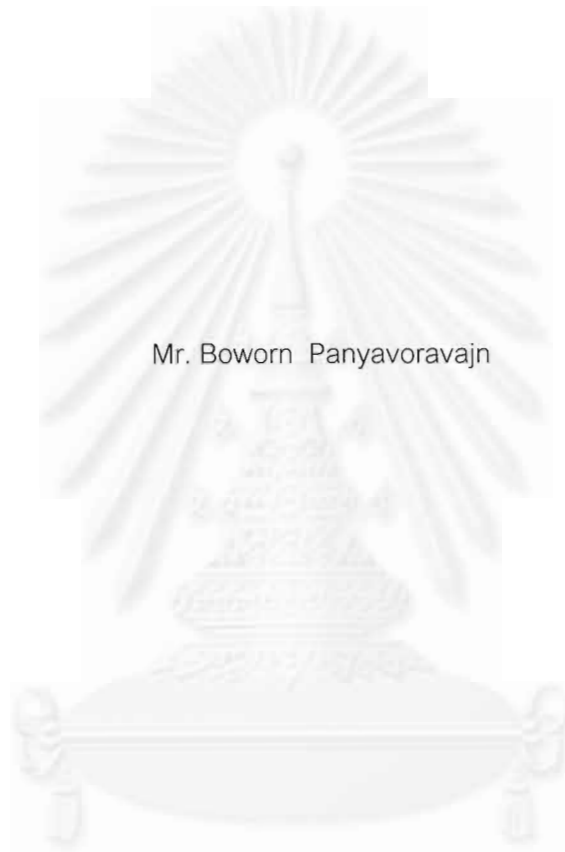


HYBRID CONTROL WITH AN IMPLICIT FORCE FOR A MANIPULATOR ARM



Mr. Boworn Panyavoravajn

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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 1999

ISBN 974-334-519-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การควบคุมแบบไฮบริดด้วยแรงแบบอิมพลีซิทีสำหรับแขนกล

โดย

นาย บวร ปัญญาวรวัจน์

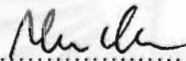
ภาควิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

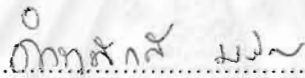
อาจารย์ที่ปรึกษา


รศ. ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

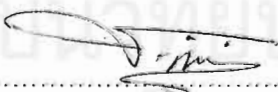

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดำรงศักดิ์ มลิลลา)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ)

บวร ปัญญาวัฒน์ : การควบคุมแบบไฮบริดด้วยแรงแบบอิมพลีซิฟสำหรับแขนกล (Hybrid Control with An Implicit Force for A Manipulator) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ , 82 หน้า. ISBN 974-334-519-1.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาวิธีการนำเอาระบบควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่งมาใช้กับแขนกลจุฬา 2 ซึ่งเป็นแขนกลที่ได้พัฒนาขึ้นในห้องทดลอง ซึ่งระบบควบคุมแรงที่ใช้มันไม่เพียงแต่ใช้ระบบควบคุมแรงแบบอิมพลีซิฟเท่านั้น แต่ยังสามารถทดลองเปรียบเทียบกับระบบควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิฟอีกด้วย ซึ่งวิธีการควบคุมแรงแบบอิมพลีซิฟนี้จะเป็นการเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบดังจะเห็นได้จากผลการทดลอง นอกจากนี้ระบบควบคุมแบบอิมพลีซิฟที่ใช้มันยังได้นำเอาวิธีการหาค่าความแข็งตั้งแบบออนไลน์มาใช้ด้วย

การทดลองนั้นทำกับวัตถุเวดล้อมหลายชนิด เช่นแผ่นเหล็กที่แข็งเกร็ง วัตถุอ่อนตัว แผ่นเหล็กที่มีความหยุ่นตัว และวัตถุที่พื้นผิวไม่ต่อเนื่อง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อควบคุมแรงและตำแหน่งของแขนกลที่กระทำกับวัตถุอ่อนตัวหรือหยุ่นตัวได้นั้น การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิฟจะให้ผลตอบสนองของแรงที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิฟ นอกจากนี้เมื่อควบคุมแรงและตำแหน่งของแขนกลที่กระทำกับวัตถุที่พื้นผิวไม่ต่อเนื่องนั้น การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิฟยังสามารถรักษาเสถียรภาพของการสัมผัสระหว่างแขนกลและวัตถุได้ดีกว่าการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิฟอีกด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....
ปีการศึกษา.....2542.....

ลายมือชื่อนิสิตบวร ปัญญาวัฒน์.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

3970876621 : MAJOR Mechanical Engineering

KEY WORD: Hybrid / Implicit / Stiffness / Force control / Manipulator

Boworn Panyavoravajjn : Hybrid Control with An Implicit Force for A Manipulator

THESIS ADVISOR : Associate Professor Dr. Viboon Sangveraphunsiri

82 pp. ISBN 974-334-519-1.

This thesis is to study the implementation techniques of Hybrid force/position control for a manipulator arm, the Chula II. The Chula II, the five-axis SCARA type robot, is developed in the Laboratory. Not only Implicit Force control is carried out in this thesis, the Explicit Force control is also used as the reference for comparison. The identification of the stiffness between manipulator and environment is included in the Implicit Force control technique. This method will improve the system's stability as shown in the experiments.

The experiments have been done with various types of environment, such as rigid steel plate, soft material, flexible steel plate and discontinuous surface. The results shown that the implicit force control gives better force response performance compare to the explicit force control for soft material and flexible steel plate. And the implicit force control can maintain the contact stability while moving on the discontinuous surface in contrast to the explicit force control.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล	ลายมือชื่อนิสิต	นร. บัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา	Dr. Viboon Sangveraphunsiri
ปีการศึกษา 2542	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆของการวิจัยด้วยดีมาโดยตลอด จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ผู้อุปการะให้ทุนการศึกษาและวิจัยแก่ข้าพเจ้าเป็นระยะเวลา 2 ปีเต็ม และบริษัท NSS จำกัด ที่ได้มอบทุนค่าใช้จ่ายเป็นเวลา 1 ปีเต็ม

นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยหุ่นยนต์อุตสาหกรรม ซึ่งเป็นสถานที่ทำวิจัย และขอขอบคุณ คุณไพรัช ตั้งพรประเสริฐ ที่ให้คำปรึกษาในการปรับปรุงแผนกล จุฬา 2, นิสิตปริญญาโทของห้องปฏิบัติการวิจัยหุ่นยนต์อุตสาหกรรมทุกท่าน ที่ให้ข้อคิดเห็นและกำลังใจเสมอมา

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงิน และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

บวร ปัญญาวรวัจน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญภาพ	ฅ
บทที่	
1. บทนำ	1
ความสำคัญและที่มาของโครงการวิทยานิพนธ์	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิทยานิพนธ์	2
ขอบเขตการดำเนินโครงการวิทยานิพนธ์	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิทยานิพนธ์	2
2. ระบบควบคุมแรงและตำแหน่ง	3
2.1 การควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่ง	3
2.1.1 การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิท	4
2.1.2 การควบคุมแรงแบบอิมพลลิซิท	6
2.1.3 Resove Acceleration Control of Manipulator	10
2.2 ปัญหาของการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่ง ของแขนกล	11
2.3 การควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่งของแขนกล ด้วยแรงแบบอิมพลลิซิทที่มีการหาค่าความแข็งดิ่งแบบออนไลน์	12
2.4 การนำทฤษฎีควบคุมไปใช้ทดลองกับแขนกล	14
3. การติดตั้ง(Implementation) ระบบควบคุมแรงและตำแหน่งกับ แขนหุ่นยนต์จู่พา 2	17
3.1 การทดลองนำการควบคุมแรงแบบอิมพลลิซิทไปใช้งาน อย่างมีประสิทธิภาพ	17
3.2 การทดลองเปรียบเทียบการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิท และการควบคุมแรงแบบอิมพลลิซิท	28
3.2.1 การทดลองควบคุมแรงและตำแหน่งกับวัตถุอ่อนตัว	28

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.2 การทดลองควบคุมแรงและตำแหน่งกับผนังแผ่น เหล็กที่มีความหยุ่นตัว	34
3.2.3 การทดลองควบคุมแรงและตำแหน่งกับผนัง แผ่นเหล็กที่มีความหยุ่นตัว โดยแรงที่กระทำมี การเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได (Step Change)	41
3.2.4 การทดลองควบคุมแรงและตำแหน่งบนพื้นแข็ง ที่รูปร่างไม่ต่อเนื่อง	47
3.3 ทดสอบการควบคุมแรงกับแผ่นเหล็ก โดยควบคุมตำแหน่ง ในแนวแกน z หรือ แกนที่ 3 และควบคุมแรงในพื้นที่ระนาบ x-y หรือแกน 1,2	58
4. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
4.1 สรุปผลการวิจัย	63
4.2 ข้อเสนอแนะ	65
รายการอ้างอิง	66
ภาคผนวก ก อุปกรณ์การทดลอง	67
ภาคผนวก ข แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกล	68
ภาคผนวก ค หุ่นยนต์จู่ฬา 2 ที่ปรับปรุงใหม่	77
ประวัติผู้วิจัย	82

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงรูปของ Compliant Frame	3
2.2 แสดงแผนภาพบล็อกของการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่ง	5
2.3 แสดง รูปของแบบจำลองของระบบมวล สปริง และตัวหน่วง	8
2.4 แสดงแผนภาพบล็อกของการควบคุมตำแหน่งของแบบจำลองแขนกล ขณะสัมผัสวัตถุ	9
2.5 แสดงทิศทางที่จะควบคุมแรงและตำแหน่ง	12
2.6 แสดงแผนภาพบล็อกของการควบคุมแรงแบบอิมพลีซิที	14
2.7 แสดงแขนกลก่อนการปรับปรุง (ซ้าย) และแขนกลหลังการปรับปรุง (ขวา)	15
2.8 แสดงลักษณะของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่ติดที่ปลายแขนกล	15
3.1 แสดงรูปของแขนกลกำลังเคลื่อนที่อยู่บนผนังแบน	18
3.2 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเป็น ระยะทาง 80 มม. บนผนังแบนด้วยขนาดแรงกด 20 นิวตัน ซึ่งใช้ การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทีที่มีการหาค่าความแข็งดิงแบบออนไลน์	19
3.3 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง เป็นระยะทาง 80 มม. บนผนังแบนด้วยขนาดแรงกด 20 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทีที่ให้ค่าความแข็งดิงคงที่	19
3.4 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเป็นระยะทาง 80 มม. บนผนังแบนด้วยขนาดแรงกด 25 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรง แบบอิมพลีซิทีที่มีการหาค่าความแข็งดิงแบบออนไลน์	20
3.5 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเป็นระยะทาง 80 มม. บนผนังแบนด้วยขนาดแรงกด 25 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรง แบบอิมพลีซิทีที่ให้ค่าความแข็งดิงคงที่	20
3.6 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเป็นระยะทาง 80 มม. บนผนังแบนด้วยขนาดแรงกด 30 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรง แบบอิมพลีซิทีที่มีการหาค่าความแข็งดิงแบบออนไลน์	21
3.7 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเป็นระยะทาง 80 มม. บนผนังแบนด้วยขนาดแรงกด 30 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรง แบบอิมพลีซิทีที่ให้ค่าความแข็งดิงคงที่	21
3.8 แสดงค่าความแข็งดิงที่คงที่ โดยแรงกดมีค่า 20 นิวตัน	22

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 แสดงค่าระยะที่สั่งให้แขนกลกดเมื่อค่าความแข็งดึงคงที่โดยแรงกดมีค่า 20 นิวตัน	22
3.10 แสดงค่าความแข็งดึงที่มีการปรับแบบออนไลน์โดยที่แรงกดมีค่า 20 นิวตัน	22
3.11 แสดงค่าระยะที่สั่งให้แขนกลกดเมื่อมีการปรับค่าความแข็งดึงแบบออนไลน์ โดยแรงกดมีค่า 20 นิวตัน	22
3.12 แสดงค่าความแข็งดึงที่คงที่ โดยแรงกดมีค่า 25 นิวตัน	23
3.13 แสดงค่าระยะที่สั่งให้แขนกลกดเมื่อค่าความแข็งดึงคงที่โดยแรงกดมีค่า 25 นิวตัน	23
3.14 แสดงค่าความแข็งดึงที่มีการปรับแบบออนไลน์โดยที่แรงกดมีค่า 25 นิวตัน	23
3.15 แสดงค่าระยะที่สั่งให้แขนกลกดเมื่อมีการปรับค่าความแข็งดึงแบบออนไลน์ โดยแรงกดมีค่า 25 นิวตัน	23
3.16 แสดงค่าความแข็งดึงที่คงที่ โดยแรงกดมีค่า 30 นิวตัน	24
3.17 แสดงค่าระยะที่สั่งให้แขนกลกดเมื่อค่าความแข็งดึงคงที่โดยแรงกดมีค่า 30 นิวตัน	24
3.18 แสดงค่าความแข็งดึงที่มีการปรับแบบออนไลน์โดยที่แรงกดมีค่า 30 นิวตัน	24
3.19 แสดงค่าระยะที่สั่งให้แขนกลกดเมื่อมีการปรับค่าความแข็งดึงแบบออนไลน์ โดยแรงกดมีค่า 30 นิวตัน	24
3.20 แสดงค่าการเคลื่อนที่และความผิดพลาดของตำแหน่งของปลายแขนกล บนผนังแบน เป็นระยะ 80 มม. มีแรงกดขนาด 20 นิวตัน ซึ่งใช้ การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่ให้ค่าความแข็งดึงคงที่	25
3.21 แสดงค่าการเคลื่อนที่และความผิดพลาดของตำแหน่งของปลายแขนกล บนผนังแบน เป็นระยะ 80 มม. มีแรงกดขนาด 20 นิวตัน ซึ่งใช้ การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่มีการหาค่าความแข็งดึงแบบออนไลน์	25
3.22 แสดงค่าการเคลื่อนที่และความผิดพลาดของตำแหน่งของปลายแขนกล บนผนังแบน เป็นระยะ 80 มม. มีแรงกดขนาด 25 นิวตัน ซึ่งใช้ การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่ให้ค่าความแข็งดึงคงที่	26
3.23 แสดงค่าการเคลื่อนที่และความผิดพลาดของตำแหน่งของปลายแขนกล บนผนังแบน เป็นระยะ 80 มม. มีแรงกดขนาด 25 นิวตัน ซึ่งใช้ การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่มีการหาค่าความแข็งดึงแบบออนไลน์	26
3.24 แสดงค่าการเคลื่อนที่และความผิดพลาดของตำแหน่งของปลายแขนกล บนผนังแบน เป็นระยะ 80 มม. มีแรงกดขนาด 30 นิวตัน ซึ่งใช้ การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่ให้ค่าความแข็งดึงคงที่	27

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.25 แสดงค่าการเคลื่อนที่และความผิดพลาดของตำแหน่งของปลายแขนกล บนผนังแบน เป็นระยะ 80 มม. มีแรงกดขนาด 30 นิวตัน ซึ่งใช้ การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่มีการหาค่าความแข็งตั้งแบบออนไลน์	27
3.26 แสดงแขนกลขณะเคลื่อนที่บนวัตถุที่มีความอ่อนตัว	28
3.27 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม. บนวัตถุอ่อน ขนาดแรง 5 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิต	29
3.28 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม. บนวัตถุอ่อนตัว ขนาดแรง 5 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิต	29
3.29 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม. บนวัตถุอ่อนตัว ขนาดแรง 10 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิต	30
3.30 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม. บนวัตถุอ่อนตัว ขนาดแรง 10 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิต	30
3.31 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรงระยะทาง 90 มม. บนผิววัตถุอ่อนตัว ขนาดแรง 5 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิต	31
3.32 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรงระยะทาง 90 มม. บนผิววัตถุอ่อนตัว ขนาดแรง 5 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิต	32
3.33 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรงระยะทาง 90 มม. บนผิววัตถุอ่อนตัว ขนาดแรง 10 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิต	32
3.34 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรงระยะทาง 90 มม. บนผิววัตถุอ่อนตัว ขนาดแรง 10 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิต	33
3.35 แสดงแขนกลขณะเคลื่อนที่บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยุ่นตัว	34
3.36 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม.บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยุ่นตัว โดยกดด้วยแรง 5 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิต	35
3.37 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม.บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยุ่นตัว โดยกดด้วยแรง 5 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิต	35

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.38 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม.บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนา 10 มม. โดยกดด้วยแรง 10 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิท	36
3.39 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม.บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนา 10 มม. โดยกดด้วยแรง 10 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลลิซิท	36
3.40 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม.บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนา 15 มม. โดยกดด้วยแรง 15 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิท	37
3.41 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม.บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนา 15 มม. โดยกดด้วยแรง 15 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลลิซิท	37
3.42 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนา 10 มม. โดยกดด้วยแรง 5 นิวตัน โดยใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิท	38
3.43 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนา 10 มม. โดยกดด้วยแรง 5 นิวตัน โดยใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลลิซิท	39
3.44 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนา 10 มม. โดยกดด้วยแรง 10 นิวตัน โดยใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิท	39
3.45 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนา 10 มม. โดยกดด้วยแรง 10 นิวตัน โดยใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลลิซิท	40
3.46 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนา 15 มม. โดยกดด้วยแรง 15 นิวตัน โดยใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิท	41

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.47 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืดัว โดยกวดัดด้วยแรง 15 นิวตัน โดยใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิต	41
3.48 แสดงแขนกลขณะเคลื่อนที่บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืดัว โดยแรงที่สัมผัส มีการเปลี่ยนแปลงเป็นลักษณะขั้นบันได (Step Change)	42
3.49 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ระยะทาง 80 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืดัว โดยแรงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 15 นิวตัน เป็น 5 นิวตัน ซึ่งใช้วิธีการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิต	43
3.50 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ระยะทาง 80 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืดัว โดยแรงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 15 นิวตัน เป็น 5 นิวตัน ซึ่งใช้วิธีการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิต	43
3.51 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ระยะทาง 80 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืดัว โดยแรงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 20 นิวตัน เป็น 10 นิวตัน ซึ่งใช้วิธีการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิต	44
3.52 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ระยะทาง 80 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืดัว โดยแรงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 20 นิวตัน เป็น 10 นิวตัน ซึ่งใช้วิธีการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิต	44
3.53 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรง ระยะทาง 80 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืดัว โดยแรงกวดัดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 15 นิวตัน เป็น 5 นิวตัน โดยใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิต	45
3.54 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรง ระยะทาง 80 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืดัว โดยแรงกวดัดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 15 นิวตัน เป็น 5 นิวตัน โดยใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิต	46
3.55 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรง ระยะทาง 80 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืดัว โดยแรงกวดัดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 20 นิวตัน เป็น 10 นิวตัน โดยใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิต	46
3.56 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรง ระยะทาง 80 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืดัว โดยแรงกวดัดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 20 นิวตัน เป็น 10 นิวตัน โดยใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิต	47

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.57 แสดงแขนกลขณะเคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่อง	48
3.58 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่อง เป็นเส้นตรง ระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 5 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรง แบบเอกซ์พลลิซิท	49
3.59 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่อง เป็นเส้นตรง ระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 5 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรง แบบอิมพลลิซิท	49
3.60 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่อง เป็นเส้นตรง ระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 10 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรง แบบเอกซ์พลลิซิท	50
3.61 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่อง เป็นเส้นตรง ระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 10 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรง แบบอิมพลลิซิท	50
3.62 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่อง เป็นเส้นตรงระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 15 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรง แบบเอกซ์พลลิซิท	51
3.63 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่อง เป็นเส้นตรง ระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 15 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรง แบบอิมพลลิซิท	52
3.64 แสดงลักษณะของปลายแขนกลที่เคลื่อนที่อยู่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่อง	53
3.65 แสดงลักษณะของปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่ใกล้ถึงจุดที่ไม่ต่อเนื่อง	54
3.66 แสดงลักษณะของปลายแขนกลขณะที่ทิศทางของการควบคุมแรงและ การควบคุมตำแหน่งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน	54
3.67 แสดงค่าตำแหน่งของแขนกลขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่มีรูปร่างที่ไม่ต่อเนื่อง เป็นเส้นตรงระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 5 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรง แบบเอกซ์พลลิซิท	55

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.68 แสดงค่าตำแหน่งของแกนกลลขณะเคลื่อนที่บนวัตถุที่มีรูปร่างที่ไม่ต่อเนื่อง เป็นเส้นตรง ระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 5 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิท	55
3.69 แสดงค่าตำแหน่งของแกนกลลขณะเคลื่อนที่บนวัตถุที่มีรูปร่างที่ไม่ต่อเนื่อง เป็นเส้นตรง ระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 10 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท	56
3.70 แสดงค่าตำแหน่งของแกนกลลขณะเคลื่อนที่บนวัตถุที่มีรูปร่างที่ไม่ต่อเนื่อง เป็นเส้นตรง ระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 10 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิท	56
3.71 แสดงค่าตำแหน่งของแกนกลลขณะเคลื่อนที่บนวัตถุที่มีรูปร่างที่ไม่ต่อเนื่อง เป็นเส้นตรง ระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 15 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท	57
3.72 แสดงค่าตำแหน่งของแกนกลลขณะเคลื่อนที่บนวัตถุที่มีรูปร่างที่ไม่ต่อเนื่อง เป็นเส้นตรง ระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 15 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิท	57
3.73 แสดงแกนกลเคลื่อนที่บนผนังแบน โดยควบคุมตำแหน่งในแนวแกน z หรือแกนที่ 3 ของแกนกล และควบคุมแรงในพื้นที่ผิวระนาบ x - y หรือแกน 1, 2 ของแกนกล	58
3.74 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแกนกลขณะเคลื่อนที่บนผนังแบน ขนาดแรง 5 นิวตัน ควบคุมตำแหน่งใน แนวแกน z หรือแกนที่ 3 ของแกนกล และควบคุมแรงในพื้นที่ผิวระนาบ x - y หรือแกน 1, 2 ของแกนกล	59
3.75 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแกนกลขณะเคลื่อนที่บนผนังแบน ขนาดแรง 10 นิวตัน ควบคุมตำแหน่งใน แนวแกน z หรือแกนที่ 3 ของแกนกล และควบคุมแรงในพื้นที่ผิวระนาบ x - y หรือแกน 1, 2 ของแกนกล	59
3.76 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแกนกลขณะเคลื่อนที่บนผนังแบน ขนาดแรง 15 นิวตัน ควบคุมตำแหน่งใน แนวแกน z หรือแกนที่ 3 ของแกนกล และควบคุมแรงในพื้นที่ผิวระนาบ x - y หรือแกน 1, 2 ของแกนกล	60

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.77 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนกลบนผนังแบน มีแรงสัมผัส 5 นิวตัน โดยควบคุมตำแหน่งในแนวแกน z หรือแกนที่ 3 ของแขนกล และควบคุมแรง ในพื้นที่ผิวระนาบ x - y หรือแกน 1, 2 ของแขนกล	61
3.78 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนกลบนผนังแบน มีแรงสัมผัส 10 นิวตัน โดยควบคุมตำแหน่งในแนวแกน z หรือแกนที่ 3 ของแขนกล และควบคุมแรง ในพื้นที่ผิวระนาบ x - y หรือแกน 1, 2 ของแขนกล	61
3.79 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนกลบนผนังแบน มีแรงสัมผัส 15 นิวตัน โดยควบคุมตำแหน่งในแนวแกน z หรือแกนที่ 3 ของแขนกล และควบคุมแรง ในพื้นที่ผิวระนาบ x - y หรือแกน 1, 2 ของแขนกล	62
ข.1 Coordinate frame ของแขนกลจู่พา 2	68
ค.1 แสดงลักษณะของชุดเฟืองฮาร์โมนิกของรอยต่อที่ 1 แบบเก่า	77
ค.2 แสดงลักษณะของชุดเฟืองฮาร์โมนิกรุ่น RFS-25-100-CC-SP	77
ค.3 แสดงลักษณะของชุดเฟืองฮาร์โมนิกของข้อต่อ 2 แบบเก่า	78
ค.4 แสดงลักษณะของชุดเฟืองฮาร์โมนิกรุ่น CSF-25-100	78
ค.5 แสดงลักษณะของรอยต่อที่ 3 แบบเก่า	79
ค.6 แสดงลักษณะของรอยต่อที่ 3 แบบใหม่	79
ค.7 แสดงรอยต่อที่ 5 แบบเก่า	80
ค.8 แสดงรอยต่อที่ 5 แบบใหม่	80
ค.9 แสดงหุ่นยนต์จู่พา 2 ก่อนการปรับปรุง	81
ค.10 แสดงหุ่นยนต์จู่พา 2 หลังการปรับปรุง	81



ความสำคัญและที่มาของโครงการวิทยานิพนธ์

หุ่นยนต์อุตสาหกรรมในปัจจุบันได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ มากมายเพื่อช่วยเพิ่มผลผลิตและคุณภาพของงาน เช่น งานพ่นสี (spray painting) งานจับวาง (pick and place) หรืองานด้านเชื่อมจุด (spot-welding) เป็นต้น ซึ่งงานลักษณะดังกล่าวจะเป็นการควบคุมแขนหุ่นยนต์แบบตำแหน่ง (position control) เท่านั้น ถ้าพิจารณาการทำงานของแขนกลในบางลักษณะ เช่น การเชื่อมจุด สมมติว่ารู้ตำแหน่งกระจกที่แน่นอน วิธีการที่ใช้ควบคุมแขนกลแบบตำแหน่ง (position control) ก็คงใช้ได้ดี แต่ถ้าเราพิจารณาถึงในกรณีที่ผิวกระจกนั้นไม่สม่ำเสมอ หรือมีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งของแขนกลขณะที่ควบคุม งานลักษณะนี้ก็คงดำเนินต่อไปไม่ได้เพราะกระจกอาจแตกหรือไม่ปลายแขนกลก็ไม่สัมผัสกับผิวกระจก จะเห็นได้ว่างานลักษณะนี้การควบคุมแขนกลโดยกำหนดตำแหน่งหรือทางเดินของแขนกลบนระนาบของกระจกนั้นดูจะไม่สมเหตุสมผล แต่ถ้าเปลี่ยนมากำหนดแรงที่กระทำตั้งฉากกับผิวกระจกจะดีกว่า และนอกจากนี้ยังมีงานที่ปลายแขนกลต้องสัมผัสกับสิ่งภายนอก เช่น การประกอบชิ้นส่วน การเจียรนัย (grinding) เป็นต้น ซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีควบคุมแบบตำแหน่งเพียงอย่างเดียว ซึ่งลักษณะงานดังกล่าวจะต้องมีการควบคุมแรงที่เกิดขึ้นที่ปลายแขนกลด้วย สำหรับวิทยานิพนธ์เรื่อง การควบคุมแรงสำหรับแขนหุ่นยนต์นี้ ได้มีผู้ทำมาก่อนหน้านี้แล้ว ซึ่งเป็นการควบคุมแรงที่ปลายให้สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอกใน 2 มิติ ซึ่งไม่เพียงพอต่อการนำแขนกลไปใช้งาน และแขนกลที่ใช้ทดลองก็มีข้อบกพร่องในระบบขับเคลื่อน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับปรุงแขนกลให้มีระบบขับเคลื่อนที่ดีขึ้น และสามารถควบคุมแรงที่ปลายแขนกลให้สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอกใน 3 มิติได้ ในโครงการวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเป็นการพัฒนาหุ่นยนต์จู่พา 2 จากที่ระบบขับเคลื่อนของแกนที่ 1 2 และ 3 มีปัญหา ให้สามารถเคลื่อนที่ได้ 3 แกน เพื่อให้สามารถควบคุมแรงที่ปลายแขนกลให้สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอกใน 3 มิติได้ และสามารถควบคุมให้แขนกลเคลื่อนที่เพื่อรักษาขนาดของแรงที่ตั้งฉากกับสิ่งแวดล้อมได้ นอกจากนี้ยังปรับปรุงแกนที่ 5 ให้มีขนาดกระทัดรัดขึ้นด้วย

วัตถุประสงค์ของโครงการวิทยานิพนธ์

1. เพื่อปรับปรุงระบบขับเคลื่อนของแขนกล ให้มีสมรรถภาพในการทำงานดีขึ้น

2. เพื่อศึกษาและออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งและแรงที่เกิดขึ้นที่ปลายแขนกลให้เคลื่อนที่ไปตามทางเดิน และเกิดแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลในทิศทางตั้งฉากกับผิวชิ้นงานตามที่กำหนด

ขอบเขตการดำเนินโครงการวิทยานิพนธ์

1. ปรับปรุงระบบขับเคลื่อนของแขนเพื่อให้เหมาะสำหรับการควบคุมแบบผสมระหว่างตำแหน่งและแรง โดยทำการเปลี่ยน harmonic drive ที่แกน 1 และ 2 และสร้างแกน 3 และ 5 ใหม่
2. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับหุ่นยนต์และออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งและแรงที่เกิดขึ้นที่ปลายแขนกลในทิศทางตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน โดยควบคุมให้แขนกลรักษาแรงที่สัมผัสกับผิวชิ้นงานให้ได้ตามที่ต้องการ
3. สร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่จำเป็นต้องใช้ในระบบควบคุม
4. ศึกษาวิธีการเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอกเข้ากับคอมพิวเตอร์
5. ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) และออกแบบระบบควบคุมหุ่นยนต์
6. ทดสอบการทำงานของหุ่นยนต์ และเก็บข้อมูลมาวิเคราะห์ เพื่อทำการแก้ไขและปรับปรุงระบบควบคุมหุ่นยนต์
7. สรุปผลการทดลองโครงการวิทยานิพนธ์

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิทยานิพนธ์

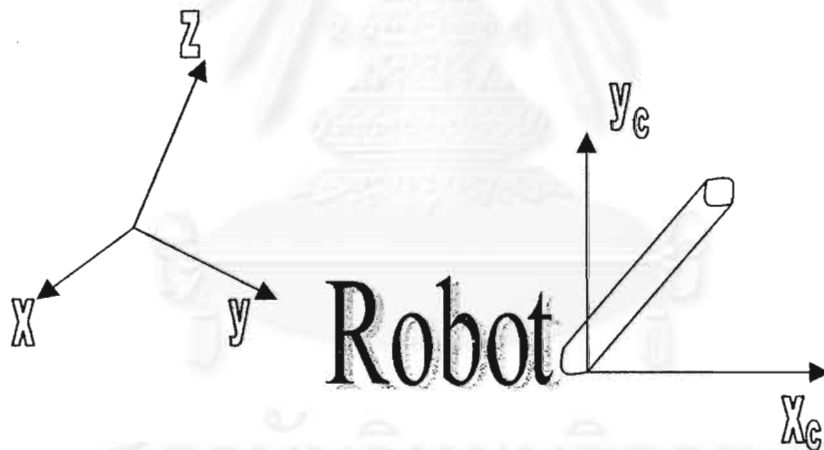
1. ได้แขนกล จูพา 2 ที่มีโครงสร้างแบบ SCARA สามารถเคลื่อนที่ได้ทั้ง 5 แกน และมีระบบขับเคลื่อนที่ดีขึ้น
2. ได้แขนกลซึ่งทำงานในลักษณะที่สามารถเคลื่อนที่เพื่อให้ปลายแขนกลสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมด้วยแรงที่ต้องการได้
3. เป็นพื้นฐานในการพัฒนาหุ่นยนต์ และงานควบคุมต่างๆ ในอุตสาหกรรมโดยใช้ไมโครคอมพิวเตอร์

บทที่ 2

การควบคุมแบบไฮบริดด้วยแรงแบบอิมพลิชิตสำหรับแขนกล

2.1 การควบคุมผสมระหว่างแรงและตำแหน่ง (Hybrid Position/Force Control)

การใช้งานแขนหุ่นยนต์ในงานที่ซับซ้อนนั้น บ่อยครั้งที่ไม่เพียงแต่ต้องควบคุมตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ แต่ต้องควบคุมแรงที่กระทำกับปลายแขนหุ่นยนต์ด้วย เช่นรูปที่ 2.1 แสดงการใช้แขนกลเพื่อจับชอล์กเขียนกระดานดำ จะเห็นได้ว่าการควบคุมแบบตำแหน่งเพียงอย่างเดียวนั้นไม่เพียงพอสำหรับการควบคุมแขนกล เนื่องจากถ้าตำแหน่งของปลายแขนกลผิดพลาดจะทำให้ชอล์กหักหรือชอล์กไม่สัมผัสกับกระดานดำ ดังนั้นการเขียนอักษรลงบนกระดานดำจึงต้องควบคุมตำแหน่งบนระนาบของกระดานดำ ในขณะที่ควบคุมแรงในแนวตั้งฉากกับกระดานดำ



รูปที่ 2.1 แสดงรูปของ Compliant Frame

ตามรูปที่ 2.1 นั้น เฟรม xyz คือเฟรมที่กำหนดตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์เทียบกับแกนอ้างอิงใดๆ (a fixed reference) ส่วนเฟรม $x_c y_c z_c$ คือ คอมไพลันท์เฟรม (Compliant Frame) หรือระบบโคออร์ดิเนตบนวัตถุที่แขนหุ่นยนต์กระทำ ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง โดยแต่ละแกนของเฟรมสามารถควบคุมตำแหน่ง (Position Control) หรือควบคุมแรง (Force Control) แบบใดแบบหนึ่งเท่านั้น

จากรูปที่ 2.1 ขณะที่ปลายชอล์กยังไม่สัมผัสกระดานดำนั้น ปลายแขนกลสามารถเคลื่อนที่ โดยมีระดับความเป็นอิสระหรือ degree of freedom (d.o.f.) เท่ากับ 6 โดยที่ 3 d.o.f. แรกเป็นการกำหนดตำแหน่ง (position) และอีก 3 d.o.f. ที่เหลือเป็นการกำหนดทิศทาง (orientation) แต่เมื่อเป็นการควบคุมแรง (force) หรือแรงบิด (torque) แล้วค่าระดับความอิสระนี้จะเท่ากับ 0 แต่ขณะที่ปลายชอล์กเริ่มสัมผัสกับกระดานดำนั้น ค่าระดับความอิสระของการควบคุมแบบตำแหน่งจะลดลงไปในทิศทางของแกน z (z-direction) แต่ค่าระดับความอิสระของการควบคุมแบบแรงจะเกิดขึ้นในทิศทางของแกน z และถ้าสมมุติว่าปลายชอล์กถูกยึดติดแน่นกับกระดานดำ ค่าระดับความอิสระของการควบคุมแรงกับแรงบิดจะเท่ากับ 6 แต่ค่าระดับความอิสระของการควบคุมตำแหน่งกับทิศทางจะมีค่าเป็นศูนย์ ในที่นี้เรียกเฟรม x_c, y_c, z_c ว่า คอมไพลันท์เฟรม

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างการควบคุมตำแหน่ง และการควบคุมแรงนั้นสามารถแทนในรูปแบบของเงื่อนไขบังคับโดยธรรมชาติ (Natural constraints) และเงื่อนไขบังคับเทียม (Artificial constraints) ได้ โดยจากตัวอย่างข้างต้น กระดานดำทำให้เกิดเงื่อนไขบังคับโดยธรรมชาติของตำแหน่งในทิศทางของแกน z และถ้าแรงเสียดทานระหว่างชอล์กและกระดานดำเป็นศูนย์ ก็จะทำให้เกิดเงื่อนไขบังคับโดยธรรมชาติของแรงในทิศทาง xy ส่วนตัวอักษรที่เขียนนั้นเป็นเงื่อนไขบังคับเทียมของตำแหน่งในทิศ xy และเงื่อนไขบังคับเทียมของแรงจะเกิดในทิศ z ซึ่งเห็นได้ว่าในแต่ละระดับของความอิสระนั้นไม่สามารถควบคุมทั้งแรงและตำแหน่งได้ในเวลาเดียวกัน

2.1.1 การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท

นักวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาการควบคุมแรงที่กระทำกับแขนกลในขณะที่แขนกลเคลื่อนที่ เช่น M.H. Raibert and J.J. Craig (1981) ได้ศึกษาเรื่อง "Hybrid position/force control of manipulators" หลักการของ Raibert และ Craig คือจะแบ่งการควบคุมเป็น 2 ส่วนแยกจากกัน โดยส่วนแรกเป็นส่วนควบคุมตำแหน่งปลายแขนกลในแนวสัมผัสกับวัตถุ ส่วนที่สองเป็นส่วนควบคุมแรงที่กระทำกับปลายแขนกลในแนวตั้งฉากกับวัตถุ ซึ่งแนวคิดนี้มาจาก Paul, R. และ Shimano, B. (1976) ที่ได้ศึกษาเรื่อง "Compliance and Control" ไว้

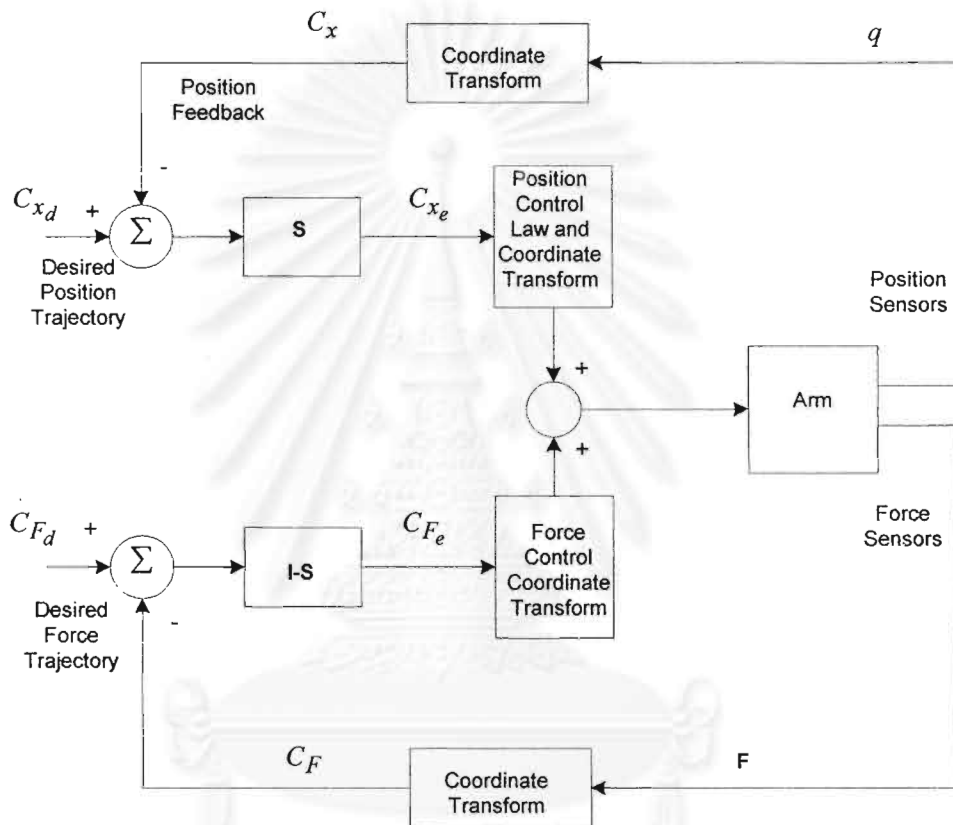
วิธีการควบคุมของ M.H. Raibert และ J.J. Craig นั้นจะแยกทิศทางของการควบคุมโดยอาศัย เวกเตอร์เลือกทิศ (Selection Vector) $\sigma = [\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z]$ ซึ่งนิยามไว้ว่าถ้าเงื่อนไขบังคับโดยธรรมชาติของตำแหน่งเกิดขึ้นในทิศใด ให้ค่า σ_i ของทิศนั้นเป็นศูนย์ ดังนั้นจากตัวอย่างข้างต้นสามารถเขียนเวกเตอร์เลือกทิศได้ดังนี้

$$\sigma = [1 \quad 1 \quad 0] \quad \dots\dots(2.1)$$

คอมไพลันท์เซเลกชันเมตริก (Compliant selection matrix) นิยามโดย $S = \text{diag}[\sigma]$ นั่นคือ

$$S = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix} \dots(2.2)$$

ซึ่งคอมโพสิชันเมตริกซ์ไฮเลคชันเมตริกซ์นี้จะช่วยในการแยกทิศทางการควบคุมโดยสามารถเขียนแผนภาพบล็อก (Block Diagram) ของการควบคุมได้ตามรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงแผนภาพบล็อกของการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่ง

จากรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงแผนภาพบล็อกของการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่ง ของ Craig และ Raibert จะเห็นได้ว่า วงรอบ (Loop) ด้านบนเป็นการควบคุมตำแหน่ง ส่วนวงรอบด้านล่างเป็นการควบคุมแรง สำหรับการควบคุมตำแหน่งนั้นทำโดยวัดตำแหน่งของแขนกลออกมาเพื่อนำมาลบกับตำแหน่งของแขนกลที่ต้องการ แล้วนำไปคูณกับเมตริกซ์ s ซึ่งเป็นเมตริกซ์เลือกทิศทางการควบคุมตำแหน่ง หลังจากนั้นจะส่งค่าไปยังตัวควบคุมตำแหน่งต่อไป ส่วนวงรอบที่ควบคุมแรงนั้น จะวัดแรงที่กระทำกับปลายแขนหุ่นยนต์เพื่อมาลบจากแรงที่ต้องการให้แขนหุ่นยนต์สัมผัสกับวัตถุ กลายเป็นค่าความผิดพลาดของแรงแล้วนำมาคูณกับเมตริกซ์ $I-S$ ซึ่งเป็นเมตริกซ์ที่เลือกทิศ

ควบคุมแรง หลังจากนั้นจึงส่งเข้าไปยังตัวควบคุมแรง ซึ่งจะคำนวณหาค่าสัญญาณควบคุมที่ใช้สำหรับควบคุมแขนหุ่นยนต์ต่อไป วิธีการควบคุมแรงที่ใช้เรียกว่า “การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท (Explicit Force Control)” ซึ่งเป็นการควบคุมแรงโดยตรง

2.1.2 การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิท

ต่อมาเมื่อผู้เสนอว่าการจะควบคุมแรงนั้นสามารถควบคุมผ่านตัวควบคุมตำแหน่งได้ ซึ่งเรียกการควบคุมแรงแบบนี้ว่า “การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิท (Implicit Force Control)” เช่น N. Hogan (1985) ได้ศึกษาเรื่อง “Impedance Control; An approach to manipulation” ซึ่งวิธีควบคุมแบบอิมพิแดนซ์นี้เป็นวิธีการหนึ่งของการควบคุมแรงแบบอิมพลีซิท โดยมีหลักการดังนี้

จากสมการการเคลื่อนที่ของแขนกล

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + d(\dot{q}) = \tau - \tau_e \quad \dots(2.3)$$

โดยที่ q, \dot{q}, \ddot{q}	แทน เวกเตอร์ (nx1) ของมุมข้อต่อ (joint) ความเร็วและความเร่งของข้อต่อ ตามลำดับ
$M(q)$	แทน เวกเตอร์ (nx1) ของเมตริกซ์ความเฉื่อย (inertia matrix) ที่เป็นโพซิทีฟ เดฟินิท เมตริกซ์ (Positive definite matrix)
$C(q, \dot{q})\dot{q}$	แทน เวกเตอร์ (nx1) ของแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal) และแรงคอริโอลิส (Coriolis)
$g(q)$	แทน ผลของแรงโน้มถ่วงโลก
$d(\dot{q})$	แทน ผลของแรงเสียดทานที่กระทำกับข้อต่อ
$\tau_e = J^T(q) \cdot f_e$	แทน เวกเตอร์ (nx1) ของเจเนอรัลไลซ์ จอยน์ ทอร์ก (generalized joint torques) ที่เกิดจากแขนกลกระทำกับวัตถุแวดล้อม
f_e	แทน แรงที่แขนกลสัมผัสกับวัตถุแวดล้อมซึ่งวัดได้จากอุปกรณ์วัดแรง
J	แทน จาคอบีเยนเมตริกซ์ (Jacobian Matrix) ซึ่งใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของปลายแขนกลกับความเร็วของข้อต่อแต่ละข้อ

การควบคุมแรงแบบอิมพิแดนซ์ (Impedance control) เป็นการควบคุมที่ไม่ได้พยายามควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่หรือแรงตามลำพัง แต่พยายามสร้างความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ตามสมการ

$$M_d \ddot{x}_t - B_d (\dot{x}_v - \dot{x}) - K_d (x_v - x) = -f_e \quad \dots(2.4)$$

โดยที่ M_d	แทนค่าความเฉื่อย (Inertia) ของการตอบสนองที่ต้องการ
B_d	แทนค่าความหน่วง (damping) ของการตอบสนองที่ต้องการ
K_d	แทนค่าความแข็งตึง (Stiffness) ของการตอบสนองของระบบ
x_v	แทนค่าตำแหน่งอ้างอิงที่ต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่ไปถึง
x	แทนค่าตำแหน่งของปลายแขนกล ณ ปัจจุบัน
\dot{x}_v	แทนค่าความเร็วของแขนกลที่ต้องการ
\dot{x}	แทนค่าความเร็วของตำแหน่งปลายแขนกล ณ ปัจจุบัน
\ddot{x}_i	แทนค่าความเร่งของตำแหน่งปลายแขนกลที่ต้องการ

สำหรับตำแหน่งอ้างอิงที่ต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่ไปถึงนั้น Seul Jung และ T.C. Hsia (1995) ได้ศึกษาไว้ในเรื่อง "On neural network application to robust impedance control of robots manipulators" ซึ่งได้กล่าวไว้ว่า ตำแหน่งที่ต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่ไปถึงสามารถหาค่าของแรงที่ต้องการให้แขนกลกดและค่าตำแหน่งของวัตถุแวดล้อมตามสมการ

$$x_v = x_e + \frac{f_d}{k_d} \quad \text{if } f_e = 0 \quad \dots(2.5)$$

$$x_v = x_e + f_d \cdot \frac{k_d \cdot (x - x_e) + f_e}{k_d \cdot f_e} \quad \text{if } f_e \neq 0 \quad \dots(2.6)$$

โดยที่ x_e แทนค่าตำแหน่งของวัตถุแวดล้อม
 f_d แทนค่าของแรงที่ต้องการให้แขนกลกด

เมื่อได้ตำแหน่งที่สั่งให้แขนกลกดแล้ว ต่อมาจะคำนวณหาค่าสัญญาณอินพุต (Input) ที่ใส่เข้าไปในระบบ ซึ่งจากที่ R.Volpe และ P.Khosla ได้ศึกษาไว้ในเรื่อง "The equivalence of second order impedance control and proportional gain explicit force control" จะได้ว่าค่าสัญญาณอินพุต (Input) ที่ใส่เข้าไปในระบบเพื่อให้ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและแรงเป็นไปตามสมการที่ (2.4) จะมีค่าตามสมการข้างล่างนี้

$$\tau = M(q)\ddot{q}_i + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + d(\dot{q}) + \tau_e \quad \dots(2.7)$$

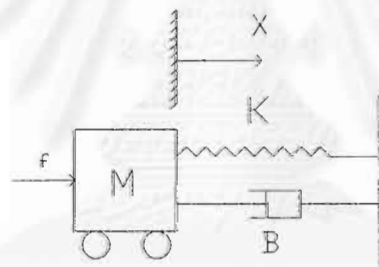
$$\ddot{q}_i = J^{-1}(q)[\ddot{x}_i - \dot{J}(q)\dot{q}] \quad \dots(2.8)$$

$$\ddot{x}_i = M_d^{-1}[B_d \cdot \dot{e}_v + K_d \cdot e_v - f_e] \quad \dots(2.9)$$

โดยที่ \dot{e}_v, e_v แทนค่าความผิดพลาดของความเร็วปลายแขนกลในระบบพิกัดฉาก (Cartesian Coordinate) ซึ่งสมการที่ (2.7) เป็นกฎการควบคุมแขนกลโดยใช้พลวัตแบบย้อนกลับ (manipulator

inverse dynamics control law) ส่วนสมการที่ (2.8) เป็นการเปลี่ยนจากความเร่งของปลายแขนกลที่ต้องการในพิกัดฉาก เป็นพิกัดข้อต่อของแขนกล (Joint Coordinate) ดังรายละเอียดแสดงไว้ในหัวข้อเรื่อง "Resolve Acceleration Control of Manipulator" และสมการที่ (2.9) แทนความเร่งของหุ่นที่ต้องการสำหรับตัวควบคุมแรงแบบอิมพีแดนซ์

จากการควบคุมผสมระหว่างการควบคุมตำแหน่งและการควบคุมแรงแบบต่าง ๆ ที่มีผู้ศึกษา มาก่อนหน้านี้ จะเห็นได้ว่าความแตกต่างระหว่างการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิทกับการควบคุมแรงแบบอิมพีซิท เช่น การควบคุมอิมพีแดนซ์ ที่เห็นได้ชัดคือ การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิทเป็นการควบคุมแรงโดยตรงทำให้ผลตอบสนองของการควบคุมแรงแบบนี้ค่อนข้างเร็ว แต่การควบคุมแรงแบบอิมพีซิทมีเสถียรภาพมากกว่า เนื่องจากการควบคุมแรงแบบอิมพีซิทนั้นไม่ควบคุมแรงโดยตรงแต่จะคำนวณค่าตำแหน่งหรือความเร็วของปลายแขนกลเพื่อให้แขนกลกวดัดแล้วเกิดแรงกระทำกับปลายแขนกลตามที่ต้องการขึ้นมาก่อน หลังจากนั้นจึงส่งเข้าไปยังตัวควบคุมตำแหน่งเพื่อควบคุมแขนหุ่นยนต์ต่อไป ซึ่งการควบคุมแรงผ่านตัวควบคุมตำแหน่งนี้ ทำให้ระบบมีเสถียรภาพดีกว่า เนื่องจากการควบคุมตำแหน่งมีลักษณะเป็นตัวกรองผ่านต่ำ (low pass filter) ซึ่งทำให้แขนกลมีเสถียรภาพดีถึงแม้ว่าจะควบคุมแรงในทิศทางใด ๆ ขณะที่ไม่สัมผัสกับวัตถุแวดล้อมซึ่งสามารถพิสูจน์ได้จากกรณีของระบบมวล สปริงและตัวหน่วงตามรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงรูปของแบบจำลองของระบบมวล สปริงและตัวหน่วง

จากรูปที่ 2.3 สมการการเคลื่อนที่ของระบบคือ

$$f = M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx \quad \dots(2.10)$$

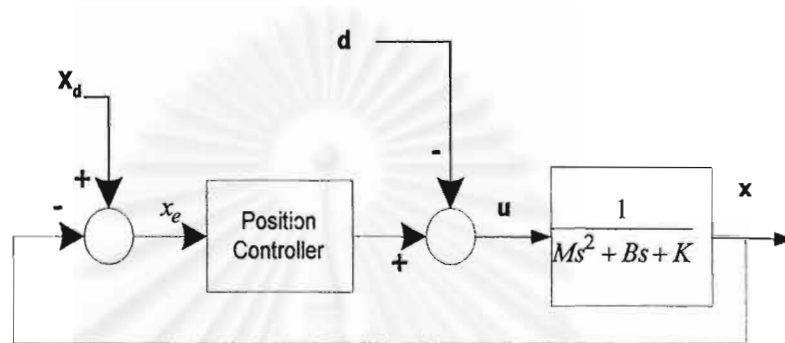
ซึ่งแทนสมการของแขนกลขณะสัมผัสกับวัตถุแวดล้อม โดยที่

M, B, K แทน มวล สัมประสิทธิ์ความหน่วง และค่าความแข็งตึงของสปริงตามลำดับ
 f แทน แรงที่ใส่เข้าไปในระบบตามลำดับ

เมื่อทำการควบคุมตำแหน่งหรือความเร็วของมวล M โดยมีสิ่งรบกวนจากภายนอกเข้ามา เช่น แรงเสียดทาน เป็นต้น ทำให้สมการที่ (2.10) เปลี่ยนไปเป็นสมการที่ (2.11)

$$f + d = M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx \quad \dots(2.11)$$

โดย d แทนแรงที่มาจากสิ่งรบกวนภายนอก (disturbance) ถ้าทำการควบคุมระบบตามสมการที่ (2.11) จะสามารถเขียนเป็นแผนภาพบล็อกได้ดังรูป 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงแผนภาพบล็อกของการควบคุมตำแหน่งของแบบจำลองแขนกลขณะสัมผัสกับวัตถุ

เมื่อเขียนสมการของตำแหน่งโดยให้ G_c แทนฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ของตัวควบคุมตำแหน่งจะได้ว่า

$$x(s) = \frac{(x_d(s) \cdot G_c(s)) - d(s)}{Ms^2 + Bs + K + G_c(s)} \quad \dots(2.12)$$

จะเห็นได้ว่าถ้าระบบควบคุมมีสิ่งรบกวนภายนอก d เข้ามาในระบบ การควบคุมตำแหน่งจะทำให้สิ่งรบกวนภายนอกนี้ผ่านตัวกรองผ่านต่ำซึ่งทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น และนอกจากนั้นถ้าใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิทเวลาที่ควบคุมให้แขนกลเคลื่อนที่เข้ามาสัมผัสกับวัตถุในตอนเริ่มแรกนั้นต้องควบคุมตำแหน่งของแขนกลก่อน เมื่อแขนกลเริ่มสัมผัสวัตถุก็จะเปลี่ยนการควบคุมแบบตำแหน่งเป็นการควบคุมแบบแรงแทน แต่การควบคุมแรงแบบอิมพลลิซิทนั้นเป็นการควบคุมแรงโดยผ่านการควบคุมตำแหน่ง ทำให้ไม่ต้องเปลี่ยนรูปแบบการควบคุมจากการควบคุมตำแหน่งเป็นการควบคุมแรงในช่วงที่แขนกลเข้าสัมผัสวัตถุ ซึ่งต่างจากกรณีของการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิท

นอกจากนั้นการควบคุมแรงแบบอิมพลลิซิทยังเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมทั่วไปได้ง่ายกว่า เนื่องจากว่าคำสั่งที่สั่งงานหุ่นยนต์อุตสาหกรรมโดยทั่วไปเป็นคำสั่งตำแหน่งให้หุ่นเคลื่อนที่ ดังนั้นถ้าควบคุมแรงโดยผ่านการควบคุมตำแหน่งของแขนกล จึงสามารถส่ง

คำสั่งไปยังแขนกลได้ทันที ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้พยายามใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทมามาใช้ในการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่งของแขนกล

2.1.3 Resolve Acceleration Control of Manipulator

การควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่งนั้น เป็นการควบคุมแบบแรงและตำแหน่งไปพร้อมๆกัน โดยแยกการควบคุมแรงและตำแหน่งออกจากกันตามทิศทางของคอมโพสิชันเฟรม เมื่อจะควบคุมตำแหน่งในทิศทางใด ๆ ของคอมโพสิชันเฟรมในวิธีรีโซลวแอคซีเลชันนั้นต้องคำนวณหาความเร่งของแขนกลในทิศทางนั้น ๆ ของคอมโพสิชันเฟรมก่อน หลังจากนั้นจึงแปลงให้มาอยู่ในรูปของความเร่งในแต่ละข้อต่อดังนี้

$$\ddot{P}_c = \ddot{P}_{cd} + K_v \cdot (\dot{P}_{cd} - \dot{P}_c) + K_p \cdot (E_p) \quad \dots(2.18)$$

โดยที่	$\ddot{P}_c =$	ความเร่งของปลายแขนกลในคอมโพสิชันเฟรม
	$\ddot{P}_{cd} =$	ความเร่งของปลายแขนกลในคอมโพสิชันเฟรมที่ต้องการ
	$\dot{P}_{cd} =$	ความเร็วของปลายแขนกลในคอมโพสิชันเฟรมที่ต้องการ
	$\dot{P}_c =$	ความเร็วของปลายแขนกลในคอมโพสิชันเฟรม
	$E_p =$	ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งปลายแขนกล
	$K_v, K_p =$	ค่าเกนของความเร็วและค่าเกนของตำแหน่ง

ค่าความเร่งที่คำนวณได้นั้นจะอยู่ในรูปทาส์สเปซ (Task Space) จึงต้องแปลงให้อยู่ในรูปของจอยน์สเปซ (Joint Space) ตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$\ddot{q} = J^{-1} \{ R_0^c (\ddot{P}_c - \dot{R}_0^c \dot{P}_c - J \dot{q}) \} \quad \dots(2.19)$$

โดยที่	$\ddot{q} =$	ความเร่งที่คำนวณได้ของข้อต่อ
	$J =$	จาโคเบียนเมตริกซ์
	$R_0^c =$	เมตริกซ์การแปลง จากเฟรม 0 ไปยังเฟรม c
	$\ddot{P}_c =$	ความเร่งของปลายแขนกลที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.18)
	$\dot{P}_c =$	ความเร็วของปลายแขนกลในเฟรม 0
	$\dot{q} =$	ความเร็วของข้อต่อ

เมื่อคำนวณความเร่งของแต่ละข้อต่อได้แล้ว ต่อไปจะคำนวณแรงบิดที่ใส่เข้าไปในข้อต่อจากสมการพลวัตของแขนกล

$$\tau = H(q) \cdot \ddot{q} + C(\dot{q}, q) + G(q) - J^T \cdot F \quad \dots(2.20)$$

โดยที่ $H(q) =$ เมตริกซ์ความเฉื่อย

$C(\dot{q}, q) =$ แรงหนีศูนย์กลาง และแรงโคริออริส

$G(q) =$ แรงโน้มถ่วง

$\tau =$ แรงเจเนอรัลไลซ์ที่ใส่เข้าไปในระบบ (Input Generalize Force)

$F =$ แรงที่กระทำกับปลายแขนกล

เมื่อแทนค่าความเร่งของแต่ละข้อต่อจากสมการที่ (2.19) ลงไปในสมการ (2.20) ทำให้ได้ว่า

$$\tau_{input} = H(q)J^{-1} \{R_0^{c-1} (\ddot{P}_c - \dot{R}_0^c \dot{P}) - J\dot{q}\} + C(\dot{q}, q) + G(q) - J^T F \quad \dots(2.21)$$

ซึ่งเมื่อใส่แรงบิดตามสมการที่ (2.21) ไปยังข้อต่อแต่ละข้อของแขนกลแล้วจะทำให้

$$\ddot{e}_p + k_v \dot{e}_p + k_p e_p = 0 \quad \dots(2.22)$$

นั่นคือค่าความผิดพลาดของตำแหน่งจะลู่เข้าสู่ศูนย์ ทำให้แขนกลเคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งที่ต้องการได้ในที่สุด

2.2 ปัญหาของการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่งของแขนกลโดยใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิท

ปัญหาของการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่งทั้งแบบที่ใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิทและการควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทคือปัญหาในการหาลักษณะรูปร่างของวัตถุที่แน่นอน ดังนั้นจึงมีผู้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแรง (Force sensor) เพื่อหารูปร่างของวัตถุขณะที่ทำการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่ง เช่น Tsuneo Yoshikawa และ Akiko Sudou (1990) ได้ศึกษาเรื่อง "Dynamic hybrid position/force control of robot manipulators: Online estimation of unknown constraint" ซึ่งใช้ข้อมูลของแรงมาหาเวกเตอร์ของพื้นผิว ทำให้สามารถทราบทิศทางในการควบคุมตำแหน่งและทิศทางในการควบคุมแรง

นอกจากนี้ ปัญหาหลักของการควบคุมผสมระหว่างการควบคุมแรงและตำแหน่งโดยใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทก็คือคำสั่งตำแหน่งให้แขนกลกด ถ้าใช้ตำแหน่งจากสมการที่ (2.5) และ (2.6) มาใช้คำนวณแรงบิดของมอเตอร์ในแต่ละข้อต่อตามสมการที่ (2.7) จะต้องรู้ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ค่อนข้างแม่นยำ เช่น ค่ามวลหรือค่าแรงเสียดทาน ถ้าค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวที่หามาได้มีความแม่นยำจะทำให้ค่าตำแหน่งที่คำนวณเพื่อให้เกิดแรงตามต้องการดังกล่าวมีความแม่นยำตามไปด้วย ทำให้สามารถควบคุมแรงได้ตามต้องการ

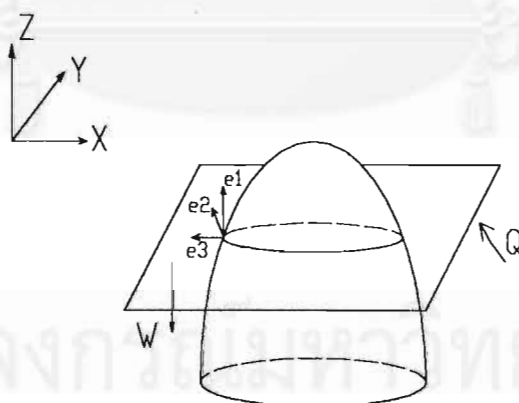
2.3 การควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่งของแขนกลด้วยแรงแบบอิมพลิซิทที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งตึงแบบออนไลน์

จากที่ได้ศึกษามาข้างต้นจึงมีแนวคิดที่จะนำการควบคุมแบบอิมพลิซิทมาประยุกต์ใช้กับการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่ง ซึ่งเรียกว่าการควบคุมแบบไฮบริดด้วยแรงแบบอิมพลิซิทสำหรับแขนกล (Hybrid Control with An Implicit Force for A Manipulator Arm) โดยที่มีการหาค่าพารามิเตอร์ความแข็งตึง (Stiffness) แบบออนไลน์ (online) เพื่อนำมาคำนวณหาค่าสั่งตำแหน่งที่ให้แขนกลกดแบบออนไลน์ด้วย ซึ่งถึงแม้ว่าไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่แม่นยำ ก็สามารถควบคุมให้แรงที่แขนกลสัมผัสวัตถุเข้าสู่ค่าที่ต้องการได้เร็ว โดยแนวคิดนี้มาจาก Dragan M. Stokic and Miomir K. Vukobratovic(1991) ซึ่งได้ศึกษาเรื่อง "An adaptive hybrid control scheme for manipulation robots with implicit force control" ไว้

วิธีนี้เป็นการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่งด้วยแรงแบบอิมพลิซิทสำหรับแขนกล โดยแรงแบบอิมพลิซิทที่ใช้คือการควบคุมแรงผ่านการควบคุมตำแหน่ง ซึ่งมีการคำนวณหาค่าความแข็งตึงแบบออนไลน์ เพื่อให้การควบคุมแรงมีประสิทธิภาพมากขึ้น วิธีการนี้สามารถสรุปเป็นขั้นตอนของการทำงานดังนี้

- 1) หาทิศทางที่จะควบคุมแรงและตำแหน่ง โดยมีหลักการดังนี้

จากที่ Tsuneo Yoshikawa และ Akiko Sudou (1990) ได้ศึกษาเรื่อง "Dynamic hybrid position/force control of robot manipulators: Online estimation of unknown constraint" ไว้ นั้นเราจะนำข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัดแรงมาหารูปร่างของวัตถุ โดยพิจารณาตามรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงทิศทางที่จะควบคุมแรงและตำแหน่ง

จากรูปที่ 2.5 จุดประสงค์คือต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่ไปบน plane Q โดยที่ควบคุมแรงในทิศตั้งฉากกับผิววัตถุ ชั้นแรกจะวัดแรงจากอุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่ปลายแขนกล หลังจากนั้นจะหาทิศทางที่ตั้งฉากกับผิวชิ้นงานจากสูตร

$$e_3 = \frac{f}{\|f\|} \quad \dots(2.13)$$

โดยที่ f แทนแรงที่แกนกลสัมผัสกับวัตถุแวดล้อม และ e_3 แทนเวกเตอร์หนึ่งหน่วยซึ่งมีทิศเดียวกับแรงที่แกนกลสัมผัสกับวัตถุแวดล้อม หลังจากนั้นจะหาทิศทางที่ต้องการให้แกนกลเคลื่อนที่จาก

$$e_2 = \frac{w \times e_3}{\|w \times e_3\|} \quad \dots(2.14)$$

โดยที่ w แทนเวกเตอร์หนึ่งหน่วยซึ่งมีทิศตั้งฉากกับระนาบ Q ส่วน e_2 แทนเวกเตอร์หนึ่งหน่วยซึ่งแสดงถึงทิศทางที่ต้องการให้แกนกลเคลื่อนที่ สำหรับแกนสุดท้ายหาได้จาก

$$e_1 = \frac{e_2 \times e_3}{\|e_2 \times e_3\|} \quad \dots(2.15)$$

โดยที่ e_1 แทนเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่มีทิศตั้งฉากกับระนาบ Q

2) ทำการคำนวณหาค่าความแข็งตึง (Stiffness) ของระบบ โดยกำหนดค่าความแข็งตึงเริ่มแรกของมิววัตถุให้มีค่าคงที่ค่าหนึ่งเพื่อนำมาคำนวณค่าระยะกดเริ่มต้นก่อน หลังจากนั้นจะคำนวณค่าความแข็งตึงจาก

$$\begin{aligned} \text{Stiffness} &= \text{Stiffness}_0 && ; i = 1 \\ \text{Stiffness} &= \frac{F_e}{x} && ; i > 1 \end{aligned} \quad \dots(2.16)$$

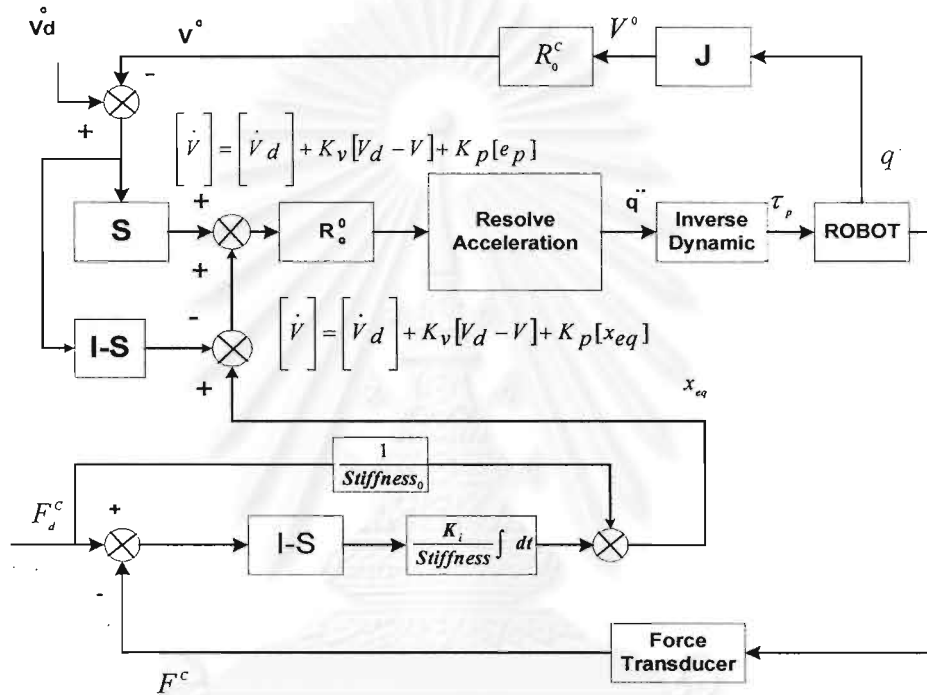
โดยที่ F_e = แรงที่แกนกลกดวัตถุ
 x = ระยะที่สั่งให้แกนกลกด

3) ต่อมาจะหาระยะที่สั่งให้แกนกลกดจากสมการที่ (2.17)

$$x = \frac{F_d}{\text{Stiffness}_0} + \int K_i \frac{(F_d - F_e)}{\text{Stiffness}} dt \quad (2.17)$$

สำหรับตัวอินทิเกรต (Integrator) ที่อยู่ในสมการ (2.17) นั้นใช้เพื่อลดค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว (steady state error) เนื่องจากว่าถ้าหาพารามิเตอร์ของแขนกลได้ไม่แม่นยำ จะทำให้แรงบิดที่คำนวณได้ไม่สามารถขับแขนกลให้เคลื่อนที่ไปถึงตำแหน่งที่ต้องการได้ ดังนั้นตัวอินทิเกรตจะช่วยให้ค่าความผิดพลาดของแรงที่สถานะอยู่ตัวเข้าใกล้ศูนย์

4) เมื่อคำนวณค่าระยะที่จะกดแล้วจะนำไปเป็นสัญญาณคำสั่งสำหรับตัวควบคุมตำแหน่งในแนวตั้งฉากกับวัตถุต่อไป และนำกลับไปใช้ในสมการที่ (2.16) เพื่อหาค่า Stiffness ใน Loop การคำนวณต่อไปอีกด้วย ระบบดังกล่าวสามารถเขียนเป็นแผนภาพบล็อกได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงแผนภาพบล็อกของการควบคุมแรงแบบอิมพลีซิที

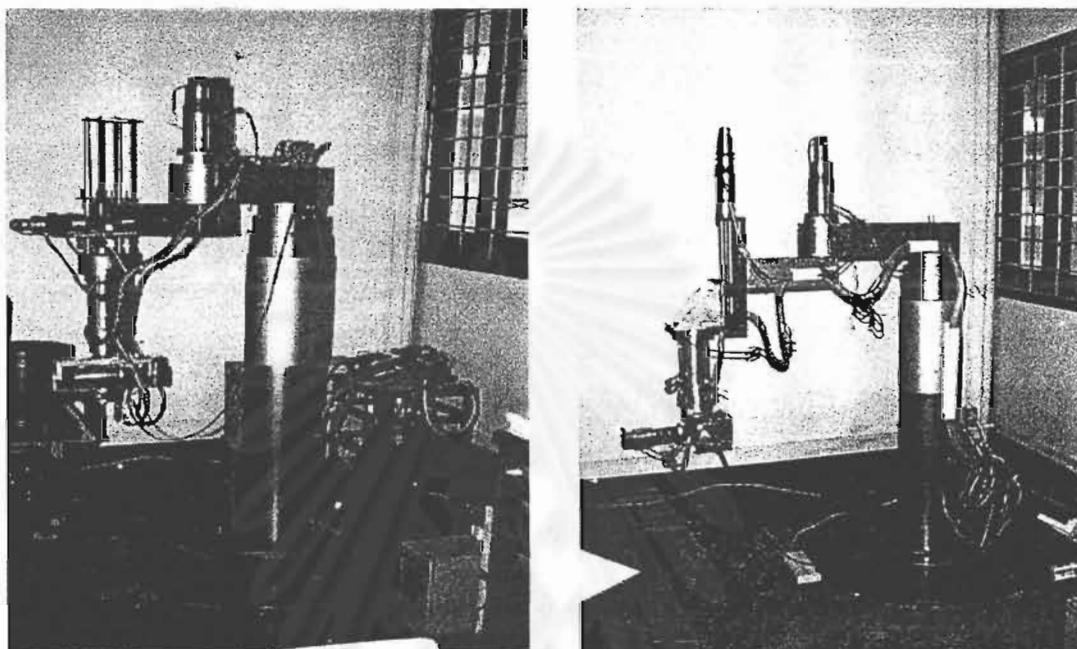
จากรูปที่ 2.6 วงรอบด้านบนเป็นวงรอบที่ควบคุมตำแหน่ง ส่วนวงรอบด้านล่างเป็นการควบคุมแรงผ่านตัวควบคุมตำแหน่งทำให้ระบบทั้งหมดเป็นการควบคุมตำแหน่ง สำหรับการควบคุมตำแหน่งนั้นใช้วิธีรีโซลวแอคซีเลชัน (Resolve Acceleration) ซึ่งเป็นการคำนวณหาความเร่งของแต่ละข้อต่อออกมาก่อน หลังจากนั้นจะทำการคำนวณหาแรงบิดที่ใช้ขับเคลื่อนข้อต่อ (link) เพื่อให้แขนกลเคลื่อนที่ตามต้องการ

2.4 การนำทฤษฎีควบคุมไปใช้ทดลองกับแขนกล

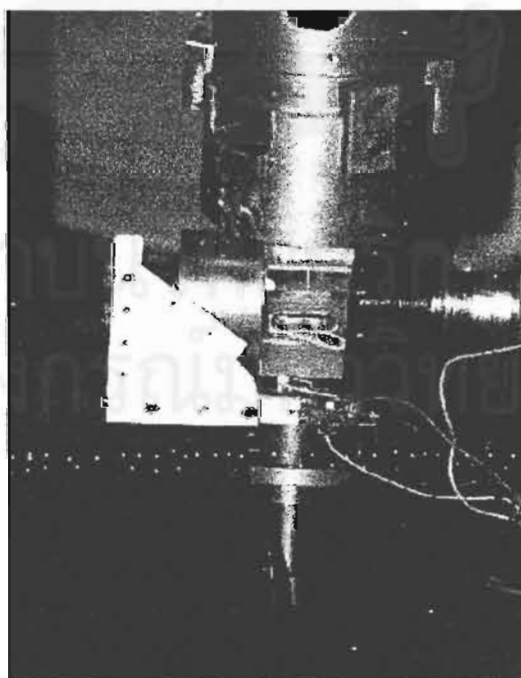
การนำทฤษฎีควบคุมไปใช้กับแขนกลนั้น จะใช้แขนกลจุฬา 2 ซึ่งได้ทำการปรับปรุงระบบขับเคลื่อนของข้อต่อแต่ละข้อ (รายละเอียดของแขนหุ่นยนต์จุฬา 2 สามารถดูได้จากภาคผนวก ค ส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลจุฬา 2 สามารถดูรายละเอียดที่ภาคผนวก ข) ซึ่งได้แสดงไว้

ตามรูปที่ 2.7 โดยที่ปลายแขนกลจะติดอุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่สามารถวัดข้อมูลของแรงได้ทั้ง 3 ทิศทาง

สำหรับทฤษฎีการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่งนั้นก็จะใช้การควบคุมตาม Block Diagram ในรูป 2.6



รูปที่ 2.7 แสดงแขนกลก่อนการปรับปรุง (ซ้าย) และแขนกลหลังการปรับปรุง (ขวา)



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่ติดที่ปลายแขนกล

อุปกรณ์ตรวจจับแรง (Force Sensor) ที่ใช้เป็นรุ่น DSP-Based Force Sensor Receivers
ส่วนอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้ในการทดลองสามารถดูรายละเอียดได้จากภาคผนวก

ส่วนโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ได้พัฒนาขึ้นโดยใช้ภาษา C
และใช้ความถี่ในการสุ่ม (Sampling Frequency) มีค่าเท่ากับ 100 Hz



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การติดตั้ง (Implementation) ระบบควบคุมแรงและตำแหน่ง กับแขนหุ่นยนต์จู่ซ่า 2

ในบทนี้เป็นการทดลองนำเอาเทคนิคระบบควบคุมแรงและตำแหน่งที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 มาประยุกต์ทดลองใช้ (Implementation) กับระบบแขนหุ่นยนต์จู่ซ่า 2 โดยที่ในการทดลองนั้นแบ่งเป็นการทดลองแบบต่าง ๆ ดังนี้

3.1 ทำการทดลองเพื่อนำการควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทีไปใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทีที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งตึง (Stiffness) แบบออนไลน์กับแบบที่ให้ค่าความแข็งตึงคงที่

3.2 ทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิที และการควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทีที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งตึงแบบออนไลน์ เมื่อต้องการให้แขนกลกดวัตถุชนิดต่าง ๆ กันดังนี้

3.2.1 วัตถุที่อ่อนตัว ซึ่งในที่นี้ใช้แผ่นโฟมในการทดลอง

3.2.2 แผ่นเหล็กที่มีความหยุ่นตัว

3.2.3 แผ่นเหล็กที่มีความหยุ่นตัวโดยคำสั่งแรงที่ให้แขนกลกระทำมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได (Step Change)

3.2.4 วัตถุแข็งที่รูปร่างไม่ต่อเนื่อง (Discontinuity)

3.3 การทดลองควบคุมแรงและตำแหน่ง โดยควบคุมตำแหน่งในแนวแกน z หรือแกนที่ 3 ของแขนกลและควบคุมแรงในพื้นที่ระนาบ xy หรือระนาบที่ประกอบด้วยแกนที่ 1 และแกนที่ 2 ของแขนกล

3.1 การทดลองนำการควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทีไปใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ

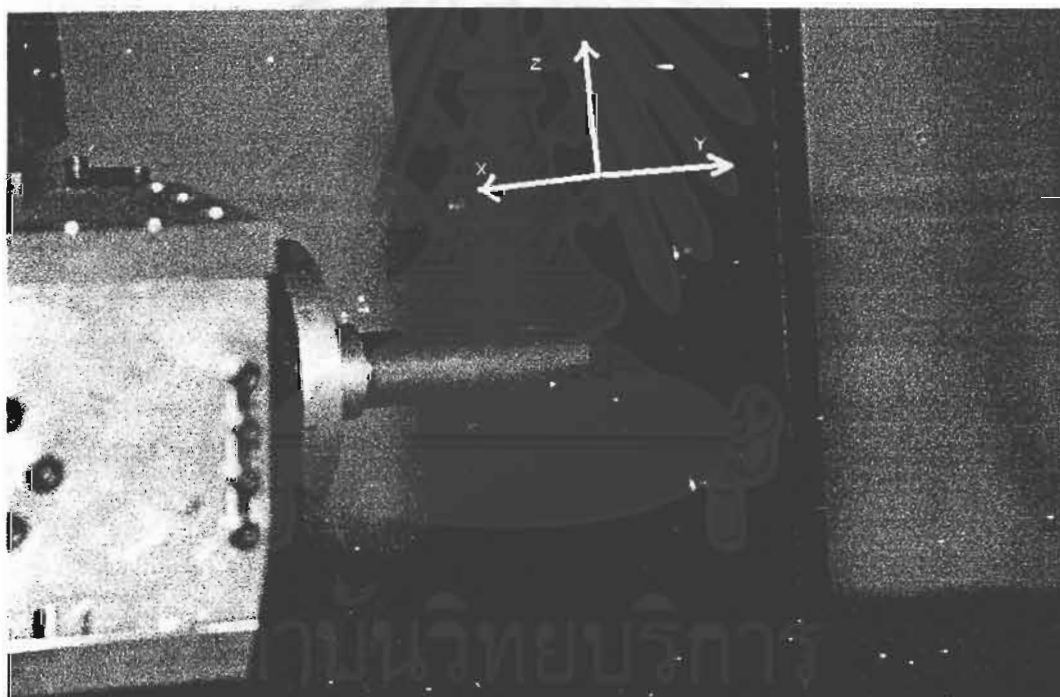
การทดลองนี้เป็นการทดลองควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่งของแขนกลที่กระทำกับผนังแบบ ตามรูปที่ 3.1 โดยการทดลองเป็นการเปรียบเทียบระหว่าง

- 1) การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิที ที่ให้ค่าความแข็งตึงคงที่ ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ 5×10^4 นิวตัน/เมตร

2) การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่มีการหาค่าหรือประมาณการค่าความแข็งตั้งแบบออนไลน์

พิจารณารูป 3.1 แกน X คือแกนที่ตั้งฉากกับพื้นผิว แกน Y คือแกนที่สัมผัสกับพื้นผิวในแนวระนาบ แกน Z คือแกนที่สัมผัสกับพื้นผิวในแนวตั้ง การทดลองเริ่มจากแขนกลอยู่ห่างจากวัตถุประมาณ 1 ซม. หลังจากนั้นแขนกลจะเคลื่อนที่เข้ากอดผนังแบนในแนวแกน X ด้วยแรงกด 20 นิวตัน 25 นิวตัน 30 นิวตัน ตามลำดับ หลังจากนั้นแขนกลจะเคลื่อนที่ไปตามผนังแบนเป็นเส้นตรง โดยมีสมการความเร็วเป็นสมการกำลังสอง เป็นระยะทาง 80 มม. ตามแนวแกน Y พร้อมกับกดผนังด้วยแรงที่กำหนด โดยการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตนั้นจะใช้ค่าเกนของอินทิกรัลเท่ากับ 0.8 ส่วนค่า $Stiffness_0$ มีค่า 5000 N/m

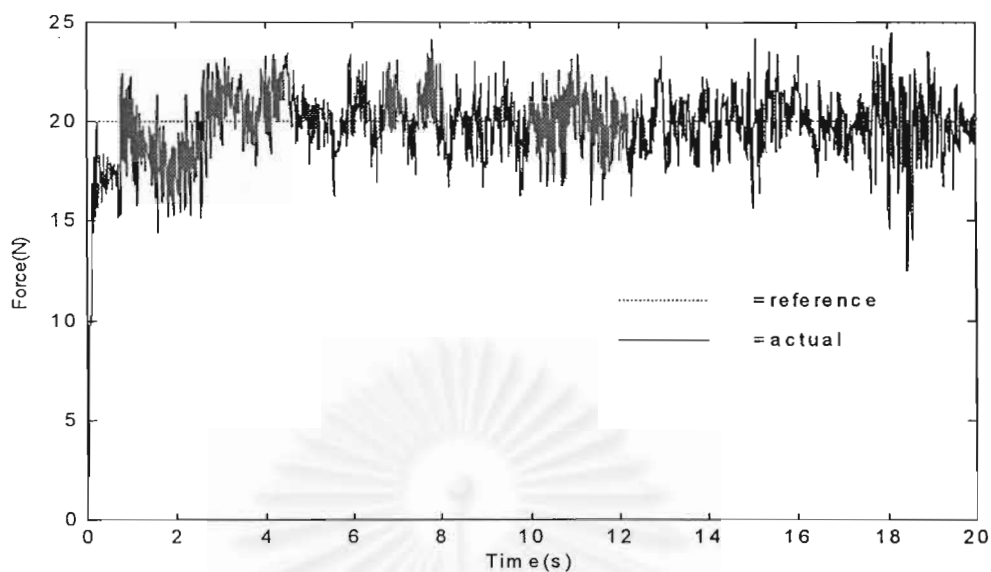
สำหรับค่า K_p และค่า K_v ของการควบคุมแบบ Resolve Acceleration มีค่าเท่ากับ 1300 และ 50 ตามลำดับ ส่วนค่า K_f สำหรับการหาค่าตำแหน่งกदनนั้นมีค่าเท่ากับ 0.8



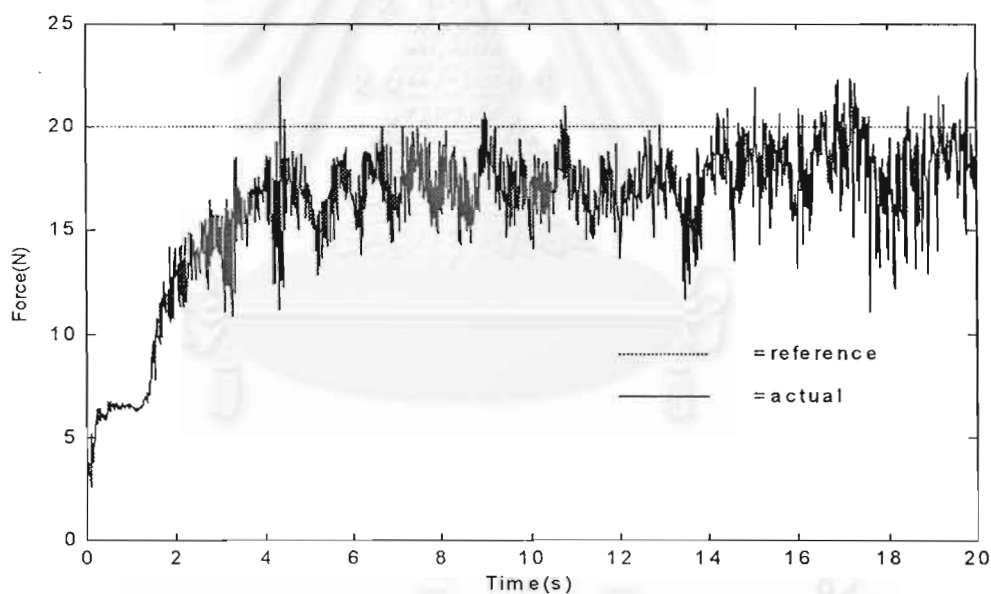
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.1 แสดงรูปของแขนกลกำลังเคลื่อนที่อยู่บนผนังแบน

Force Response



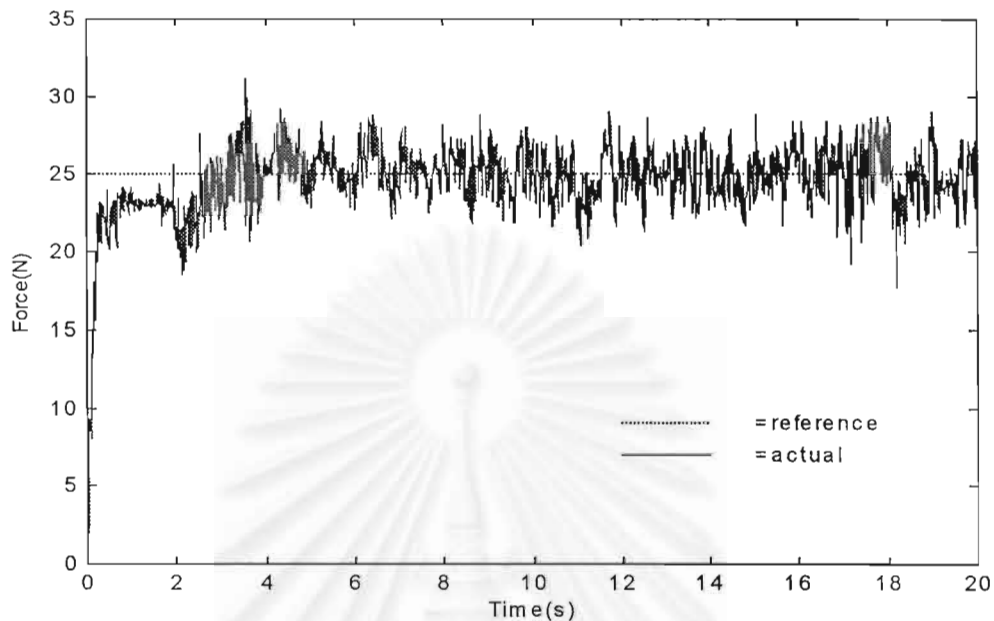
รูปที่ 3.2 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเป็นระยะทาง 80 มม. บนผนังแบน ด้วยขนาดแรงกด 20 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทที่มีการหาค่าความแข็งตั้งแบบออนไลน์



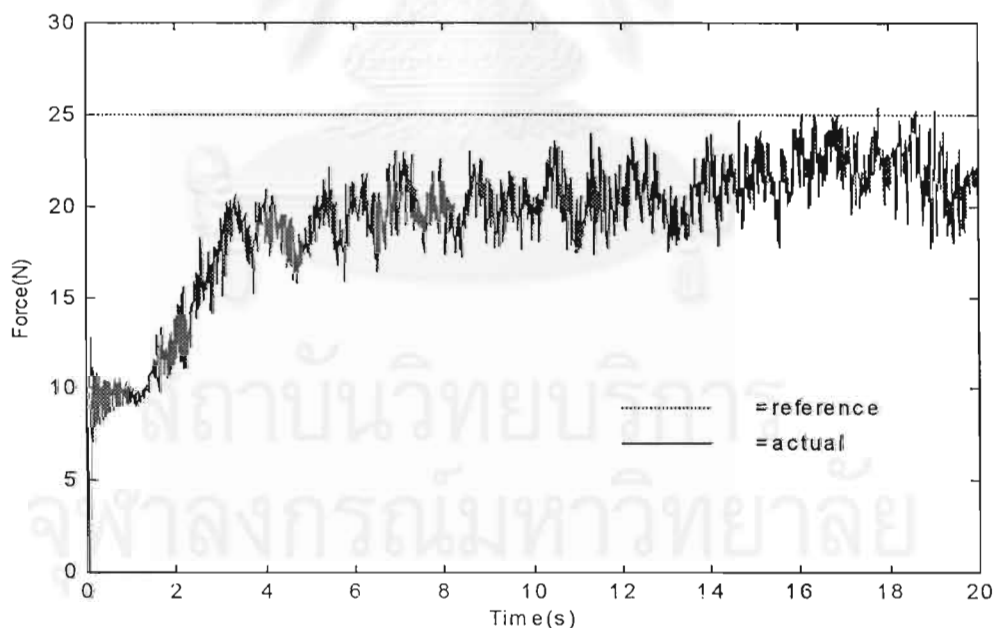
รูปที่ 3.3 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเป็นระยะทาง 80 มม. บนผนังแบน ด้วยขนาดแรงกด 20 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทที่ให้ค่าความแข็งตั้งคงที่

จากรูปที่ 3.2 – 3.3 จะเห็นได้ว่าตอนเริ่มต้นแขนกลวิ่งเข้ากวดวัตถุด้วยแรงที่น้อยกว่าค่าที่ต้องการ เนื่องจากตำแหน่งที่ต้องการให้แขนกลกดตอนเริ่มต้นไม่ทำให้เกิดแรงตามต้องการ หลังจากนั้นผลของค่าอินทิกรัลจะทำให้แรงกดค่อย ๆ เพิ่มขึ้นสู่ค่าที่ต้องการ ซึ่งการควบคุมแรงแบบ

อิมพลิชิตที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งตั้งแบบออนไลน์นั้น เมื่อเวลาผ่านไป 3 วินาที แรงกดก็จะเข้าสู่ค่าที่ต้องการ ส่วนการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่ให้ค่าความแข็งตั้งคงที่นั้น เมื่อเวลาผ่านไป 20 วินาที แรงกดจึงเข้าสู่ค่าที่ต้องการ



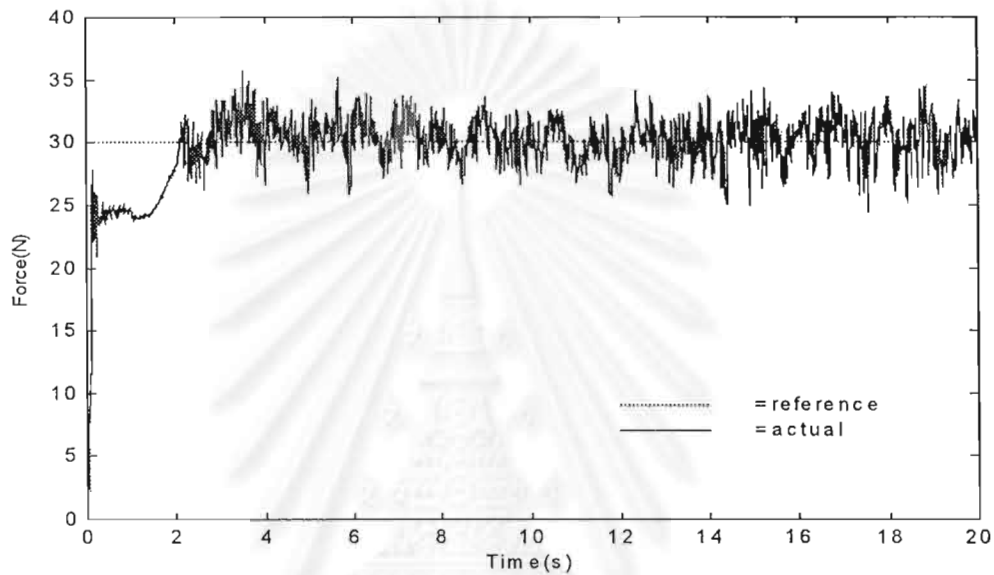
รูปที่ 3.4 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเป็นระยะทาง 80 มม. บนผนังแบน ด้วยขนาดแรงกด 25 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่มีการหาค่าความแข็งตั้งแบบออนไลน์



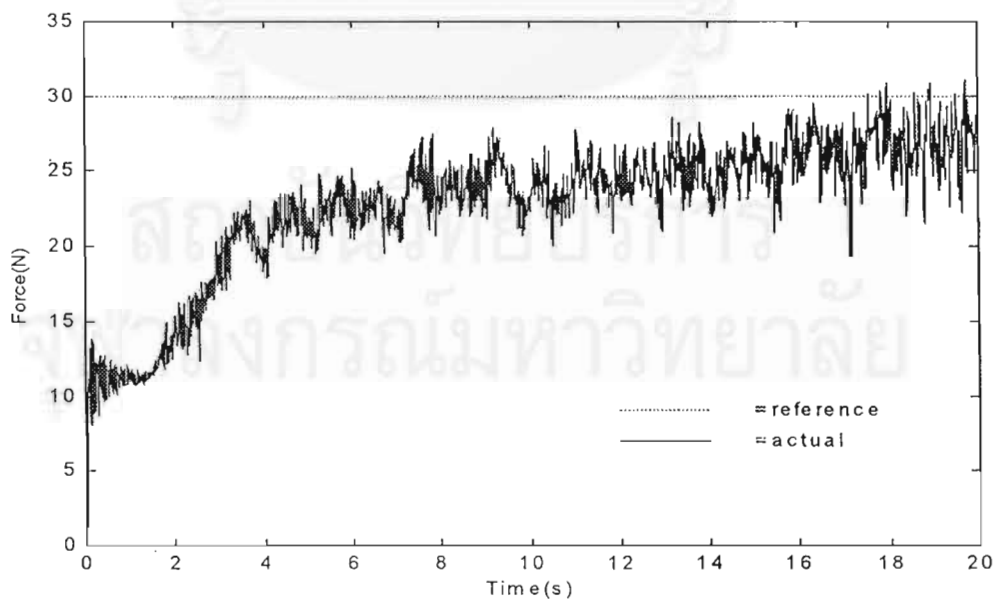
รูปที่ 3.5 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเป็นระยะทาง 80 มม. บนผนังแบน ด้วยขนาดแรงกด 25 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่ให้ค่าความแข็งตั้งคงที่

จากรูปที่ 3.4 – 3.5 จะเห็นได้ว่าขณะที่คำสั่งให้แรงกดมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 25 นิวตัน นั้น ผลที่ได้ก็ใกล้เคียงกับขณะที่แรงกดมีค่า 20 นิวตัน โดยตอนเริ่มต้นแขนกลวิ่งเข้ากวดัตถ์ด้วยแรงที่น้อย

กว่าค่าที่ต้องการ เนื่องจากตำแหน่งที่ต้องการให้แขนกลกดตอนเริ่มต้นไม่ทำให้เกิดแรงตามต้องการ โดยวิธีที่หาค่าความแข็งตั้งแบบออนไลน์นั้นจะมีแรงกดเริ่มต้นประมาณ 15 นิวตัน แต่วิธีที่ให้ค่าความแข็งตั้งคงที่นั้นจะมีแรงกดเริ่มต้นประมาณ 10 นิวตัน หลังจากนั้นผลของค่าอินทิกรัลจะทำให้แรงกดค่อยๆเพิ่มขึ้นสู่ค่าที่ต้องการ แต่การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่มีการหาค่าหรือประมาณค่า Stiffness แบบออนไลน์นั้น เมื่อเวลาผ่านไป 3 วินาที ส่วนการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่ให้ค่าความแข็งตั้งคงที่นั้น เมื่อเวลาผ่านไป 20 วินาที แรงกดจึงเข้าสู่ค่าที่ต้องการ



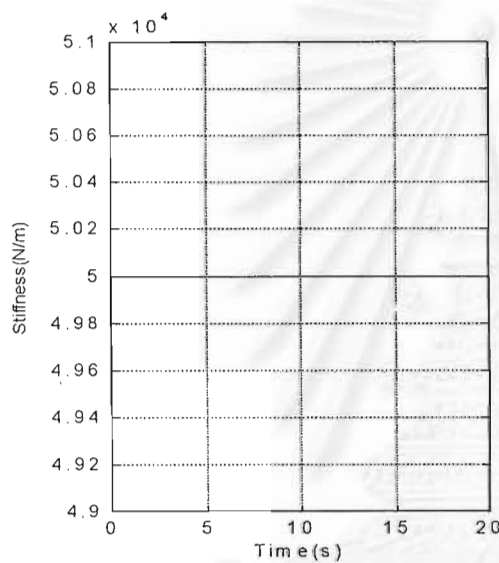
รูปที่ 3.6 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเป็นระยะทาง 80 มม. บนผนังแบนด้วยขนาดแรงกด 30 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่มีการหาค่าความแข็งตั้งแบบออนไลน์



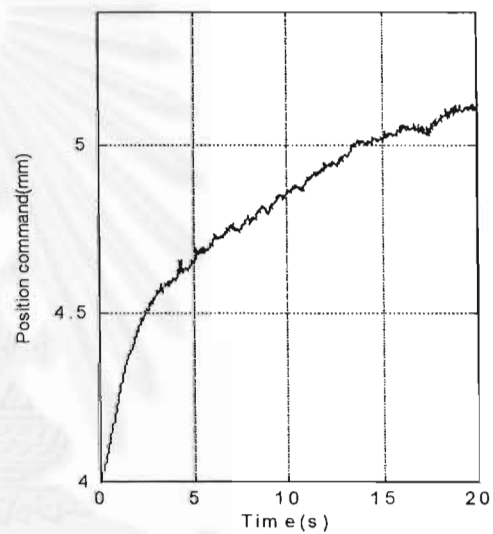
รูปที่ 3.7 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเป็นระยะทาง 80 มม. บนผนังแบนด้วยขนาดแรงกด 30 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่ให้ค่าความแข็งตั้งคงที่

จากรูปที่ 3.6 – 3.7 จะเห็นได้ว่าขณะที่คำสั่งให้แรงกตมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 25 N นั้น ผลที่ได้ก็ใกล้เคียงกับขณะที่แรงกตมีค่า 20 N โดยตอนเริ่มต้นแขนกลวิ่งเข้ากตวัตถุด้วยแรงที่น้อยกว่าค่าที่ต้องการ เนื่องจากตำแหน่งที่ต้องการให้แขนกลกตตอนเริ่มต้นไม่ทำให้เกิดแรงตามต้องการ โดยวิธีที่หาค่าความแข็งตึงแบบออนไลน์นั้นจะมีแรงกตเริ่มต้นประมาณ 15 N แต่วิธีที่ให้ค่าความแข็งตึงคงที่นั้นจะมีแรงกตเริ่มต้นประมาณ 10 N หลังจากนั้นผลของค่าอินทิกรัลจะทำให้แรงกตค่อยๆเพิ่มขึ้นสู่ค่าที่ต้องการ แต่การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่มีการหาค่าหรือประมาณค่า Stiffness แบบออนไลน์นั้น เมื่อเวลาผ่านไป 3 วินาที ส่วนการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่ให้ค่าความแข็งตึงคงที่นั้น เมื่อเวลาผ่านไป 20 วินาที แรงกตจึงเข้าสู่ค่าที่ต้องการ

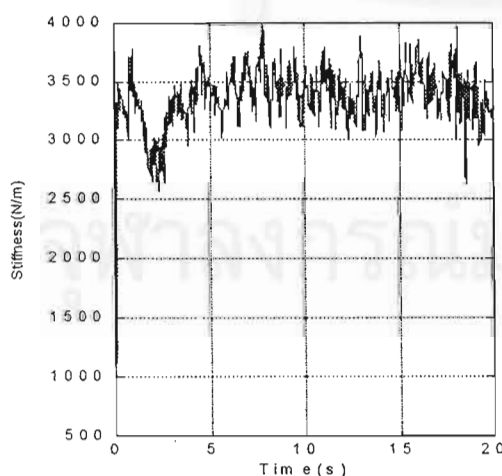
Normal Position Response



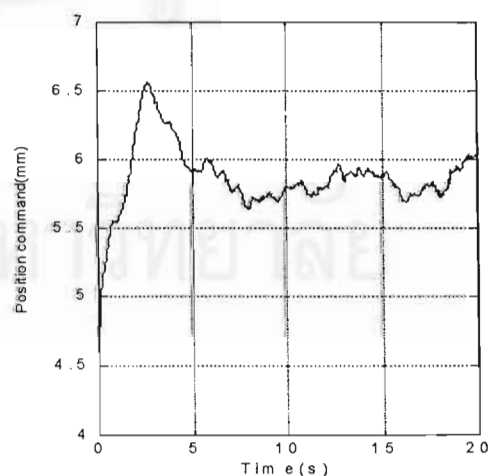
รูปที่ 3.8 แสดงค่าความแข็งตึงที่คงที่ โดยแรงกตมีค่า 20 นิวตัน



รูปที่ 3.9 แสดงค่าระยะที่สั่งให้แขนกลกต เมื่อค่าความแข็งตึงคงที่ โดยแรงกตมีค่า 20 นิวตัน

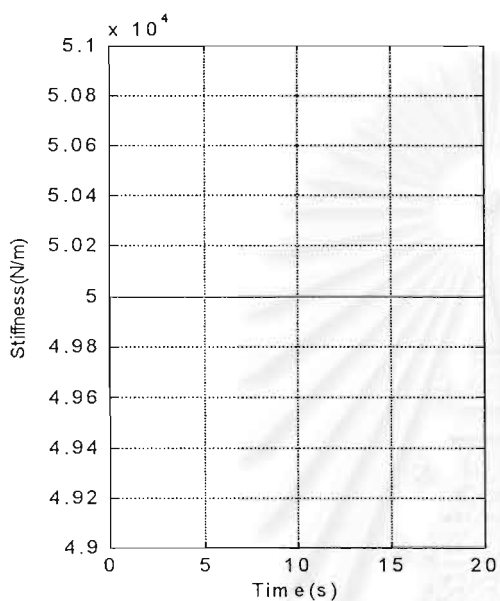


รูปที่ 3.10 แสดงค่าความแข็งตึงที่มีการปรับแบบออนไลน์ โดยที่แรงกตมีค่า 20 นิวตัน

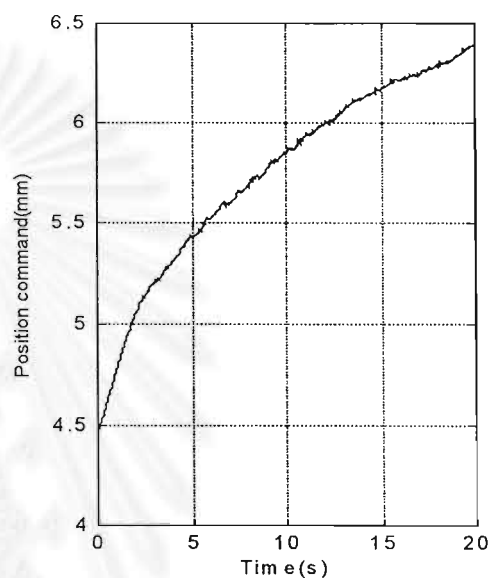


รูปที่ 3.11 แสดงค่าระยะที่สั่งให้แขนกลกต เมื่อมีการปรับค่าความแข็งตึงแบบออนไลน์ โดยที่แรงกตมีค่า 20 นิวตัน

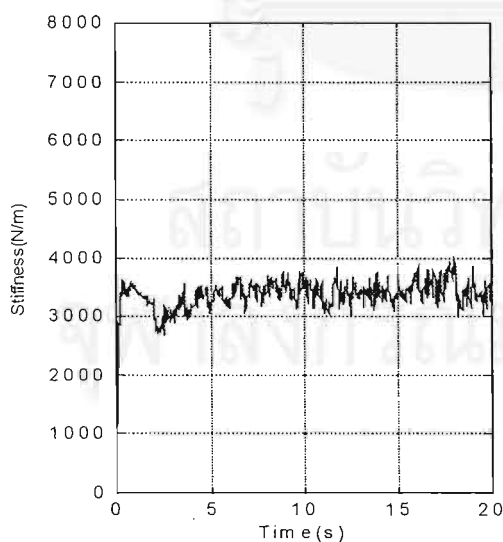
จากรูป 3.8-3.11 แสดงถึงค่าคำสั่งตำแหน่งให้แขนกลกวด และค่าความแข็งตึงของระบบ ขณะที่คำสั่งแรงกวดมีค่า 20 นิวตัน จะเห็นได้ว่าวิธีควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งตึงแบบออนไลน์นั้น ค่าระยะที่สั่งให้แขนกลกวดจะมีค่าลู่เข้าสู่ค่าที่ทำให้เกิดแรงตามที่ต้องการคือประมาณ 6 มม. ได้เร็วกว่า การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่ให้ค่าความแข็งตึงคงที่ โดยจะลู่เข้าเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 5 วินาที และถ้าพิจารณาค่าความแข็งตึงของระบบแล้ว ค่าความแข็งตึงของระบบจะมีค่าประมาณ 3,500 นิวตัน/เมตร



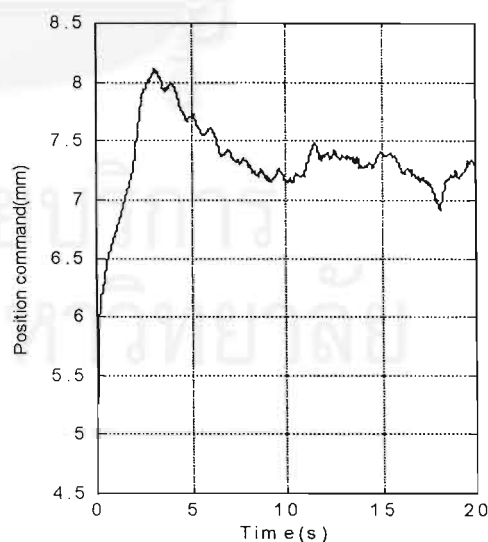
รูปที่ 3.12 แสดงค่าความแข็งตึงที่คงที่ โดยแรงกวดมีค่า 25 นิวตัน



รูปที่ 3.13 แสดงค่าระยะที่สั่งให้แขนกลกวด เมื่อค่าความแข็งตึงคงที่ โดยแรงกวดมีค่า 25 นิวตัน

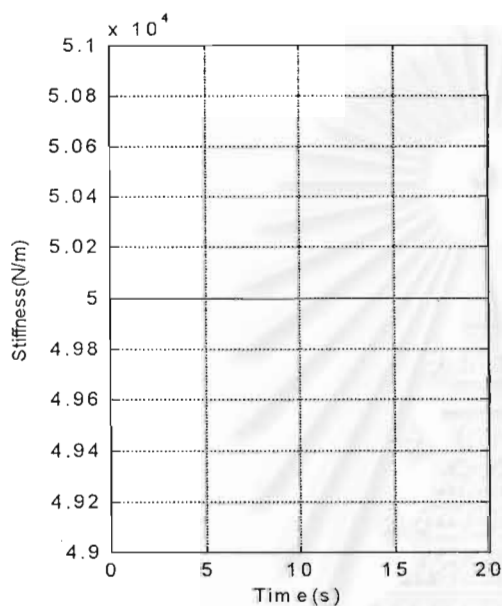


รูปที่ 3.14 แสดงค่าความแข็งตึงที่มีการปรับแบบออนไลน์ โดยที่แรงกวดมีค่า 25 นิวตัน

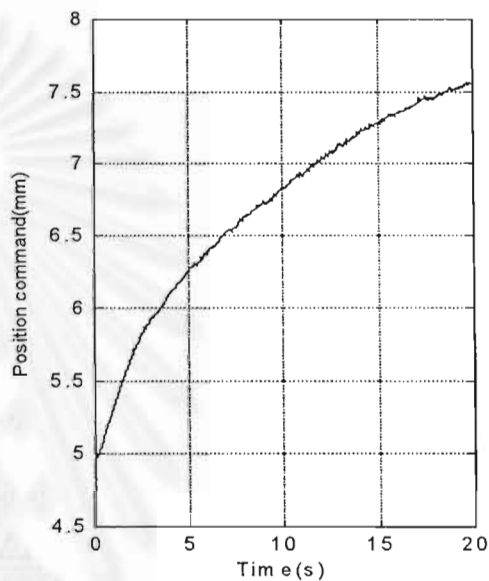


รูปที่ 3.15 แสดงค่าระยะที่สั่งให้แขนกลกวด เมื่อมีการปรับค่าความแข็งตึงแบบออนไลน์ โดยที่แรงกวดมีค่า 25 นิวตัน

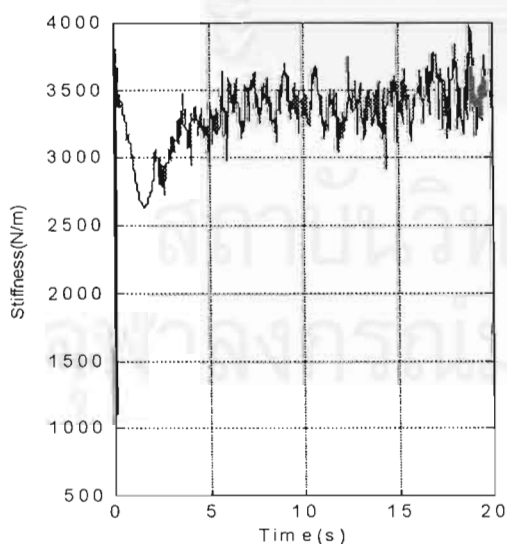
จากรูป 3.12-3.15 แสดงถึงค่าคำสั่งตำแหน่งให้แขนกลกด และค่าความแข็งตึงของระบบ ขณะที่คำสั่งแรงกดมีค่า 25 นิวตัน จะเห็นได้ว่าวิธีควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทีที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งตึงแบบออนไลน์นั้น ค่าระยะที่สั่งให้แขนกลกดจะมีค่าลู่เข้าสู่ค่าที่ทำให้เกิดแรงตามที่ต้องการคือประมาณ 7.5 มม. ได้เร็วกว่า การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทีที่ให้ค่าความแข็งตึงคงที่ โดยจะลู่เข้าเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 5 วินาที และถ้าพิจารณาค่าความแข็งตึงของระบบแล้ว ค่าความแข็งตึงของระบบจะมีค่าประมาณ 3,500 นิวตัน/เมตร



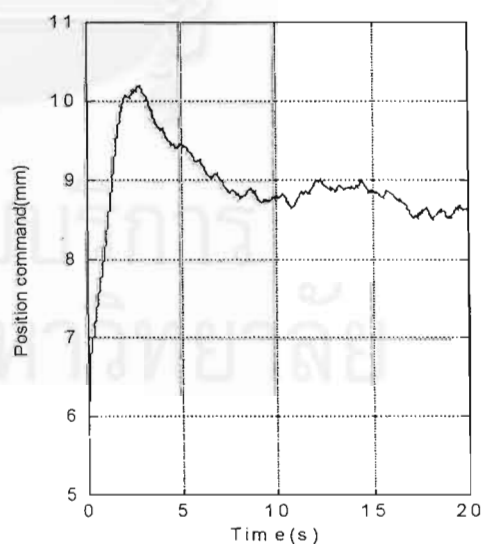
รูปที่ 3.16 แสดงค่าความแข็งตึงที่คงที่ โดยแรงกดมีค่า 30 นิวตัน



รูปที่ 3.17 แสดงค่าระยะที่สั่งให้แขนกลกด เมื่อค่าความแข็งตึงคงที่โดยแรงกดมีค่า 30 นิวตัน



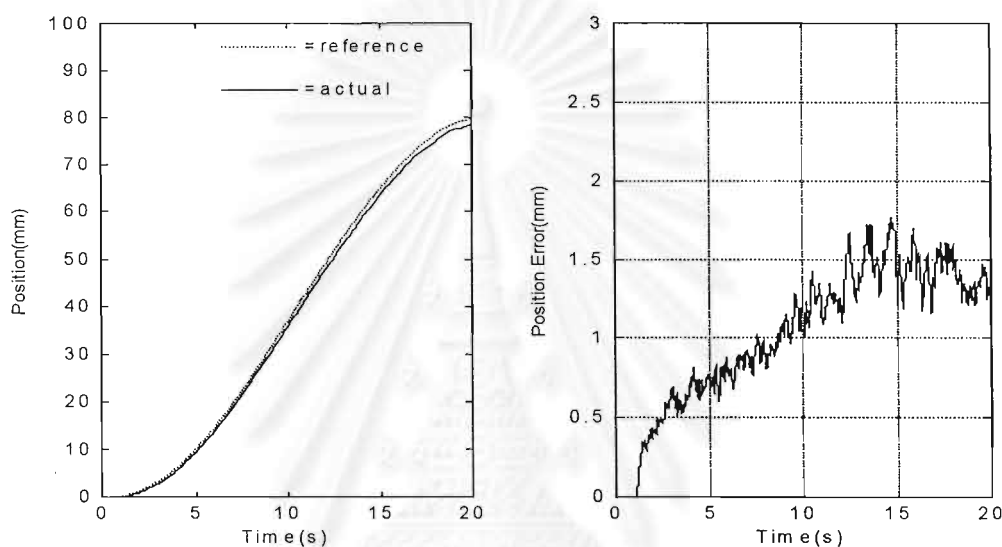
รูปที่ 3.18 แสดงค่าความแข็งตึงที่มีการปรับแบบออนไลน์ โดยแรงกดมีค่า 30 นิวตัน



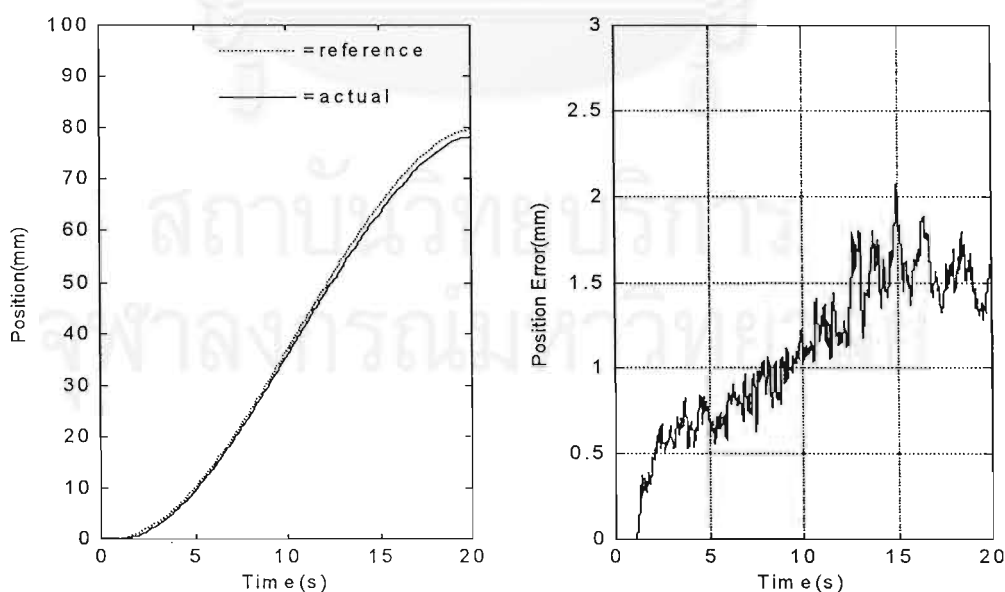
รูปที่ 3.19 แสดงค่าระยะที่สั่งให้แขนกลกด เมื่อมีการปรับค่าความแข็งตึงแบบออนไลน์ โดยแรงกดมีค่า 30 นิวตัน

จากรูป 3.16-3.19 แสดงถึงค่าคำสั่งตำแหน่งให้แขนกลกุด และค่าความแข็งตึงของระบบ ขณะที่คำสั่งแรงกุดมีค่า 30 นิวตัน จะเห็นได้ว่าวิธีควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งตึงแบบออนไลน์นั้น ค่าระยะที่สั่งให้แขนกลกุดจะมีค่าลู่เข้าสู่ค่าที่ทำให้เกิดแรงตามที่ต้องการคือประมาณ 9 มม. ได้เร็วกว่า การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่ให้ค่าความแข็งตึงคงที่ โดยจะลู่เข้าเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 5 วินาที และถ้าพิจารณาค่าความแข็งตึงของระบบแล้ว ค่าความแข็งตึงของระบบจะมีค่าประมาณ 3,500 นิวตัน/เมตร

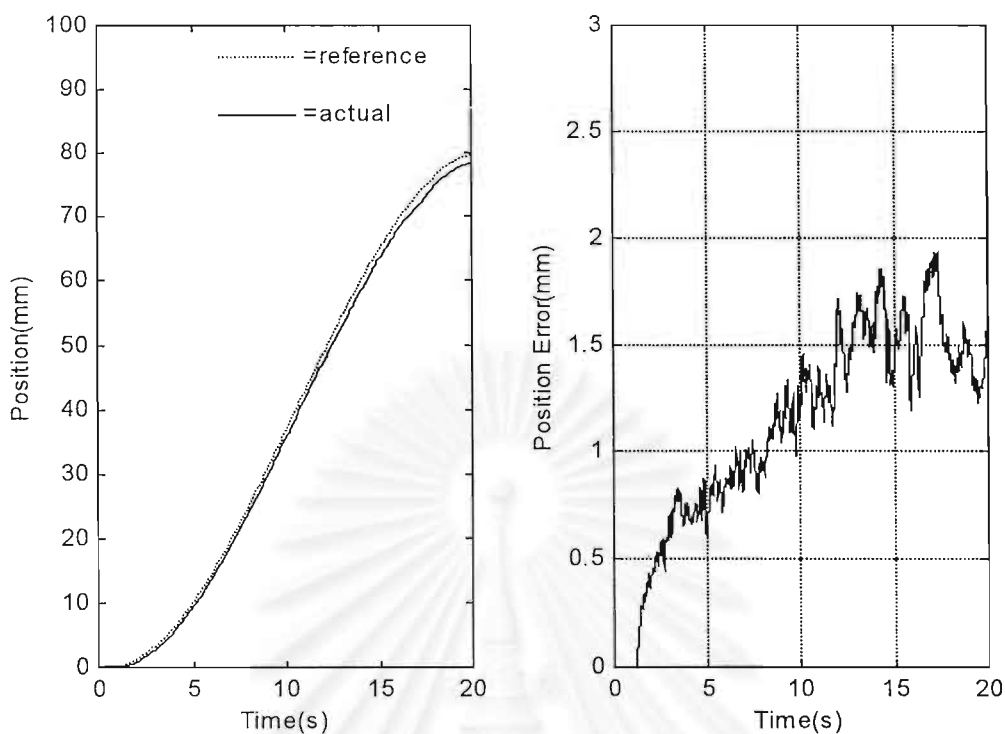
Position Response



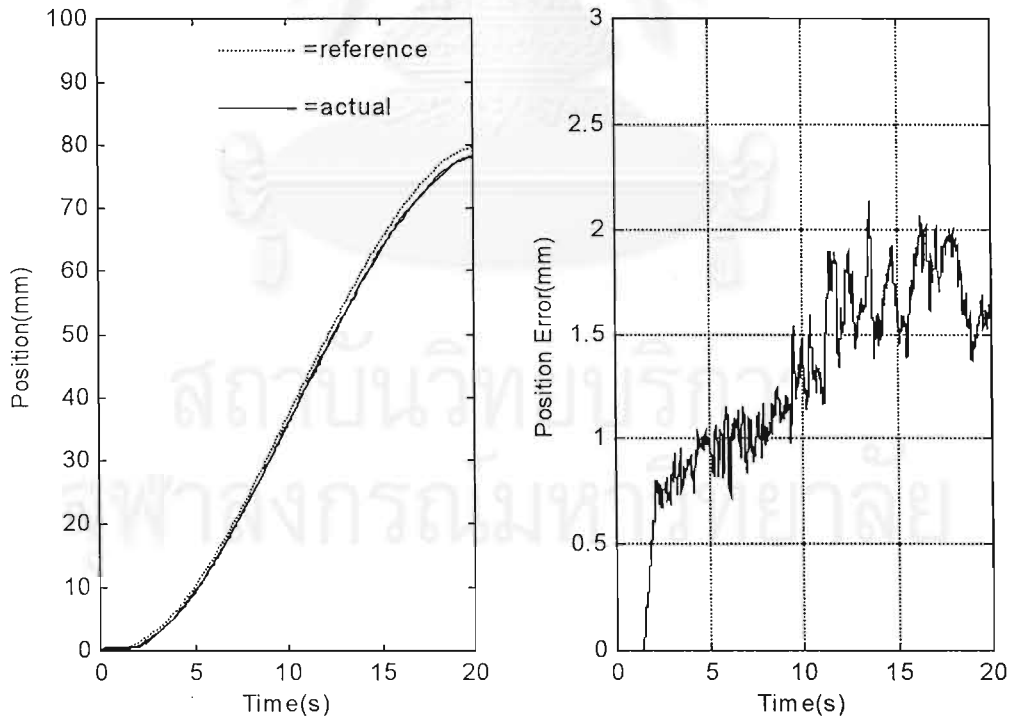
รูปที่ 3.20 แสดงค่าการเคลื่อนที่และความผิดพลาดของตำแหน่งของปลายแขนกล บนผนังแบน เป็นระยะ 80 มม. มีแรงกุดขนาด 20 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่ให้ค่าความแข็งตึงคงที่



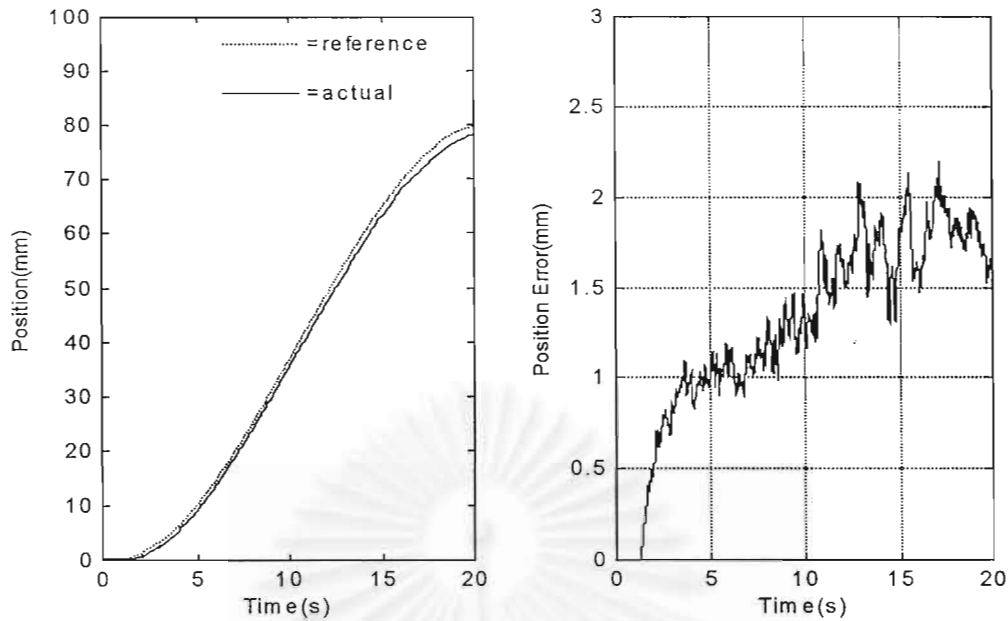
รูปที่ 3.21 แสดงค่าการเคลื่อนที่และความผิดพลาดของตำแหน่งของปลายแขนกล บนผนังแบนเป็นระยะ 80 มม. มีแรงกุดขนาด 20 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่มีการหาค่าความแข็งตึงแบบออนไลน์



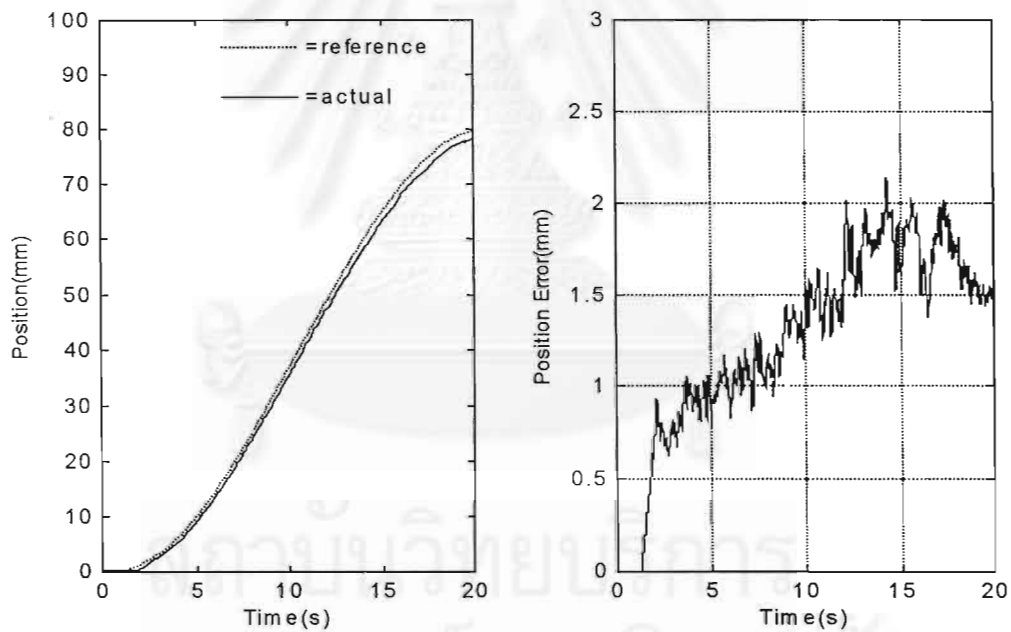
รูปที่ 3.22 แสดงค่าการเคลื่อนที่ และความผิดพลาดของตำแหน่งของปลายแขนกลบนผนังแบน เป็นระยะ 80 มม. โดยมีแรงกวดขนาด 25 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่ให้ค่าความแข็งตึงคงที่



รูปที่ 3.23 แสดงค่าการเคลื่อนที่ และความผิดพลาดของตำแหน่งของปลายแขนกลบนผนังแบน เป็นระยะ 80 มม. โดยมีแรงกวดขนาด 25 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่มีการหาค่าความแข็งตึงแบบออนไลน์



รูปที่ 3.24 แสดงค่าการเคลื่อนที่ และความผิดพลาดของตำแหน่งของปลายแขนกลบนผนังแบน เป็นระยะ 80 มม. โดยมีแรงกดขนาด 30 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่ให้ค่าความแข็งตึงคงที่



รูปที่ 3.25 แสดงค่าการเคลื่อนที่ และความผิดพลาดของตำแหน่งของปลายแขนกลบนผนังแบนเป็นระยะ 80 มม. โดยมีแรงกดขนาด 30 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่มีการหาค่าความแข็งตึงแบบออนไลน์

จากรูปที่ 3.20 – 3.25 แสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงของปลายแขนกลบนผนังแบน โดยมีสมการความเร็วเป็นสมการกำลังสอง เป็นระยะทาง 80 มม. โดยมีแรงกดคือ 20 นิวตัน 25 นิวตัน 30 นิวตัน ตามลำดับ การทดลองนี้ทำในสองกรณีกล่าวคือ 1) กำหนดค่าความแข็งตึงให้มีค่าคงที่ 2) คำนวณหาหรือประมาณการค่าความแข็งตึงในลักษณะแบบออนไลน์

จากการทดลองพบว่า การควบคุมตำแหน่งของแขนกลทั้ง 2 วิธีนั้นให้ผลดีไม่ต่างกัน โดยที่ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งปลายแขนกลมีค่าไม่เกิน 2.5 มม. ทั้งนี้เนื่องจากการควบคุมตำแหน่งนั้นใช้วิธีการควบคุมเหมือนกัน แต่ช่วงแรกการเคลื่อนที่จะเริ่มต้นช้าเนื่องจากตัวโปรแกรมจะสั่งตำแหน่งอ้างอิงช่วง 1 วินาทีแรกให้มีค่าเป็นศูนย์ และเมื่อเวลาผ่านไปค่าความผิดพลาดมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการปรับค่าเกนของระบบไม่เหมาะสม

3.2 การทดลองเปรียบเทียบการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิทกับการควบคุมแรงแบบอิมพลลิซิท

3.2.1 การทดลองควบคุมแรงและตำแหน่งกับวัตถุอ่อนตัว

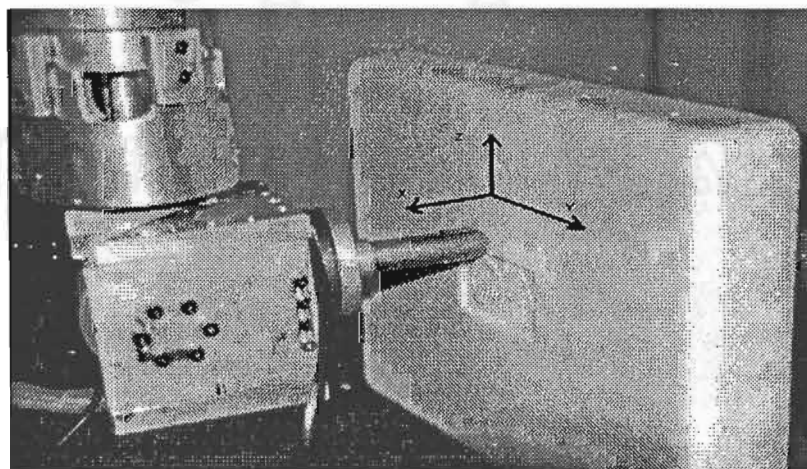
การทดลองนี้เป็นการทดลองควบคุมแรงที่แขนกลกระทำกับวัตถุอ่อนตัว ซึ่งในที่นี้ใช้โฟม ตามรูปที่ 3.26 เป็นวัตถุให้แขนกลกด โดยเป็นการทดลองเปรียบเทียบระหว่าง

- 1) การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิท โดยที่ตัวควบคุมแรงจะมีลักษณะตามสมการ

$$F = F_d + \int K_i \cdot (F_d - F_e) dt$$

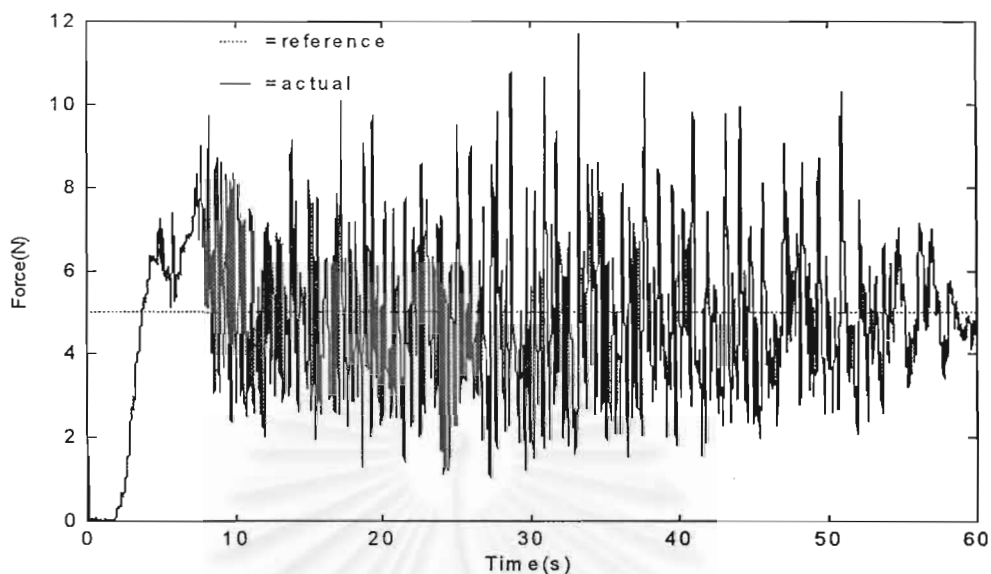
- 2) การควบคุมแรงแบบอิมพลลิซิทที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งตั้งแบบออนไลน์ เพื่อศึกษาความแตกต่างของผลตอบสนองของแรงที่แขนกลกดวัตถุและผลตอบสนองของตำแหน่งปลายแขนกล พิจารณารูป 3.26 แกน X คือแกนที่ตั้งฉากกับพื้นผิว แกน Y คือแกนที่สัมผัสกับพื้นผิวในแนวระนาบ แกน Z คือแกนที่สัมผัสกับพื้นผิวในแนวตั้ง

การทดลองเริ่มจากให้แขนกลอยู่ห่างจากโฟมประมาณ 1 ซม. แล้วควบคุมให้แขนกลเคลื่อนที่เข้าไปกดวัตถุตามแนวแกน X แล้วเคลื่อนที่ไปบนผิววัตถุเป็นแนวเส้นตรงตามแนวแกน Y โดยมีสมการความเร็วเป็นสมการกำลังสอง เป็นระยะทาง 90 มม. พร้อมกับกดวัตถุด้วยแรงขนาด 5 นิวตันและ 10 นิวตัน ตามลำดับ

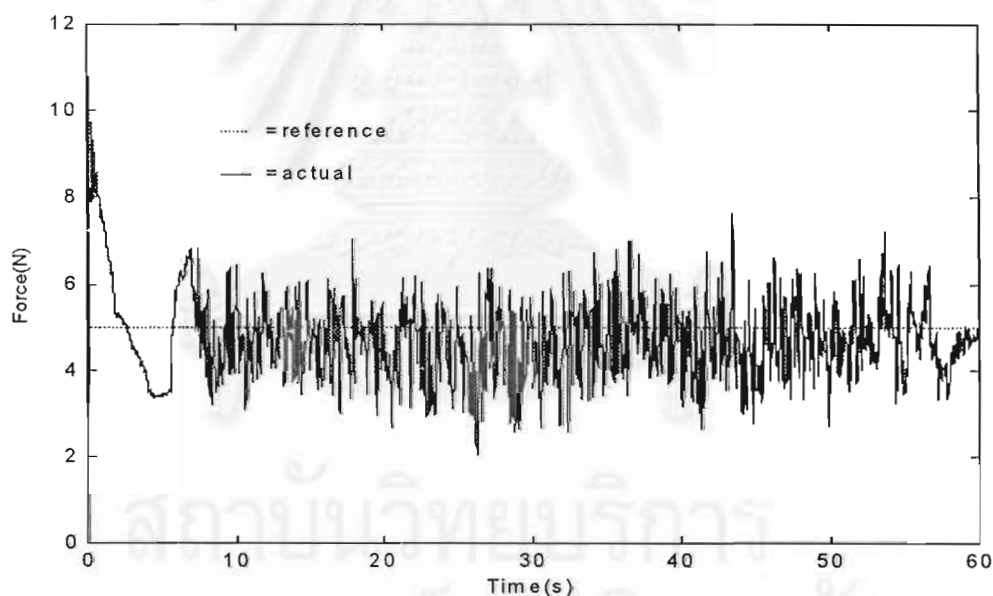


รูปที่ 3.26 แสดงแขนกลขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่มีความอ่อนตัว

Force Response



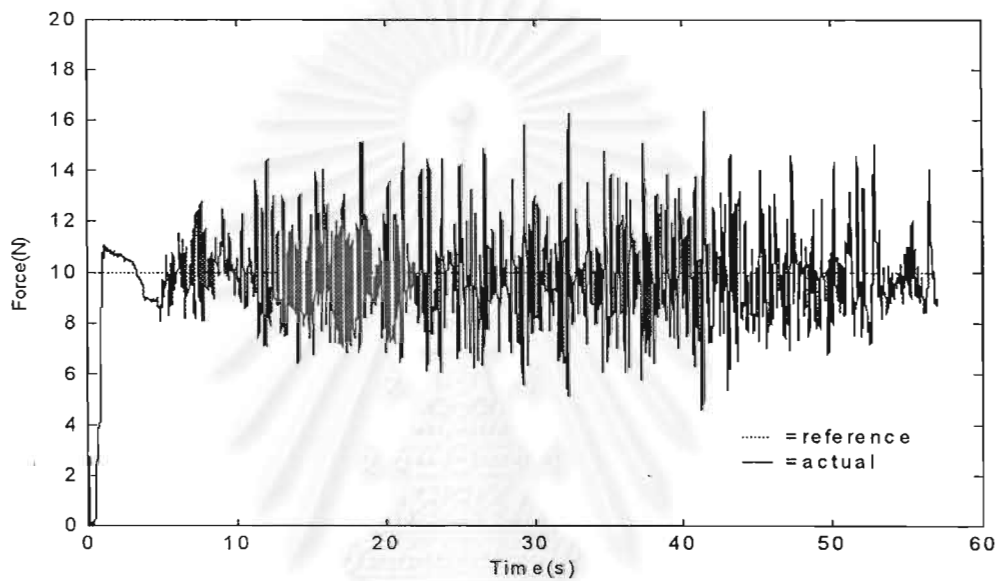
รูปที่ 3.27 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงระยะทาง 90 มม.บนผิววัตถุอ่อนตัว ขนาดแรง 5 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิท



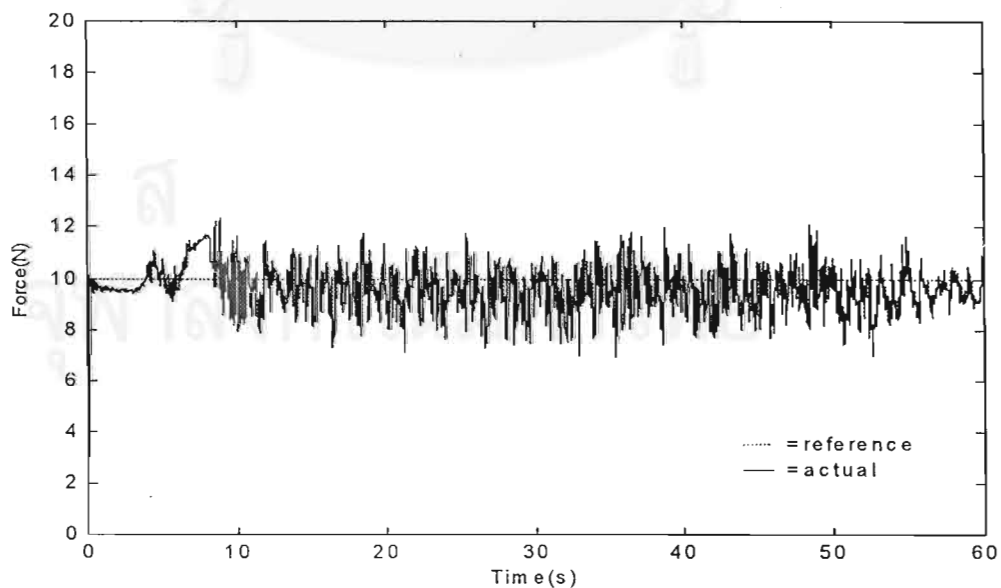
รูปที่ 3.28 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงระยะทาง 90 มม.บนผิววัตถุอ่อนตัว ขนาดแรง 5 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลลิซิท

จากรูปที่ 3.27 – 3.28 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงที่แขนกลกดขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุอ่อนตัวเป็นระยะทาง 90 มม. โดยแรงกดมีค่า 5 นิวตัน โดยรูป 3.27 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงเมื่อทำการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิท ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าขณะเริ่มต้นนั้น แรงกดมีค่าเป็นศูนย์ ทั้งนี้เนื่องจากความผิดพลาดของตัวควบคุมที่ชดเชยแรงเสียดทานไม่เพียงพอ หลังจากนั้นผลของ

ตัวอินทิกรัลจะทำให้แรงกดลู่เข้าสู่ค่าที่ต้องการ แต่ว่าขณะที่เคลื่อนที่ไปนั้นแรงสัมผัสจะมีการสั่นมาก เนื่องจากวัตถุที่แขนกลกดนั้นอ่อนตัวได้ ทำให้แรงกดไม่เรียบ ส่วนรูปที่ 3.28 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงเมื่อทำการควบคุมแบบอิมพลีซิท ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าช่วงแรกแรงกดมีค่ามาก ทั้งนี้เนื่องจากการคำนวณหาตำแหน่งให้แขนกลกดตอนเริ่มแรกนั้นมากเกินไป หลังจากนั้นแรงกดจะลู่เข้าสู่ค่าที่ต้องการเนื่องจากตัวอินทิกรัล และแรงสัมผัสจะค่อนข้างเรียบเนื่องจากขณะที่กดลงบนวัตถุที่อ่อนตัวนั้น ซึ่งการควบคุมตำแหน่งในการกดจะให้ผลตอบสนองของแรงที่เรียกว่าการควบคุมแรงโดยตรง



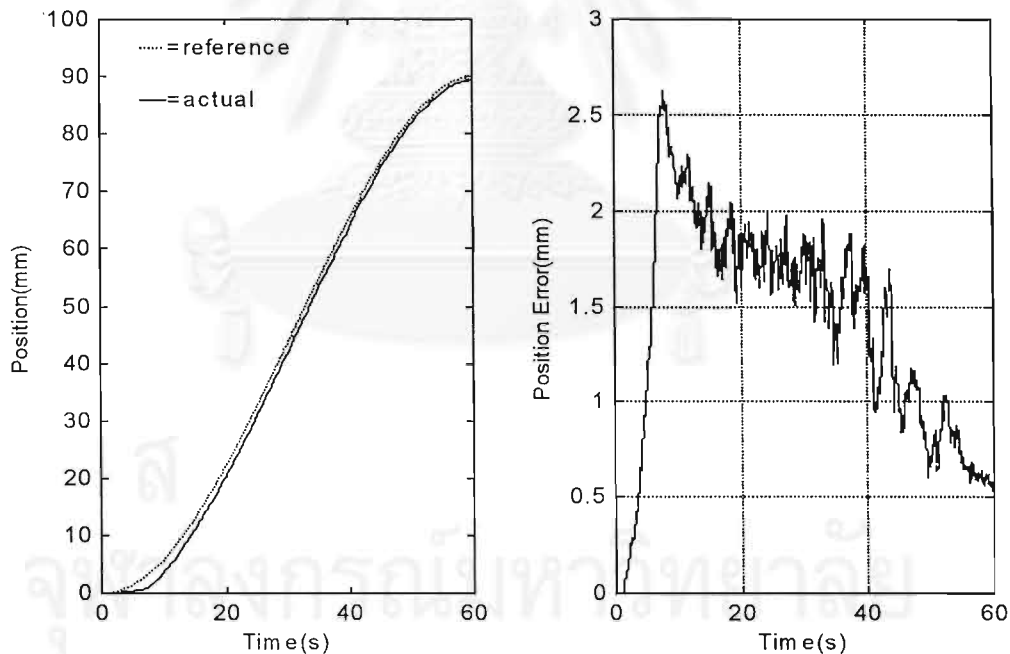
รูปที่ 3.29 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงระยะทาง 90 มม. บนผิววัตถุอ่อนตัว ขนาดแรง 10 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท



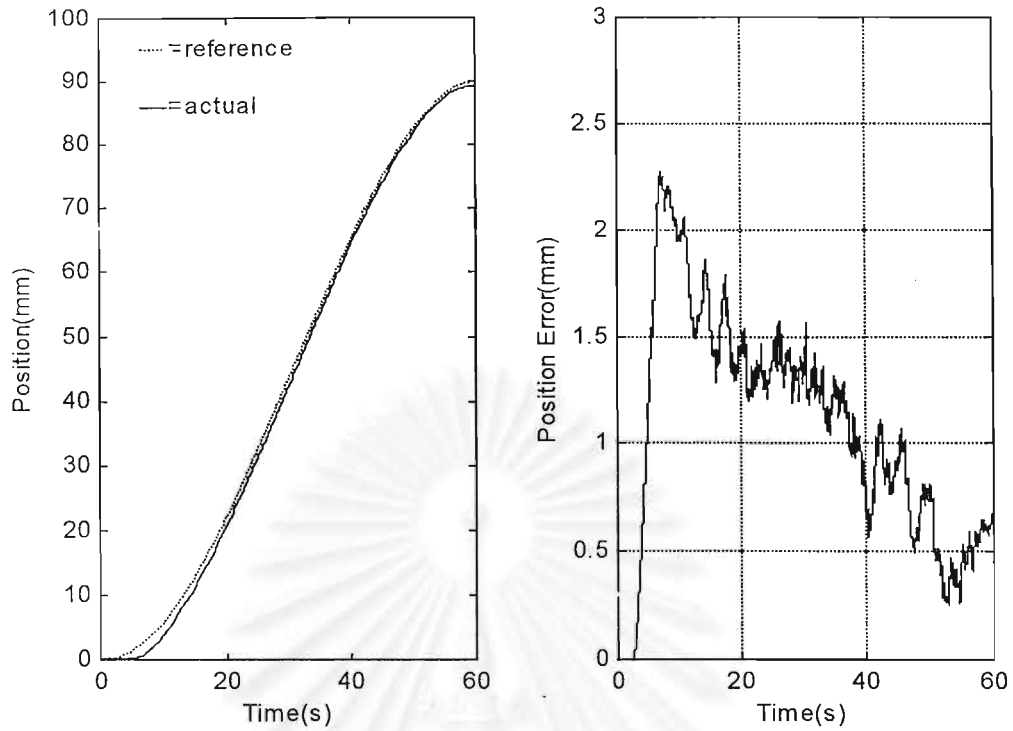
รูปที่ 3.30 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงระยะทาง 90 มม. บนผิววัตถุอ่อนตัว ขนาดแรง 10 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิท

จากรูปที่ 3.29 – 3.30 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงที่แขนกลกดขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุอ่อนตัวเป็นระยะทาง 90 มม. โดยแรงกดมีค่า 10 นิวตัน โดยรูป 3.29 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงเมื่อทำการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิท ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าขณะเริ่มต้นนั้น แรงกดมีค่าเริ่มต้นประมาณ 2 นิวตัน หลังจากนั้นจะมีค่าเป็นศูนย์ ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงจากการควบคุมตำแหน่งเป็นการควบคุมแรง และการชดเชยแรงเสียดทานที่น้อยเกินไป หลังจากนั้นผลของตัวอินทิกรัลจะทำให้แรงกดลู่เข้าสู่ค่าที่ต้องการ แต่ว่าขณะที่เคลื่อนที่ไปนั้นแรงสัมผัสจะมีการสั่นมาก เนื่องจากวัตถุที่แขนกลกดนั้นอ่อนตัวได้ โดยมีการสั่นรอบคำสั่งแรงด้วยแอมพลิจูดประมาณ 4 นิวตัน ส่วนรูปที่ 3.30 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงเมื่อทำการควบคุมแบบอิมพลลิซิท ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าช่วงแรกแรงกดมีค่ามาก ทั้งนี้เนื่องจากการคำนวณหาตำแหน่งให้แขนกลกดตอนเริ่มแรกนั้นมากเกินไป หลังจากนั้นแรงกดจะลู่เข้าสู่ค่าที่ต้องการเนื่องจากตัวอินทิกรัล และแรงสัมผัสจะค่อนข้างเรียบ โดยมีการสั่นรอบคำสั่งแรงด้วยแอมพลิจูดประมาณ 2 นิวตัน เนื่องจากขณะที่กดลงบนวัตถุที่อ่อนตัวนั้น ซึ่งการควบคุมตำแหน่งในการกดจะให้ผลตอบสนองของแรงที่เรียกว่าการควบคุมแรงโดยตรง

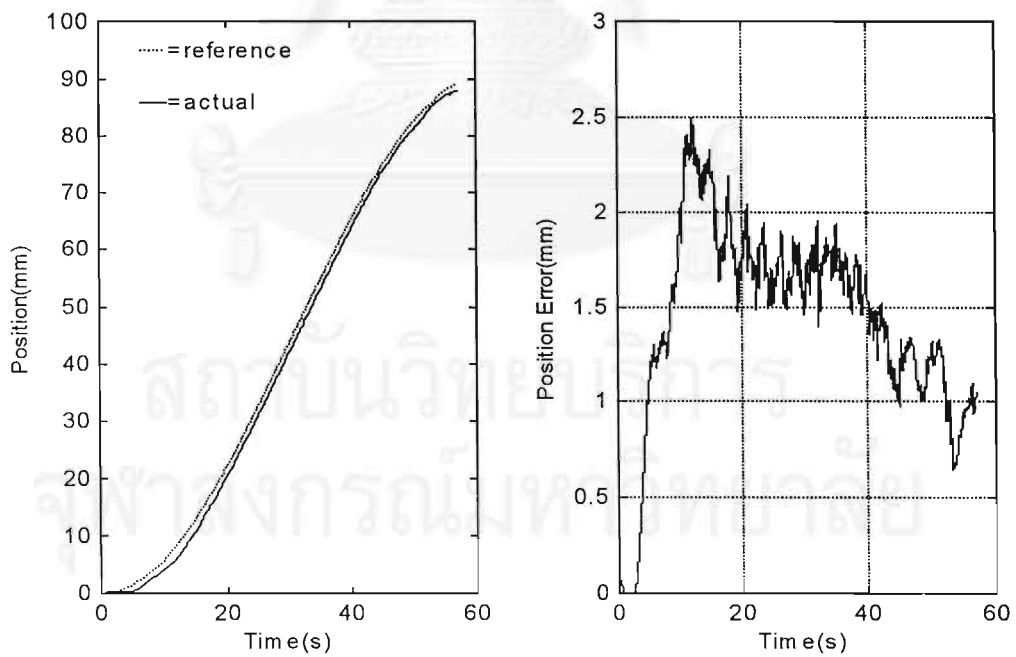
Position Response



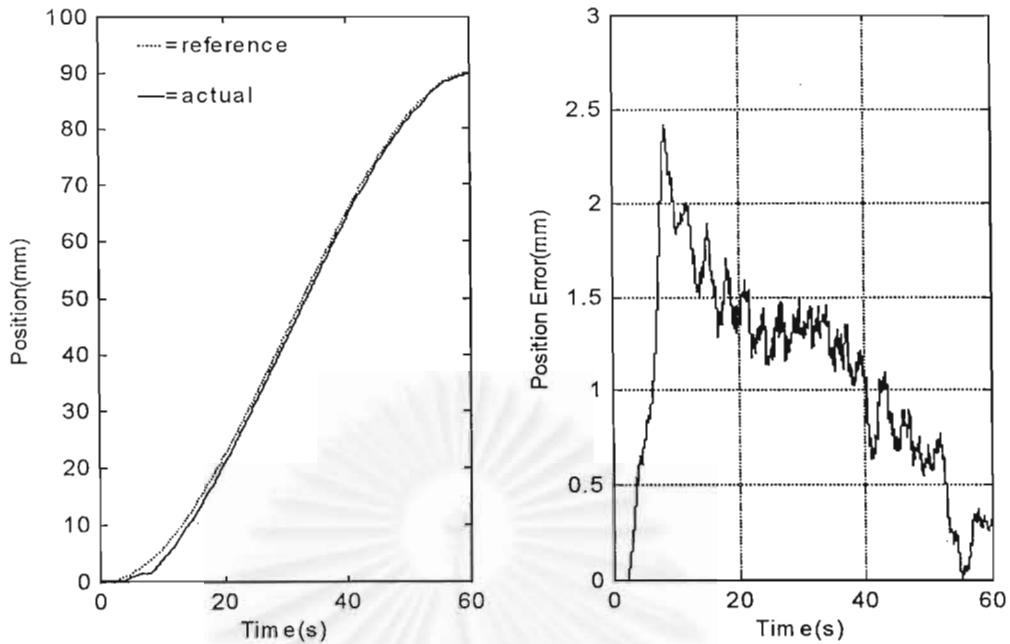
รูปที่ 3.31 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรงระยะทาง 90 มม. บนผิววัตถุอ่อนตัวขนาดแรง 5 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิท



รูปที่ 3.32 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรงระยะทาง 90 มม. บนมอเตอร์ถ่วงอ่อนตัว ขนาดแรง 5 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิท



รูปที่ 3.33 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรงระยะทาง 90 มม. บนมอเตอร์ถ่วงอ่อนตัว ขนาดแรง 10 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท



รูปที่ 3.34 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรงระยะทาง 90 มม. บนนิววัตต์ก่อนตัว ขนาดแรง 10 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิต

จากรูปที่ 3.31 - 3.34 แสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงของปลายแขนกลบนนิววัตต์ก่อนตัวโดยมีสมการความเร็วเป็นสมการกำลังสอง เป็นระยะทาง 90 มม. โดยมีแรงกดคือ 5 นิวตัน และ 10 นิวตัน ตามลำดับ การทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิตกับการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งตั้งแบบออนไลน์ ซึ่งพบว่าผลตอบสนองของตำแหน่งจากการควบคุมทั้ง 2 วิธีไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากว่าการยวบตัวของวัตต์ก่อนตัวมีค่าค่อนข้างน้อย ซึ่งมีผลต่อการเคลื่อนที่ของแขนกลในแนวสัมผัสกับวัตต์น้อยตามไปด้วย และการที่เราใช้ตัวควบคุมตำแหน่งในแนวสัมผัสเป็นแบบเดียวกัน ทำให้ผลตอบสนองของตำแหน่งไม่ต่างกันมากนัก

3.2.2 การทดลองควบคุมแรงและตำแหน่งกับผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยุ่นตัว

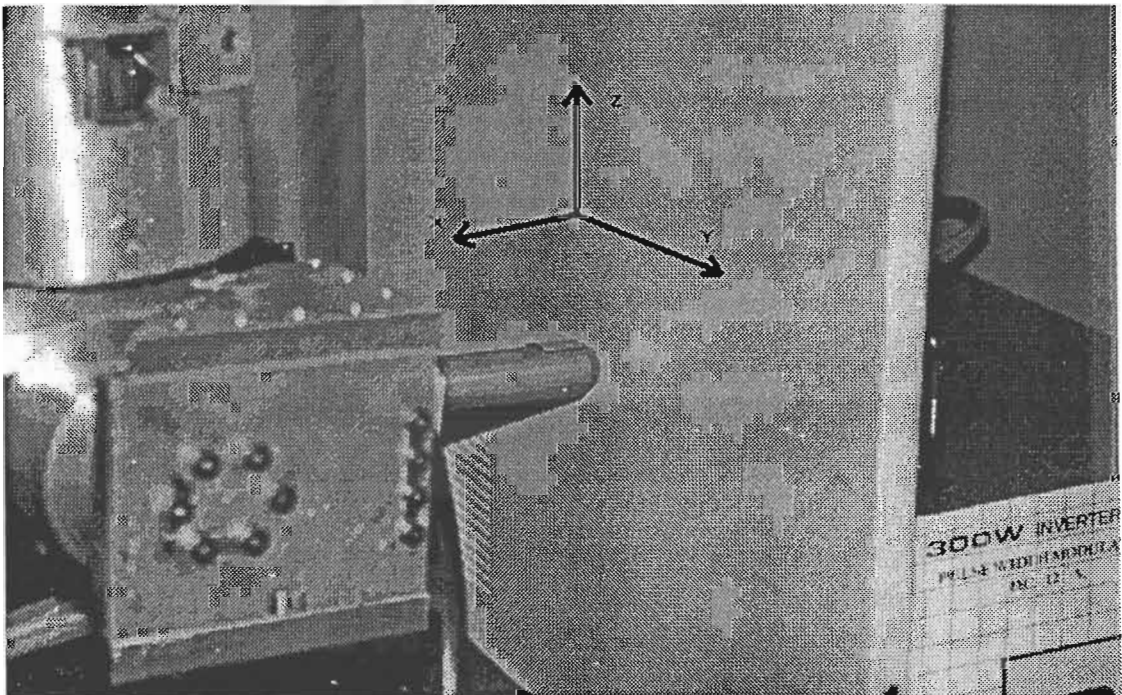
การทดลองนี้เป็นการทดลองควบคุมแรงที่แขนกลกระทำกับผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยุ่นตัว โดยยึดปลายด้านหนึ่งไว้ ซึ่งในที่นี้ใช้ฝาครอบของคอมพิวเตอร์ ตามรูปที่ 3.35 เป็นวัตถุให้แขนกล กัด การทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบระหว่าง

1) การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิต

2) การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งตั้งแบบออนไลน์

พิจารณารูป 3.35 แกน X คือแกนที่ตั้งฉากกับพื้นผิว แกน Y คือแกนที่สัมผัสกับพื้นผิวในแนวระนาบ แกน Z คือแกนที่สัมผัสกับพื้นผิวในแนวตั้ง

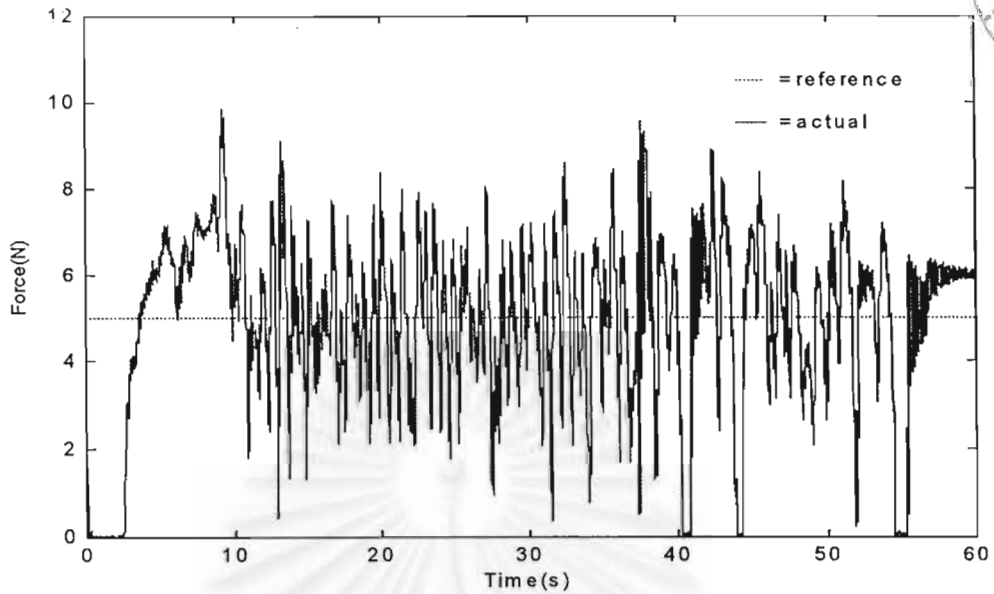
การทดลองเริ่มจากให้แขนกลอยู่ห่างจากวัตถุประมาณ 1 ซม. แล้วควบคุมให้แขนกลเคลื่อนที่เข้าไปกดวัตถุตามแนวแกน X ด้วยแรงที่กำหนดคือ 5 นิวตัน 10 นิวตัน และ 15 นิวตัน ตามลำดับ หลังจากนั้นจะให้แขนกลกดไปบนผิววัตถุพร้อมกับเคลื่อนที่ไปบนผิววัตถุเป็นเส้นตรงตามแนวแกน Y โดยมีสมการความเร็วเป็นสมการกำลังสอง เป็นระยะทาง 90 มม. เพื่อที่จะศึกษาความแตกต่างของการควบคุมทั้ง 2 แบบ ที่มีต่อแรงกดและการเคลื่อนที่ของแขนกล



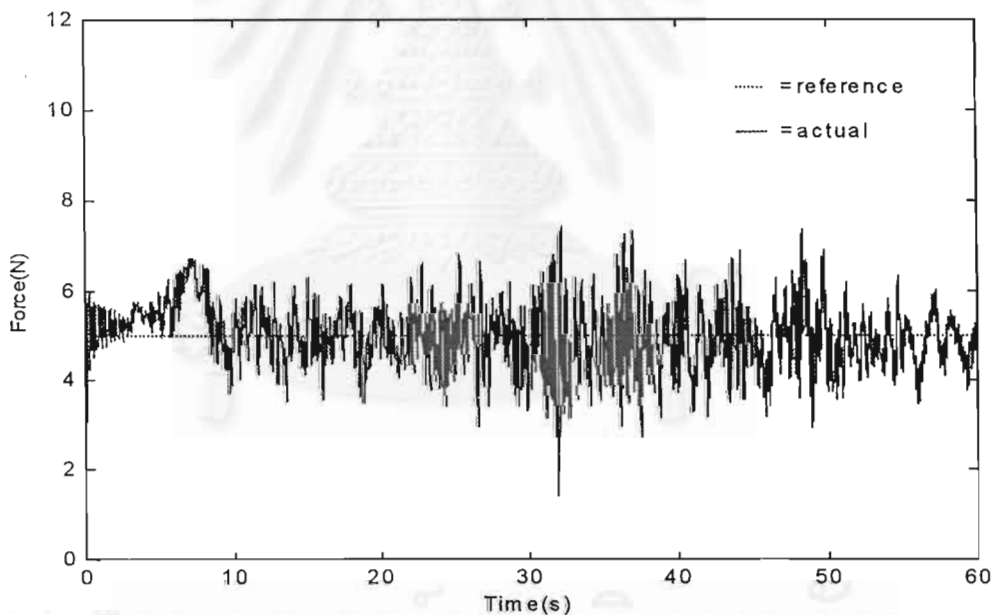
รูปที่ 3.35 แสดงแขนกลขณะที่เคลื่อนที่บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยุ่นตัว



Force Response



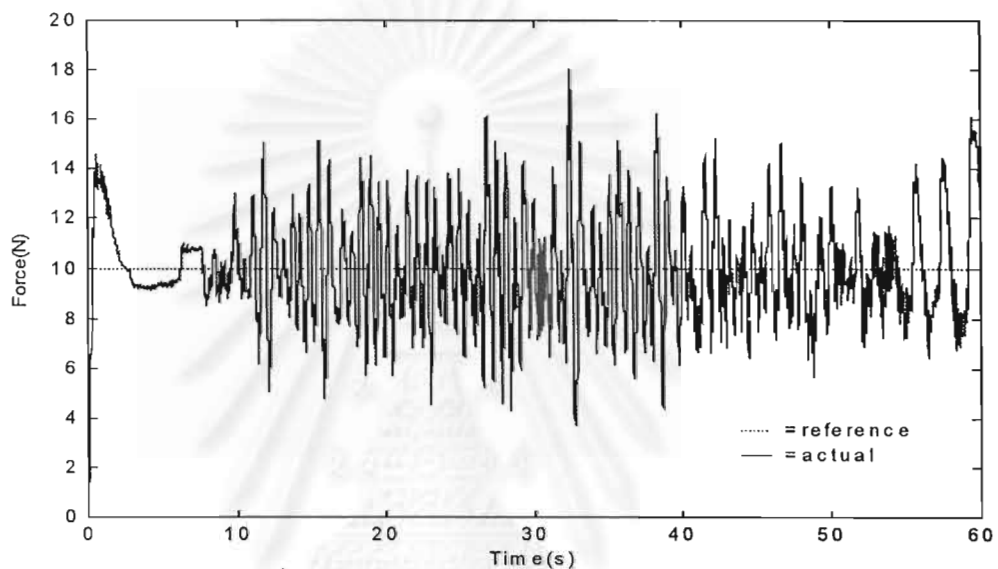
รูปที่ 3.36 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม.บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยาบตัว โดยกดด้วยแรง 5 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิท



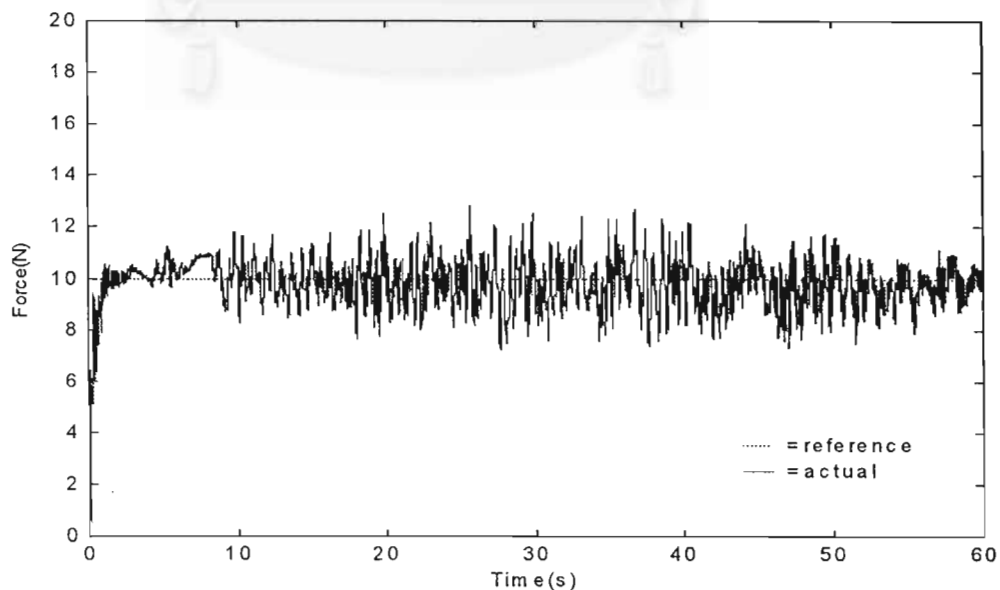
รูปที่ 3.37 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม.บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยาบตัว โดยกดด้วยแรง 5 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลลิซิท

จากรูปที่ 3.36 – 3.37 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงที่แขนกลกดขณะที่เคลื่อนที่บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยาบตัวเป็นระยะทาง 90 มม. โดยแรงกดมีค่า 5 นิวตัน โดยรูป 3.36 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงเมื่อทำการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิท ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าขณะเริ่มต้นนั้นแรงกดมีค่าเริ่มต้นประมาณ 2 นิวตัน หลังจากนั้นจะมีค่าเป็นศูนย์ ทั้งนี้เนื่องจากเป็นช่วงที่มีการ

เปลี่ยนแปลงจากการควบคุมตำแหน่งเป็นการควบคุมแรง และการชดเชยแรงเสียดทานที่น้อยเกินไป หลังจากนั้นผลของตัวอินทิกรัลจะทำให้แรงกดลู่เข้าสู่ค่าที่ต้องการ แต่ว่าขณะที่เคลื่อนที่ไปนั้น แรงสัมผัสจะมีการสั่นมากเนื่องจากวัตถุที่แขนกลกลดนั้นอ่อนตัวได้ทำให้แรงกดไม่เรียบ โดยมีการสั่นรอบค่าสั่งแรงด้วยแอมพลิจูดประมาณ 4 นิวตัน ส่วนรูปที่ 3.37 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงเมื่อทำการควบคุมแบบอิมพลีซิท ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าแรงกดจะรักษาระดับอยู่ที่ค่าที่ต้องการโดยที่ไม่สั่นมากนัก โดยมีการสั่นรอบค่าสั่งแรงด้วยแอมพลิจูดประมาณ 3 นิวตัน เนื่องจากขณะที่กดลงบนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยุ่นตัวนั้นวัตถุเกิดการสั่นมาก ซึ่งการควบคุมตำแหน่งในการกดจะให้ผลตอบสนองของแรงที่เรียกว่าการควบคุมแรงโดยตรง

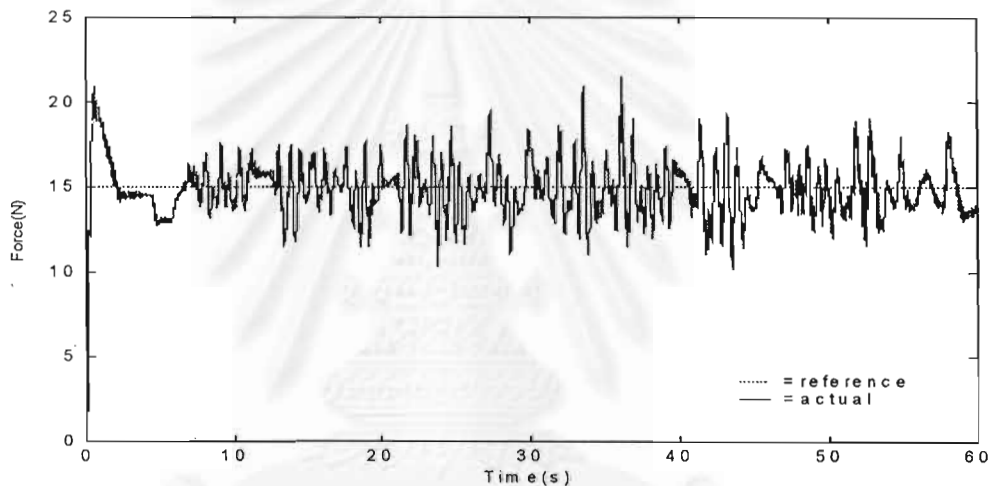


รูปที่ 3.38 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม.บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยุ่นตัว โดยกดด้วยแรง 10 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท

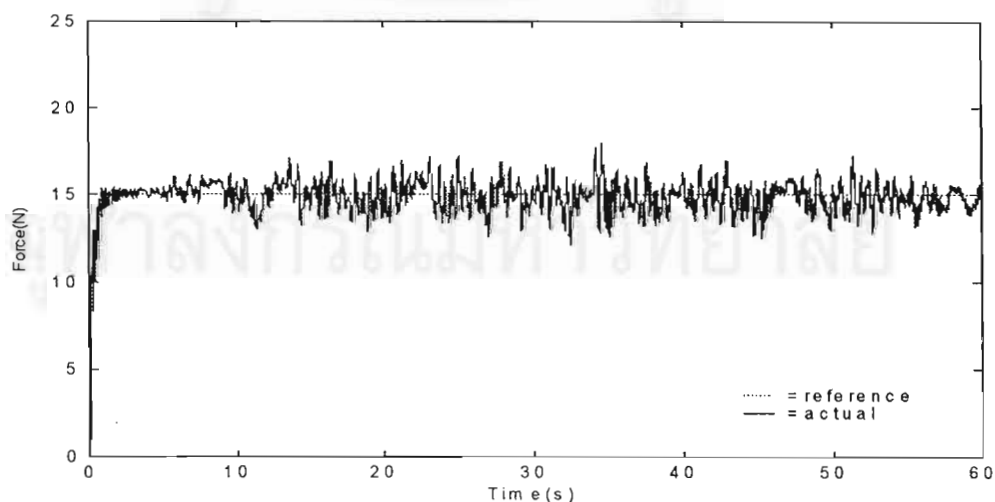


รูปที่ 3.39 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม.บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยุ่นตัว โดยกดด้วยแรง 10 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิท

จากรูปที่ 3.38 – 3.39 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงที่แขนกลกดขณะที่เคลื่อนที่บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืดตัวเป็นระยะทาง 90 มม. โดยแรงกดมีค่า 10 นิวตัน โดยรูป 3.38 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงเมื่อทำการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิท ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าแรงสัมผัสเข้าใกล้ค่าที่ต้องการได้เร็ว เนื่องจากคำสั่งแรงกดมากทำให้ผลตอบสนองของแรงเข้าเร็ว แต่ว่าขณะที่เคลื่อนที่ไปนั้นแรงสัมผัสจะมีการสั่นมากเนื่องจากวัตถุที่แขนกลกดนั้นอ่อนตัวได้ ทำให้แรงกดไม่เรียบ โดยมีการสั่นรอบคำสั่งแรงด้วยแอมพลิจูดประมาณ 6 นิวตัน ส่วนรูปที่ 3.39 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงเมื่อทำการควบคุมแบบอิมพลลิซิท ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าแรงกดจะรักษาระดับอยู่ที่ค่าที่ต้องการโดยที่ไม่สั่นมากนัก โดยมีการสั่นรอบคำสั่งแรงด้วยแอมพลิจูดประมาณ 2 นิวตัน เนื่องจากขณะที่กดลงบนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืดตัวนั้นวัตถุเกิดการสั่นมาก ซึ่งการควบคุมตำแหน่งในการกดจะให้ผลตอบสนองของแรงที่เรียกว่าการควบคุมแรงโดยตรง



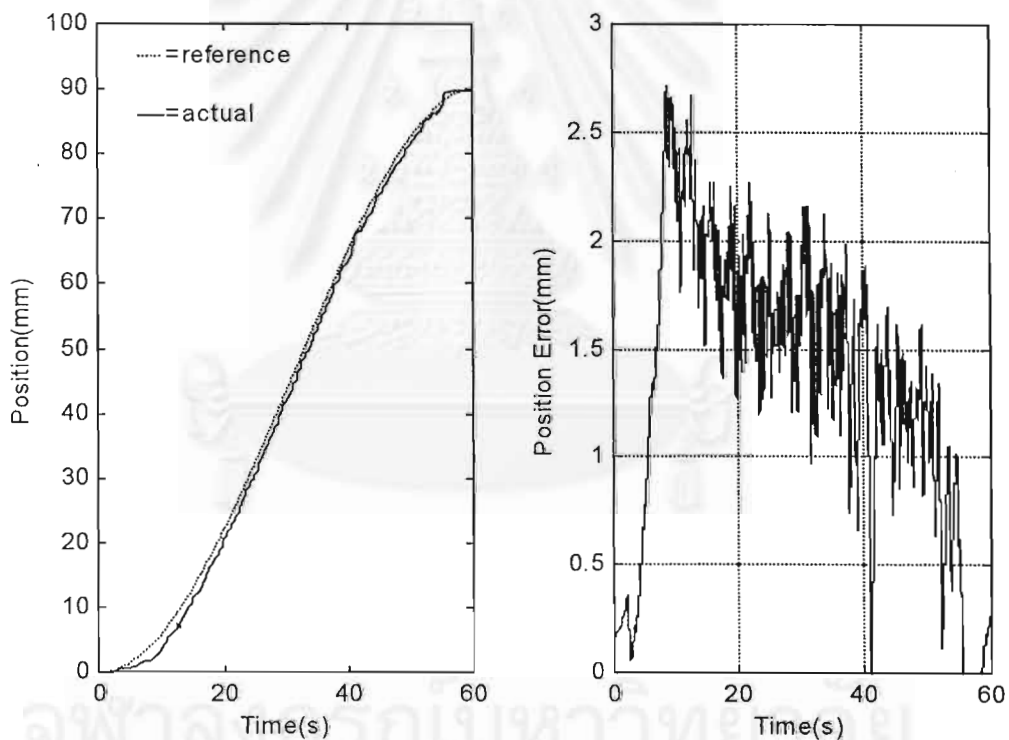
รูปที่ 3.40 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม.บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืดตัว โดยกดด้วยแรง 15 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิท



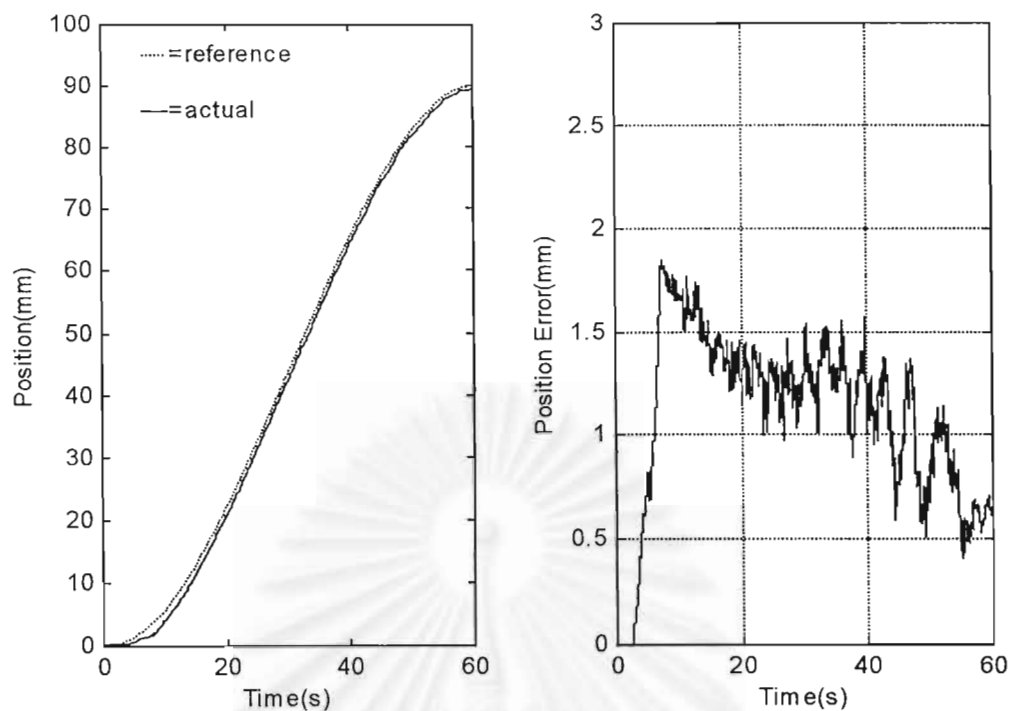
รูปที่ 3.41 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม.บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืดตัว โดยกดด้วยแรง 15 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลลิซิท

จากรูปที่ 3.40 – 3.41 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงที่แขนกลกดขณะที่เคลื่อนที่บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืดัวเป็นระยะทาง 90 มม. โดยแรงกดมีค่า 15 นิวตัน โดยรูป 3.40 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงเมื่อทำการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าขณะที่เคลื่อนที่ไปนั้นแรงสัมผัสจะมีการสั่นมากเนื่องจากวัตถุที่แขนกลกดนั้นอ่อนตัวได้ ทำให้แรงกดไม่เรียบ โดยมีการสั่นรอบค่าสั่งแรงด้วยแอมพลิจูดประมาณ 4 นิวตัน ส่วนรูปที่ 3.41 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงเมื่อทำการควบคุมแบบอิมพลีซิท ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าแรงกดจะรักษาระดับอยู่ที่ค่าที่ต้องการ โดยที่ไม่สั่นมากนัก โดยมีการสั่นรอบค่าสั่งแรงด้วยแอมพลิจูดประมาณ 2 นิวตัน เนื่องจากขณะที่กดลงบนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืดัวนั้นวัตถุเกิดการสั่นมาก ซึ่งการควบคุมตำแหน่งในการกดจะให้ผลตอบสนองของแรงที่เรียบกว่าการควบคุมแรงโดยตรง

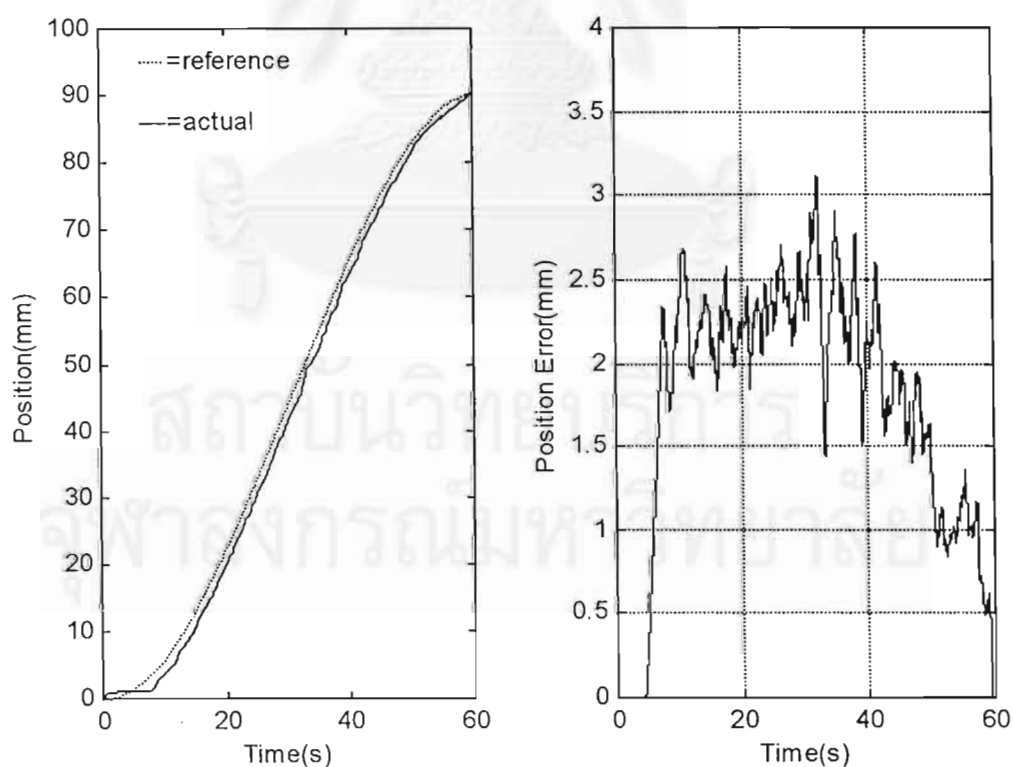
Position Response



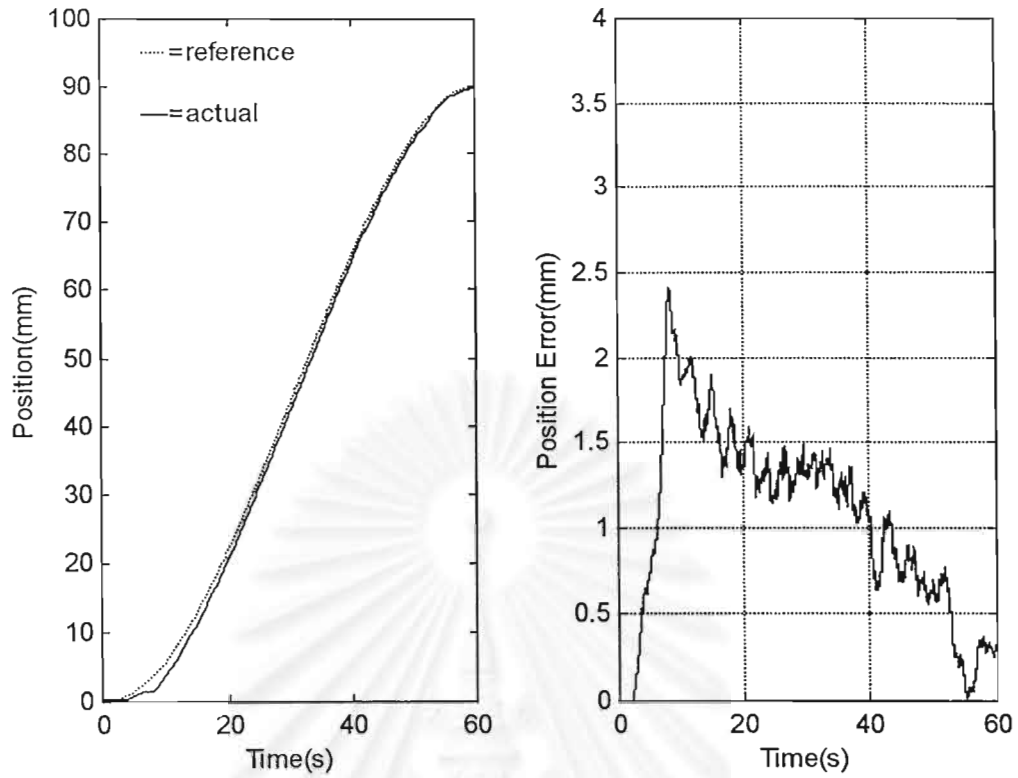
รูปที่ 3.42 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืดัว โดยกดวัตถุด้วยแรง 5 นิวตัน โดยใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท



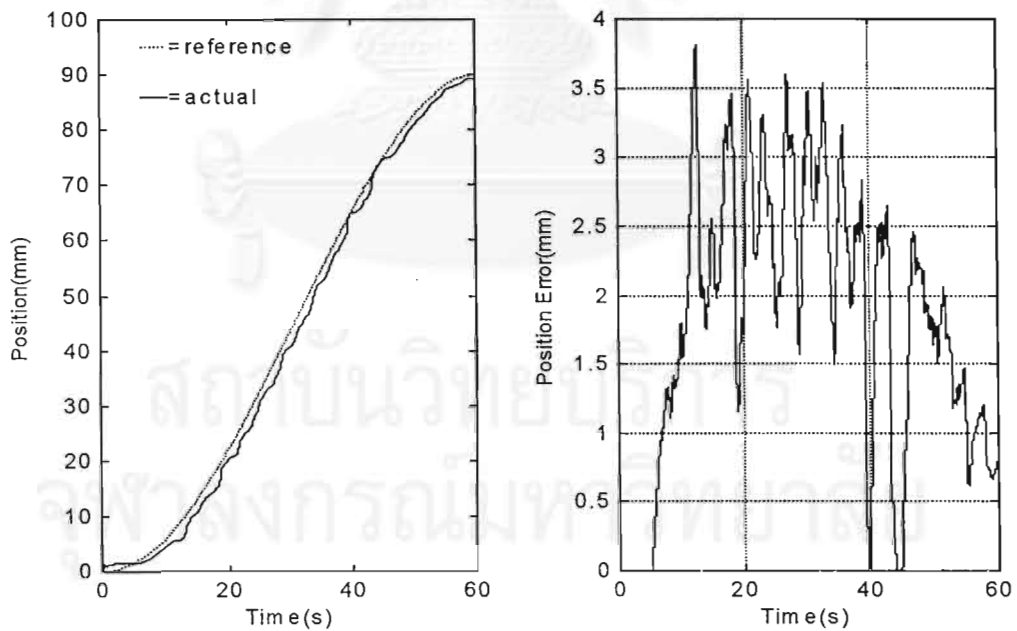
รูปที่ 3.43 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืด โดยกวดำตฤด้วยแรง 5 นิวตัน โดยใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิต



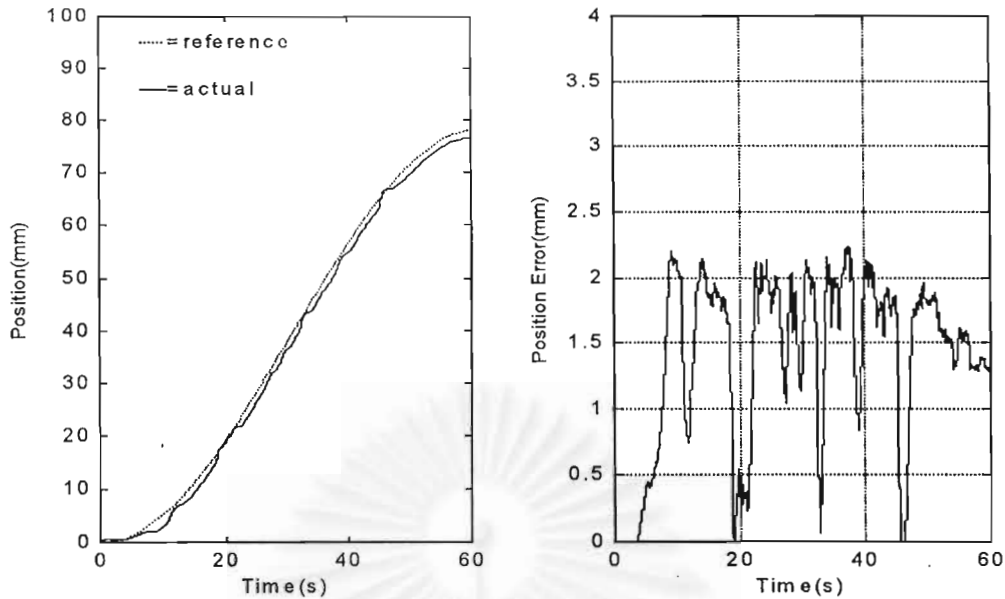
รูปที่ 3.44 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืด โดยกวดำตฤด้วยแรง 10 นิวตัน โดยใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิต



รูปที่ 3.45 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืด โดยกวดำตฤด้วยแรง 10 นิวตัน โดยใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิท



รูปที่ 3.46 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืด โดยกวดำตฤด้วยแรง 15 นิวตัน โดยใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท



รูปที่ 3.47 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรง ระยะทาง 90 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืด โดยยกตัวด้วยแรง 15 นิวตัน โดยใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิท

จากรูปที่ 3.42 - 3.47 แสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงของปลายแขนกลบนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืดโดยมีสมการความเร็วเป็นสมการกำลังสอง เป็นระยะทาง 90 มม. โดยมีแรงกดคือ 5 นิวตัน 10 นิวตัน และ 15 นิวตัน ตามลำดับ การทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิทกับการควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งตึงแบบออนไลน์ ซึ่งพบว่าผลตอบสนองของตำแหน่งเมื่อเราควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิทนั้นจะค่อนข้างสั้นมาก ทั้งนี้เนื่องจากว่าขณะที่แขนกลยกตัวพร้อมกับเคลื่อนที่ไปนั้น วัตถุประสงค์การสั่งตัวมากทำให้การควบคุมตำแหน่งในแนวสัมผัสไม่เรียบตามไปด้วย ส่วนการควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทนั้นวัตถุประสงค์สั้นตัวน้อยกว่า ทำให้ผลตอบสนองของตำแหน่งในแนวสัมผัสค่อนข้างเรียบตามไปด้วย

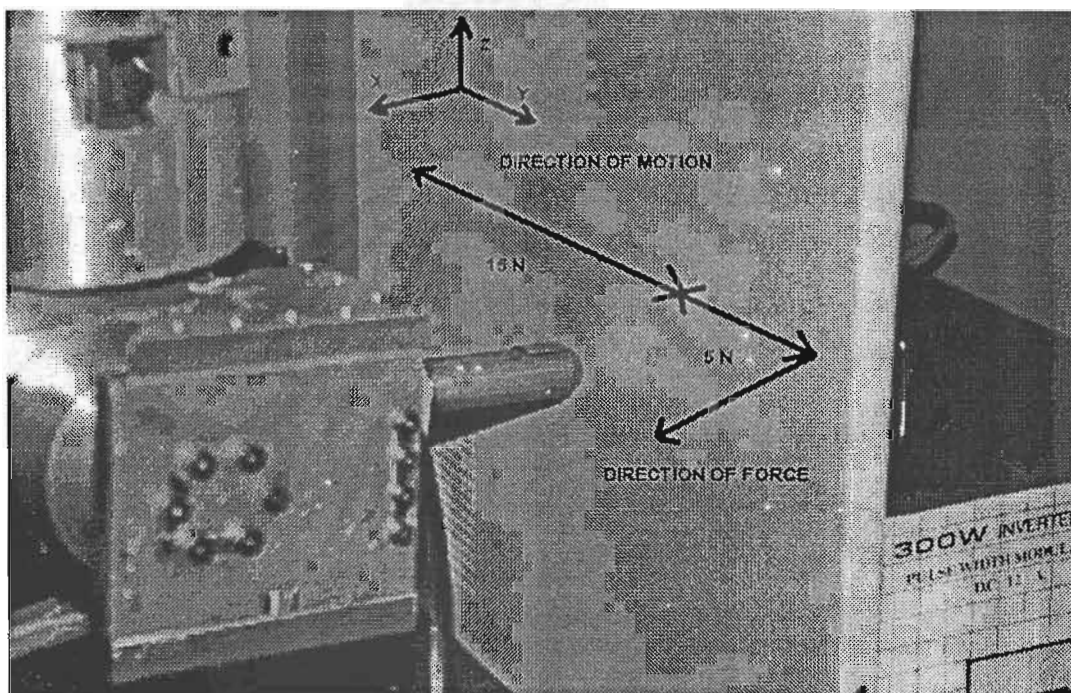
3.2.3 การทดลองควบคุมแรงและตำแหน่งกับผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืดโดยแรงที่กระทำมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได (Step Change)

การทดลองนี้เป็นการทดลองควบคุมแรงที่แขนกลกระทำกับผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืดโดยยึดปลายด้านหนึ่งไว้ เหมือนในหัวข้อ 3.2.2 แต่ว่าการทดลองนี้ คำสั่งแรงมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได โดยทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่าง

- 1) การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท
- 2) การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งตึงแบบออนไลน์

พิจารณารูป 3.48 แกน X คือแกนที่ตั้งฉากกับพื้นผิว แกน Y คือแกนที่สัมผัสกับพื้นผิวในแนวระนาบ แกน Z คือแกนที่สัมผัสกับพื้นผิวในแนวตั้ง

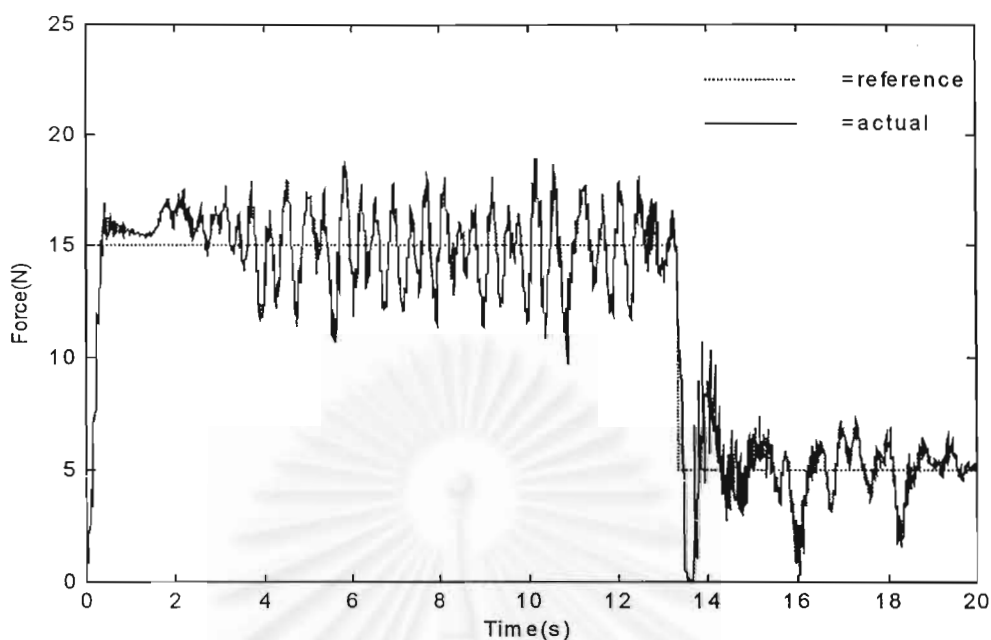
ซึ่งการทดลองเริ่มจากให้แขนกลอยู่ห่างจากวัตถุประมาณ 1 ซม. แล้วควบคุมให้แขนกลเคลื่อนที่เข้าไปกวดวัตถุตามแนวแกน X ด้วยแรงที่กำหนดคือ 15 นิวตัน และ 20 นิวตัน ตามลำดับ หลังจากนั้นก็จะให้แขนกลกดไปบนผิววัตถุ พร้อมกับเคลื่อนที่ไปบนผิววัตถุเป็นเส้นตรงตามแนวแกน Y โดยมีสมการความเร็วเป็นสมการกำลังสอง เป็นระยะทาง 60 มม. หลังจากนั้นคำสั่งแรงจะมีการเปลี่ยนแปลงจาก 15 นิวตัน เป็น 5 นิวตัน และจาก 20 นิวตัน เป็น 10 นิวตัน ตามลำดับ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได และจะควบคุมให้แขนกลเคลื่อนที่ต่อไปอีก 20 มม. ตามรูปที่ 3.48 เพื่อศึกษาผลตอบสนองของแรงที่แขนกลกดวัตถุ และการเคลื่อนที่ของปลายแขนกล



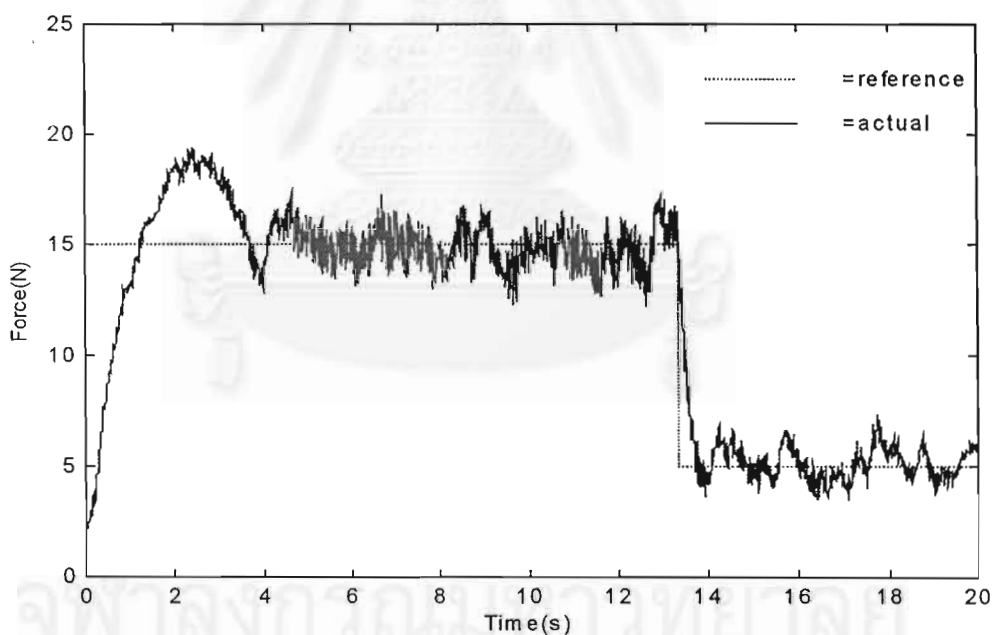
รูปที่ 3.48 แสดงแขนกลขณะเคลื่อนที่บนผืนหนังแผ่นเหล็กที่มีความหยาบตัว โดยแรงที่สัมผัสมีการเปลี่ยนแปลงเป็นลักษณะขั้นบันได (Step Change)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Force Response



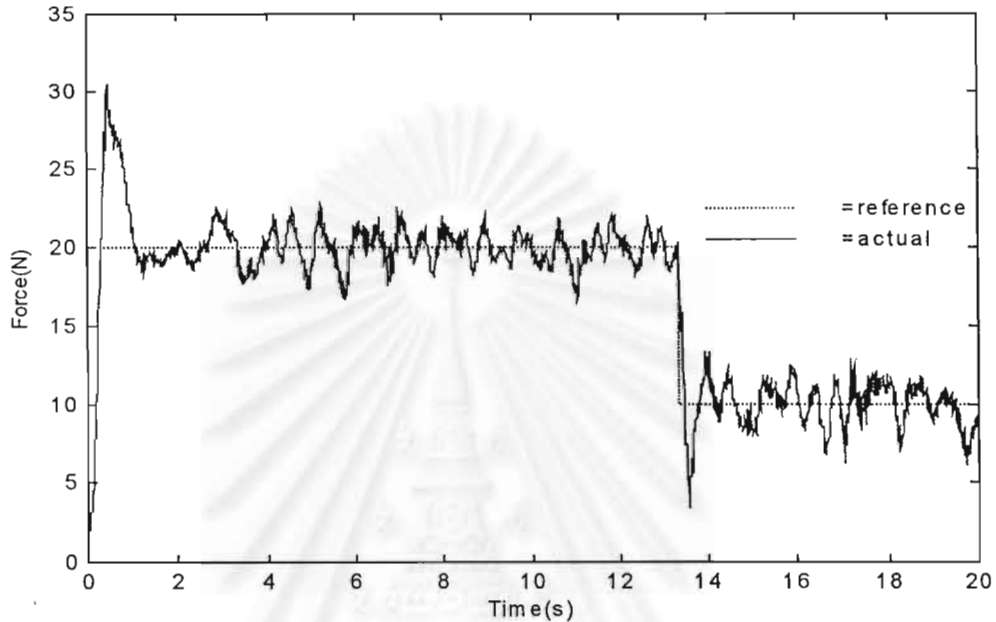
รูปที่ 3.49 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ระยะทาง 80 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืด โดยแรงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 15 นิวตันเป็น 5 นิวตัน ซึ่งใช้วิธีการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิท



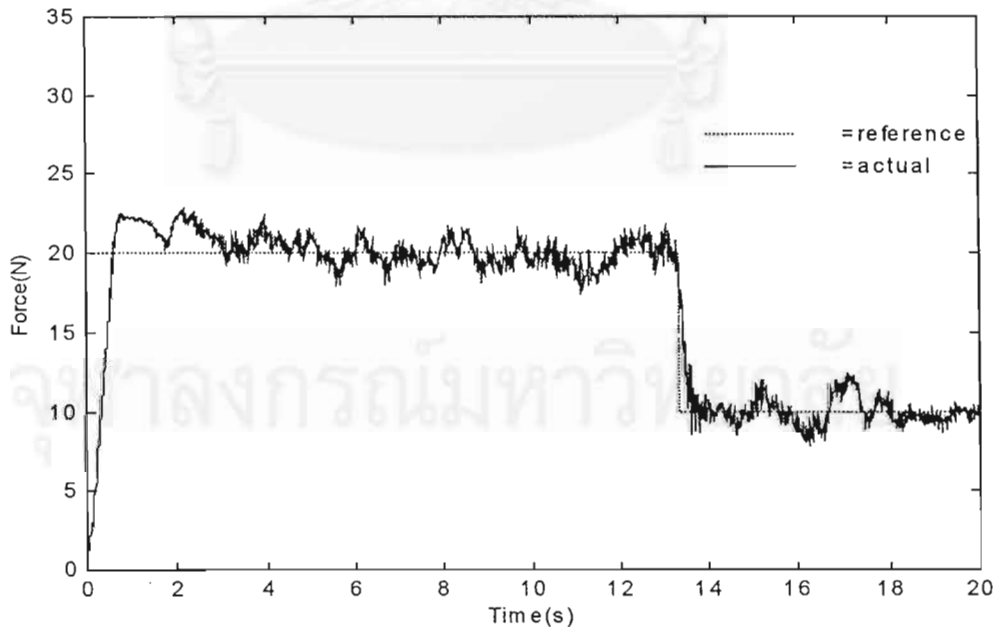
รูปที่ 3.50 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ระยะทาง 80 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืด โดยแรงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 15 นิวตัน เป็น 5 นิวตัน ซึ่งใช้วิธีการควบคุมแรงแบบอิมพลลิซิท

จากรูปที่ 3.49 – 3.50 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงที่แขนกลกดขณะที่เคลื่อนที่บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืดเป็นระยะทาง 80 มม. โดยแรงที่กระทำมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได โดยแรงกดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 15 นิวตัน เป็น 5 นิวตัน จากรูป 3.49 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงเมื่อทำการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิท ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าขณะที่คำสั่งแรงมีการเปลี่ยนแปลง

แปลงนั้น แรงสัมผัสจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและมีส่วนพุ่งเกิน (overshoot) เกิดขึ้น โดยมีค่าประมาณ 5 นิวตัน นั่นคือแขนกลจะหลุดจากผิวเนื่องจากการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิทนั้นจะให้ผลตอบสนองของแรงที่ไว ส่วนรูปที่ 3.50 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงเมื่อทำการควบคุมแบบอิมพลลิซิท ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าขณะที่คำสั่งแรงมีการเปลี่ยนแปลงนั้น แรงสัมผัสจะค่อย ๆ ไล่เข้าสู่คำสั่งแรงค่าใหม่ซึ่งจะไม่เกิดส่วนพุ่งเกินขึ้น เป็นผลให้วัตถุที่ถูกกกดนั้นมีการสั่นตัวน้อยกว่าด้วย



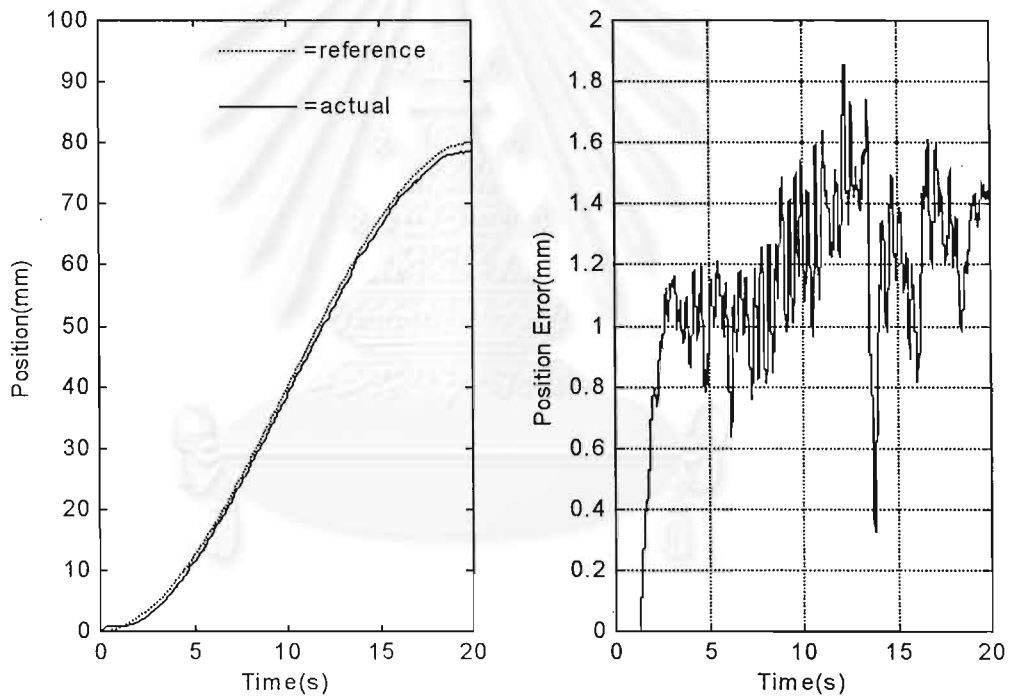
รูปที่ 3.51 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ระยะทาง 80 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยาบตัว โดยแรงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 20 นิวตันเป็น 10 นิวตัน ซึ่งใช้วิธีการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิท



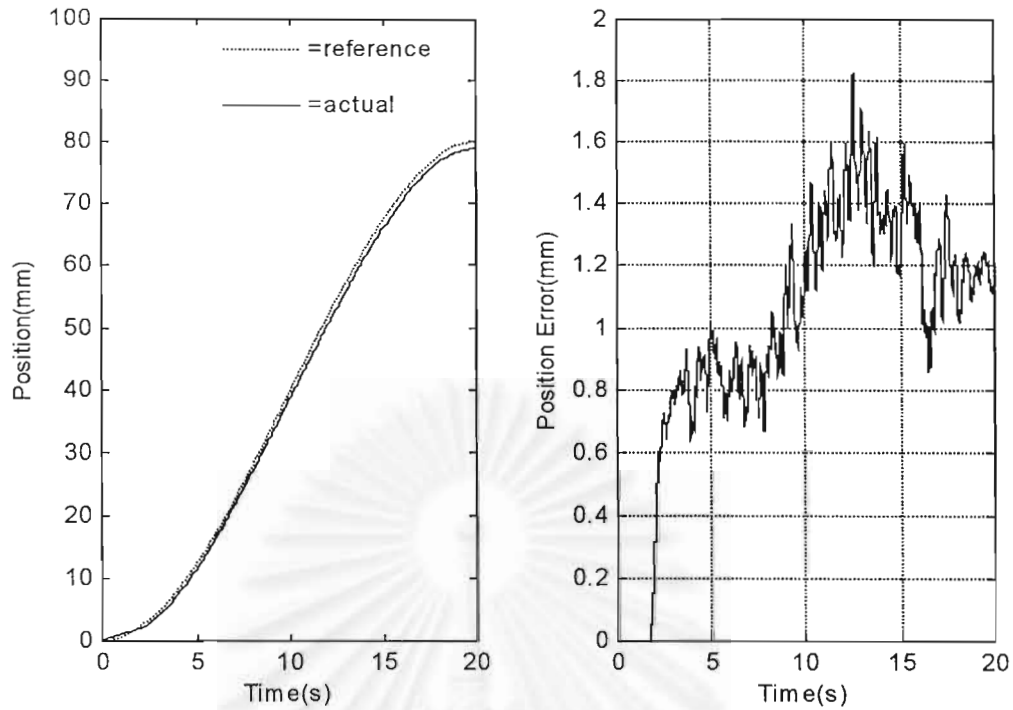
รูปที่ 3.52 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ระยะทาง 80 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยาบตัว โดยแรงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 20 นิวตัน เป็น 10 นิวตัน ซึ่งใช้วิธีการควบคุมแรงแบบอิมพลลิซิท

จากรูปที่ 3.51 – 3.52 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงที่แขนกลกดขณะที่เคลื่อนที่บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืดตัวเป็นระยะทาง 80 มม. โดยแรงที่กระทำมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได โดยแรงกดมีการเปลี่ยนแปลงจาก 20 นิวตัน เป็น 10 นิวตัน จากรูป 3.51 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงเมื่อทำการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าขณะที่คำสั่งแรงมีการเปลี่ยนแปลงนั้น แรงสัมผัสจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและมีส่วนพุ่งเกินเกิดขึ้น โดยมีค่าประมาณ 7 นิวตัน เนื่องจากว่าการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิทนั้นจะให้ผลตอบสนองของแรงที่ไว ส่วนรูปที่ 3.52 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงเมื่อทำการควบคุมแบบอิมพลีซิท ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าขณะที่คำสั่งแรงมีการเปลี่ยนแปลงนั้น แรงสัมผัสจะค่อย ๆ เข้าสู่คำสั่งแรงค่าใหม่ ซึ่งจะไม่เกิดส่วนพุ่งเกินขึ้น เป็นผลให้วัตถุที่ถูกกดนั้นมีการสั่นตัวน้อยกว่าด้วย

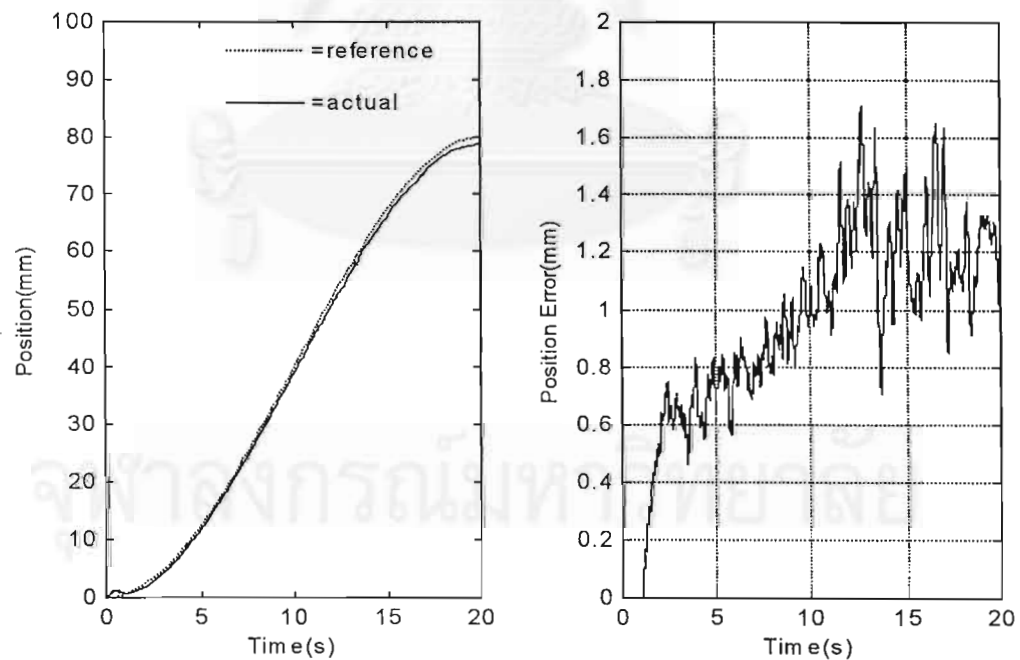
Position Response



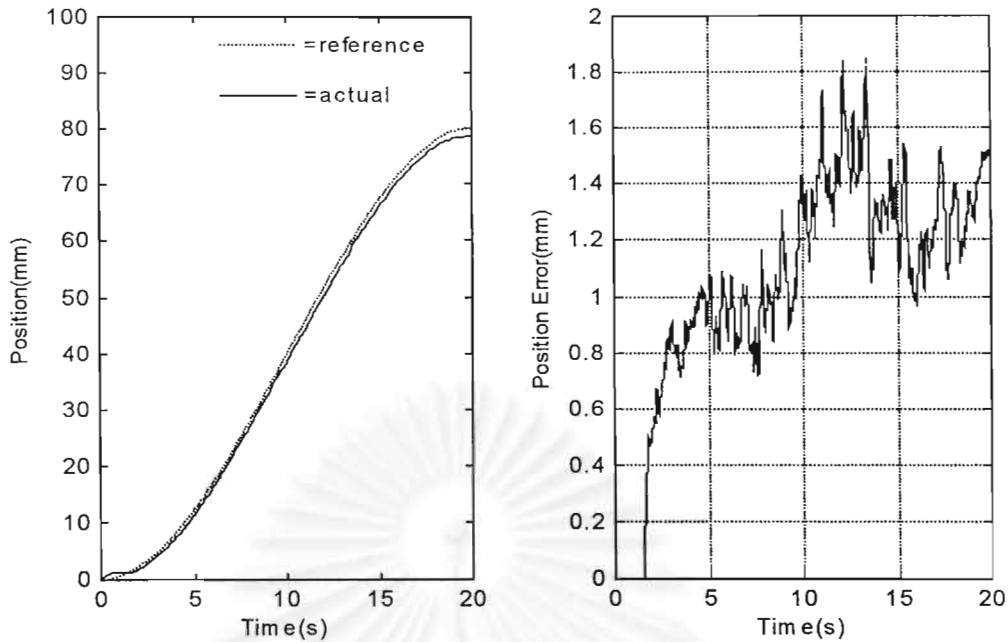
รูปที่ 3.53 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรง ระยะทาง 80 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหนืดตัว โดยแรงกดวัตถุมีการเปลี่ยนแปลงจาก 15 นิวตัน เป็น 5 นิวตัน โดยใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท



รูปที่ 3.54 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรง ระยะทาง 80 มม. บนผืนหนังแผ่นเหล็กที่มีความหยาบตัว โดยแรงกวดัตถุมมีการเปลี่ยนแปลงจาก 15 นิวตัน เป็น 5 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิท



รูปที่ 3.55 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรง ระยะทาง 80 มม. บนผืนหนังแผ่นเหล็กที่มีความหยาบตัว โดยแรงกวดัตถุมมีการเปลี่ยนแปลงจาก 20 นิวตัน เป็น 10 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท



รูปที่ 3.56 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็นเส้นตรง ระยะทาง 80 มม. บนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยาบตัว โดยแรงกวดัตถุมมีการเปลี่ยนแปลงจาก 20 นิวตัน เป็น 10 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิต

จากรูปที่ 3.53 – 3.56 เป็นผลการเคลื่อนที่ของแขนกลบนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยาบตัว โดยคำสั่งแรงที่แขนกลกวดัตถุมมีการเปลี่ยนแปลงจาก 15 นิวตัน เป็น 5 นิวตัน และจาก 20 นิวตัน เป็น 10 นิวตัน ตามลำดับ โดยเป็นการเปรียบเทียบระหว่าง การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิตและการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งดิงแบบออนไลน์ ผลปรากฏว่าเมื่อใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิตนั้น ผลตอบสนองของตำแหน่งปลายแขนกลขณะที่คำสั่งแรงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 15 นิวตัน เป็น 5 นิวตันนั้นเกิดการสั่นมาก เนื่องจากแขนกลหลุดออกจากผิววัตถุแล้วกลับเข้ากวดัตถุใหม่ ในขณะที่การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตนั้น แขนกลไม่หลุดจากผิววัตถุ ทำให้ผลตอบสนองของตำแหน่งปลายแขนกลค่อนข้างเรียบ สำหรับกรณีของคำสั่งแรงมีการเปลี่ยนแปลงจาก 20 นิวตัน เป็น 10 นิวตัน นั้น ทั้งการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิต และการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิต ให้ผลที่ไม่ต่างกัน เนื่องจากคำสั่งแรงที่ให้แขนกลกวดัตถุมีค่ามาก วัตถุที่แขนกลกดจึงไม่มีการสั่นมากนัก ตำแหน่งของแขนกลในแนวสัมผัสกับวัตถุจึงค่อนข้างเรียบตามไปด้วย

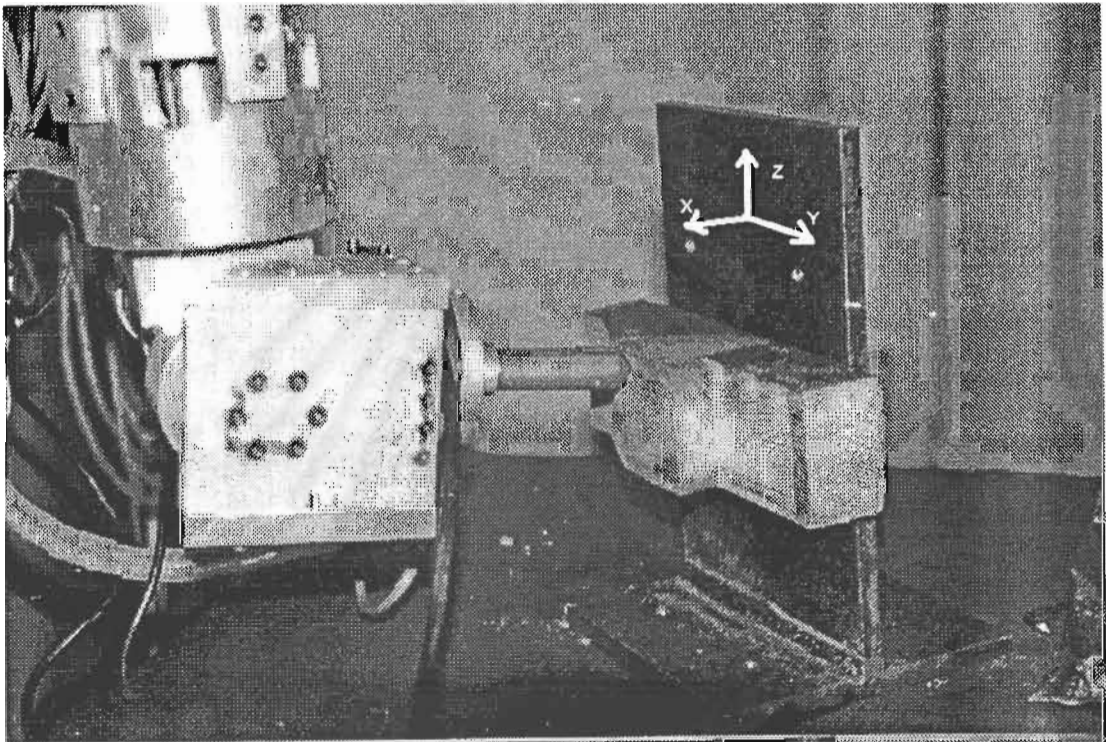
3.2.4 การทดลองควบคุมแรงและตำแหน่งกับวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่อง

การทดลองนี้เป็นการทดลองควบคุมแรงที่แขนกลกระทำกับวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่อง ตามรูปที่ 3.57 การทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบระหว่าง

- 1) การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิต
- 2) การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งดิงแบบออนไลน์

พิจารณารูป 3.57 แกน X คือแกนที่ตั้งฉากกับพื้นผิว แกน Y คือแกนที่สัมผัสกับพื้นผิวในแนวระนาบ แกน Z คือแกนที่สัมผัสกับพื้นผิวในแนวตั้ง

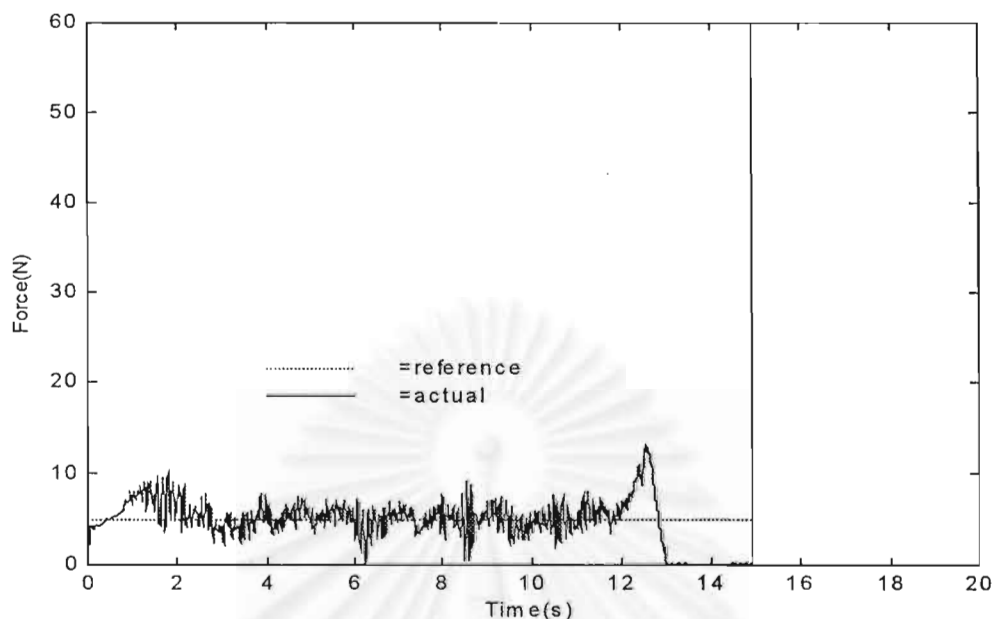
การทดลองเริ่มจากแขนกลอยู่ห่างจากวัตถุประมาณ 1 ซม. หลังจากนั้นแขนกลจะเคลื่อนที่เข้าหาวัตถุตามแนวแกน X ด้วยแรงกด 5 นิวตัน 10 นิวตัน และ 15 นิวตัน ตามลำดับ พร้อมกับเคลื่อนที่ไปบนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่อง โดยมีการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามแนวแกน Y และพยายามควบคุมให้แรงที่แขนกลกดวัตถุเป็นตามที่ต้องการ ซึ่งการทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงข้อดีของการควบคุมแบบอิมพลีซิฟเมื่อพารามิเตอร์ของการควบคุมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว



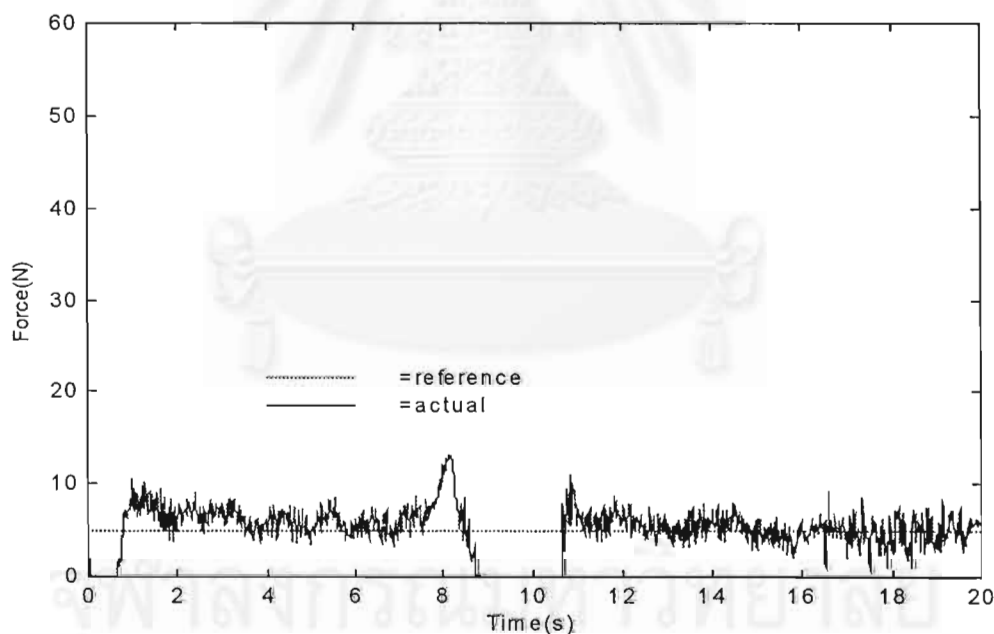
รูปที่ 3.57 แสดงแขนกลขณะเคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่อง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Force Response



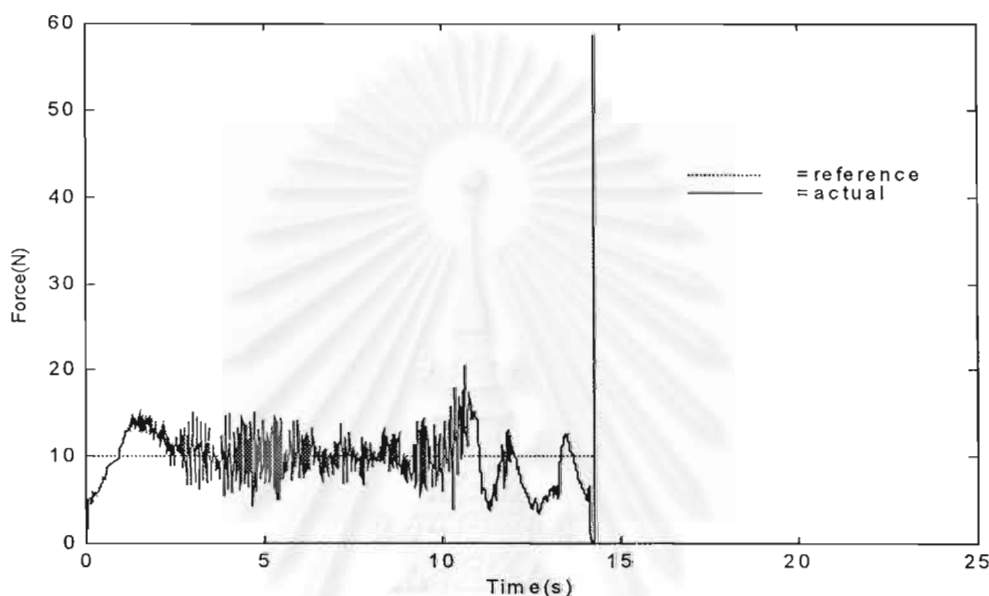
รูปที่ 3.58 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกล ขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่องเป็นเส้นตรงระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 5 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิท



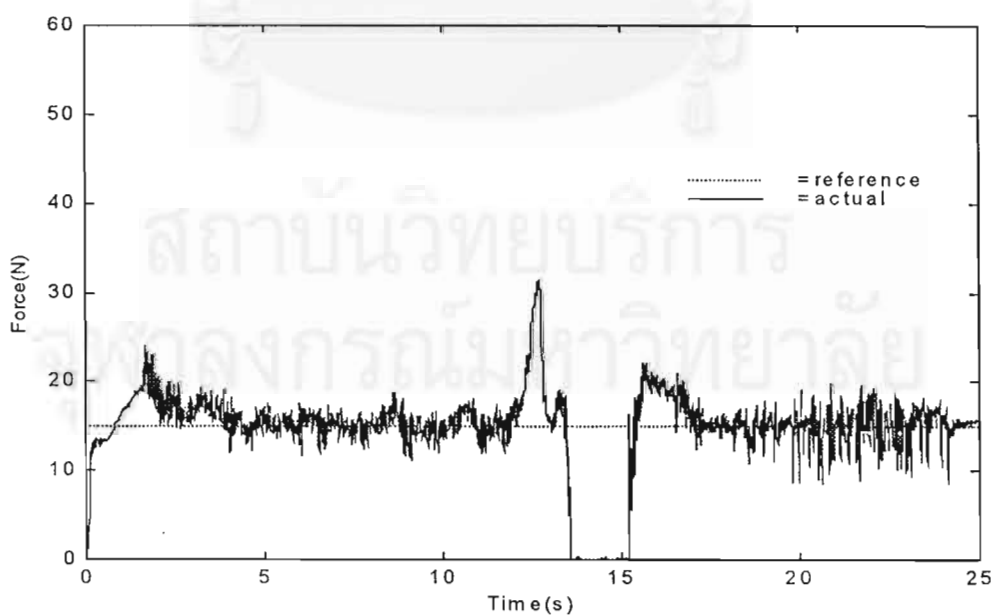
รูปที่ 3.59 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกล ขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่องเป็นเส้นตรงระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 5 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลลิซิท

จากรูปที่ 3.58 – 3.59 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงที่แขนกลกดขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่องเป็นระยะทาง 80 มม. โดยคำสั่งแรงมีค่า 5 นิวตัน จากรูป 3.58 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงเมื่อทำการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิท ซึ่งจะเห็นได้ว่าช่วงวินาทีที่ 12 ถึงวินาทีที่ 13 นั้นแรงสัมผัสจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น หลังจากนั้นแขนกลก็จะหลุดจากผิว แล้วพุ่งกลับเข้ามาชนวัตถุใหม่

ด้วยแรงที่เกินกว่าค่าที่ต้องการมาก ส่วนรูปที่ 3.59 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงเมื่อทำการควบคุมแบบอิมพลีซิท ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าช่วงวินาทีที่ 7 ถึงวินาทีที่ 9 นั้นแรงสัมผัสจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น หลังจากนั้นแขนกลจะหลุดออกจากวัตถุ แล้วกลับเข้ามาชนวัตถุใหม่ด้วยแรงที่ไม่มากกว่าค่าที่ต้องการมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อแขนกลหลุดออกจากวัตถุแล้ว แขนกลจะเคลื่อนที่กลับเข้ามาสัมผัสใหม่ด้วยความเร็วที่ค่อนข้างคงที่เนื่องจากการควบคุมตำแหน่งกวดของแขนกลแทนที่จะเป็นการควบคุมแรงของแขนกล

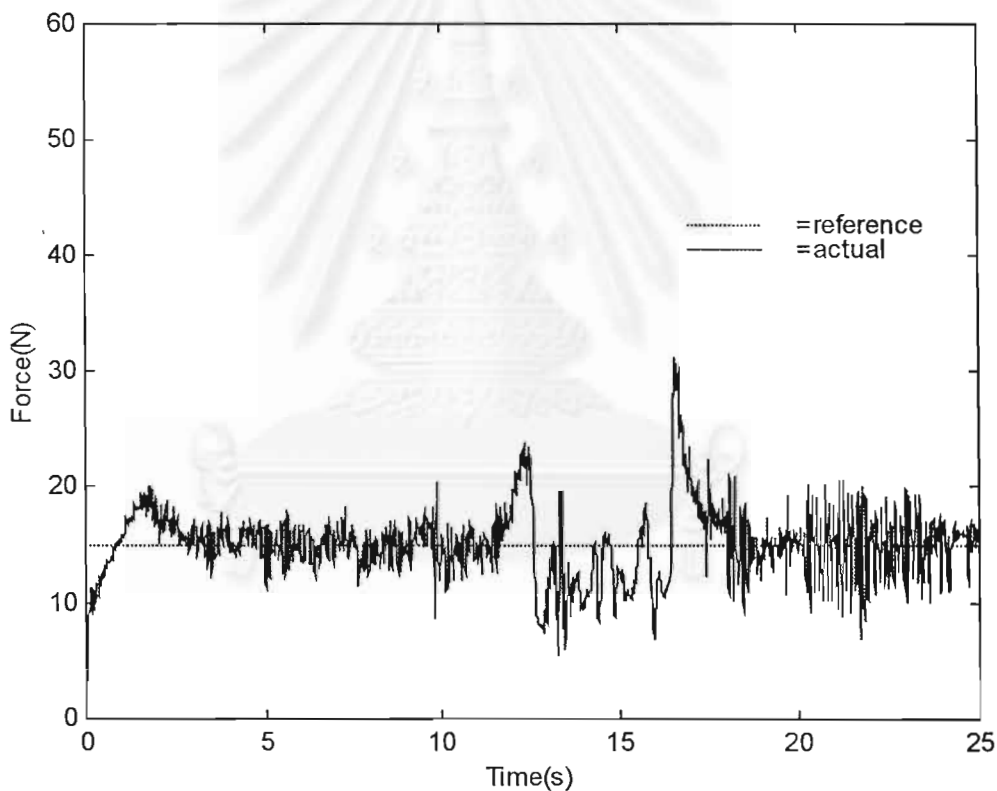


รูปที่ 3.60 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกล ขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่องเป็นเส้นตรงระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกวด 10 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท

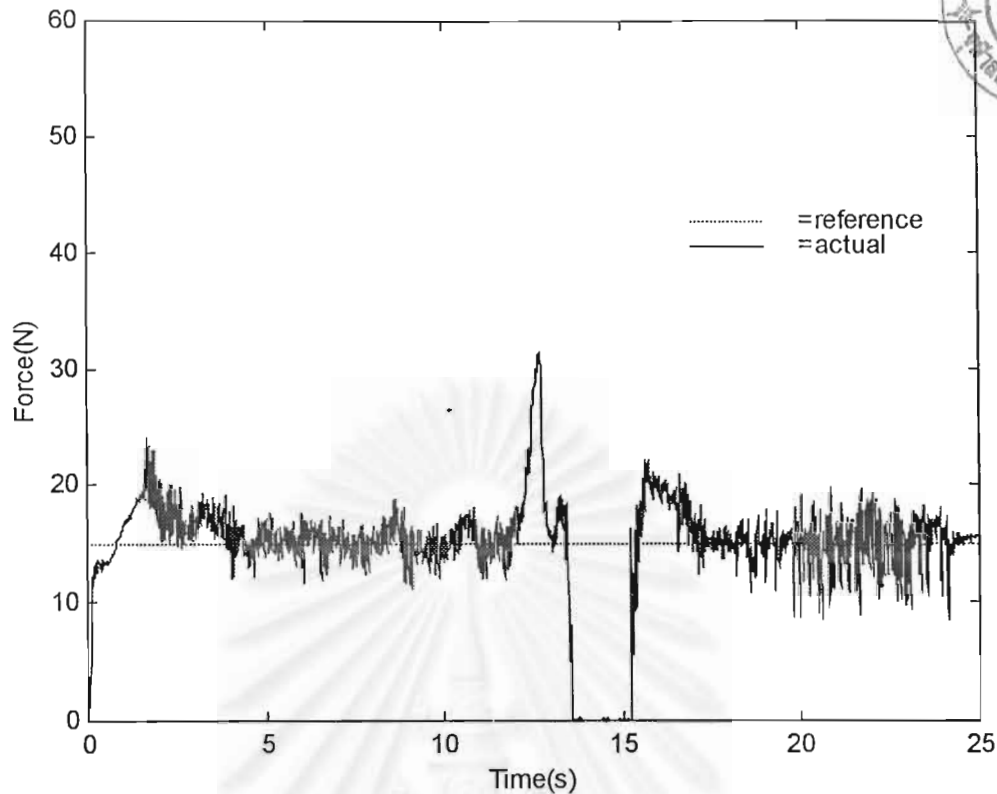


รูปที่ 3.61 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกล ขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่องเป็นเส้นตรงระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกวด 10 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิท

จากรูปที่ 3.60 – 3.61 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงที่แขนกลกดขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่องเป็นระยะทาง 80 มม. โดยคำสั่งแรงมีค่า 10 นิวตัน จากรูป 3.60 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงเมื่อทำการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิชิต ซึ่งจะเห็นได้ว่าช่วงวินาทีที่ 10 ถึงวินาทีที่ 11 นั้นแรงสัมผัสจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น หลังจากนั้นแขนกลก็จะหลุดจากผิว แล้วพุ่งกลับเข้ามาชนวัตถุใหม่ด้วยแรงที่เกินกว่าค่าที่ต้องการมาก ส่วนรูปที่ 3.61 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงเมื่อทำการควบคุมแบบอิมพลลิชิต ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าช่วงวินาทีที่ 12 ถึงวินาทีที่ 14 นั้นแรงสัมผัสจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น หลังจากนั้นแขนกลจะหลุดออกจากวัตถุ แล้วกลับเข้ามาชนวัตถุใหม่ด้วยแรงที่ไม่มากกว่าค่าที่ต้องการมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อแขนกลหลุดออกจากวัตถุแล้ว แขนกลจะเคลื่อนที่กลับเข้ามาสัมผัสใหม่ด้วยความเร็วที่ค่อนข้างคงที่เนื่องจากเป็นการควบคุมตำแหน่งกดของแขนกลแทนที่จะเป็นการควบคุมแรงของแขนกล



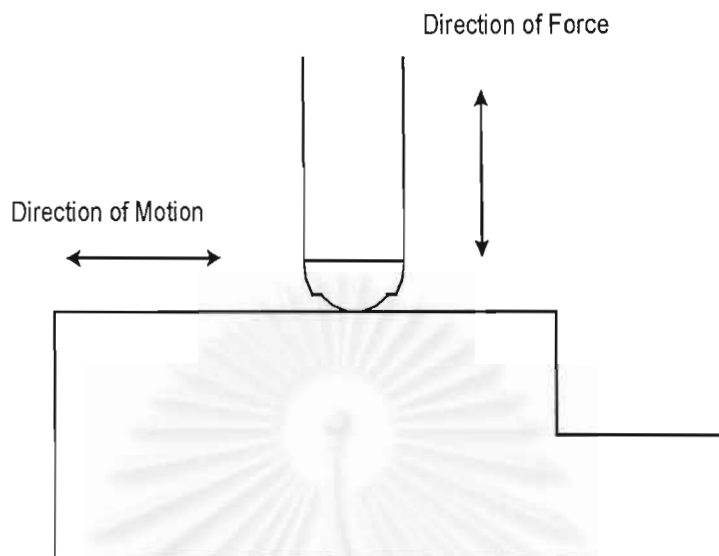
รูปที่ 3.62 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกล ขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่องเป็นเส้นตรงระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 15 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิชิต



รูปที่ 3.63 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกล ขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่องเป็นเส้นตรงระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 15 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิต

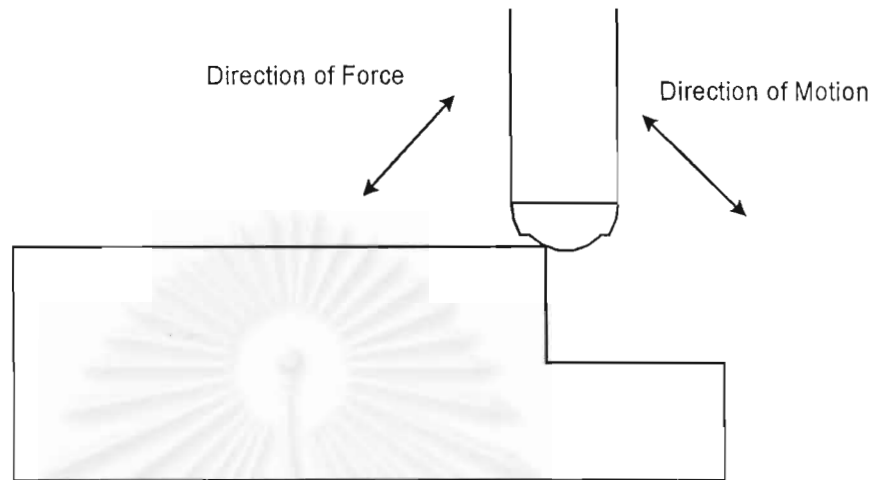
จากรูปที่ 3.62 – 3.63 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงที่แขนกลกดขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่องเป็นระยะทาง 80 มม. โดยคำสั่งแรงมีค่า 15 นิวตัน จากรูป 3.62 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงเมื่อทำการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิต ซึ่งจะเห็นได้ว่าช่วงวินาทีที่ 12 ถึงวินาทีที่ 13 นั้นแรงสัมผัสจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่หลังจากนั้นแขนกลจะไม่หลุดออกจากผิวเหมือนเช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้านี้ ทั้งนี้เนื่องจากคำสั่งแรงกดมีค่ามาก ส่วนรูปที่ 3.63 แสดงถึงผลตอบสนองของแรงเมื่อทำการควบคุมแบบอิมพลิชิต ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าช่วงวินาทีที่ 12 ถึงวินาทีที่ 13 นั้นแรงสัมผัสจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น หลังจากนั้นแขนกลจะหลุดออกจากวัตถุ แล้วกลับเข้ามาชนวัตถุใหม่ ถึงแม้คำสั่งแรงกดจะมีค่ามากก็ตาม ทั้งนี้อาจเนื่องจากการปรับค่าพารามิเตอร์ของการควบคุมอาจไม่เหมาะสม แต่แขนกลจะกลับเข้ากดวัตถุใหม่ด้วยแรงที่ไม่มากกว่าที่ต้องการมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อแขนกลหลุดออกจากวัตถุแล้ว แขนกลจะเคลื่อนที่กลับเข้ามาสัมผัสใหม่ด้วยความเร็วที่ค่อนข้างคงที่เนื่องจากเป็นการควบคุมตำแหน่งกดของแขนกลแทนที่จะเป็นการควบคุมแรงของแขนกล

สาเหตุที่ผลตอบสนองของแรงจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นช่วงหนึ่ง แล้วแขนกลจะหลุดออกจากวัตถุ นั้นก็มีสาเหตุมาจากรูปร่างของแท่งตรวจรู้แรงตามรูปที่ 3.64

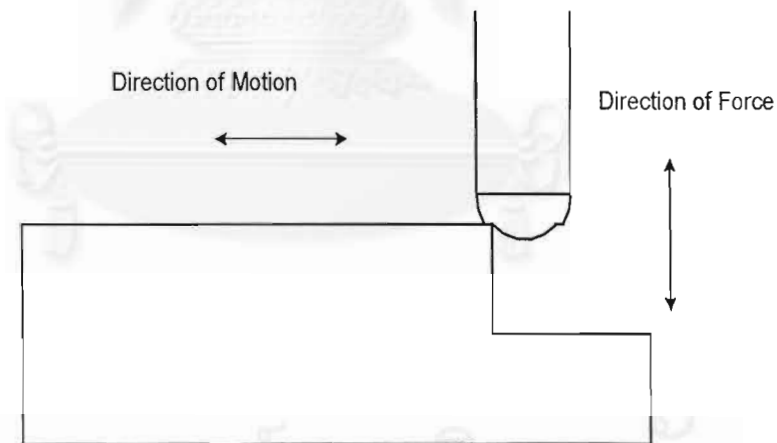


รูปที่ 3.64 แสดงลักษณะของปลายแขนกลที่เคลื่อนที่อยู่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่อง

ตามรูป 3.64 นั้นเป็นรูปของแท่งตรวจรู้แรงซึ่งติดอยู่ที่ปลายแขนกลขณะกำลังเคลื่อนที่บนวัตถุช่วงที่รูปร่างต่อเนื่อง เมื่อแขนกลเคลื่อนที่ถึงบริเวณที่วัตถุไม่ต่อเนื่องตามรูปที่ 3.65 นั้น ทิศทางการควบคุมแรงและการควบคุมตำแหน่งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้การควบคุมแรงเกิดความผิดพลาดขึ้นมาก ทำให้แรงสัมผัสมีค่าเพิ่มสูงขึ้น หลังจากนั้นพอปลายแขนกลเคลื่อนที่มาอยู่ที่ตำแหน่งตามรูปที่ 3.66 ทิศทางของการควบคุมตำแหน่งและการควบคุมแรงเปลี่ยนไปอย่างกะทันหัน ถ้าคำสั่งแรงมีค่าน้อยก็ทำให้ปลายแขนกลหลุดออกจากผิว ตามรูปที่ 3.59 ซึ่งคำสั่งแรงที่ให้แขนกลกวัดตุ้มมีค่า 5 นิวตัน ซึ่งตัวควบคุมจะสั่งให้แขนกลกวัดตุ้มเข้าไปใหม่ ซึ่งการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซีทจะทำให้แขนกลเคลื่อนที่เข้าหาพื้นผิวด้วยความเร่งจนชนพื้นผิวด้วยแรงเกินกว่าที่กำหนด (50 นิวตัน) จึงทำให้ระบบเกิดความไม่เสถียรภาพขึ้น ดังเช่นรูปที่ 3.58 และ 3.60 แต่ถ้าคำสั่งแรงมีค่ามากถึง 15 นิวตัน ดังรูปที่ 3.64 แขนกลจะไม่หลุดออกจากพื้นผิว เนื่องจากคำสั่งแรงมีค่ามาก ทำให้ระบบยังคงมีเสถียรภาพในขณะที่การควบคุมแรงแบบอิมพลลิซีทนั้น ถึงแม้ปลายแขนกลจะหลุดออกจากผิว แต่ก็หลุดห่างออกมาไม่มาก และตัวควบคุมจะสั่งให้ปลายแขนกลเคลื่อนที่เข้าหาวัตถุด้วยความเร็วค่อนข้างคงที่เนื่องจากการควบคุมตำแหน่ง ทำให้ปลายแขนกลเริ่มสัมผัสพื้นผิวใหม่ด้วยแรงที่ไม่เกินจากที่ต้องการมากนัก ตามรูปที่ 3.59 3.61 และ 3.63

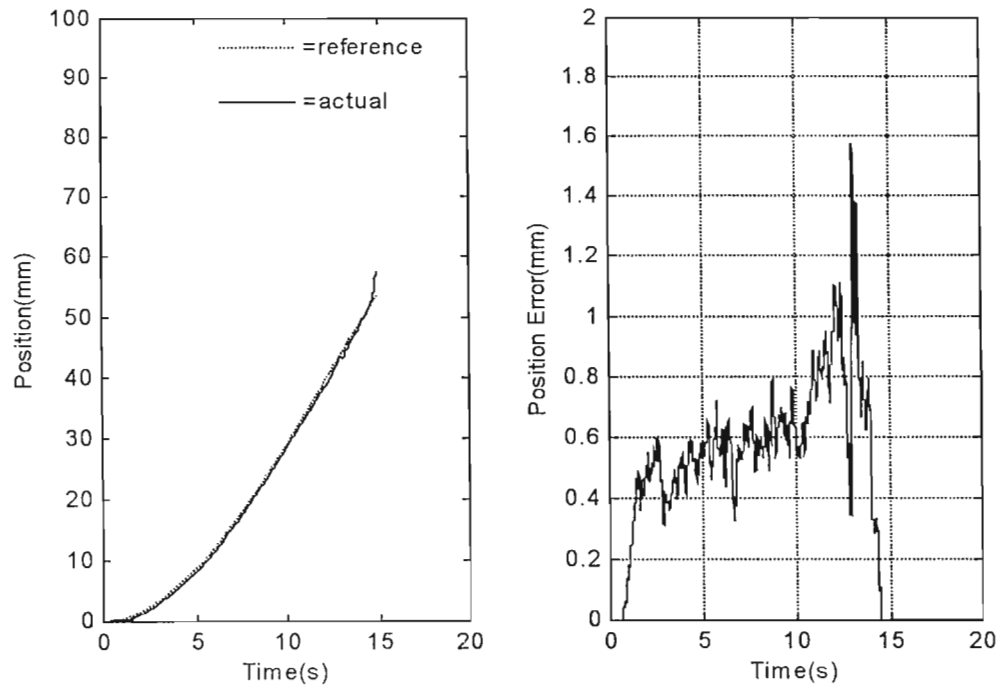


รูปที่ 3.65 แสดงลักษณะของปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่ใกล้ถึงจุดที่ไม่ต่อเนื่อง

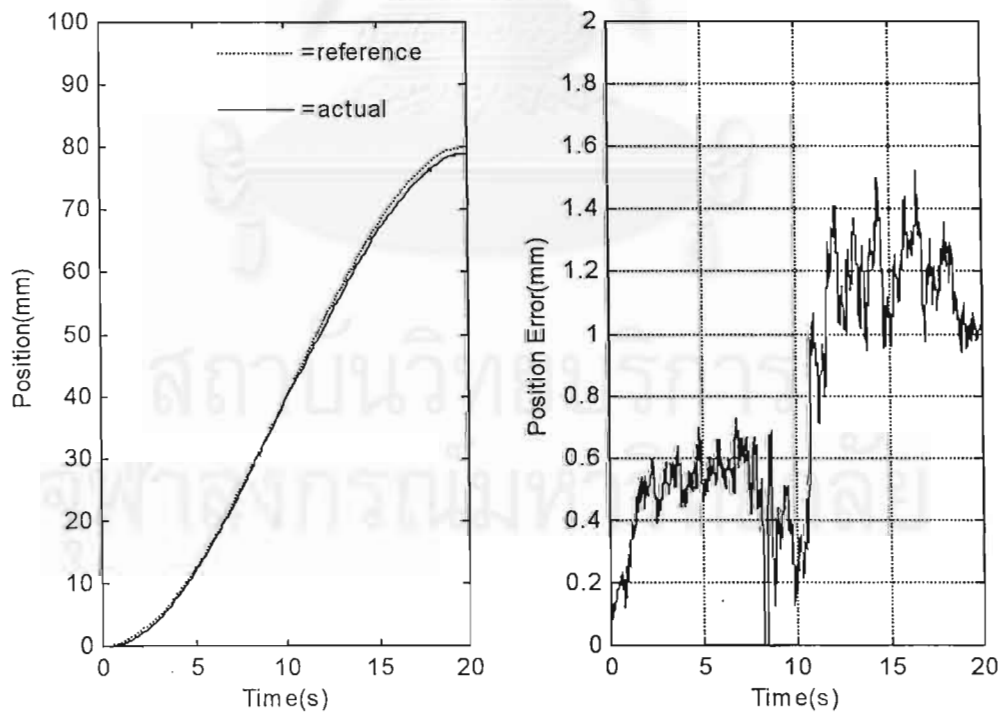


รูปที่ 3.66 แสดงลักษณะของปลายแขนกลขณะที่ทิศทางของการควบคุมแรงและการควบคุมตำแหน่งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน

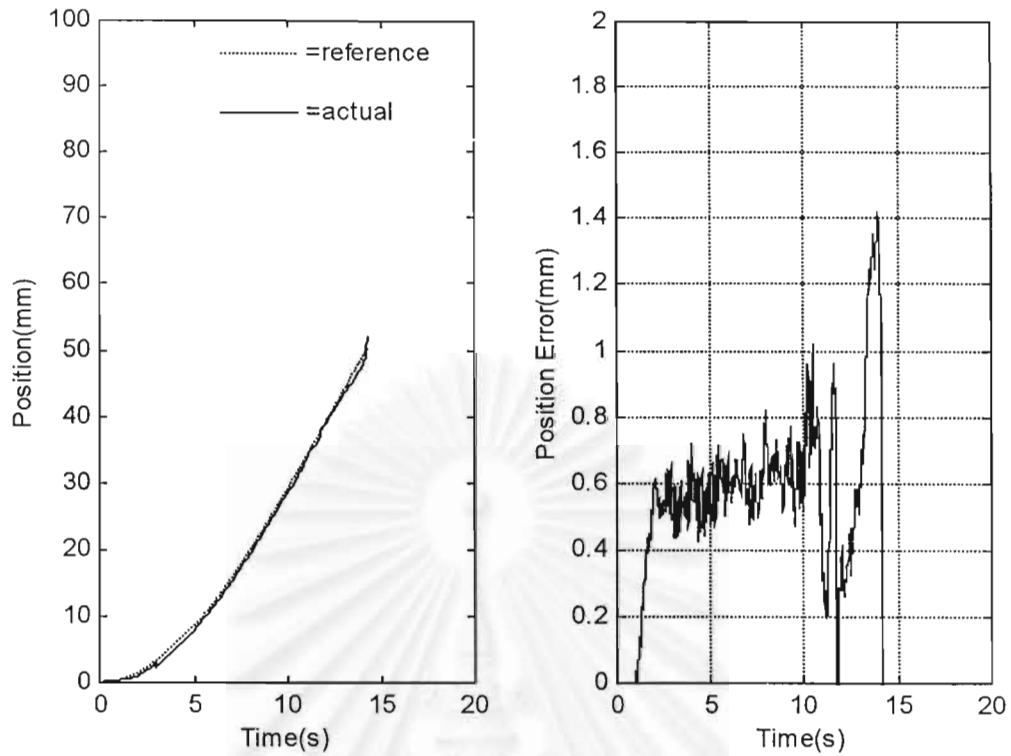
Position Response



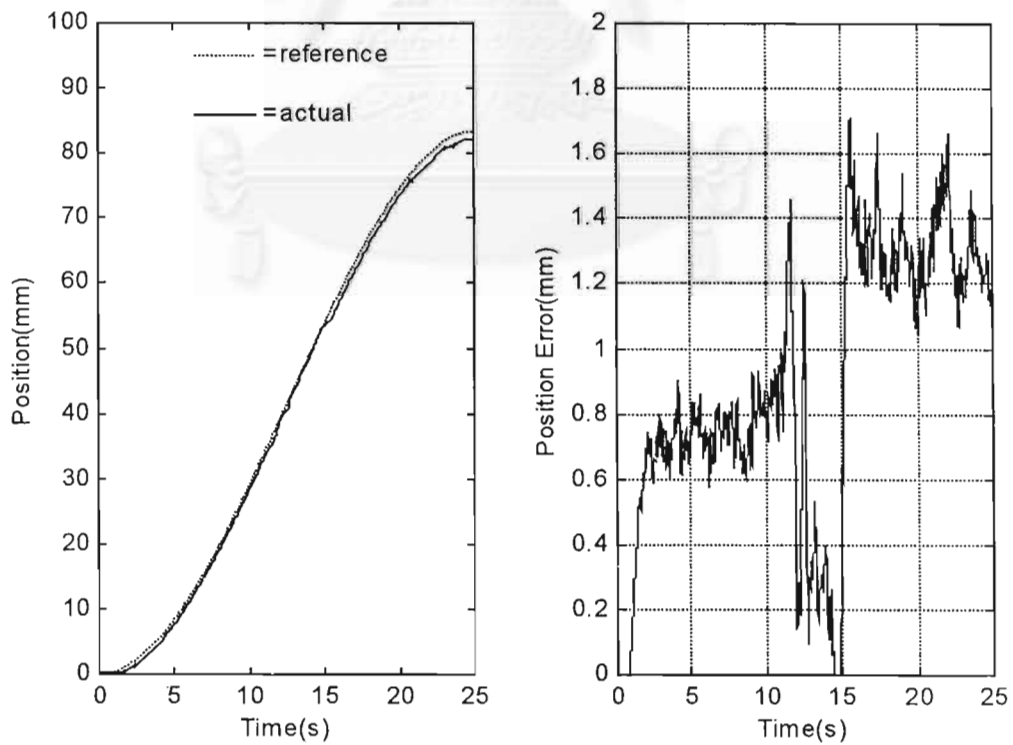
รูปที่ 3.67 แสดงค่าตำแหน่งของแขนกล ขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่องเป็นเส้นตรงระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 5 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิท



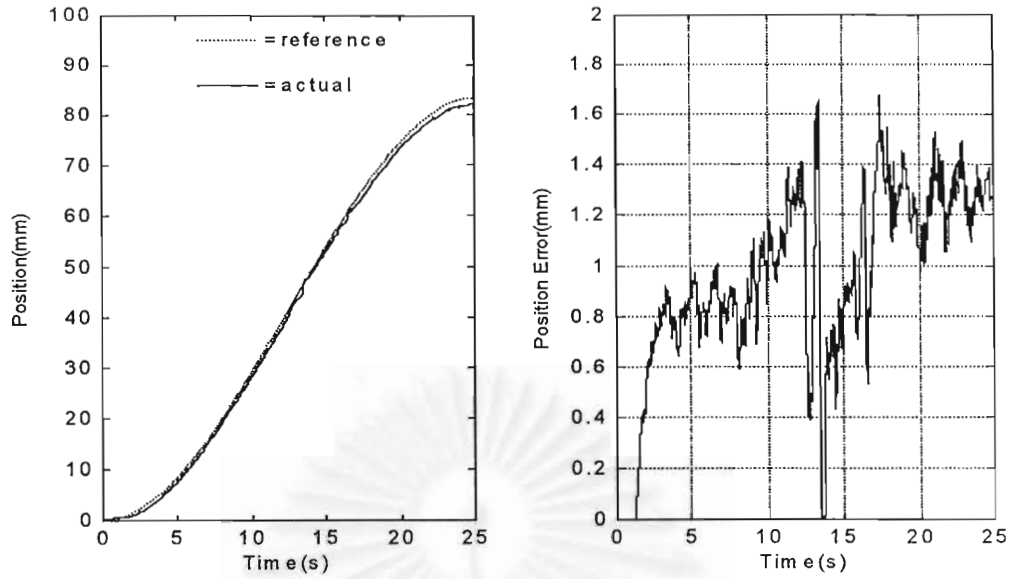
รูปที่ 3.68 แสดงค่าตำแหน่งของแขนกล ขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่องเป็นเส้นตรงระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 5 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลลิซิท



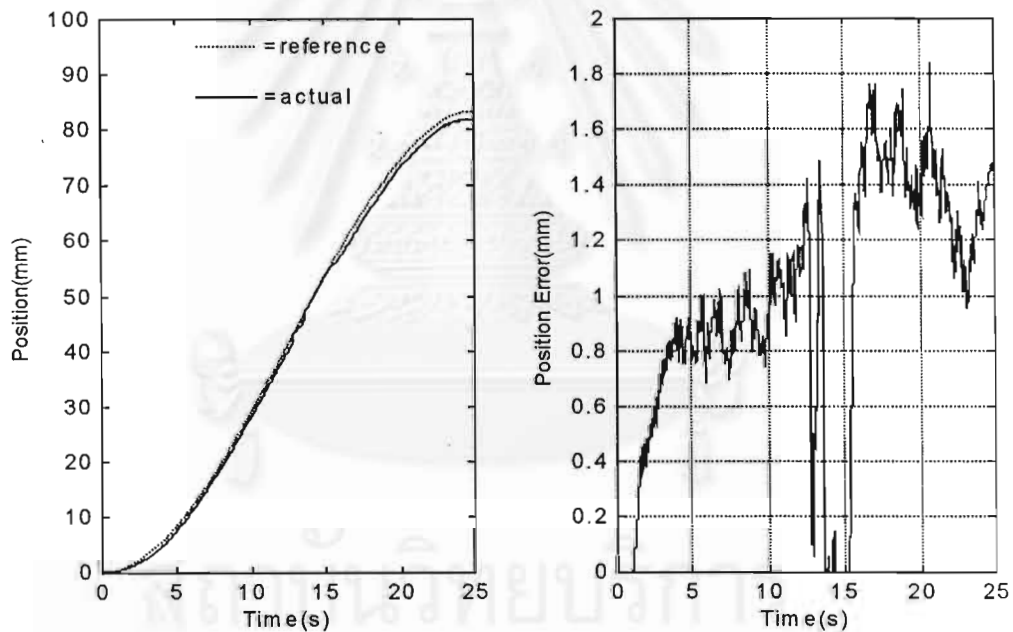
รูปที่ 3.69 แสดงค่าตำแหน่งของแขนกล ขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่องเป็นเส้นตรงระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 10 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลลิซิท



รูปที่ 3.70 แสดงค่าตำแหน่งของแขนกล ขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่องเป็นเส้นตรงระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 10 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลลิซิท



รูปที่ 3.71 แสดงค่าตำแหน่งของแขนกล ขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่องเป็นเส้นตรงระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 15 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท



รูปที่ 3.72 แสดงค่าตำแหน่งของแขนกล ขณะที่เคลื่อนที่บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่องเป็นเส้นตรงระยะ 80 มม. โดยมีขนาดแรงกด 15 นิวตัน ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิท

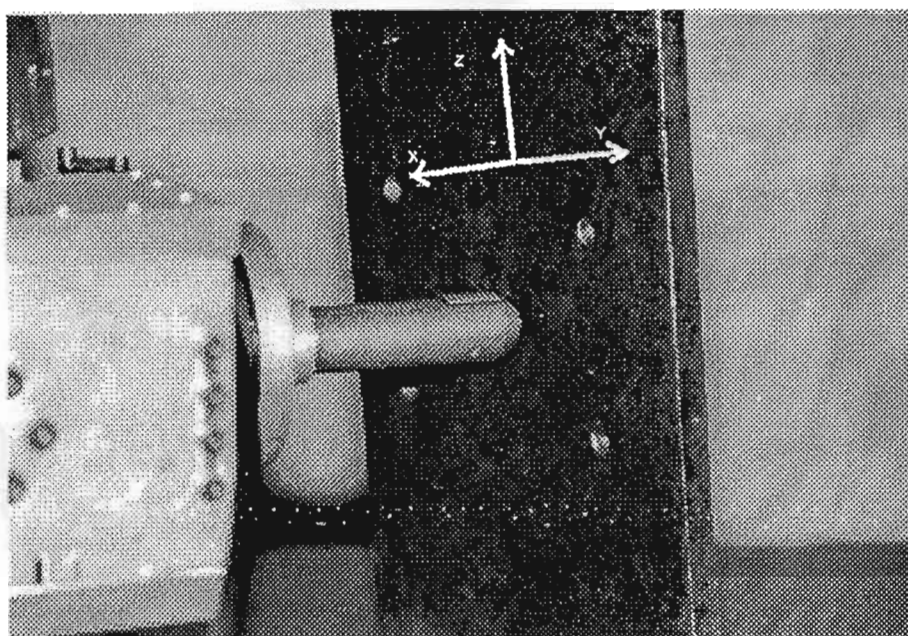
จากรูปที่ 3.67 – 3.72 เป็นผลตอบสนองของตำแหน่งปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงโดยมีสมการความเร็วเป็นสมการกำลังสอง เป็นระยะทาง 80 มม. บนวัตถุที่รูปร่างไม่ต่อเนื่อง โดยแรงที่แขนกลกดมีค่า 5 นิวตัน 10 นิวตัน และ 15 นิวตัน ตามลำดับ ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่าง การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิทและการควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทที่มีการหาค่าหรือ

ประมาณค่าความแข็งดึงแบบออนไลน์ ซึ่งผลปรากฏว่า เมื่อแขนกลเคลื่อนที่ถึงจุดที่พื้นผิวไม่ต่อเนื่อง ถ้าคำสั่งเร่งที่ต้องการให้แขนกลกวัดตุ้มมีค่า 5 นิวตัน และ 10 นิวตัน การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิตซิฟทำให้เกิดความไม่เสถียรภาพขึ้น การควบคุมตำแหน่งก็ไม่เสถียรภาพตามไปด้วย แต่ ถ้าคำสั่งเร่งที่ต้องการให้แขนกลกวัดตุ้มมีค่า 15 นิวตัน นั้น การควบคุมแรงยังคงมีเสถียรภาพอยู่ ทำให้การควบคุมตำแหน่งก็ยังคงมีเสถียรภาพอยู่ด้วย ส่วนการควบคุมแรงแบบอิมพลิตซิฟนั้น ระบบยังคงเสถียรภาพไม่ว่าคำสั่งเร่งที่ต้องการให้แขนกลกวัดตุ้มมีค่าเท่าไรก็ตาม

3.3 การทดลองควบคุมแรงกับผนังแบนโดยควบคุมตำแหน่งในแนวแกน z หรือแกนที่ 3 ของแขนกล และควบคุมแรงในพื้นที่ผิวระนาบ x - y หรือแกน 1 และ 2 ของแขนกล

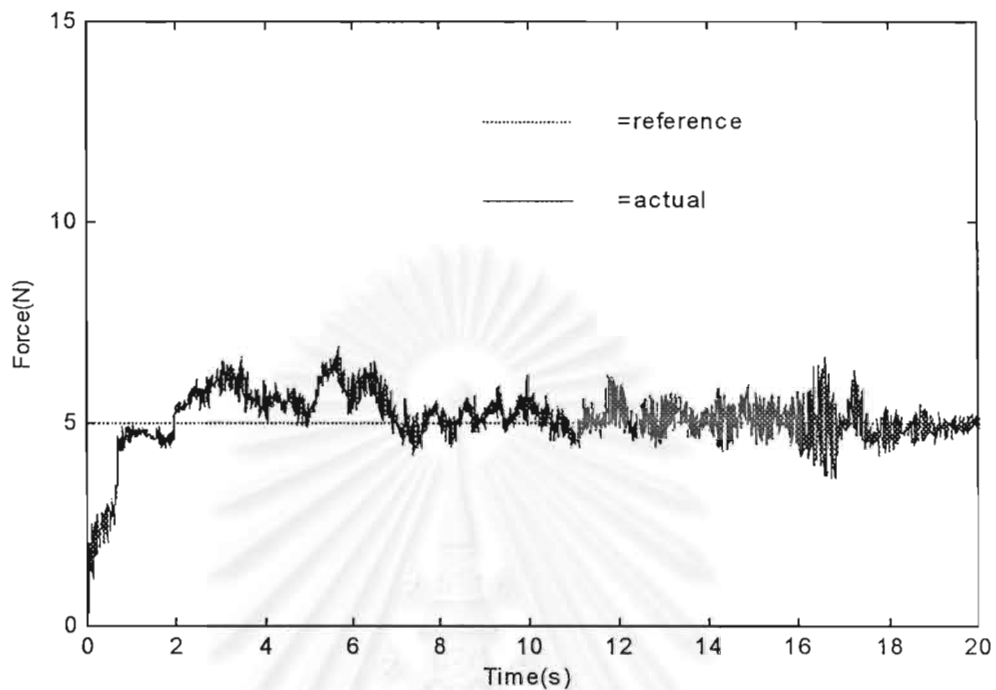
การทดลองนี้เป็นการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่ง โดยควบคุมตำแหน่งในแนวแกน z หรือแกนที่ 3 และควบคุมแรงในพื้นที่ผิวระนาบ x - y หรือแกน 1 และ 2 ซึ่งต่างจากการทดลองก่อนหน้านี้ เนื่องจากแต่ละข้อต่อของแขนกลนั้นจะควบคุมแรงหรือควบคุมตำแหน่งเท่านั้น ตามรูปที่ 3.73 โดยที่แกน 1 และ 2 ของแขนกลจะควบคุมแรง ส่วนแกน 3 ของแขนกลจะควบคุมตำแหน่ง สำหรับการควบคุมแรงนั้นใช้วิธีควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิตซิฟ

การทดลองเริ่มจากให้แขนกลอยู่ห่างจากวัตถุประมาณ 1 ซม. แล้วควบคุมให้แขนกลเคลื่อนที่เข้าไปกวัดตุ้มเริ่มต้นด้วยแรง 5 นิวตัน 10 นิวตัน และ 15 นิวตัน ตามลำดับ แล้วแขนกลจะเริ่มเคลื่อนที่โดยที่แกนที่ 3 จะเคลื่อนที่ขึ้นตามพื้นผิวโดยมีสมการความเร็วเป็นสมการกำลังสอง เป็นระยะทาง 80 มม. ส่วนแกน 1 และ 2 จะกดพื้นผิวด้วยแรงที่กำหนดโดยไม่เคลื่อนที่

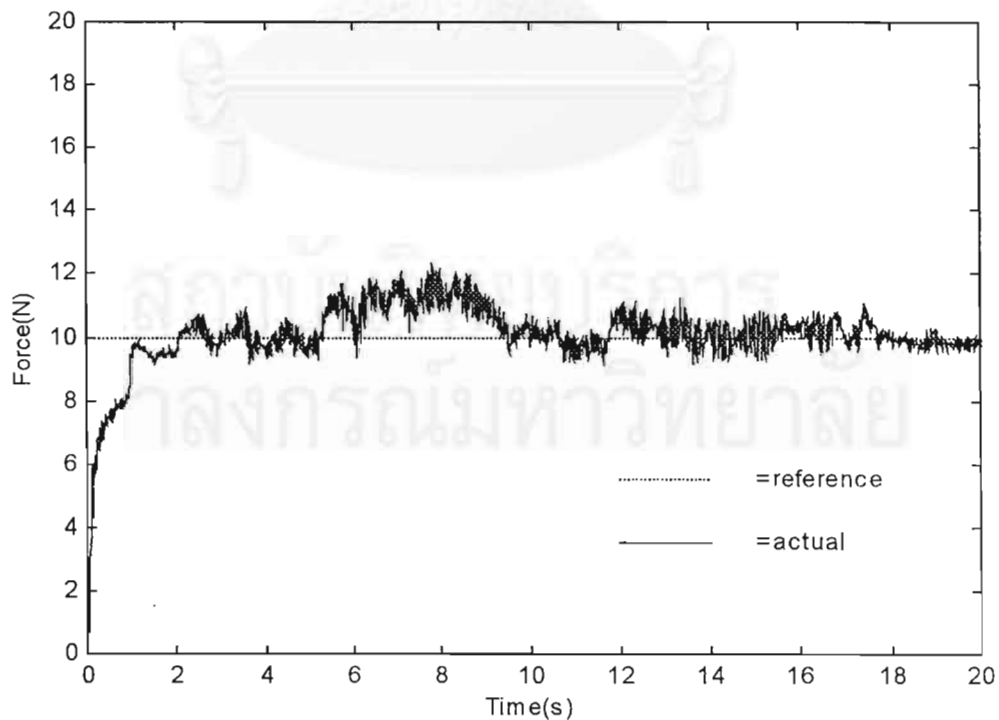


รูปที่ 3.73 แสดงแขนกลเคลื่อนที่บนผนังแบน โดยควบคุมตำแหน่งในแนวแกน z หรือแกนที่ 3 ของแขนกล และควบคุมแรงในพื้นที่ผิวระนาบ x - y หรือแกน 1 และ 2 ของแขนกล

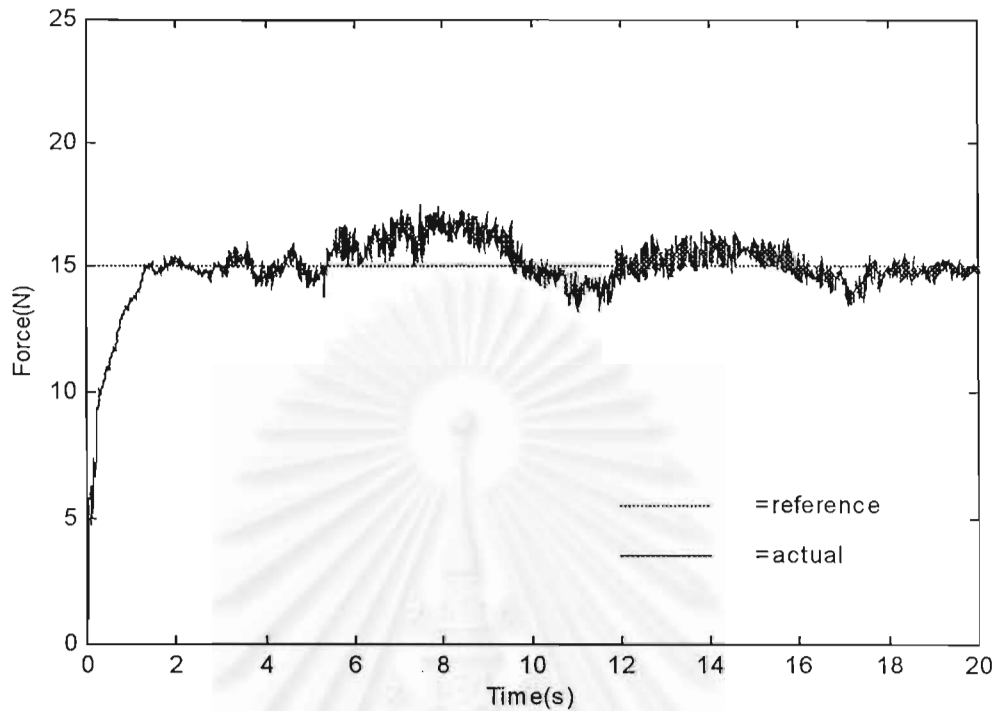
Force Response



รูปที่ 3.74 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่บนผนังแบน ขนาดแรง 5 นิวตัน ควบคุมตำแหน่งในแนวแกน z หรือแกนที่ 3 ของแขนกล และควบคุมแรงในพื้นที่ผิวระนาบ x - y หรือแกน 1 และ 2 ของแขนกล



รูปที่ 3.75 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่บนผนังแบน ขนาดแรง 10 นิวตัน ควบคุมตำแหน่งในแนวแกน z หรือแกนที่ 3 ของแขนกล และควบคุมแรงในพื้นที่ผิวระนาบ x - y หรือแกน 1 และ 2 ของแขนกล

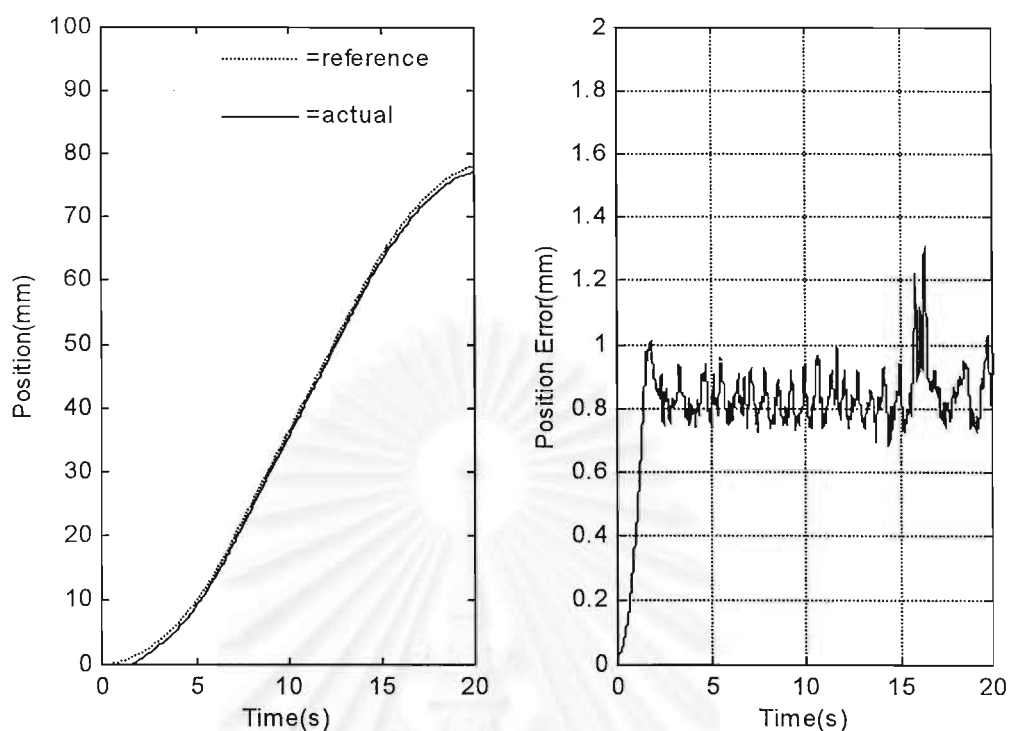


รูปที่ 3.76 แสดงค่าแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่บนผนังแบน ขนาดแรง 15 นิวตัน ควบคุมตำแหน่งในแนวแกน z หรือแกนที่ 3 ของแขนกล และควบคุมแรงในพื้นที่ผิวระนาบ x - y หรือแกน 1 และ 2 ของแขนกล

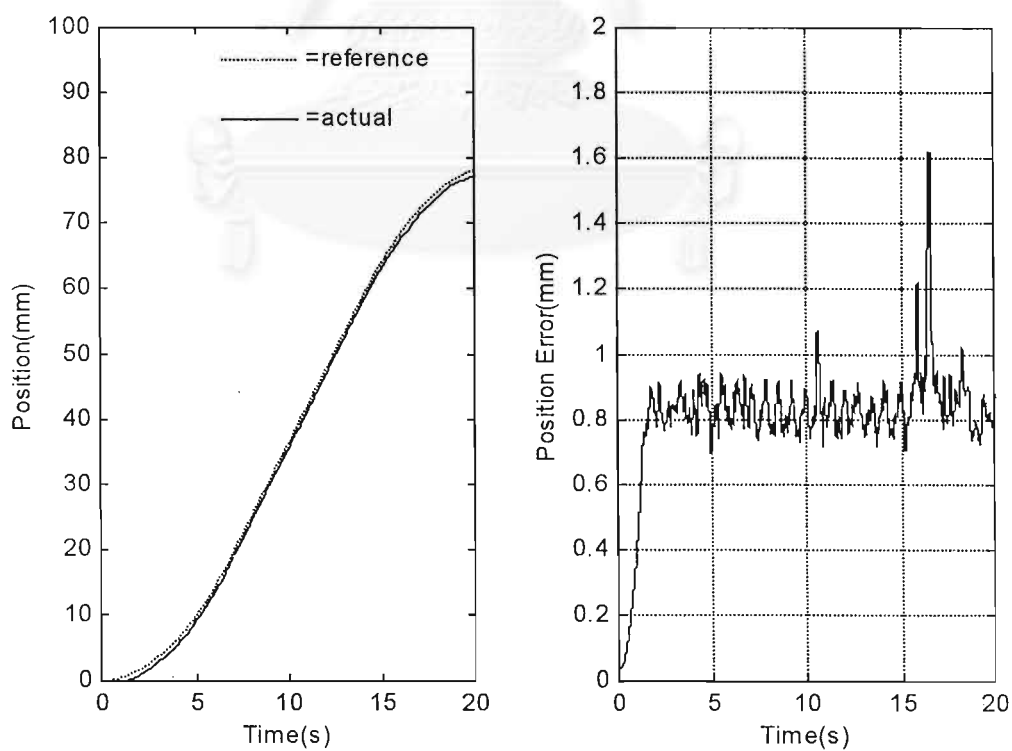
จากรูปที่ 3.74 – 3.76 เป็นการทดลองควบคุมแรงที่ปลายแขนกลกระทำกับผนังแบน โดยควบคุมตำแหน่งในแนวแกน z หรือแกนที่ 3 ของแขนกล และควบคุมแรงในพื้นที่ผิวระนาบ x - y หรือแกน 1 และ 2 ของแขนกล ซึ่งใช้การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท ผลปรากฏว่า ผลตอบสนองของแรงที่ปลายแขนกลกระทำกับผนังแบนนั้นค่อนข้างเรียบ ทั้งนี้เนื่องจากแขนกลแกนที่ 1 และ 2 ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมแรงไม่ได้เคลื่อนที่ มีเพียงแกนที่ 3 ซึ่งควบคุมตำแหน่งที่เคลื่อนที่ สำหรับค่าความผิดพลาดของแรงนั้นมีค่าประมาณไม่เกิน 2 นิวตัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

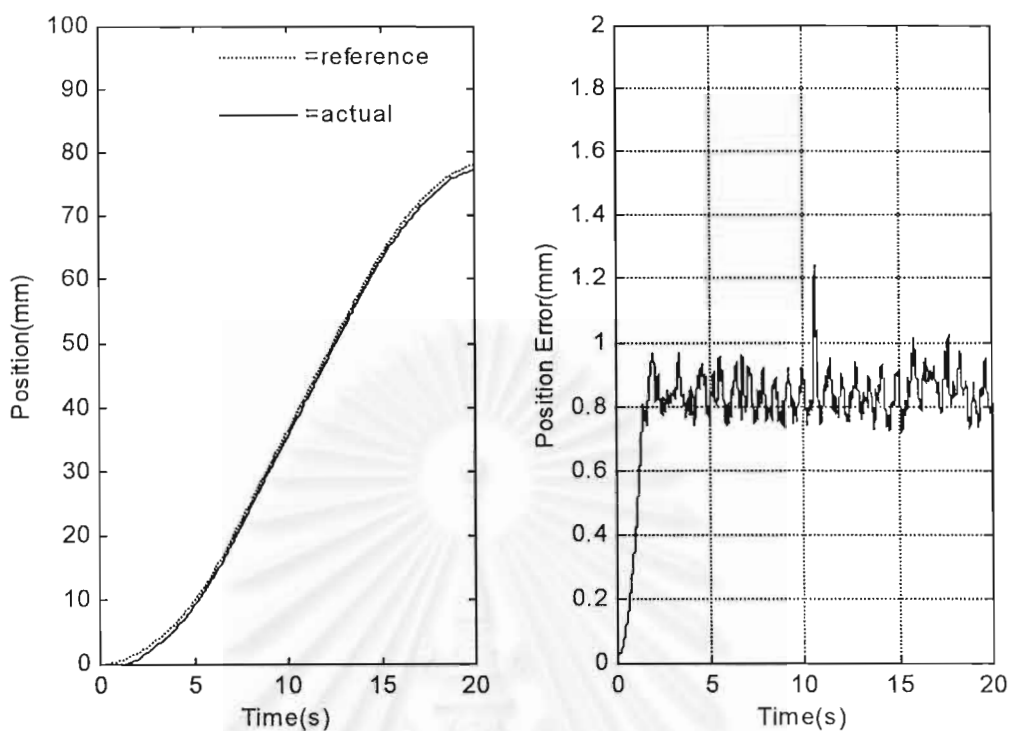
Position Response



รูปที่ 3.77 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนกลบนผนังแบน มีแรงสัมผัส 5 นิวตัน โดยควบคุมตำแหน่งในแนวแกน z หรือแกนที่ 3 ของแขนกล และควบคุมแรงในพื้นที่ระนาบ x - y หรือแกน 1 และ 2 ของแขนกล



รูปที่ 3.78 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนกลบนผนังแบน มีแรงสัมผัส 10 นิวตัน โดยควบคุมตำแหน่งในแนวแกน z หรือแกนที่ 3 ของแขนกล และควบคุมแรงในพื้นที่ระนาบ x - y หรือแกน 1 และ 2 ของแขนกล



รูปที่ 3.79 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนกลบนผนังแบน มีแรงสัมผัส 15 นิวตัน โดยควบคุมตำแหน่งในแนวแกน z หรือแกนที่ 3 ของแขนกล และควบคุมแรงในพื้นที่ผิวระนาบ x - y หรือแกน 1 และ 2 ของแขนกล

จากรูปที่ 3.77 – 3.79 เป็นผลตอบสนองของตำแหน่งปลายแขนกลขณะที่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในแนวแกน Z บนผนังแบนโดยมีสมการความเร็วเป็นสมการกำลังสอง เป็นระยะทาง 80 มม. ซึ่งพบว่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลค่อนข้างเรียบและมีค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ยไม่ถึง 1 มม. ซึ่งเนื่องมาจากการที่แขนกลไม่สั่นในขณะที่ควบคุม ทำให้ตำแหน่งของปลายแขนกลค่อนข้างเรียบตามไปด้วยนั่นเอง นั่นคือถ้าทำการควบคุมเพียงตำแหน่งหรือแรงเพียงอย่างเดียวในแต่ละข้อต่อของแขนกล ผลตอบสนองที่ได้ออกมาค่อนข้างเรียบกว่าแบบที่ต้องควบคุมทั้งแรงและตำแหน่งไปพร้อมๆกันในแต่ละข้อต่อของแขนกล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

การทดลองเรื่องการควบคุมแบบไฮบริดด้วยแรงแบบอิมพลิชิตสำหรับแขนกลนี้ ใช้หุ่นยนต์ จูฬา 2 เป็นหุ่นทดลอง โดยที่ปลายหุ่นยนต์มีอุปกรณ์ตรวจจับแรงติดอยู่ ส่วนตัวควบคุมนั้นใช้ คอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุม ซึ่งโปรแกรมควบคุมนั้นเขียนขึ้นโดยใช้ภาษา C โดยมีความถี่ในการสุ่ม ข้อมูล 100 เฮิรท์ ซึ่งการทดลองนี้พยายามนำเอาการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตมาใช้ให้เกิดประสิทธิภาพ เมื่อได้การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่มีประสิทธิภาพแล้วก็นำมาเปรียบเทียบกับ การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิต โดยทดลองให้แขนกลกดพร้อมกับเคลื่อนที่บนชิ้นงานชนิดและรูปร่างต่าง ๆ กัน

จากการทดลองนำการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตมาใช้ให้เกิดประสิทธิภาพนั้น ได้ทำการทดลองโดยใช้การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งตึงแบบออนไลน์ มาเปรียบเทียบกับ การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่ให้ค่าความแข็งตึงคงที่ เพื่อศึกษาความแตกต่าง ซึ่งผลการทดลองปรากฏว่า การควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งตึงแบบออนไลน์ให้การตอบสนองของแรงที่เร็วกว่าการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่ให้ค่าความแข็งตึงคงที่ ส่วนการเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิตและการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตนั้น พบว่าในกรณีที่เป็นชิ้นงานที่มีผิวแข็งและต่อเนื่อง วิธีการควบคุมทั้ง 2 แบบให้ผลที่ไม่แตกต่างกัน แต่ในกรณีที่ทำการกับชิ้นงานที่มีความหยุนตัว อ่อนตัวหรือรูปร่างไม่ต่อเนื่องนั้นให้ผลที่ต่างกัน โดยสามารถสรุปเป็นข้อๆได้ดังนี้

1. ปัญหาหลักของการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตคือ ปัญหาการหาค่าระยะที่สั่งให้แขนกลกดเพื่อให้ได้แรงตามที่ต้องการ ซึ่งจากการทดลองพบว่าการหาค่าความแข็งตึงแบบออนไลน์นั้น ค่าระยะที่สั่งให้แขนกลกดเพื่อให้ได้แรงตามที่ต้องการลู่เข้าสู่ค่าที่เหมาะสมเร็วกว่าแบบที่ให้ค่าความแข็งตึงคงที่ ซึ่งทำให้แรงที่สัมผัสเข้าสู่ค่าที่ต้องการเร็วกว่าด้วย
2. สำหรับชิ้นงานที่มีความอ่อนตัวซึ่งในการทดลอง ได้ใช้โฟมเป็นวัตถุให้แขนกลกด ผลปรากฏว่า การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลิชิตและการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตที่มีการหาค่าหรือประมาณค่าความแข็งตึงแบบออนไลน์ให้ผลต่างกัน โดยการควบคุมแรงแบบอิมพลิชิตให้ผลตอบสนองของแรงที่เร็วกว่า เนื่องจากระหว่างที่แขนกลกดลงในบนผิวชิ้นงานและเคลื่อนที่ไปตามผิวชิ้นงานนั้น ปลายแขนกลมีการเคลื่อนที่ในทิศตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน ซึ่งถ้าควบคุม

ตำแหน่งของปลายแขนกล มีผลให้ผลตอบสนองแรงตึกว่าการควบคุมแรงที่กระทำกับปลายแขนกล

3. สำหรับการทดลองควบคุมผลสมระหว่างแรงและตำแหน่งของแขนกลบนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยุ่นตัวนั้น ผลตอบสนองของแรงเมื่อควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิทและควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทให้ผลต่างกัน โดยการควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทให้ผลตอบสนองของแรงที่เรียกว่าเช่นเดียวกับการทดลองกับชิ้นงานที่มีความอ่อนตัว ซึ่งถ้าสังเกตที่ผนังแผ่นเหล็กระหว่างที่แขนกลเคลื่อนที่อยู่ นั้น พบว่าการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิททำให้ผนังแผ่นเหล็กสั้นมากกว่าการควบคุมแรงแบบอิมพลีซิท
4. สำหรับการทดลองควบคุมผลสมระหว่างแรงและตำแหน่งของแขนกลบนผนังแผ่นเหล็กที่มีความหยุ่นตัว โดยค่าแรงที่กระทำมีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได (Step Change) นั้น ผลตอบสนองของแรงเมื่อควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิทและควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทให้ผลต่างกัน โดยขณะที่แรงมีการเปลี่ยนแปลงนั้น ผลตอบสนองของแรงเมื่อควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทไม่เกิดส่วนพุ่งเกินมากเหมือนกับการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท ซึ่งช่วงที่คำสั่งแรงมีการเปลี่ยนแปลงนั้นถ้าคำสั่งแรงมีค่าน้อยแล้ว การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิทมีผลให้ปลายแขนกลหลุดออกจากวัตถุได้ เนื่องจากระบบไวต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์
5. การควบคุมแบบอิมพลีซิทมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบต่ำกว่าการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท ดังดูได้จากการทดลองให้แขนกลกดและเคลื่อนที่บนชิ้นงานที่มีผิวแข็งแต่รูปร่างไม่ต่อเนื่อง พบว่าขณะที่แขนกลเคลื่อนที่ไปบนผิวต่อเนื่อง ทั้งการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิทและการควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทนั้นให้ผลเหมือนกัน แต่ขณะที่แขนกลเคลื่อนที่ไปพบกับช่วงที่รูปร่างวัตถุไม่ต่อเนื่อง ทิศทางของการควบคุมแรงและการควบคุมตำแหน่งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ทำให้แขนกลหลุดออกจากผิว ซึ่งการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิทนั้นทำให้แขนหลุดออกมาห่างจากผิวมากและกลับเข้ากระทกผิววัตถุด้วยความเร่ง ทำให้ระบบไม่เสถียรภาพ ในขณะที่การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทนั้น แขนกลหลุดออกจากผิวไม่มากนัก และกลับเข้าสัมผัสใหม่ด้วยความเร็วค่อนข้างคงที่ ทำให้ไม่เกิดส่วนพุ่งเกินของแรงมากนัก ระบบจึงมีเสถียรภาพ
6. เมื่อทำการทดลองโดยแยกแกนอิสระ โดยให้แกนที่ 3 ของแขนกล หรือแกน Z ควบคุมตำแหน่ง ส่วนแกน 1 และ 2 ของแขนกล หรือแกน X-Y ควบคุมแรง ผลตอบสนองของแรงเรียกว่าการควบคุมแรงและตำแหน่งในแนวแกน X-Y เนื่องจากแต่ละแกนนั้นควบคุมเพียงแค่แรงหรือไม่ก็ตำแหน่งเท่านั้น ซึ่งจากการทดลองนี้ทำให้สรุปได้ว่า การแยกแกนควบคุม

ตำแหน่งและควบคุมแรงออกจากกันโดยเด็ดขาด ทำให้ผลตอบสนองของแรงที่แขนกลสัมผัสกับวัตถุดีกว่าการที่การควบคุมแรงและการควบคุมตำแหน่งอยู่ในแกนเดียวกัน

7. สำหรับการควบคุมตำแหน่งนั้นพบว่าถ้าชิ้นงานไม่มีการอ่อนตัวหรือยุบตัว และวัตถุมีรูปร่างต่อเนื่องแล้ว การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิทีและการควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทีให้ผลไม่ต่างกัน นั่นคือปลายแขนกลสามารถเคลื่อนที่ไปตามทิศทางที่ต้องการได้อย่างดี โดยมีความผิดพลาดไม่เกิน 3 มม. แต่ถ้าวัตถุที่แขนกลกดมีการอ่อนตัวหรือยุบตัวมาก การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิทีมีผลให้แขนกลกดวัตถุแล้วทำให้วัตถุสั้นมาก ทำให้แขนกลมีการสั่นในแนวตั้งฉากกับวัตถุมาก ซึ่งมีผลให้การเคลื่อนที่ของปลายแขนกลในแนวสัมผัสกับวัตถุไม่เรียบตามไปด้วย ในขณะที่การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทีบนวัตถุที่มีการอ่อนตัวหรือยุบตัวนั้น วัตถุที่ถูกกดไม่มีการสั้นมากนัก ทำให้แขนกลมีการสั่นในแนวตั้งฉากกับวัตถุน้อย ซึ่งมีผลให้การเคลื่อนที่ของปลายแขนกลในแนวสัมผัสกับวัตถุค่อนข้างเรียบตามไปด้วย

จากการทดลองที่ทำนั้น เห็นได้ว่าข้อดีของการนำวิธีควบคุมแรงแบบอิมพลีซิที เมื่อเปรียบเทียบกับควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิที ในการนำมาใช้กับการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่งคือ ในกรณีที่ว่าวัตถุที่สัมผัสมีความอ่อนตัวนั้น ระบบจะมีผลตอบสนองของแรงและเสถียรภาพดีกว่าเมื่อพารามิเตอร์ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และในความเป็นจริงแล้ว คำสั่งที่ใช้ควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรมโดยทั่วไปเป็นคำสั่งของตำแหน่ง ดังนั้นวิธีการควบคุมแรงแบบอิมพลีซิทีนี้ จึงนำไปประยุกต์ใช้ได้ง่ายกว่าวิธีการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิที

ข้อเสนอแนะ

หลังจากที่ได้มีการปรับปรุงโครงสร้างของแขนกลจู่ปา 2 และทำการทดลองควบคุมแรงและตำแหน่งแล้วนั้น พบว่าวิธีที่เสนอนั้นมีเสถียรภาพดีกว่า และง่ายในการประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมได้โดยตรง สิ่งที่ต้องทำต่อจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ ทดลองนำตัวควบคุมนี้ไปใช้กับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่สามารถแก้ไขตัวควบคุมของหุ่นยนต์ได้จริง และลองใช้กับงานจริง เช่นงาน Grinding หรืองาน peg-in-the-hole นอกจากนี้ควรจะลองหาวิธีการควบคุมแบบอื่นมาลองใช้เพื่อให้ผลการควบคุมดีขึ้น อย่างเช่น Fuzzy Control หรือ Sliding Control เป็นต้น



รายการอ้างอิง

- [1] M. Raibert and J. Craig. Hybrid position/force control of manipulators. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control Vol. 102, June 1981 : pp.126-133.
- [2] H. Hogan. Impedance Control; An Approach to Manipulation: Part I-Theory; Part II-Implementation; Part III- Applications. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control Vol. 107, March 1985 : pp.1-24.
- [3] Seul Jung และ T.C. Hsia. On neural network application to robust impedance control of robots manipulators. in Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation Vol.1, May 1995 : pp. 869-874.
- [4] Luh, J.Y.S., Walker, M.W. and Paul, R.P.C.. Resolved Acceleration Control of Mechanical Manipulations. I.E.E.E. Trans. Automatic Control, 25,3(1980b).
- [5] Tsuneo Yoshikawa and Akiko Sudou. Dynamic Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulators: On-Line Estimation of Unknown Constraint. I.E.E.E. Trans. On Robotics and automation Vol. 9, April 1993.
- [6] Dragan M. Stokic and Miomir K. Vukobratovic. An adaptive hybrid control scheme for manipulation robots with implicit force control. I.E.E.E. International Conference on Advanced Robotics Vol. 2 , 1991 :pp. 1505-1508 .
- [7] Paul, R., and Shimano, B.. Compliance and Control. Joint Automatic Control Conference San Francisco, 1976.
- [8] John J. Craig. Introduction to Robotics mechanics and control. Second Edition. Silma :Addison-Wesley Publishing Company, 1989.

ภาคผนวก ก

อุปกรณ์การทดลอง

แขนกล : จูฬา 2 รูปแบบ : สกากล้า (SCARA TYPE ROBOT)

ตัวควบคุม : เครื่องคอมพิวเตอร์ (PC computer) Software : ภาษา ซี (C Language)

คาบเวลาการสุ่ม : 10 มิลลิวินาที

เครื่องขยาย : ElectroCraft Model LA 5600

อุปกรณ์ตรวจรู้แรง (Force Sensor) : DSP-Based Force Sensor Receivers ซึ่งวัดแรงสูงสุดได้ 114 นิวตัน โดยมี Resolution 0.007 นิวตัน

อุปกรณ์ติดต่อกับภายนอก (Interface Card): ET-PC8255 Digital I/O 2 cards
DataTranslation DT2815 8 channels
JR3 DSP-based force sensor receivers card

อุปกรณ์ตรวจรู้ตำแหน่ง (Position Sensor) :

ข้อต่อที่ 1	Sumtak Rotary Encoder 2048 p/r
ข้อต่อที่ 2	E6B2-CWZ6C Omron Rotary Encoder(Increment) 500 p/r
ข้อต่อที่ 3	Line Seiki Rotary Encoder 500p/r
ข้อต่อที่ 4	Sumtak Rotary Encoder 1000 p/r
ข้อต่อที่ 5	Sumtak Rotary Encoder 2048 p/r

ตัวขับ (Actuator) :

ข้อต่อที่ 1	Electrocraft Model 0643-33-004
ข้อต่อที่ 2	Electrocraft Model 0643-33-004
ข้อต่อที่ 3	Electrocraft Model 0588-33-500
ข้อต่อที่ 4	Electrocraft Model 0588-33-500
ข้อต่อที่ 5	Reliance Electric Model S 372

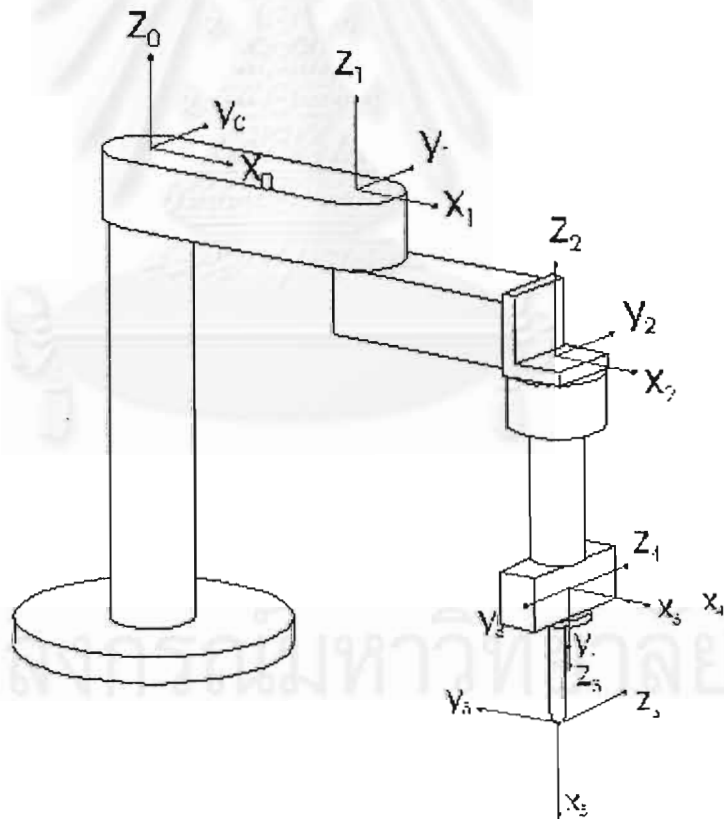
ภาคผนวก ข

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกล

คิเนเมติกของแขนกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คิเนเมติกของแขนกลเป็นการวิเคราะห์ถึงการเคลื่อนที่ของข้อต่อ (link) ต่าง ๆ ของแขนกล และเนื่องจากประสิทธิภาพของงานนั้น ๆ จะขึ้นอยู่กับเคลื่อนที่ของแขนกล ฉะนั้นคิเนเมติกจึงเป็นเครื่องมือพื้นฐาน ในการออกแบบระบบควบคุมแขนกล

Denavit-Hartenberg notation ของแขนกลจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป ข.1 Coordinate frame ของแขนกลจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูป ข.1 เป็นการตั้งเฟรมบน link ต่างๆ ของแขนกลโดยใช้วิธีของ Denavit-Hartenberg และสามารถหาพารามิเตอร์ของข้อต่อ ดังตาราง ข.1

ตาราง ข.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของข้อต่อ ของแขนกลจู่ฟ้า 2

Link No	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	0	L_1	0	θ_1
2	0	L_2	0	θ_2
3	180	0	D_3	0
4	90	0	0	θ_4
5	0	L_5	0	θ_5

จากรูป ข.1 และตาราง ข.1 สามารถหาเมตริกซ์การแปลงเอกพันธ์ (homogeneous transformation matrix) ของข้อต่อที่ติดกันของแขนกลจู่ฟ้า 2 ได้ดังนี้

$$A_1^0(\theta_1) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & L_1 \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & L_1 \sin(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & D_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2^1(\theta_2) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & L_2 \cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & L_2 \sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & D_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3^2(\theta_3) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & D_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_4^3(\theta_4) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) & 0 & \sin(\theta_4) & 0 \\ \sin(\theta_4) & 0 & -\cos(\theta_4) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_5^4(\theta_5) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_5) & -\sin(\theta_5) & 0 & l_5 \cos(\theta_5) \\ \sin(\theta_5) & \cos(\theta_5) & 0 & l_5 \sin(\theta_5) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ส่วนเมตริกซ์การแปลงเอกพจน์จากเฟรมสุดท้ายไปยังเฟรมศูนย์ของแขนกลหาได้จาก

$$\mathbf{A}_5^0 = \mathbf{A}_1^0 \cdot \mathbf{A}_2^1 \cdot \mathbf{A}_3^2 \cdot \mathbf{A}_4^3 \cdot \mathbf{A}_5^4$$

$$\mathbf{A}_5^0 = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & o_1 \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & o_2 \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & o_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$p_{11} = \cos(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4) \cdot \cos(\theta_5)$$

$$p_{12} = -\cos(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4) \cdot \sin(\theta_5)$$

$$p_{13} = -\sin(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4)$$

$$o_1 = \cos(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4) \cdot l_5 \cdot \cos(\theta_5) + l_2 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_1 \cdot \cos(\theta_1)$$

$$p_{21} = \sin(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4) \cdot \cos(\theta_5)$$

$$p_{22} = -\sin(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4) \cdot \sin(\theta_5)$$

จาโคเบียน ของแขนกลจพหุ 2

$$\mathbf{J}_{A1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{A2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{A3} = 0$$

$$\mathbf{J}_{A4} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{A5} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4) \\ \cos(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{L1} = \begin{bmatrix} -(l_1 \sin(q_1) + l_2 \sin(q_1 + q_2) + l_5 \sin(q_1 + q_2 - q_4) \cos(q_5)) \\ (l_1 \cos(q_1) + l_2 \cos(q_1 + q_2) + l_5 \cos(q_1 + q_2 - q_4) \cos(q_5)) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{L2} = \begin{bmatrix} -(l_2 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_5 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4)) \cdot \cos(\theta_5) \\ (l_2 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_5 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4)) \cdot \cos(\theta_5) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{L3} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{L4} = \begin{bmatrix} l_5 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4) \cdot \cos(\theta_5) \\ -l_5 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4) \cdot \cos(\theta_5) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{L5} = \begin{bmatrix} -l_5 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4) \cdot \sin(\theta_5) \\ -l_5 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4) \cdot \sin(\theta_5) \\ -l_5 \cdot \cos(\theta_5) \end{bmatrix}$$

การคำนวณแบบรีเคอร์ซีฟ (Recursive computation)

วิธีการคำนวณแบบรีเคอร์ซีฟจะแบ่งเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกจะเป็นการคำนวณคิเนแมติกของแขนกลเพื่อหาตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในสมการนิวตัน-ออยเลอร์ (Newton-Euler) ส่วนหลังจะเป็นการคำนวณหาค่าแรงบิดที่ใช้ขับเคลื่อนข้อต่อแขนกลโดยใช้สมการนิวตัน-ออยเลอร์

จลนศาสตร์ของข้อต่อ (Kinematic of the link)

ความเร็วเชิงมุม (angular velocity)

$$\mathbf{R}_0^1 \omega_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_0^2 \omega_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_0^3 \omega_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_0^4 \omega_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta}_4 - (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_0^5 = \begin{bmatrix} (\dot{\theta}_4 - (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)) \cdot \sin(\theta_5) \\ (\dot{\theta}_4 - (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)) \cdot \cos(\theta_5) \\ \dot{\theta}_5 \end{bmatrix}$$

ความเร่งเชิงมุม (angular acceleration)

$$\mathbf{R}_0^1 \dot{\omega}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta}_1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_0^2 \dot{\omega}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_0^3 \dot{\omega}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_0^4 \dot{\omega}_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ \ddot{\theta}_4 - (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_0^5 \dot{\omega}_5 = \begin{bmatrix} (\dot{\theta}_4 - (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)) \cdot \dot{\theta}_5 \cdot \cos(\theta_5) + (\ddot{\theta}_4 - (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2)) \cdot \sin(\theta_5) \\ -((\dot{\theta}_4 - (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)) \cdot \dot{\theta}_5 \cdot \sin(\theta_5) + (\ddot{\theta}_4 - (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2)) \cdot \cos(\theta_5)) \\ \ddot{\theta}_5 \end{bmatrix}$$

ความเร็วเชิงเส้น (Linear Velocity)

$$\mathbf{R}_0^1 \mathbf{v}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_1 \cdot \dot{\theta}_1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_0^2 \mathbf{v}_2 = \begin{bmatrix} l_1 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \sin(\theta_2) \\ l_1 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \cos(\theta_2) + l_2 \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_0^3 \mathbf{v}_3 = \begin{bmatrix} l_1 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \sin(\theta_2) \\ -(l_1 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \cos(\theta_2) + l_2 \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)) \\ -\dot{d}_3 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_0^4 \mathbf{v}_4 = \begin{bmatrix} l_1 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \sin(\theta_2 - \theta_4) - l_2 \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cdot \sin(\theta_4) \\ -\dot{d}_3 \\ l_1 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \cos(\theta_2 - \theta_4) - l_2 \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cdot \cos(\theta_4) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_0^5 \mathbf{v}_5 = \begin{bmatrix} \{l_1 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \sin(\theta_2 - \theta_4) - l_2 \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cdot \sin(\theta_4)\} \cdot \cos(\theta_5) - \dot{d}_3 \cdot \sin(\theta_5) \\ \{l_1 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \sin(\theta_2 - \theta_4) + l_2 \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cdot \sin(\theta_4)\} \cdot \sin(\theta_5) - \dot{d}_3 \cdot \cos(\theta_5) + l_5 \cdot \dot{\theta}_5 \\ l_1 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \cos(\theta_2 - \theta_4) + l_2 \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cdot \cos(\theta_4) + l_5 \cdot \cos(\theta_5) \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_4) \end{bmatrix}$$

ความเร่งเชิงเส้น (linear Acceleration)

$$\mathbf{R}_0^1 \mathbf{a}_1 = \begin{bmatrix} -l_1 \cdot (\dot{\theta}_1)^2 \\ l_1 \cdot \ddot{\theta}_1 \\ g \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_0^2 \mathbf{a}_2 = \begin{bmatrix} -l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 - l_1 \left((\dot{\theta}_1)^2 \cos(\theta_2) - \ddot{\theta}_1 \cdot \sin(\theta_2) \right) \\ l_2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) - l_1 \left((\dot{\theta}_1)^2 \sin(\theta_2) + \ddot{\theta}_1 \cdot \cos(\theta_2) \right) \\ g \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_0^3 \mathbf{a}_3 = \begin{bmatrix} -l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 - l_1 \left((\dot{\theta}_1)^2 \cos(\theta_2) - \ddot{\theta}_1 \cdot \sin(\theta_2) \right) \\ -l_2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) - l_1 \left((\dot{\theta}_1)^2 \sin(\theta_2) + \ddot{\theta}_1 \cdot \cos(\theta_2) \right) \\ -(g + \ddot{d}_3) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_0^4 \mathbf{a}_4 = \begin{bmatrix} -l_2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \cos(\theta_4) - l_2(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \sin(\theta_4) + l_1 \left(-(\dot{\theta}_1)^2 \cos(\theta_2 - \theta_4) + \ddot{\theta}_1 \sin(\theta_2 - \theta_4) \right) \\ -(g + \ddot{d}_3) \\ -l_2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \sin(\theta_4) + l_2(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \cos(\theta_4) + l_1 \left(-(\dot{\theta}_1)^2 \sin(\theta_2 - \theta_4) + \ddot{\theta}_1 \cos(\theta_2 - \theta_4) \right) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_0^5 \mathbf{a}_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ l_5 \ddot{\theta}_5 \\ l_5 \{ \cos(\theta_5) \cdot (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 - \ddot{\theta}_4) - \dot{\theta}_5 \cdot \sin(\theta_5) \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_4) \} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} l_5(\omega_{y5}^2 + \omega_{z5}^2) \\ l_5 \omega_{x5} \omega_{y5} \\ l_5 \omega_{x5} \omega_{z5} \end{bmatrix} + \mathbf{R}_0^4 \mathbf{a}_4$$

ในสมการนิวตัน-ออยเลอร์ ความเร็วและความเร่งจะเทียบกับจุดรวมมวล (centroid) แต่ตัวแปรในวิธีการคำนวณแบบรีเคอร์ซีฟจะเทียบกับเฟรมของตัวเอง ฉะนั้นจึงต้องแปลงความเร็วและความเร่งให้เทียบกับจุดรวมมวลของข้อต่อ นั้น ๆ ตามสมการต่อไปนี้

ความเร็วของจุดรวมมวล (Centroidal Velocity)

$${}^i \mathbf{v}_{ci} = {}^i \mathbf{v}_i + {}^i \boldsymbol{\omega}_i \times {}^i \mathbf{r}_{ci}$$

ความเร่งของจุดรวมมวล (Centroidal Acceleration)

$${}^i \mathbf{A}_{ci} = {}^i \mathbf{A}_i + {}^i \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times {}^i \mathbf{r}_{ci} + {}^i \boldsymbol{\omega}_i \times ({}^i \boldsymbol{\omega}_i \times {}^i \mathbf{r}_{ci})$$

เมื่อได้ค่าต่างๆ ของตัวแปรคิเนเมติกแล้ว จะคำนวณหาแรงบิดที่ใช้ขับเคลื่อนข้อต่อแกนกลโดยใช้สมการนิวตัน-ออยเลอร์ ดังนี้

กรณีเชิงเส้น

$$\mathbf{R}_i^{i+1} [\mathbf{f}_{i-1,i} - \mathbf{f}_{i,i+1} + \mathbf{m}g] = \mathbf{m}_i {}^i \mathbf{A}_{ci}$$

กรณีเชิงมุม

$$\mathbf{R}_i^0 \mathbf{N}_{i-1,i} - \mathbf{N}_{i,i+1} + \mathbf{r}_{i,ci} \times \mathbf{f}_{i,i+1} - \mathbf{r}_{i-1,ci} \times \mathbf{f}_{i-1,i} = I_i \dot{\omega}_i + \omega_i \times (I_i \omega_i)$$

โดย I_i คือ อินเนอร์ซีเรียรอบจุดรวมมวลของข้อต่อ i เทียบกับโคออดิเนต ของ เฟรม i

เมื่อหาค่าแรง (force) และแรงบิด (torque) ที่กระทำต่อ link ต่าง ๆ ได้แล้ว ก็จะหาแรงและแรงบิดที่เกิดจากตัวขับ (actuator) ของแต่ละข้อต่อ กำหนดให้ τ_i เป็นแรงหรือแรงบิดของตัวขับที่ข้อต่อ i จะได้ว่า

กรณีข้อต่อเลื่อนไถล (prismatic joint) τ_i จะเป็น แรงเชิงเส้นตามแนวแกน $i-1$

$$\tau_i = [\mathbf{R}_0^i \mathbf{b}_{i-1}]^T [\mathbf{R}_0^i \mathbf{f}_{i-1,i}]$$

กรณีข้อต่อหมุน (revolute joint) τ_i จะเป็นแรงบิดเชิงมุม รอบแกน $i-1$ จะได้

$$\tau_i = [\mathbf{R}_0^i \mathbf{b}_{i-1}]^T [\mathbf{R}_0^i \mathbf{N}_{i-1,i}]$$

ซึ่งสามารถเขียนแรงบิดของตัวขับที่ใช้ข้อต่อแขนกล ให้อยู่ในรูปเมตริกส์ 5×1 ได้

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \end{bmatrix}$$

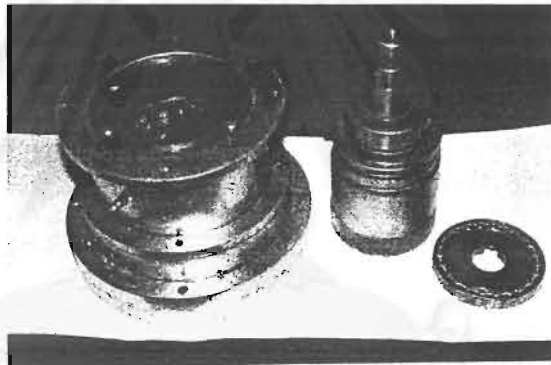
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

การปรับปรุงแขนกล จุฬา 2

สำหรับแขนกลจุฬา 2 ที่ปรับปรุงขึ้นใหม่นี้ จุดประสงค์เพื่อจะทำให้แขนกลมีระบบขับเคลื่อนที่ดีขึ้น คือ ไม่มีแบคแลช (backlash) และมีความแข็งแกร่ง (Rigidity) มากขึ้น แต่ลักษณะโครงสร้างยังคงเป็นแขนกลชนิดสกาล่า (SCARA TYPE ROBOT) เหมือนเดิม ซึ่งเราได้ปรับปรุงสิ่งต่าง ๆ ดังนี้

1. เนื่องจากเดิมที่ข้อต่อ 1 มีปัญหาเนื่องจากแรงเสียดทาน บางครั้งข้อต่อกำลังเคลื่อนที่อยู่ เกิดสะดุดขึ้นมา ทำให้ต้องเปลี่ยนจากชุดเฟืองฮาร์โมนิก (Harmonic Drive) ที่มีลักษณะแยกเป็นชิ้น ๆ อยู่ มาเป็นชุดเฟืองฮาร์โมนิกที่ประกอบเป็นชิ้นเดียวซึ่งพร้อมจะใช้งานได้ทันที โดยชุดเฟืองฮาร์โมนิกตัวใหม่นี้เป็นรุ่น RFS-25-100-CC-SP ของบริษัท HARMONIC DRIVE SYSTEMS INC. ซึ่งมีอัตราทด 1:100 โดยชิ้นส่วนต่าง ๆ จะประกอบรวมเป็นชิ้นเดียวกัน ทำให้ง่ายต่อการใช้งาน

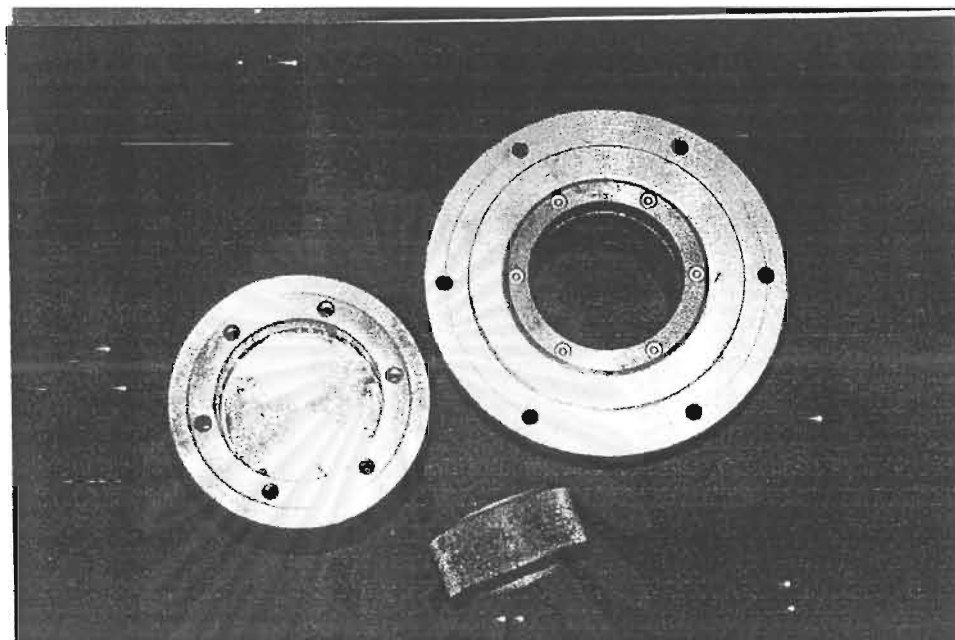


รูป ค.1 แสดงลักษณะของชุดเฟืองฮาร์โมนิกของข้อต่อที่ 1 แบบเก่า



รูป ค.2 แสดงลักษณะของชุดเฟืองฮาร์โมนิกรุ่น RFS-25-100-CC-SP

- ชุดเฟืองฮาร์โมนิกที่ข้อต่อที่ 2 มีแบคแลช ซึ่งเป็นผลเสียต่อการควบคุมแรง ดังนั้นจึงเปลี่ยนมาเป็นชุดเฟืองฮาร์โมนิกรุ่น CSF-25-100 ซึ่งมีอัตราทด 1:100 โดยชิ้นส่วนต่างๆ จะประกอบรวมเป็นชิ้นเดียวกันเช่นเดียวกับข้อต่อที่ 1 ทำให้ง่ายต่อการใช้งาน

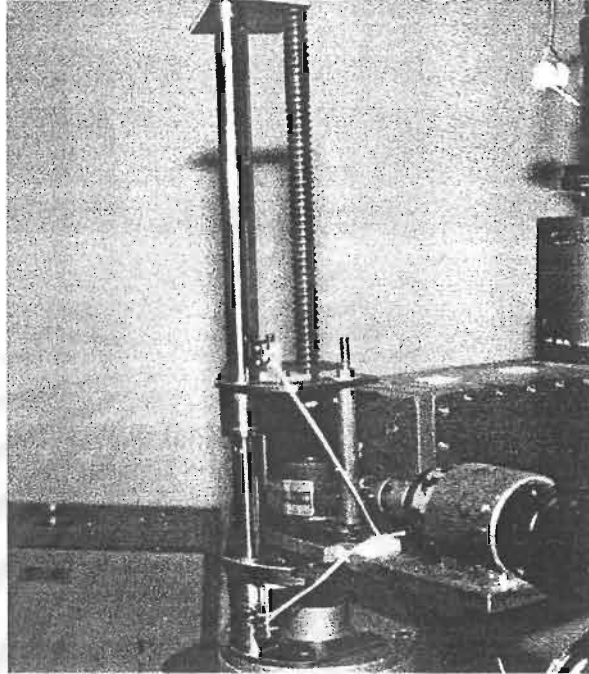


รูป ค.3 แสดงลักษณะของชุดเฟืองฮาร์โมนิกของข้อต่อ 2 แบบเก่า

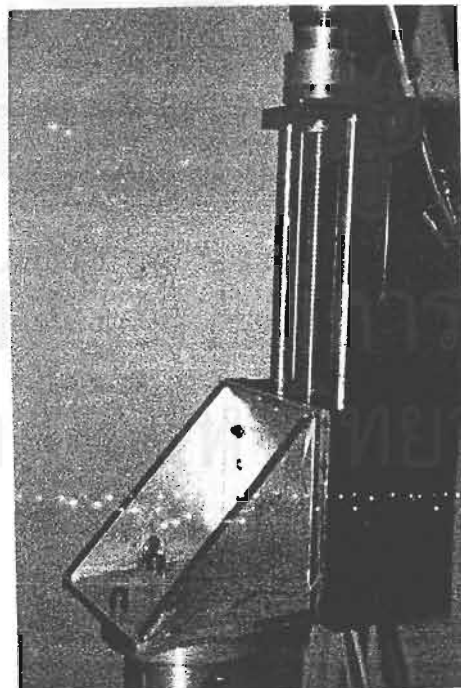


รูป ค.4 แสดงลักษณะของชุดเฟืองฮาร์โมนิกรุ่น CSF-25-100

3. เดิมข้อต่อ 3 ที่มีลักษณะเป็นข้อต่อเลื่อนไถลนั้นมีความแข็งแรงต่ำ ดังนั้นจึงปรับปรุงโดยการเปลี่ยนใหม่ทั้งหมด ให้เป็นลักษณะรางเลื่อนที่มีรางอยู่ 2 ข้าง และมีบอลสกรู (Ball Screw) อยู่ตรงกลาง ซึ่งจะทำให้ข้อต่อมีความแข็งแรงมากขึ้น

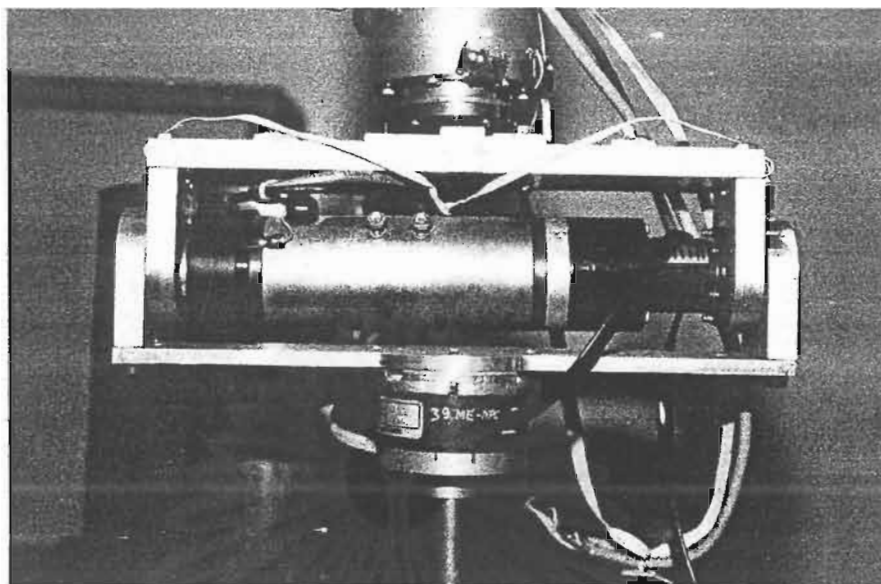


รูป ค.5 แสดงลักษณะของข้อต่อที่ 3 แบบเก่า

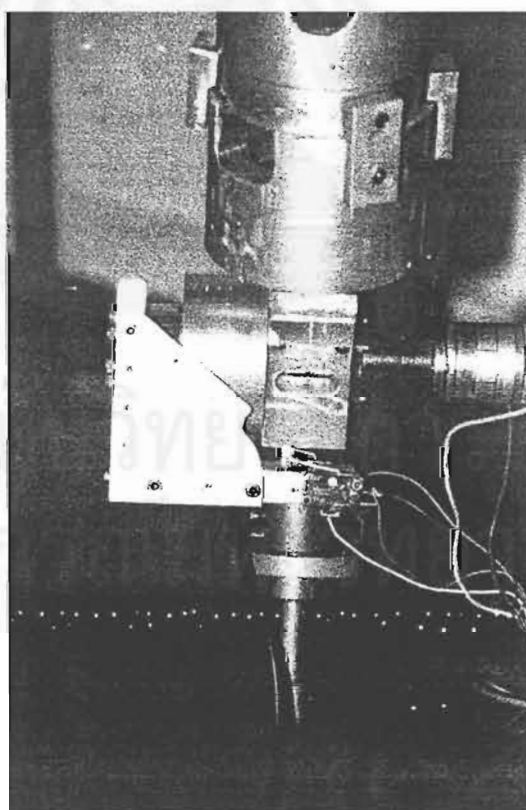


รูป ค.6 แสดงลักษณะของข้อต่อที่ 3 แบบใหม่

4. เปลี่ยนรูปแบบของข้อต่อที่ 5 ใหม่ให้มีรูปแบบกระทัดรัดขึ้น ดังรูป

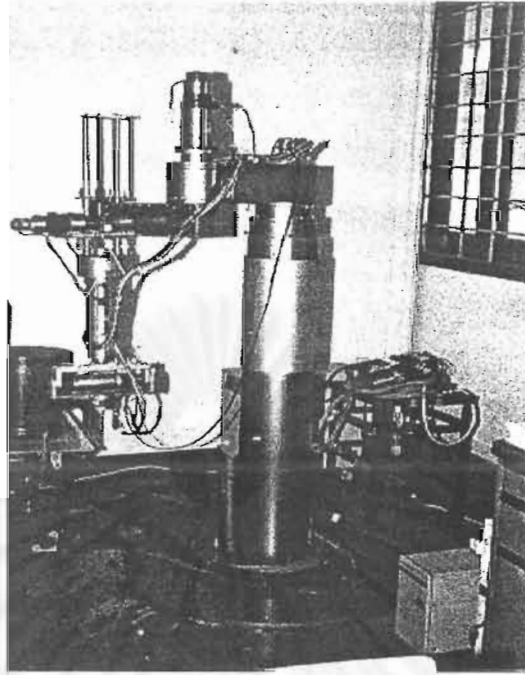


รูป ค.7 แสดงข้อต่อที่ 5 แบบเดิม

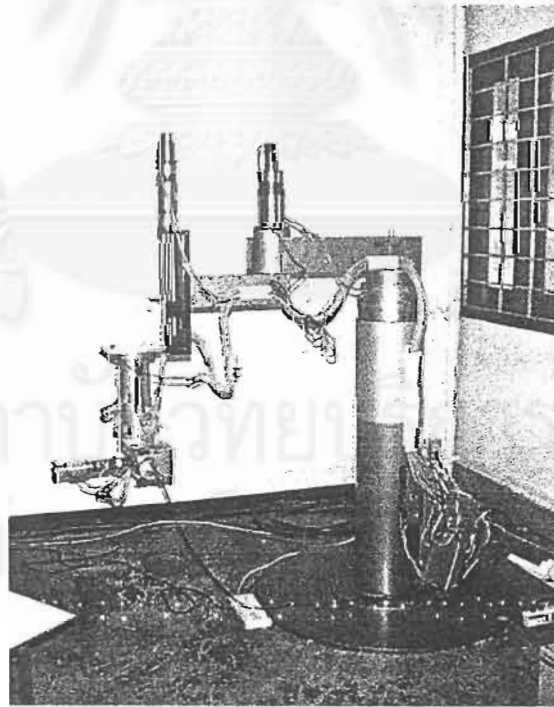


รูป ค.8 แสดงข้อต่อที่ 5 แบบใหม่

เมื่อทำการปรับปรุงแขนกลจู่พา 2 แล้วจะได้แขนกลใหม่ดังรูป ค.10



รูป ค.9 แสดงหุ่นยนต์จู่พา 2 ก่อนการปรับปรุง



รูป ค.10 แสดงหุ่นยนต์จู่พา 2 หลังการปรับปรุง



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายบวร ปัญญาวรรวัจน์ เกิดเมื่อวันที่ 17 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2518 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาชั้นปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล (วิศวกรรมควบคุมอัตโนมัติ) จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2539 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล (วิศวกรรมควบคุมอัตโนมัติ) ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2539



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย