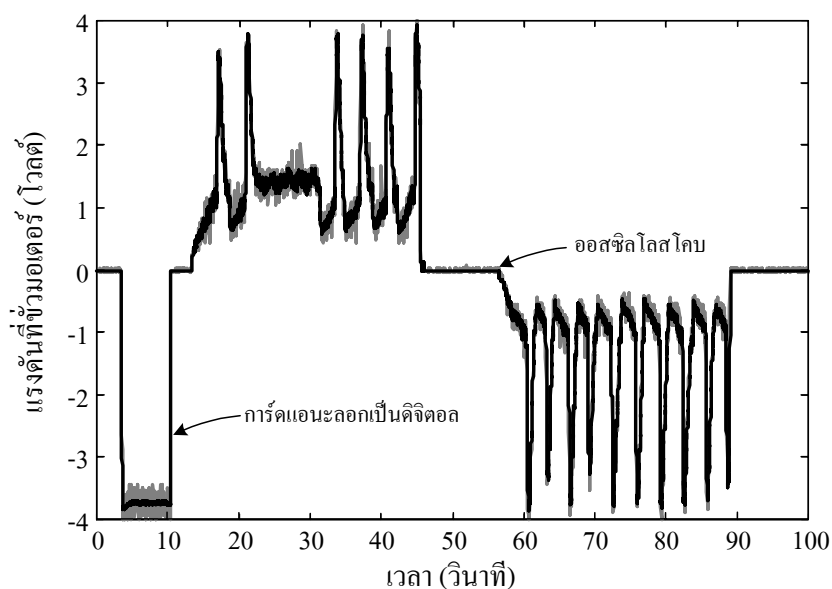
รูปที่ ก.28 การเปรียบเทียบสัญญาณจากวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่ช่องสัญญาณ 1

การเปรียบเทียบข้อมูลชุดแรกจากช่องสัญญาณที่ 1 โดยทำการวัดสัญญาณแรงดันที่หัวของมอเตอร์ ดังรูปที่ ก.28 มีขนาดระหว่าง -4 ถึง 4 โวลต์ช่วงเวลา 100 วินาที โดยมีเส้นสีดำเป็นสัญญาณจากวงจรแปลงสัญญาณ และสีเทาเป็นสัญญาณที่จากออสซิลโลสโคป โดยจากภาพจะเห็นว่าสัญญาณทั้งสองมีความสัมพันธ์กันทั้งขนาดและเวลา โดยขนาดจากวงจรแปลงสัญญาณที่อ่านได้เป็นการนำข้อมูลมาเฉลี่ยจึงทำให้ขนาดที่ได้อยู่กึ่งกลางสัญญาณที่ได้จากออสซิลโลสโคป ซึ่งช่องแรกของสัญญาณเป็นการเคลื่อนที่ต่อเนื่องที่ความเร็วประมาณ 45 มิลลิเมตรต่อวินาที แรงดันจากออสซิลโลสโคปที่วัดได้อยู่ระหว่าง $3.5 - 4$ โวลต์ แต่ของวงจรแปลงสัญญาณอยู่ระหว่าง $3.7 - 3.8$ โวลต์ ช่องที่สองคือเวลาระหว่าง 15 – 50 วินาที เป็นการควบคุมให้แท่นเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที แบบตำแหน่งของแท่นเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น แรงดันด้านบวกจากวงจรแปลงสัญญาณมีขนาดต่ำกว่าคืออยู่ข้างล่างของสัญญาณจากออสซิลโลสโคปพิจารณาจากสภาวะแรงดันได้ขึ้น พิจารณาช่องที่สามระหว่าง 55 – 90 วินาที แรงดันด้านลบจากวงจรแปลงสัญญาณมีขนาดสูง

กว่า เพราะสัญญาณจากวงจรอยู่ขอบบนของสัญญาณจากออสซิลโลสโคป เมื่อพิจารณาออกจากระดับแรงดันศูนย์โวลต์



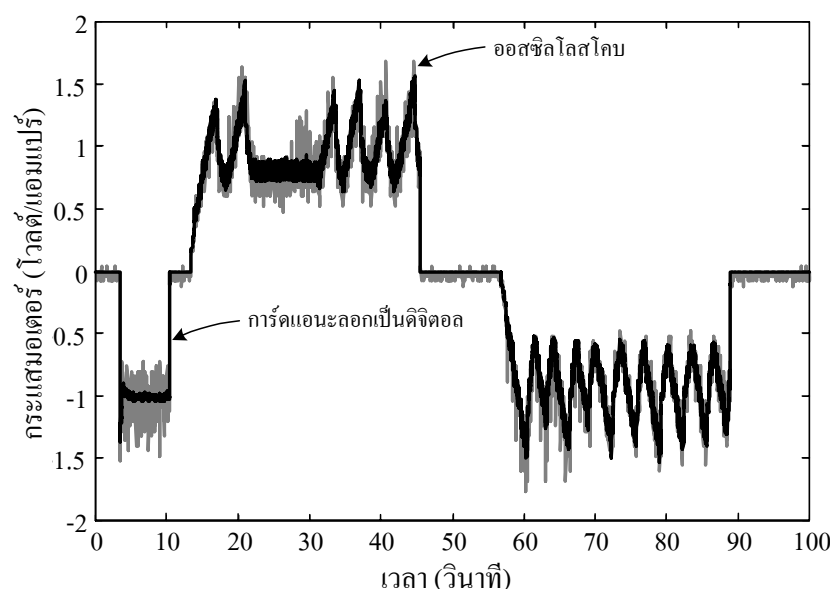
รูปที่ ก.29 การเปรียบเทียบสัญญาณจากวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่ช่องสัญญาณ 2



รูปที่ ก.30 การเปรียบเทียบสัญญาณจากวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่ช่องสัญญาณ 3

การเปรียบเทียบข้อมูลชุดที่สองจากช่องสัญญาณที่ 2 โดยทำการวัดสัญญาณตำแหน่งที่มีระดับแรงดันระหว่าง 0 – 4 โวลต์ ดังรูปที่ ก.29 โดยสีของเส้นสัญญาณเช่นเดียวกับรูปที่ ก.28 เนื่องจากแรงดันมีเฉพาะด้านบวก ดังนั้นจุดที่วัดจะทำการวัดจากจุดเดียวกัน โดยจากภาพแรงดันที่วัดโดยวงจรแปลงสัญญาณจะมีขนาดเท่ากันที่ระดับแรงดันมากกว่า 0.7 โวลต์ เนื่องจากเส้นสัญญาณอยู่กึ่งกลางของออสซิลโลสโคป แต่ส่วนที่แรงดันมีขนาดต่ำกว่า 0.7 โวลต์ ขนาดของแรงดันที่วัดได้มีขนาดสูงกว่าเล็กน้อย เนื่องจากสัญญาณจากวงจรแปลงสัญญาณอยู่ขอบบนของสัญญาณจากออสซิลโลสโคป

การเปรียบเทียบข้อมูลชุดที่สามจากช่องสัญญาณที่ 3 โดยทำการวัดสัญญาณความเร็วในการเคลื่อนที่แทน ดังรูปที่ ก.30 มีขนาดแรงดันระหว่าง -4 ถึง 4 โวลต์ช่วงเวลา 100 วินาที โดยสัญญาณที่วัดได้มีขนาดและเวลาที่สัมพันธ์กันกับสัญญาณของออสซิลโลสโคป มีขนาดเท่ากันทั้งสัญญาณทางด้านบวกและด้านลบ เนื่องจากเส้นสัญญาณทั้งสองทับกันตลอดที่วัด โดยไม่ว่าจะเป็นความเร็วแบบต่อเนื่องหรือแบบคิดค้นทั้งไปและกลับ



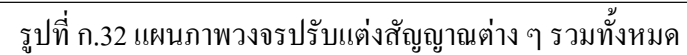
รูปที่ ก.31 การเปรียบเทียบสัญญาณจากวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่ช่องสัญญาณ 4

การเปรียบเทียบข้อมูลชุดสุดท้ายจากช่องสัญญาณที่ 4 โดยทำการวัดสัญญาณกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์ ดังรูปที่ ก.31 มีขนาดระหว่าง -2 ถึง 2 โวลต์ช่วงเวลา 100 วินาที โดยมีความหมายเป็นกระแสจริงระหว่าง -2 ถึง 2 แอมแปร์ ขนาดที่วัดได้จากวงจรแปลงสัญญาณเป็นค่าเฉลี่ย เช่นเดียวกับแรงดันดังรูปที่ 3.28 เนื่องจากแรงดันและกระแสของมอเตอร์มาจากการสวิตช์ซึ่งโดย

วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง จึงมีสัญญาณรบกวนสูง ดังนั้นการวัดโดยวงจรแปลงสัญญาณจึงมีสัญญาณรบกวนลดลงดังภาพ จึงมีขนาดเป็นค่าเฉลี่ยอยู่กึ่งกลางสัญญาณจากออสซิลโลสโคป ไม่ว่าจะเป็นสภาวะกระแสต่อเนื่องแบบคงที่และแบบเปลี่ยนแปลง และมีขนาดเท่ากันทั้งด้านบวกและลบ

ดังนั้นจากการเปรียบเทียบทั้ง 4 ช่องสัญญาณที่ปรากฏบนรูปที่ผ่านมา เห็นได้ว่าขนาดของแรงดันที่วัดได้จากวงจรแปลงสัญญาณมีขนาดและความเร็วสัมพันธ์กับสัญญาณที่วัดโดยมีค่าความผิดพลาดเล็กน้อยระหว่างสัญญาณทางบวกและลบ และสามารถวัดสัญญาณได้โดยไม่มีการคลิปลสัญญาณ โดยสัญญาณมีขนาดไม่เกินค่าที่ออกแบบไว้ จึงสรุปได้ว่าวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล วงจรปรับแต่งสัญญาณต่างๆ ออกแบบได้มีความเหมาะสมกัน

การติดตั้งวงจรการควบคุม วงจรการปรับแต่งสัญญาณ และระบบขับเคลื่อนแท่นเชิงเส้น ดังรูปที่ ก.32



ภาคผนวก ข

ผลการค้นหาพารามิเตอร์ของระบบแบบออฟไลน์
โดยวิธีจินเนติกอัลกอริทึมและวิธีค้นหาแบบตาบ

ตารางที่ ข.1 ผลจากการค้นหาพารามิเตอร์ของระบบช่วงแรกโดยวิธีจิ้นแนติกอัลกอริทึม

ความเร็ว	ตำแหน่ง (mm)	F_S (N)	F_C (N)	F_V (Ns/mm)	k_{spring} (N/mm)	vss (mm/s)	m (kg)	error (mm ²)	รอบการ ทำงาน
5 mm/s	49 – 87	130.257	46.856	0.800	0.414	2.781	13.170	1172.970	92
	87 – 126	133.189	48.750	0.841	0.455	2.906	14.664	3052.257	70
	126 – 168	137.659	45.014	0.834	0.457	4.000	6.669	4726.559	100
	168 – 208	139.355	48.397	0.781	0.452	3.263	9.693	2355.880	46
	208 – 249	140.007	48.407	0.840	0.443	2.682	12.691	1133.352	35
	249 – 288	131.394	46.460	0.838	0.403	2.890	11.695	1269.162	64
	288 – 327	138.263	49.392	0.821	0.489	3.298	10.706	1411.259	54
	327 – 350	134.712	59.785	0.840	0.259	3.490	10.272	29.048	27
	ค่าเฉลี่ย	135.604	49.133	0.824	0.421	3.164	11.195	1893.811	61
	ค่าสูงสุด	140.007	59.785	0.841	0.489	4.000	14.664	4726.559	100
	ค่าต่ำสุด	130.257	45.014	0.781	0.259	2.682	6.669	29.048	27
	ค่าเบี่ยงเบน	3.736	4.536	0.022	0.071	0.440	2.457	1452.990	26
-5 mm/s	350 – 312	-135.036	-42.158	-0.808	0.497	5.205	6.879	879.550	66
	312 – 277	-126.166	-47.606	-0.845	0.304	3.263	14.478	131.750	37
	277 – 241	-131.451	-47.030	-0.801	0.431	4.255	10.614	304.530	38
	241 – 214	-104.606	-45.041	-0.751	0.351	2.750	9.711	519.910	54
	214 – 178	-122.060	-48.036	-0.772	0.300	2.524	10.552	355.060	37
	178 – 145	-121.017	-45.782	-0.761	0.366	3.997	10.486	339.650	35
	145 – 111	-118.648	-45.404	-0.822	0.229	3.184	12.364	218.820	39
	111 – 72	-134.595	-47.782	-0.762	0.415	2.903	8.826	587.510	39
	72 – 49	-119.990	-57.955	-0.819	0.212	2.558	14.598	484.000	28
	ค่าเฉลี่ย	-124.711	-47.883	-0.797	0.352	3.347	10.813	495.820	41
	ค่าต่ำสุด	-135.036	-57.956	-0.846	0.212	2.525	6.880	131.750	66
	ค่าสูงสุด	-104.607	-42.158	-0.751	0.497	5.206	14.598	879.550	28
	ค่าเบี่ยงเบน	9.508	4.358	0.033	0.091	0.873	2.414	308.770	10

ตารางที่ ข.2 ผลจากการค้นหาพารามิเตอร์ของระบบช่วงแรกโดยวิธีค้นหาแบบตาบู่

ความเร็ว	ตำแหน่ง (mm)	F_S (N)	F_C (N)	F_V (Ns/mm)	k_{spring} (N/mm)	vss (mm/s)	m (kg)	error (mm ²)	รอบการ ทำงาน
5 mm/s	49 – 87	121.836	47.349	0.755	0.248	4.028	7.394	1288.539	38
	87 – 126	134.915	49.977	0.814	0.469	3.849	9.750	4559.774	24
	126 – 168	132.278	45.332	0.822	0.362	3.977	10.703	4860.070	60
	168 – 208	140.491	49.188	0.835	0.484	3.638	9.473	2314.662	10
	208 – 249	133.303	46.007	0.791	0.326	3.153	8.401	2421.417	36
	249 – 288	136.705	47.430	0.779	0.468	2.750	7.832	1991.172	75
	288 – 327	126.098	46.557	0.841	0.259	2.536	14.553	432.330	94
	327 – 350	131.961	59.642	0.791	0.211	3.986	10.262	28.312	24
	ค่าเฉลี่ย	132.198	48.935	0.803	0.354	3.490	9.796	2237.035	45
	ค่าสูงสุด	140.491	59.642	0.841	0.484	4.028	14.553	4860.070	94
	ค่าต่ำสุด	121.836	45.332	0.755	0.211	2.536	7.394	28.312	10
	ค่าเบี่ยงเบน	5.884	4.595	0.030	0.110	0.597	2.247	1748.916	29
-5 mm/s	350 – 312	-135.487	-47.876	-0.832	0.499	4.264	14.676	882.343	82
	312 – 277	-129.510	-50.006	-0.844	0.380	3.547	13.883	186.658	77
	277 – 241	-134.611	-47.699	-0.777	0.493	3.490	8.811	298.829	69
	241 – 214	-105.266	-47.483	-0.783	0.374	2.972	12.701	530.776	43
	214 – 178	-126.188	-48.508	-0.837	0.388	3.468	9.566	823.812	143
	178 – 145	-122.883	-49.875	-0.792	0.406	3.014	14.255	317.072	107
	145 – 111	-118.568	-46.976	-0.791	0.235	3.042	8.886	326.668	39
	111 – 72	-133.120	-49.301	-0.774	0.394	2.888	9.148	655.819	133
	72 – 49	-122.149	-58.650	-0.811	0.267	4.089	13.858	486.020	60
	ค่าเฉลี่ย	-125.309	-49.597	-0.805	0.382	3.419	11.754	500.889	83
	ค่าต่ำสุด	-135.487	-58.650	-0.844	0.235	2.888	8.811	186.658	143
	ค่าสูงสุด	-105.266	-46.976	-0.774	0.499	4.264	14.676	882.343	39
	ค่าเบี่ยงเบน	9.569	3.560	0.027	0.088	0.497	2.577	244.595	37

ตารางที่ ข.3 ผลจากการค้นหาพารามิเตอร์ของระบบช่วงที่สองโดยวิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึม

ความเร็ว	ตำแหน่ง (mm)	F_S (N)	F_C (N)	F_V (Ns/mm)	k_{spring} (N/mm)	vss (mm/s)	m (kg)	error (mm ²)	รอบการ ทำงาน
5 mm/s	49 – 87	124.087	47.000	0.797	0.348	2.898	11.284	1294.860	86
	87 – 126	128.443	46.951	0.802	0.389	3.936	10.487	2837.348	42
	126 – 168	130.291	46.495	0.798	0.397	2.590	11.345	3870.822	68
	168 – 208	132.335	48.469	0.800	0.365	2.883	11.276	2461.458	45
	208 – 249	137.600	47.532	0.795	0.372	2.524	10.688	1116.348	45
	249 – 288	128.059	47.082	0.800	0.392	2.657	10.891	1106.280	85
	288 – 327	130.805	46.465	0.799	0.390	2.906	11.087	725.897	76
	327 – 350	140.152	53.781	0.806	0.361	4.468	10.405	62.112	28
	ค่าเฉลี่ย	131.472	47.972	0.800	0.377	3.108	10.933	1684.391	59
	ค่าสูงสุด	140.152	53.781	0.806	0.397	4.468	11.345	3870.822	86
	ค่าต่ำสุด	124.087	46.465	0.795	0.348	2.524	10.405	62.112	28
	ค่าเบี่ยงเบน	5.221	2.433	0.003	0.018	0.706	0.373	1257.704	22
-5 mm/s	350 – 312	-128.606	-46.103	-0.800	0.375	2.695	11.214	495.282	54
	312 – 277	-130.715	-47.302	-0.800	0.356	2.870	10.591	114.010	27
	277 – 241	-126.714	-46.848	-0.801	0.364	2.822	11.138	246.054	32
	241 – 214	-103.153	-46.000	-0.791	0.357	2.601	10.767	501.484	68
	214 – 178	-123.174	-47.212	-0.804	0.379	2.629	11.103	426.401	34
	178 – 145	-120.729	-47.725	-0.809	0.399	3.065	10.830	313.676	36
	145 – 111	-121.202	-47.752	-0.808	0.343	3.618	10.988	267.870	38
	111 – 72	-134.083	-47.325	-0.810	0.377	3.875	10.401	745.162	100
	72 – 49	-124.248	-53.999	-0.810	0.351	4.499	10.404	504.487	62
	ค่าเฉลี่ย	-123.625	-47.807	-0.804	0.367	3.186	10.826	401.603	50
	ค่าต่ำสุด	-134.083	-53.999	-0.810	0.343	2.601	10.401	114.010	100
	ค่าสูงสุด	-103.153	-46.000	-0.791	0.399	4.499	11.214	745.162	27
	ค่าเบี่ยงเบน	8.860	2.405	0.006	0.017	0.664	0.310	187.252	24

ตารางที่ ข.4 ผลจากการค้นหาพารามิเตอร์ของระบบช่วงที่สองโดยวิธีค้นหาแบบตาม

ความเร็ว	ตำแหน่ง (mm)	F_S (N)	F_C (N)	F_V (Ns/mm)	k_{spring} (N/mm)	vss (mm/s)	m (kg)	error (mm ²)	รอบการ ทำงาน
5 mm/s	49 – 87	125.995	46.389	0.791	0.387	3.413	10.675	1445.628	101
	87 – 126	128.665	46.768	0.800	0.378	2.775	10.991	3065.441	147
	126 – 168	131.410	47.321	0.796	0.378	3.944	11.047	6019.315	3
	168 – 208	134.998	46.442	0.798	0.362	2.978	10.703	1940.210	30
	208 – 249	137.049	46.395	0.807	0.363	2.675	11.091	1348.298	148
	249 – 288	127.996	46.276	0.804	0.391	2.677	10.630	1226.831	123
	288 – 327	130.122	47.294	0.797	0.383	2.756	11.188	1053.810	42
	327 – 350	140.448	51.380	0.805	0.364	4.353	10.665	86.715	8
	ค่าเฉลี่ย	132.085	47.283	0.800	0.376	3.197	10.874	2023.281	75
	ค่าสูงสุด	140.448	51.380	0.807	0.391	4.353	11.188	6019.315	148
	ค่าต่ำสุด	125.995	46.276	0.791	0.362	2.675	10.630	86.715	3
	ค่าเบี่ยงเบน	4.969	1.705	0.005	0.012	0.644	0.227	1819.540	61
-5 mm/s	350 – 312	-128.355	-46.359	-0.801	0.368	2.901	11.043	674.033	60
	312 – 277	-130.447	-50.907	-0.795	0.375	2.985	11.274	150.420	49
	277 – 241	-126.906	-46.169	-0.804	0.367	2.736	10.842	253.123	75
	241 – 214	-103.176	-46.217	-0.805	0.354	2.541	10.672	567.372	72
	214 – 178	-123.922	-48.375	-0.792	0.394	2.651	10.697	564.508	67
	178 – 145	-118.156	-47.475	-0.794	0.345	3.172	10.951	309.455	85
	145 – 111	-122.473	-48.774	-0.806	0.363	2.531	10.737	115.506	89
	111 – 72	-133.213	-46.186	-0.793	0.350	3.098	11.201	549.490	77
	72 – 49	-124.234	-53.976	-0.808	0.352	4.427	10.964	508.507	147
	ค่าเฉลี่ย	-123.431	-48.271	-0.800	0.363	3.005	10.931	410.268	80
	ค่าต่ำสุด	-133.213	-53.976	-0.808	0.345	2.531	10.672	115.506	147
	ค่าสูงสุด	-103.176	-46.169	-0.792	0.394	4.427	11.274	674.033	49
	ค่าเบี่ยงเบน	8.811	2.670	0.006	0.015	0.582	0.216	205.043	28

ตารางที่ ข.5 ผลจากการค้นหาพารามิเตอร์ของระบบช่วงที่สามโดยวิธีจิ้นเนติกอัลกอริทึม

ความเร็ว	ตำแหน่ง (mm)	F_S (N)	F_C (N)	F_V (Ns/mm)	k_{spring} (N/mm)	vss (mm/s)	m (kg)	error (mm ²)	รอบการ ทำงาน
5 mm/s	49 – 87	125.337	46.358	0.799	0.370	3.082	10.900	1521.841	30
	87 – 126	127.456	46.687	0.795	0.370	3.365	10.900	2648.277	75
	126 – 168	129.313	46.399	0.800	0.370	3.745	10.900	5848.452	45
	168 – 208	135.705	47.683	0.801	0.370	2.643	10.900	1315.184	38
	208 – 249	136.510	47.455	0.791	0.370	3.750	10.900	1759.748	20
	249 – 288	126.945	46.497	0.810	0.370	2.589	10.900	1080.403	64
	288 – 327	129.947	46.702	0.793	0.370	2.886	10.900	1475.391	45
	327 – 350	140.613	53.996	0.809	0.370	4.499	10.900	65.491	28
	ค่าเฉลี่ย	131.478	47.722	0.800	0.370	3.320	10.900	1964.348	43
	ค่าสูงสุด	140.613	53.996	0.810	0.370	4.499	10.900	5848.452	75
	ค่าต่ำสุด	125.337	46.358	0.791	0.370	2.589	10.900	65.491	20
	ค่าเบี่ยงเบน	5.452	2.582	0.007	0.000	0.654	0.000	1725.407	19
-5 mm/s	350 – 312	-129.211	-46.148	-0.798	0.370	2.661	10.900	416.371	31
	312 – 277	-130.703	-48.850	-0.795	0.370	2.721	10.900	82.631	24
	277 – 241	-127.384	-47.651	-0.807	0.370	2.513	10.900	259.693	39
	241 – 214	-103.719	-46.250	-0.792	0.370	2.767	10.900	498.234	39
	214 – 178	-122.838	-48.251	-0.809	0.370	2.784	10.900	768.475	56
	178 – 145	-119.689	-46.096	-0.798	0.370	2.526	10.900	293.105	39
	145 – 111	-122.777	-48.556	-0.804	0.370	2.627	10.900	195.744	39
	111 – 72	-134.252	-46.004	-0.808	0.370	3.133	10.900	473.068	38
	72 – 49	-125.120	-53.993	-0.810	0.370	4.499	10.900	514.477	39
	ค่าเฉลี่ย	-123.966	-47.978	-0.802	0.370	2.914	10.900	389.089	38
	ค่าต่ำสุด	-134.252	-53.993	-0.810	0.370	2.513	10.900	82.631	56
	ค่าสูงสุด	-103.719	-46.004	-0.792	0.370	4.499	10.900	768.475	24
	ค่าเบี่ยงเบน	8.822	2.530	0.007	0.000	0.622	0.000	205.128	8

ตารางที่ ข.6 ผลจากการค้นหาพารามิเตอร์ของระบบช่วงที่สามโดยวิธีค้นหาแบบตามู

ความเร็ว	ตำแหน่ง (mm)	F_S (N)	F_C (N)	F_V (Ns/mm)	k_{spring} (N/mm)	vss (mm/s)	m (kg)	error (mm ²)	รอบการ ทำงาน
5 mm/s	49 – 87	125.102	47.105	0.807	0.370	3.377	10.900	1447.427	61
	87 – 126	127.422	46.695	0.799	0.370	3.669	10.900	3037.117	89
	126 – 168	131.383	47.939	0.807	0.370	4.276	10.900	6312.186	65
	168 – 208	131.106	46.578	0.805	0.370	4.140	10.900	3279.142	30
	208 – 249	137.399	46.421	0.800	0.370	2.730	10.900	1303.861	98
	249 – 288	126.931	47.101	0.793	0.370	2.523	10.900	1230.618	64
	288 – 327	129.714	46.893	0.797	0.370	3.382	10.900	1431.241	38
	327 – 350	140.766	53.455	0.805	0.370	4.280	10.900	73.883	18
	ค่าเฉลี่ย	131.228	47.773	0.802	0.370	3.547	10.900	2264.434	57
	ค่าสูงสุด	140.766	53.455	0.807	0.370	4.280	10.900	6312.186	98
	ค่าต่ำสุด	125.102	46.421	0.793	0.370	2.523	10.900	73.883	18
	ค่าเบี่ยงเบน	5.370	2.342	0.005	0.000	0.677	0.000	1933.268	28
-5 mm/s	350 – 312	-129.159	-46.709	-0.799	0.370	3.093	10.900	987.400	27
	312 – 277	-130.060	-49.244	-0.805	0.370	2.922	10.900	123.223	82
	277 – 241	-127.167	-46.928	-0.804	0.370	2.595	10.900	266.133	97
	241 – 214	-103.773	-46.617	-0.805	0.370	2.924	10.900	563.847	71
	214 – 178	-122.545	-47.336	-0.798	0.370	2.911	10.900	715.567	68
	178 – 145	-119.346	-49.979	-0.795	0.370	2.987	10.900	360.019	34
	145 – 111	-122.941	-49.474	-0.793	0.370	3.116	10.900	228.919	52
	111 – 72	-134.324	-46.066	-0.801	0.370	2.588	10.900	718.979	3
	72 – 49	-125.146	-53.982	-0.808	0.370	4.415	10.900	518.976	96
	ค่าเฉลี่ย	-123.829	-48.482	-0.801	0.370	3.061	10.900	498.118	59
	ค่าต่ำสุด	-134.324	-53.982	-0.808	0.370	2.588	10.900	123.223	97
	ค่าสูงสุด	-103.773	-46.066	-0.793	0.370	4.415	10.900	987.400	3
	ค่าเบี่ยงเบน	8.768	2.506	0.005	0.000	0.541	0.000	279.758	32

ตารางที่ ข.7 ผลจากการค้นหาพารามิเตอร์ของระบบช่วงที่สี่โดยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม

ความเร็ว	ตำแหน่ง (mm)	F_S (N)	F_C (N)	F_V (Ns/mm)	k_{spring} (N/mm)	vss (mm/s)	m (kg)	error (mm ²)	รอบการ ทำงาน
5 mm/s	49 – 87	125.261	47.750	0.795	0.370	3.198	10.900	1683.482	28
	87 – 126	127.601	47.750	0.799	0.370	3.198	10.900	2734.357	21
	126 – 168	130.781	47.750	0.799	0.370	3.198	10.900	4415.258	28
	168 – 208	130.807	47.750	0.810	0.370	3.198	10.900	4050.973	56
	208 – 249	136.834	47.750	0.801	0.370	3.198	10.900	1847.153	31
	249 – 288	126.700	47.750	0.805	0.370	3.198	10.900	4127.355	28
	288 – 327	129.729	47.750	0.794	0.370	3.198	10.900	1501.579	46
	327 – 350	141.235	47.750	0.810	0.370	3.198	10.900	162.264	16
	ค่าเฉลี่ย	131.118	47.750	0.802	0.370	3.198	10.900	2565.302	32
	ค่าสูงสุด	141.235	47.750	0.810	0.370	3.198	10.900	4415.258	56
	ค่าต่ำสุด	125.261	47.750	0.794	0.370	3.198	10.900	162.264	16
	ค่าเบี่ยงเบน	5.390	0.000	0.006	0.000	0.000	0.000	1525.853	13
-5 mm/s	350 – 312	-131.683	-48.230	-0.790	0.370	3.198	10.900	1717.634	39
	312 – 277	-130.644	-48.230	-0.796	0.370	3.198	10.900	112.287	28
	277 – 241	-127.230	-48.230	-0.808	0.370	3.198	10.900	336.163	30
	241 – 214	-103.834	-48.230	-0.790	0.370	3.198	10.900	969.192	29
	214 – 178	-122.523	-48.230	-0.793	0.370	3.198	10.900	695.412	38
	178 – 145	-119.353	-48.230	-0.810	0.370	3.198	10.900	265.337	38
	145 – 111	-122.856	-48.230	-0.796	0.370	3.198	10.900	235.424	36
	111 – 72	-134.723	-48.230	-0.793	0.370	3.198	10.900	891.453	38
	72 – 49	-126.939	-48.230	-0.810	0.370	3.198	10.900	627.162	24
	ค่าเฉลี่ย	-124.421	-48.230	-0.799	0.370	3.198	10.900	650.007	33
	ค่าต่ำสุด	-134.723	-48.230	-0.810	0.370	3.198	10.900	112.287	39
	ค่าสูงสุด	-103.834	-48.230	-0.790	0.370	3.198	10.900	1717.634	24
	ค่าเบี่ยงเบน	9.134	0.000	0.008	0.000	0.000	0.000	501.258	6

ตารางที่ ข.8 ผลจากการค้นหาพารามิเตอร์ของระบบช่วงที่สี่โดยวิธีค้นหาแบบตามู

ความเร็ว	ตำแหน่ง (mm)	F_S (N)	F_C (N)	F_V (Ns/mm)	k_{spring} (N/mm)	vss (mm/s)	m (kg)	error (mm ²)	รอบการ ทำงาน
5 mm/s	49 – 87	125.040	47.750	0.800	0.370	3.198	10.900	1594.874	69
	87 – 126	127.612	47.750	0.806	0.370	3.198	10.900	4493.631	98
	126 – 168	128.047	47.750	0.795	0.370	3.198	10.900	4477.872	59
	168 – 208	130.806	47.750	0.804	0.370	3.198	10.900	4116.217	89
	208 – 249	136.904	47.750	0.798	0.370	3.198	10.900	1884.698	89
	249 – 288	126.987	47.750	0.801	0.370	3.198	10.900	2586.563	58
	288 – 327	129.728	47.750	0.794	0.370	3.198	10.900	1501.266	83
	327 – 350	141.041	47.750	0.804	0.370	3.198	10.900	166.581	2
	ค่าเฉลี่ย	130.771	47.750	0.800	0.370	3.198	10.900	2602.713	68
	ค่าสูงสุด	141.041	47.750	0.806	0.370	3.198	10.900	4493.631	98
	ค่าต่ำสุด	125.040	47.750	0.794	0.370	3.198	10.900	166.581	2
	ค่าเบี่ยงเบน	5.461	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	1606.325	31
-5 mm/s	350 – 312	-128.660	-48.230	-0.792	0.370	3.198	10.900	1302.642	54
	312 – 277	-130.014	-48.230	-0.806	0.370	3.198	10.900	109.523	12
	277 – 241	-127.137	-48.230	-0.798	0.370	3.198	10.900	325.432	45
	241 – 214	-103.577	-48.230	-0.797	0.370	3.198	10.900	841.560	99
	214 – 178	-122.525	-48.230	-0.795	0.370	3.198	10.900	779.146	33
	178 – 145	-119.398	-48.230	-0.805	0.370	3.198	10.900	314.491	76
	145 – 111	-122.903	-48.230	-0.794	0.370	3.198	10.900	233.761	61
	111 – 72	-133.975	-48.230	-0.802	0.370	3.198	10.900	947.030	6
	72 – 49	-126.930	-48.230	-0.810	0.370	3.198	10.900	627.514	91
	ค่าเฉลี่ย	-123.902	-48.230	-0.800	0.370	3.198	10.900	609.011	53
	ค่าต่ำสุด	-133.975	-48.230	-0.810	0.370	3.198	10.900	109.523	99
	ค่าสูงสุด	-103.577	-48.230	-0.792	0.370	3.198	10.900	1302.642	6
	ค่าเบี่ยงเบน	8.785	0.000	0.006	0.000	0.000	0.000	393.098	33

ภาคผนวก ค

ผลการปรับแต่งพารามิเตอร์ของระบบแบบออนไลน์
โดยอาศัยหลักการฟuzzyลอจิก

ตารางที่ ค.1 ผลทดสอบแบบจำลองแรงเสียดทานก่อนปรับแต่งพารามิเตอร์ของระบบแบบออนไลน์
ที่ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที

รอบใน การ ทดสอบ	ทางบวก				ทางลบ			
	Error (mm ² /จุด)	จำนวน (จุด)	F _{C+} (N)	F _{V+} (Ns/mm)	Error (mm ² /จุด)	จำนวน (จุด)	F _{C+} (N)	F _{V+} (Ns/mm)
1	12.086	667	47.75	0.801	10.223	681	-48.23	-0.799
2	12.402	669	47.75	0.801	4.694	664	-48.23	-0.799
3	10.815	651	47.75	0.801	7.184	680	-48.23	-0.799
4	6.946	661	47.75	0.801	8.436	659	-48.23	-0.799
5	8.817	653	47.75	0.801	9.014	658	-48.23	-0.799
6	10.228	727	47.75	0.801	7.955	717	-48.23	-0.799
7	11.715	691	47.75	0.801	9.895	679	-48.23	-0.799
8	8.838	672	47.75	0.801	10.133	669	-48.23	-0.799
9	8.041	683	47.75	0.801	6.080	673	-48.23	-0.799
10	6.397	689	47.75	0.801	10.010	703	-48.23	-0.799
11	4.836	693	47.75	0.801	8.842	708	-48.23	-0.799
ค่าเฉลี่ย	9.193	678	47.75	0.801	8.406	681	-48.23	-0.799

ตารางที่ ค.2 ผลทดสอบการปรับแต่งพารามิเตอร์ของระบบแบบออนไลน์(แบบปรับ F_C เฉลี่ย)ที่
ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที

รอบใน การ ทดสอบ	ทางบวก				ทางลบ			
	Error (mm ² /จุด)	จำนวน (จุด)	F_{C+} (N)	F_{V+} (Ns/mm)	Error (mm ² /จุด)	จำนวน (จุด)	F_{C+} (N)	F_{V+} (Ns/mm)
1	5.479	668	48.125	0.801	6.435	683	-48.471	-0.799
2	6.578	701	48.637	0.801	6.401	688	-48.824	-0.799
3	7.715	700	50.150	0.801	9.393	667	-49.637	-0.799
4	9.990	664	51.264	0.801	10.491	705	-50.035	-0.799
5	7.778	703	50.862	0.801	6.454	700	-50.160	-0.799
6	8.702	692	52.640	0.801	5.805	693	-50.438	-0.799
7	9.647	670	53.572	0.801	8.933	660	-51.587	-0.799
8	8.905	713	53.933	0.801	9.491	694	-52.103	-0.799
9	8.137	696	54.540	0.801	7.153	690	-53.041	-0.799
10	7.820	698	55.324	0.801	10.032	688	-53.689	-0.799
11	8.615	681	55.939	0.801	7.927	690	-54.145	-0.799
12	7.503	695	56.560	0.801	7.097	704	-54.392	-0.799
13	10.900	691	58.257	0.801	7.809	681	-54.827	-0.799
14	9.746	679	59.604	0.801	7.027	652	-54.772	-0.799
15	10.250	669	60.588	0.801	9.748	670	-55.621	-0.799
16	9.715	670	61.362	0.801	7.066	678	-56.316	-0.799
17	9.995	662	61.873	0.801	6.990	687	-56.762	-0.799
18	9.445	706	61.533	0.801	4.948	667	-56.762	-0.799
19	9.729	667	61.589	0.801	8.042	668	-57.582	-0.799
20	12.384	681	61.981	0.801	8.494	657	-58.647	-0.799
21	8.791	670	62.127	0.801	7.428	672	-58.237	-0.799
22	8.789	682	62.196	0.801	8.210	662	-58.994	-0.799
ค่าเฉลี่ย	8.937	684.5	56.484		7.790	648.9	-53.866	
ค่าต่ำสุด	5.479		48.125		4.948		-58.994	
ค่าสูงสุด	12.384		62.196		10.491		-48.471	

ตารางที่ ก.3 ผลการปรับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน โดยวิธีการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์

ตำแหน่ง	รอบที่1	รอบที่2	รอบที่3	รอบที่4	รอบที่5	รอบที่6	รอบที่7	รอบที่8	รอบที่9	รอบที่10	รอบที่11	รอบที่12	รอบที่13	รอบที่14	รอบที่15	รอบที่16	รอบที่17	รอบที่18	รอบที่19	รอบที่20	ค่าเฉลี่ย
F _{S+(5)}	126.08	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.08	126.00	126.00	126.01
F _{S+(15)}	125.25	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.25	125.00	125.00	125.02
F _{S+(25)}	124.84	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	124.84	125.00	125.00	124.99
F _{S+(35)}	124.77	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	124.77	125.00	125.00	124.98
F _{S+(45)}	125.00	127.00	129.00	129.00	129.00	129.00	132.00	132.00	133.00	133.00	136.00	139.00	139.00	139.00	142.00	145.00	149.00	153.86	154.00	154.00	140.82
F _{S+(55)}	125.44	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.07	126.00	126.00	125.50
F _{S+(65)}	126.04	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.04	126.00	126.00	126.00
F _{S+(75)}	126.74	127.00	127.00	127.00	127.00	127.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	124.00	124.00	124.00	124.00	123.60	125.00	124.00	125.10
F _{S+(85)}	127.47	127.00	127.00	133.00	139.00	145.00	145.00	145.00	145.00	146.00	147.00	148.00	148.00	148.00	148.00	148.00	148.00	147.65	148.00	148.00	143.57
F _{S+(95)}	128.17	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.17	128.00	128.00	127.97
F _{S+(105)}	128.76	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	135.00	135.00	135.00	135.00	135.00	134.56	135.00	140.00	132.71
F _{S+(115)}	129.20	130.00	130.00	125.00	125.00	121.00	121.00	121.00	121.00	118.00	118.00	118.00	118.00	122.00	122.00	122.00	122.00	122.05	122.00	122.00	122.14
F _{S+(125)}	129.40	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	136.00	136.00	136.00	136.00	136.00	136.00	136.00	136.00	136.00	136.00	135.87	136.00	136.00	133.66
F _{S+(135)}	129.37	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	127.00	127.00	126.78	122.00	122.00	127.22
F _{S+(145)}	129.32	125.00	125.00	125.00	124.00	122.00	122.00	122.00	122.00	122.00	122.00	122.00	122.00	122.00	122.00	122.00	120.00	120.48	120.00	120.00	122.21
F _{S+(155)}	129.58	130.00	130.00	135.00	135.00	135.00	135.00	131.00	131.00	131.00	131.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.14	126.00	126.00	128.77
F _{S+(165)}	130.45	130.00	130.00	130.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	134.00	134.00	134.00	132.00	132.00	132.00	132.00	132.00	131.59	130.00	130.00	130.61
F _{S+(175)}	132.19	132.00	132.00	132.00	132.00	132.00	138.00	138.00	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	146.00	146.00	145.80	146.00	146.00	139.87
F _{S+(185)}	134.37	134.00	134.00	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	128.99	129.00	128.00	129.45
F _{S+(195)}	136.22	136.00	136.00	136.00	136.00	136.00	136.00	136.00	136.00	136.00	136.00	142.00	142.00	142.00	142.00	142.00	142.00	143.78	146.00	146.00	140.09
F _{S+(205)}	136.99	137.00	137.00	137.00	139.00	139.00	136.00	136.00	136.00	136.00	131.00	131.00	132.00	132.00	132.00	133.00	133.00	133.34	133.00	133.00	134.45
F _{S+(215)}	135.98	136.00	136.00	136.00	136.00	136.00	136.00	136.00	139.00	139.00	139.00	139.00	139.00	140.00	140.00	140.00	140.00	140.08	140.00	146.00	139.74

ตารางที่ ก.3 ผลการปรับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน โดยวิธีการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ (ต่อ)

ตำแหน่ง	รอบที่1	รอบที่2	รอบที่3	รอบที่4	รอบที่5	รอบที่6	รอบที่7	รอบที่8	รอบที่9	รอบที่10	รอบที่11	รอบที่12	รอบที่13	รอบที่14	รอบที่15	รอบที่16	รอบที่17	รอบที่18	รอบที่19	รอบที่20	ค่าเฉลี่ย
F _S +(225)	133.48	133.00	133.00	139.00	139.00	139.00	139.00	139.00	139.00	139.00	139.00	139.00	139.00	139.00	137.00	137.00	137.00	137.43	137.00	137.00	137.47
F _S +(235)	130.39	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	123.90	124.00	124.00	127.01
F _S +(245)	127.64	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	123.00	123.00	123.00	123.00	123.00	123.00	123.00	121.00	127.00	126.76	127.00	127.00	125.84
F _S +(255)	126.09	126.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	125.00	123.00	123.00	123.00	122.07	120.00	115.00	122.66
F _S +(265)	125.98	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	125.00	125.00	125.00	125.00	124.00	124.00	124.10	124.00	124.00	125.66
F _S +(275)	127.06	127.00	127.00	127.00	127.00	127.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	128.00	126.00	126.00	126.00	126.00	131.00	130.84	131.00	135.00	129.00
F _S +(285)	129.04	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	129.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	126.00	129.37	129.00	129.00	127.84
F _S +(295)	131.67	132.00	137.00	137.00	137.00	137.00	137.00	137.00	137.00	137.00	137.00	143.00	143.00	143.00	143.00	143.00	143.00	143.09	143.00	143.00	139.82
F _S +(305)	134.65	135.00	135.00	135.00	135.00	135.00	135.00	135.00	135.00	135.00	135.00	135.00	141.00	141.00	141.00	141.00	141.00	140.71	147.00	149.00	139.49
F _S +(315)	137.73	138.00	138.00	138.00	138.00	138.00	138.00	138.00	144.00	144.00	144.00	144.00	144.00	145.00	145.00	145.00	145.00	141.01	141.00	141.00	141.29
F _S +(325)	140.64	141.00	142.00	142.00	142.00	142.00	142.00	142.00	142.00	142.00	142.00	142.00	142.00	142.00	142.00	142.00	142.00	142.05	142.00	142.00	141.90
F _S +(335)	143.09	143.00	143.00	143.00	143.00	143.00	143.00	143.00	143.00	143.00	143.00	143.00	143.00	143.00	143.00	143.00	143.00	143.09	143.00	143.00	143.01
F _S +(345)	144.83	145.00	145.00	145.00	145.00	145.00	145.00	145.00	145.00	145.00	145.00	145.00	145.00	145.00	145.00	145.00	145.00	144.83	145.00	145.00	144.98
F _S +(355)	145.57	146.00	146.00	146.00	146.00	146.00	146.00	146.00	146.00	146.00	146.00	146.00	146.00	146.00	146.00	146.00	146.00	145.57	146.00	146.00	145.96
F _S +(365)	145.05	145.00	145.00	145.00	145.00	145.00	145.00	145.00	145.00	145.00	145.00	145.00	145.00	145.00	145.00	145.00	145.00	145.05	145.00	145.00	145.00
F _S +(375)	142.99	143.00	143.00	143.00	143.00	143.00	143.00	143.00	143.00	143.00	143.00	143.00	143.00	143.00	143.00	143.00	143.00	142.99	143.00	143.00	143.00
F _S +(385)	139.12	139.00	139.00	139.00	139.00	139.00	139.00	139.00	139.00	139.00	139.00	139.00	139.00	139.00	139.00	139.00	139.00	139.12	139.00	139.00	139.01
F _S +(395)	133.17	133.00	133.00	133.00	133.00	133.00	133.00	133.00	133.00	133.00	133.00	133.00	133.00	133.00	133.00	133.00	133.00	133.17	133.00	133.00	133.01
F _S (5)	-153.52	-153.52	-153.52	-153.52	-153.52	-153.52	-153.52	-153.52	-153.52	-153.52	-153.52	-153.52	-153.52	-153.52	-153.52	-153.52	-153.52	-153.52	-153.52	-153.52	-153.52
F _S (15)	-139.42	-139.00	-139.00	-139.00	-139.00	-139.00	-139.00	-139.00	-139.00	-139.00	-139.00	-139.00	-139.00	-139.00	-139.00	-139.00	-139.00	-139.42	-139.00	-139.00	-139.04
F _S (25)	-130.06	-130.00	-130.00	-130.00	-130.00	-130.00	-130.00	-130.00	-130.00	-130.00	-130.00	-130.00	-130.00	-130.00	-130.00	-130.00	-130.00	-130.06	-130.00	-130.00	-130.01

ตารางที่ ก.3 ผลการปรับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน โดยวิธีการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ (ต่อ)

ตำแหน่ง	รอบที่1	รอบที่2	รอบที่3	รอบที่4	รอบที่5	รอบที่6	รอบที่7	รอบที่8	รอบที่9	รอบที่10	รอบที่11	รอบที่12	รอบที่13	รอบที่14	รอบที่15	รอบที่16	รอบที่17	รอบที่18	รอบที่19	รอบที่20	ค่าเฉลี่ย
F _S (35)	-124.70	-125.00	-125.00	-125.00	-125.00	-125.00	-125.00	-125.00	-125.00	-125.00	-125.00	-125.00	-125.00	-125.00	-125.00	-125.00	-125.00	-124.70	-125.00	-125.00	-124.97
F _S (45)	-122.55	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-122.55	-123.00	-123.00	-122.96
F _S (55)	-122.87	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-122.87	-123.00	-123.00	-122.99
F _S (65)	-124.88	-125.00	-125.00	-125.00	-125.00	-125.00	-120.00	-120.00	-120.00	-120.00	-120.00	-120.00	-120.00	-120.00	-120.00	-120.00	-120.00	-120.45	-120.00	-120.00	-121.32
F _S (75)	-127.82	-128.00	-128.00	-128.00	-127.00	-127.00	-127.00	-127.00	-126.00	-124.00	-122.00	-122.00	-122.00	-122.00	-122.00	-122.00	-122.00	-122.16	-122.00	-122.00	-124.26
F _S (85)	-130.92	-131.00	-131.00	-131.00	-131.00	-131.00	-131.00	-131.00	-131.00	-131.00	-131.00	-131.00	-131.00	-131.00	-131.00	-130.00	-130.00	-130.27	-130.00	-130.00	-130.92
F _S (95)	-133.43	-127.00	-127.00	-127.00	-127.00	-121.00	-121.00	-121.00	-121.00	-121.00	-121.00	-121.00	-117.00	-117.00	-117.00	-117.00	-117.00	-117.42	-117.00	-117.00	-120.95
F _S (105)	-134.58	-135.00	-135.00	-135.00	-135.00	-135.00	-135.00	-135.00	-135.00	-135.00	-136.00	-136.00	-136.00	-130.00	-130.00	-130.00	-130.00	-125.27	-125.00	-125.00	-131.56
F _S (115)	-133.63	-134.00	-134.00	-134.00	-134.00	-134.00	-134.00	-134.00	-134.00	-134.00	-134.00	-134.00	-134.00	-134.00	-134.00	-134.00	-134.00	-133.63	-134.00	-133.00	-133.79
F _S (125)	-130.66	-131.00	-131.00	-131.00	-131.00	-129.00	-129.00	-129.00	-129.00	-129.00	-129.00	-129.00	-129.00	-129.00	-130.00	-130.00	-130.00	-129.99	-130.00	-130.00	-129.72
F _S (135)	-126.69	-127.00	-121.00	-120.00	-120.00	-120.00	-120.00	-120.00	-120.00	-120.00	-121.00	-121.00	-121.00	-121.00	-121.00	-121.00	-122.00	-123.42	-123.00	-123.00	-121.79
F _S (145)	-122.80	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-119.00	-120.00	-120.00	-120.00	-120.00	-120.00	-120.00	-120.00	-120.00	-119.69	-120.00	-116.00	-120.28
F _S (155)	-119.92	-120.00	-120.00	-120.00	-120.00	-120.00	-120.00	-120.00	-120.00	-120.00	-120.00	-120.00	-119.00	-119.00	-119.00	-119.00	-119.00	-119.32	-119.00	-119.00	-119.31
F _S (165)	-118.49	-118.00	-120.00	-120.00	-120.00	-120.00	-120.00	-120.00	-120.00	-120.00	-121.00	-121.00	-121.00	-121.00	-121.00	-121.00	-121.00	-121.48	-121.00	-122.00	-120.43
F _S (175)	-118.85	-119.00	-119.00	-119.00	-119.00	-119.00	-119.00	-119.00	-119.00	-119.00	-119.00	-119.00	-119.00	-119.00	-119.00	-119.00	-119.00	-119.44	-115.00	-115.00	-117.49
F _S (185)	-121.18	-121.00	-121.00	-121.00	-121.00	-121.00	-121.00	-121.00	-121.00	-121.00	-121.00	-121.00	-117.00	-117.00	-117.00	-117.00	-113.00	-113.43	-113.00	-114.00	-118.20
F _S (195)	-124.05	-118.00	-118.00	-118.00	-118.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.21	-123.00	-123.00	-122.19
F _S (205)	-125.10	-125.00	-125.00	-125.00	-119.00	-119.00	-119.00	-119.00	-120.00	-120.00	-120.00	-116.00	-116.00	-116.00	-116.00	-111.00	-111.00	-110.67	-111.00	-111.00	-116.99
F _S (215)	-121.94	-122.00	-122.00	-122.00	-122.00	-122.00	-122.00	-122.00	-122.00	-122.00	-122.00	-122.00	-123.00	-123.00	-123.00	-123.00	-124.00	-123.15	-123.00	-123.00	-122.57
F _S (225)	-113.99	-114.00	-114.00	-115.00	-116.00	-112.00	-107.00	-103.00	-106.00	-103.00	-103.00	-105.00	-105.00	-106.00	-106.00	-106.00	-106.00	-105.94	-108.00	-108.00	-108.26
F _S (235)	-106.04	-106.00	-106.00	-106.00	-106.00	-106.00	-106.00	-106.00	-106.00	-106.00	-106.00	-106.00	-107.00	-107.00	-103.00	-104.00	-106.00	-104.36	-102.00	-102.00	-104.80
F _S (245)	-103.77	-104.00	-104.00	-104.00	-106.00	-106.00	-106.00	-109.00	-110.00	-110.00	-111.00	-113.00	-113.00	-113.00	-113.00	-113.00	-113.00	-113.44	-113.00	-113.00	-110.01

ตารางที่ ค.3 ผลการปรับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน โดยวิธีการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ (ต่อ)

ประวัติผู้เขียน

นายกิตติวงศ์ สุธรรมโน เกิดเมื่อวันที่ 2 พฤษภาคม พ.ศ. 2516 ที่อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาช่างไฟฟ้า และสำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า-ไฟฟ้ากำลัง จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ได้รับการบรรจุเป็นข้าราชการครู ระดับ 3 ประจำแผนกวิชาไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เมื่อวันที่ 3 กรกฎาคม พ.ศ. 2538 และได้เคยสอนวิชาปฏิบัติการสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และได้รับทุนพัฒนานักศึกษาให้ศึกษาต่อระดับปริญญาโท ของกรมสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ให้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี