

ขอบเขตครึ่งเล่มเหมือนแบบสเปคสำหรับช่วยการทำงานแบบแกนกลนำและแกนกลตาม

นายนวกกร คิชริยะกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์นี้ต้องถูกส่งมายังมหาวิทยาลัย
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

HAPTIC VIRTUAL FIXTURE FOR TASK ASSISTANCE IN MASTER-SLAVE OPERATION

Mr. Nawakorn Ditsariyakul

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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ขอบเขตครึ่งเสมือนแบบแฮปติกสำหรับช่วยการทำงาน

แบบแขนกลนำและแขนกลตาม

โดย

นายนवर ดิษริยะกุล

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศสิทธิ์วงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.กฤษณ์ มะลิทอง)

นวกกร ดิษริยะกุล : ขอบเขตตริงเสมือนแบบแฮปติกสำหรับช่วยการทำงานแบบแขนกลนำและแขนกลตาม. (HAPTIC VIRTUAL FIXTURE FOR TASK ASSISTANCE IN MASTER-SLAVE OPERATION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, 66 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการพัฒนากำแพงเสมือนสำหรับระบบแขนกลนำและแขนกลตามแบบมีแรงสะท้อนกลับ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการทำงานและป้องกันการออกนอกบริเวณที่กำหนด โดยกำแพงเสมือนที่นำเสนอสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มกำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้ซึ่งคำนวณระยะการเคลื่อนที่ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจากเงื่อนไขบางประการ และกลุ่มกำแพงเสมือนแบบสมการชิกมอยด์ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงจากกำแพงเสมือนและตำแหน่งของปลายแขนกลในรูปแบบสมการชิกมอยด์

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่ากำแพงเสมือนทั้ง 2 กลุ่มสามารถช่วยเพิ่มความสะดวกในการทำงานและลดระยะระหว่างตำแหน่งของปลายแขนกลและขอบเขตบริเวณห้ามเข้าถึงได้ และเมื่อทำการปรับพารามิเตอร์บางตัวสามารถป้องกันการล้ำแนวเข้าสู่บริเวณห้ามเข้าถึงได้

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2555.....

5270348521 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: MASTER-SLAVE MANIPULATOR / FORCE REFLECT / VIRTUAL FIXTURE.

NAWAKORN DITSARIYAKUL : HAPTIC VIRTUAL FIXTURE FOR TASK ASSISTANCE IN
MASTER-SLAVE OPERATION. ADVISOR : PROF. VIBOON SANGVERAPHANSIRI,
Ph.D., 66 pp.

This research work is to develop the virtual wall for a master-slave manipulator arm with force reflection. The purposes are to improve accuracy of the operation and preventing over travelling beyond a desired boundary. The virtual wall presented here can be categorized into 2 groups. The first group is consisted of the movable virtual walls where the predicted distance of the end-effector can be calculated based on various end-effector and hand models. The second group is consisted of the virtual walls that the force at the wall and the end-effector distance from the boundary are related based on the Sigmoid equation.

From the experimental results, it is shown that both virtual wall groups can be used to improve the comfortability of an operator at the haptic device or the master arm as well as reducing the distance between the boundary and the end-effector. And by adjusting some wall parameters, the over travelling through the forbidden boundary can be prevented.

Department : Mechanical Engineering Student's Signature.....

Field of Study : Mechanical Engineering Advisor's Signature.....

Academic Year : 2012.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้คอยให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆที่มีประโยชน์ในงานวิจัย รวมทั้งคอยสนับสนุนทางด้านอุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัยมาด้วยดีโดยตลอด จนกระทั่งงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยสำหรับทุนการศึกษา และขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ นิสิตปริญญาโทและปริญญาเอกทุกท่านที่ได้ให้ข้อคิดเห็นและกำลังใจตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
บทที่ 2 ขอบเขตตรึงเสมือน.....	5
2.1 กำแพงเสมือน.....	6
2.1.1 กำแพงเสมือนแบบสปริงและตัวหน่วง.....	6
2.1.2 กำแพงเสมือนแบบสปริง.....	6
2.2 กำแพงเสมือนแบบเคลื่อนที่ได้.....	7
2.2.1 การเคลื่อนที่ที่ความเร็วคงที่.....	9
2.2.2 การเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกำแพงเสมือน.....	9
2.2.3 การเคลื่อนที่ของปลายแขนกลและมือเมื่อชนกำแพงเสมือน.....	11
2.2.4 แรงที่กระทำกับปลายแขนกล.....	13
2.3 กำแพงเสมือนแบบสมการช็อกมอยด์.....	13
บทที่ 3 หุ่นยนต์แขนกลนำ.....	15
3.1 ข้อมูลทางเทคนิคของแขนกล.....	15
3.2 การเขียนโปรแกรมเชื่อมต่อแขนกลนำแฟนท่อม.....	16
บทที่ 4 แขนกลตาม.....	21
4.1 ขอบเขตพื้นที่ทำงานของแขนกล RCRT-1.....	21
4.2 ลักษณะโครงสร้างและการติดตั้งแกนบนแขนกล RCRT-1.....	23

	หน้า
4.3 จลศาสตร์ไปข้างหน้า	24
4.4 จลศาสตร์ย้อนกลับ	25
บทที่ 5 การทดลอง	27
การทดลองที่ 1: การทดสอบกำแพงเสมือนชนิดต่างๆ	27
ผลการทดลองการที่ 1	28
สรุปผลการทดลองที่ 1	29
การทดลองที่ 2: เปรียบเทียบกำแพงเสมือนแบบเคลื่อนที่ได้รูปแบบสปริง และสมการ ซิกมอยด์	29
ผลการทดลองที่ 2	32
สรุปผลการทดลองที่ 2	33
การจำลองการเคลื่อนที่ของระบบ	33
การทดลองที่ 3: การทดลองเมื่อเทียบค่าพารามิเตอร์ของกำแพงเสมือน	42
ผลการทดลองที่ 3	43
สรุปผลการทดลองที่ 3	60
การทดลองที่ 4: การทดลองหาความเร็วสำหรับการทำงานทั่วไป	60
ผลการทดลองที่ 4	61
สรุปผลการทดลองที่ 4	62
บทที่ 6 สรุปผลงานวิจัย และข้อเสนอแนะ	63
สรุปผลงานวิจัย	63
ข้อเสนอแนะ	63
รายการอ้างอิง	64
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	66

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลทางเทคนิคของแขนกลแฟนท่อม.....	16
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของเดนาวิต-ฮาร์เทนเบอร์เกอร์ของแขนกล RCRT-1	24
ตารางที่ 5.1 ค่าเริ่มต้นของการจำลองการเคลื่อนที่.....	34
ตารางที่ 5.2 ระยะเวลาเคลื่อนที่ในกรณีต่างๆ	35

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ขอบเขตเสมือนสำหรับนำทาง.....	5
รูปที่ 2.2 กำแพงเสมือน.....	5
รูปที่ 2.3 กำแพงเสมือนและแรงเนื่องจากกำแพงเสมือนแบบสปริง.....	7
รูปที่ 2.4 การล้าแนวขอบเขตของบริเวณที่ห้ามเข้าถึงของกำแพงเสมือน.....	7
รูปที่ 2.5 กำแพงเสมือนแบบเคลื่อนที่ได้และแรงเนื่องจากกำแพงเสมือนแบบเคลื่อนที่ได้ชนิดสปริง..	8
รูปที่ 2.6 การหยุดของปลายแขนกลเมื่อชนกำแพงเสมือนแบบเคลื่อนที่ได้.....	8
รูปที่ 2.7 แบบจำลองของระบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกล เมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริง.....	9
รูปที่ 2.8 แบบจำลองของระบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกล เมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริง กับตัวหน่วง.....	10
รูปที่ 2.9 แบบจำลองของระบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลและมือ เมื่อชนกำแพงเสมือนชนิด สปริง.....	11
รูปที่ 2.10 แบบจำลองของระบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลและมือ เมื่อชนกำแพงเสมือนชนิด สปริงกับตัวหน่วง.....	12
รูปที่ 2.11 แบบจำลองของปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่อิสระ.....	13
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและตำแหน่งของปลายแขนกล เมื่อแรงสูงสุดมีค่า 1 N.....	14
รูปที่ 3.1 ลักษณะของแขนกล PHANTOM® PREMIUM 1.5.....	15
รูปที่ 3.2 แผนภาพลำดับการทำงานในแต่ละรอบของแขนกลแพนทอม.....	19
รูปที่ 3.3 แผนภาพขั้นตอนการทำงานของกำแพงเสมือนแบบเคลื่อนที่ได้.....	20
รูปที่ 4.1 หุ่นยนต์แขนกลตาม RCRT-1.....	21
รูปที่ 4.2 พื้นที่ทำงานของแขนกล RCRT-1 ใน 3 มิติ.....	22
รูปที่ 4.3 ขอบเขตพื้นที่ทำงานของแขนกล RCRT-1.....	22
รูปที่ 4.4 โครงสร้างกลไกและแกนเคลื่อนที่ของแขนกล RCRT-1.....	23
รูปที่ 4.5 การส่งกำลังผ่านสายเคเบิลของข้อต่อที่ 5 และ 6 ของแขนกล RCRT-1.....	23
รูปที่ 4.6 การติดตั้งแกนลงบนโครงสร้างของแขนกล RCRT-1.....	24
รูปที่ 5.1 ทิศทางการเคลื่อนที่ของแขนกลนำ และลักษณะของกำแพงเสมือน.....	28
รูปที่ 5.2 ตำแหน่งของปลายแขนกลเมื่อใช้กำแพงเสมือนแบบต่างๆ เทียบกับตำแหน่งของพื้นที่ห้าม เข้าถึง เมื่อ $k_w = 2.0 \text{ N/MM}$	28

รูปที่ 5.3 ตำแหน่งของปลายแกนกลเมื่อใช้กำแพงเสมือนแบบต่างๆ เทียบกับตำแหน่งของพื้นที่ห้าม
 เข้าถึง เมื่อ $k_w = 4.0 \text{ N/MM}$ 29

รูปที่ 5.4 ภาพปลายแกนกลจากกล้องและเส้นทางการเคลื่อนที่ปลายแกนกลในการทดลองที่ 2 30

รูปที่ 5.5 ชุดทดลอง..... 31

รูปที่ 5.6 แผนภาพลักษณะขอบเขตของบริเวณที่ห้ามเข้าถึงของการทดลองที่ 2 31

รูปที่ 5.7 ตำแหน่งของปลายแกนกลที่เวลาต่างๆ (เส้นประ), ระยะการเคลื่อนที่สูงสุด (เครื่องหมาย
 ดาว), ระยะการเคลื่อนที่ที่เวลา 0.120 วินาที (วงกลม) เมื่อค่าคงตัวสปริงของกำแพงเสมือน
 เป็น 0.3 N/MM และค่าเริ่มต้นการเคลื่อนที่ครั้งที่ 1 36

รูปที่ 5.8 ตำแหน่งของปลายแกนกลที่เวลาต่างๆ (เส้นประ), ระยะการเคลื่อนที่สูงสุด (เครื่องหมาย
 ดาว), ระยะการเคลื่อนที่ที่เวลา 0.120 วินาที (วงกลม) เมื่อค่าคงตัวสปริงของกำแพงเสมือน
 เป็น 0.8 N/MM และค่าเริ่มต้นการเคลื่อนที่ครั้งที่ 1 37

รูปที่ 5.9 ตำแหน่งของปลายแกนกลที่เวลาต่างๆ (เส้นประ), ระยะการเคลื่อนที่สูงสุด (เครื่องหมาย
 ดาว), ระยะการเคลื่อนที่ที่เวลา 0.120 วินาที (วงกลม) เมื่อค่าคงตัวสปริงของกำแพงเสมือน
 เป็น 0.3 N/MM และค่าเริ่มต้นการเคลื่อนที่ครั้งที่ 2 38

รูปที่ 5.10 ตำแหน่งของปลายแกนกลที่เวลาต่างๆ (เส้นประ), ระยะการเคลื่อนที่สูงสุด (เครื่องหมาย
 ดาว), ระยะการเคลื่อนที่ที่เวลา 0.120 วินาที (วงกลม) เมื่อค่าคงตัวสปริงของกำแพงเสมือน
 เป็น 0.8 N/MM และค่าเริ่มต้นการเคลื่อนที่ครั้งที่ 2 39

รูปที่ 5.11 ตำแหน่งของปลายแกนกลที่เวลาต่างๆ (เส้นประ), ระยะการเคลื่อนที่สูงสุด (เครื่องหมาย
 ดาว), ระยะการเคลื่อนที่ที่เวลา 0.120 วินาที (วงกลม) เมื่อค่าคงตัวสปริงของกำแพงเสมือน
 เป็น 0.3 N/MM และค่าเริ่มต้นการเคลื่อนที่ครั้งที่ 3 40

รูปที่ 5.12 ตำแหน่งของปลายแกนกลที่เวลาต่างๆ (เส้นประ), ระยะการเคลื่อนที่สูงสุด (เครื่องหมาย
 ดาว), ระยะการเคลื่อนที่ที่เวลา 0.120 วินาที (วงกลม) เมื่อค่าคงตัวสปริงของกำแพงเสมือน
 เป็น 0.8 N/MM และค่าเริ่มต้นการเคลื่อนที่ครั้งที่ 3 41

รูปที่ 5.13 ภาพปลายแกนกลจากกล้องและเส้นทางการเคลื่อนที่ปลายแกนกลในการทดลองที่ 3 ... 42

รูปที่ 5.14 แผนภาพลักษณะขอบเขตของบริเวณที่ห้ามเข้าถึงของการทดลองที่ 3 43

รูปที่ 5.15 ตำแหน่งของปลายแกนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 1 เมื่อค่าคงตัวสปริง 0.3 N/MM 44

รูปที่ 5.16 ตำแหน่งของปลายแกนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 1 เมื่อค่าคงตัวสปริง 0.4 N/MM 45

รูปที่ 5.17 ตำแหน่งของปลายแกนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 1 เมื่อค่าคงตัวสปริง 0.5 N/MM 45

รูปที่ 5.18 ตำแหน่งของปลายแกนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 1 เมื่อค่าคงตัวสปริง 0.6 N/MM 46

รูปที่ 5.19 ตำแหน่งของปลายแกนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 1 เมื่อค่าคงตัวสปริง 0.7 N/MM 46

รูปที่ 5.20 ตำแหน่งของปลายแกนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 1 เมื่อ $A = 1.5$ และ $\gamma = 9$ 47

รูปที่ 5.21 ตำแหน่งของปลายแกนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 1 เมื่อ $A = 2$ และ $\gamma = 9$ 48

รูปที่ 5.22 ตำแหน่งของปลายแกนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 1 เมื่อ $A = 3$ และ $\gamma = 9$ 48

รูปที่ 5.23 ตำแหน่งของปลายแกนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 2 เมื่อค่าคงตัวสปริง 0.3 N/MM 50

รูปที่ 5.24 ตำแหน่งของปลายแกนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 2 เมื่อค่าคงตัวสปริง 0.4 N/MM 50

รูปที่ 5.25 ตำแหน่งของปลายแกนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 2 เมื่อค่าคงตัวสปริง 0.5 N/MM 51

รูปที่ 5.26 ตำแหน่งของปลายแกนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 2 เมื่อค่าคงตัวสปริง 0.6 N/MM 51

รูปที่ 5.27 ตำแหน่งของปลายแกนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 2 เมื่อค่าคงตัวสปริง 0.7 N/MM 52

รูปที่ 5.28 ตำแหน่งของปลายแกนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 2 เมื่อ $A = 1.5$ และ $\gamma = 9$ 53

รูปที่ 5.29 ตำแหน่งของปลายแกนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 2 เมื่อ $A = 2$ และ $\gamma = 9$ 53

รูปที่ 5.30 ตำแหน่งของปลายแกนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 2 เมื่อ $A = 3$ และ $\gamma = 9$ 54

รูปที่ 5.31 ตำแหน่งของปลายแกนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 3 เมื่อค่าคงตัวสปริง 0.3 N/MM 55

รูปที่ 5.32 ตำแหน่งของปลายแกนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 3 เมื่อค่าคงตัวสปริง 0.4 N/MM 56

รูปที่ 5.33 ตำแหน่งของปลายแกนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 3 เมื่อค่าคงตัวสปริง 0.5 N/MM 56

รูปที่ 5.34 ตำแหน่งของปลายแกนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 3 เมื่อค่าคงตัวสปริง 0.6 N/MM 57

รูปที่ 5.35 ตำแหน่งของปลายแกนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 3 เมื่อค่าคงตัวสปริง 0.7 N/MM 57

รูปที่ 5.36 ตำแหน่งของปลายแกนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 3 เมื่อ $A = 1.5$ และ $\gamma = 9$ 58

รูปที่ 5.37 ตำแหน่งของปลายแกนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 3 เมื่อ $A = 2$ และ $\gamma = 9$ 59

รูปที่ 5.38 ตำแหน่งของปลายแกนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 3 เมื่อ $A = 3$ และ $\gamma = 9$ 59

รูปที่ 5.39 ลักษณะปลายลวดและรูเข็มก่อนเริ่มการทดลอง 60

รูปที่ 5.40 ลักษณะปลายลวดและรูเข็มเมื่อเสร็จสิ้นการทดลอง 61

รูปที่ 5.41 ความเร็วของแกนกลแฟนท่อมที่แปลงเทียบให้อยู่แกนเดียวกับแกนกลตามครั้งที่ 1 61

รูปที่ 5.42 ความเร็วของแกนกลแฟนท่อมที่แปลงเทียบให้อยู่แกนเดียวกับแกนกลตามครั้งที่ 2 62

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

กำแพงเสมือนเป็นการสร้างกฎการควบคุมที่เชื่อมโยงการทำงานร่วมกันระหว่างคนและเครื่องจักร มีการใช้งานและวิจัยอย่างกว้างขวาง เช่น ในระบบอุตสาหกรรมการผลิตมีการใช้กำแพงเสมือนเพื่อช่วยกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ให้อยู่ในขอบเขต ในทางการแพทย์มีการวิจัยเพื่อใช้กำแพงเสมือนช่วยกำหนดระยะสำหรับการขุดดินเพื่อเก็บกู้วัตถุระเบิด [1] การกำหนดขอบเขตพื้นที่ห้ามเข้าถึงสำหรับหุ่นยนต์ชนิดเคลื่อนที่ได้ (Mobile Robot) การใช้กำแพงเสมือนในการช่วยฝึกการเขียนหนังสือด้วยมือข้างที่ไม่ถนัด [2] และสำหรับระบบแขนกลนำและแขนกลตามที่มีการสะท้อนกลับของแรง กำแพงเสมือนสามารถทำให้ผู้ควบคุมที่ด้านแขนกลนำ (Master arm) ทราบได้ว่าผู้ควบคุมกำลังนำปลายแขนหุ่นยนต์ออกนอกบริเวณที่กำหนดหรือไม่ผ่านแรงสะท้อนที่สร้างขึ้นด้านแขนกลนำ

ในการทำงานหลายอย่างข้างต้น สิ่งหนึ่งที่เป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการทำงาน คือ ความแม่นยำในการทำงาน หรือการควบคุมตำแหน่งปลายของแขนกล เนื่องจากหากการทำงานมีความผิดพลาด หรือไม่อาจจะควบคุมให้ปลายแขนหุ่นยนต์อยู่ในบริเวณที่จำกัด มีการล้ำเข้าไปยังบริเวณที่ไม่ต้องการอาจทำให้ความเสียหาย เช่น เกิดความผิดพลาดในการปฏิบัติงาน เกิดอันตรายต่อผู้ที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง หรือเกิดความเสียหายต่อตัวแขนกลเองได้ จึงได้มีการนำสิ่งที่เรียกว่า ขอบเขตตรึงเสมือน (Virtual Fixture) หรือ กำแพงเสมือน (Virtual Wall) ซึ่งเป็นสร้างกฎการควบคุมที่ตัวเชื่อมโยงการทำงานร่วมกันระหว่างคนและเครื่องจักร เข้ามาใช้งานในการช่วยกำหนดขอบเขตที่ปลายแขนหุ่นยนต์ที่สามารถเข้าถึงได้ โดยกำแพงเสมือนนี้จะบอกให้ผู้ควบคุมที่ด้านแขนกลนำ (Master arm) รู้ว่าผู้ควบคุมกำลังนำปลายแขนหุ่นยนต์ออกนอกบริเวณที่จำกัดผ่านแรงสะท้อน (force reflection) ที่สร้างขึ้นที่ด้านแขนกลนำ (Master arm) การสร้างกำแพงเสมือนนี้สามารถสร้างได้ทั้งที่ด้านแขนกลนำหรือด้านแขนกลตาม (Slave arm)

โดยที่ระบบส่วนใหญ่จะทำงานเมื่อแขนกลมีการเคลื่อนที่ผ่านแนวที่กำหนดแล้วสร้างแรงต้านการเคลื่อนที่ บ่อยครั้งเราจะพบว่าในการทำงานจริงปลายแขนกลหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่เกินเข้าไปในบริเวณที่เรากำหนดขอบเขต ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาและวิจัยเพื่อปรับปรุงให้ระบบของกำแพงเสมือนทำงานก่อนถึงบริเวณที่ห้ามเข้าถึงในการทำงาน (Forbidden region) คือ มีการคาดการณ์ล่วงหน้าด้วยเงื่อนไขบางอย่างเพื่อหาตำแหน่งของแขนกลถ้าคาดว่าจะเคลื่อนที่เกินขอบเขตระบบจะทำงาน ทำให้เราสามารถรับรู้ได้ถึงขอบเขต และระมัดระวังในการเคลื่อนที่มากยิ่งขึ้น [3]

สำหรับระบบสภาพแวดล้อมเสมือนจริง (Virtual Environment) จะเน้นรูปแบบที่สร้างแรงต้านเมื่อผ่านแนวอ้างอิงเพื่อรักษาความเสมือนจริงของสภาพแวดล้อมเอาไว้ ทว่าในการทำงานในสภาวะที่มีพื้นที่จำกัดนั้น สิ่งสำคัญคือการป้องกันการล้ำแนวที่ต้องการออกไปเป็นหลัก

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

ศึกษาการสร้างขอบเขตจริงเสมือน (Virtual Fixture) หรือ กำแพงเสมือน (Virtual wall) ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของแขนหุ่นยนต์ที่ทำงานแบบแขนกลนำและแขนกลตามแบบมีแรงสะท้อนกลับ (Master-Slave with force reflection) เพื่อเพิ่มความสามารถในการสร้างแรงสะท้อนที่ช่วยลดการเคลื่อนที่ของปลายแขนหุ่นยนต์ข้ามบริเวณที่จำกัด

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1) แขนกลสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องในขอบเขตของ Virtual Fixture
- 2) ช่วยลดการเคลื่อนที่ของปลายแขนหุ่นยนต์ผ่านกำแพงเสมือน โดยเปรียบเทียบระหว่างกำแพงเสมือนที่ทำงานในลักษณะอ้อมมันต์ (Passive) ที่พัฒนาขึ้นก่อนหน้านี้โดยห้องปฏิบัติการวิจัยกับกำแพงเสมือนที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์

- 1) ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวกับการควบคุมการทำงานของแขนกลนำและแขนกลตามแบบมีแรงสะท้อนกลับ (Master-Slave with force reflection)
- 2) ศึกษาการสร้างกำแพงเสมือนที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบแขนกลนำและแขนกลตามแบบมีแรงสะท้อน
- 3) ศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างขอบเขตจริงเสมือนหรือกำแพงเสมือนแบบแอปติกที่สามารถลดการเคลื่อนที่ของปลายแขนหุ่นยนต์ข้ามกำแพงเสมือน เช่น การใช้ข้อมูลความเร็วของการเคลื่อนที่ปลายแขนหุ่นยนต์เพื่อมาเป็นตัวพารามิเตอร์หนึ่งสำหรับการสร้างกำแพงเสมือน เป็นต้น
- 4) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของขอบเขตจริงเสมือนแบบแอปติกที่พัฒนาขึ้น และจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์
- 5) ทดสอบการทำงานกับแขนกล 6 องศาอิสระสำหรับงานขนาดเล็ก (RCRT-1) ที่พัฒนาขึ้นที่ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบผลิตขั้นสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้อุปกรณ์แอปติก (Haptic) ที่สามารถสร้างแรงสะท้อนเพื่อให้ผู้ควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์มีความรับรู้ถึงขนาดของแรงกระทำระหว่างปลายแขนหุ่นยนต์ของแขนกลตามที่ทำกับสภาพแวดล้อม
- 6) วิเคราะห์ แก้ไข และสรุปผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) กำแพงเสมือนแบบแฮบติกแบบใหม่ที่สร้างขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการควบคุมการทำงานของระบบแขนกลนำและแขนกลตามแบบมีแรงสะท้อนกลับ (Master-Slave with force reflection) กับการทำงานที่มีขนาดเล็ก (Miniature task)
- 2) ใช้เป็นพื้นฐานในการพัฒนาระบบควบคุมขั้นสูงสำหรับการทำงานร่วมกันระบบมนุษย์และเครื่องจักรต่อไป

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Louis B. Rosenberg, and Bernard D. Adelstein [4] ได้ทดสอบการรับรู้ถึงผิวของกำแพงเสมือนและประเมินว่ารูปแบบใดคล้ายกำแพงจริงมากที่สุด โดยแบ่งคุณสมบัติที่สนใจออกเป็น 3 ประเภท คือ ความแข็ง การปะทะกับกำแพง การฟื้นจากกำแพง โดยแยกทดสอบกำแพงเสมือนออกเป็น กำแพงสปริงที่ค่าคงตัวสปริง กำแพงตัวหน่วงแบบค่าคงที่ความหน่วงเชิงเส้นและค่าคงที่ความหน่วงเฉพาะทิศทางเข้าหากำแพง ซึ่งการรู้สึกถึงการปะทะกับกำแพงที่ชัด คือ กลุ่มกำแพงตัวหน่วงทั้ง 2 แบบ สำหรับความแข็งของกำแพงผู้ทดลองชอบกำแพงสปริงมากกว่า สำหรับการฟื้นจากกำแพง ผู้ทดลองชอบกำแพงสปริง และกำแพงตัวหน่วงเฉพาะทิศทางเข้า เนื่องจากเมื่อเคลื่อนที่ออกจากกำแพงตัวหน่วงจะเกิดการหน่วงซึ่งขัดกับความรู้สึกของกำแพงจริง ผลสรุปโดยรวมผู้ทดลองพอใจกำแพงแบบสปริงมากที่สุด

P. Marayong, G. D. Hager และ A. M. Okamura [3] ได้มีการหาค่าพลศาสตร์ของมือ คือ ค่าคงตัวสปริงของมือ และค่าคงที่ความหน่วงของมือ โดยเสนอการกำหนดระยะเพื่อระหว่างกำแพงเสมือนและขอบเขตห้ามเข้าถึงจากการนำพลศาสตร์ของมือและความหยุ่นตัวของแขนกลมา คาดการณ์ระยะทางเคลื่อนที่สูงสุดเพื่อป้องกันการเข้าถึงบริเวณห้ามเข้าถึง

P. Marayong, Hye Sun Na, and A. M. Okamura [5] เสนอการกำหนดระยะเพื่อระหว่างกำแพงเสมือนและขอบเขตห้ามเข้าถึงโดยนำแรงที่กระทำกับแขนกลและความหยุ่นตัวของแขนกลมา คาดการณ์การเคลื่อนที่สูงสุดที่เป็นไปได้

Jing Ren, et al. [6] ได้ทดสอบการควบคุมปลายแขนกลให้ไปถึงระยะที่ต้องการ โดยเปรียบเทียบระหว่างการมี และไม่มี การป้อนกลับของแรงจากสิ่งติดตริงเสมือนที่ระยะลึกที่ต้องการ ด้วยสมการชิมมอยด์ การทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้สิ่งติดตริงเสมือนด้วยขนาดของแรงที่เหมาะสม ทำให้ผู้ทดลองสามารถเคลื่อนที่ไปใกล้ตำแหน่งที่ต้องการได้ดีขึ้น

Angelo Basteris, Lino Bracco และ Vittorio Sanguineti [2] ทดสอบการใช้แขนกลช่วยในการถ่ายทอดการเขียนตัวหนังสือด้วยมือข้างที่ไม่ถนัด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้แรงในรูปแบบสปริงและตัวหน่วงสามารถช่วยในการลดเวลาการถ่ายโอนได้ และหากต้องการถ่ายทอดการทำซ้ำ การ

กำหนดตำแหน่งอ้างอิงเป็นเส้นทางการเคลื่อนที่ (Trajectory guidance) ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการทำงานที่มีรูปแบบแล้วได้ดี และการฝึกฝนสามารถช่วยลดเวลาในการทำงานลงได้

Stuart Booth, Franco De Angelis, and Thore Schimidt-Tjarksen [7] ได้ทดสอบการจำลองแรงด้วยแขนกล Phantom Premium 1.5 และเสนอว่าเพื่อสร้างแรงตอบสนองควรใช้รอบการทำงานขั้นต่ำอยู่ในช่วง 550 – 600 Hz โดยไม่ขึ้นกับค่าคงตัวสปริงระหว่าง 0.2 – 1.2 N/mm

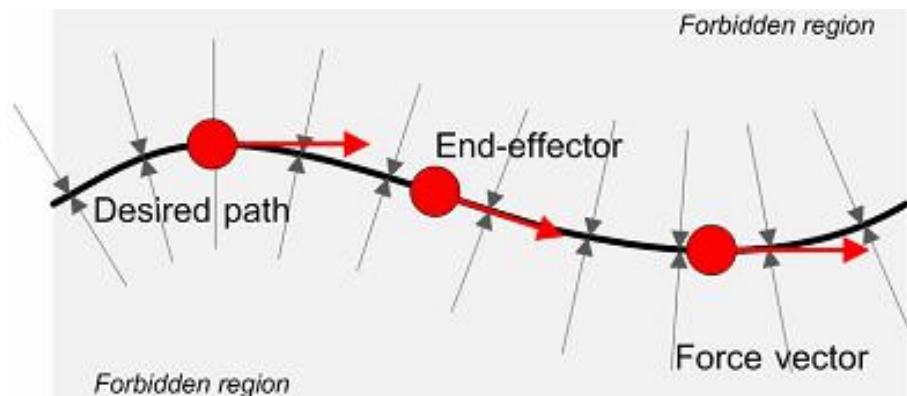
Michele Scandola, Marco Vicentini และ Paolo Fiorini (2011) [8] ได้ทดสอบผลของการเปลี่ยนอัตราการทำงานของอุปกรณ์แฮปติกและการเปลี่ยนค่าคงตัวสปริงของกำแพงเสมือนพบว่าเมื่อเทียบกับอัตราการทำงานที่ 250 Hz การใช้อัตราการทำงานของอุปกรณ์ที่ 500 และ 1000 Hz ช่วยเพิ่มความไวต่อแรงได้อย่างชัดเจน

บทที่ 2

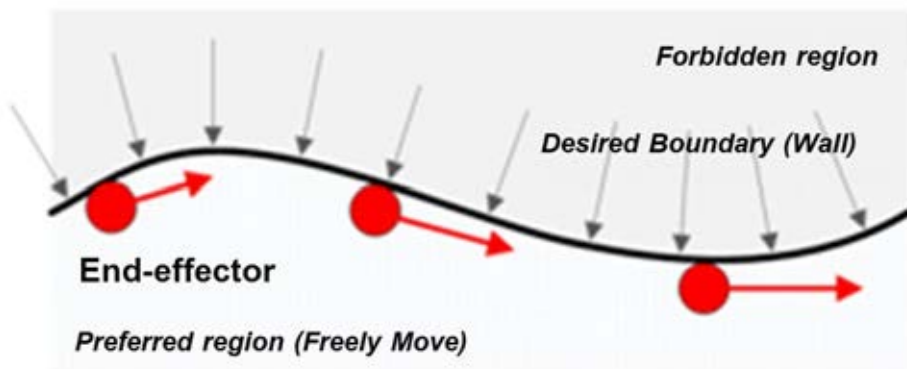
ขอบเขตตรึงเสมือน

ขอบเขตตรึงเสมือนเป็นการกำหนดข้อจำกัดในการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลด้วยซอฟต์แวร์ การจำกัดการเคลื่อนที่ที่ข้ามขอบเขตของบริเวณที่ห้ามเข้าถึง (Forbidden Region Boundary) สามารถทำได้โดยการสร้างแรงสะท้อนกลับไปที่แขนกลที่ฝั่งผู้ควบคุม (แขนกลนำ) และสามารถแบ่งขอบเขตตรึงเสมือนได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ขอบเขตเสมือนสำหรับนำทาง (Guidance Virtual Fixture) และกำแพงเสมือน (Virtual Wall)

โดยขอบเขตเสมือนสำหรับนำทางเป็นการกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายแขนกล โดยผู้ใช้สามารถเคลื่อนปลายแขนกลตามเส้นทางได้อย่างอิสระ แต่เมื่อมีการเคลื่อนที่ออกนอกบริเวณ จะเกิดแรงสะท้อนกลับเพื่อรักษาเส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลดังรูปที่ 2.1 ขณะที่กำแพงเสมือนเป็นการกำหนดเขตพื้นที่ที่ห้ามเข้าถึงโดยทำตัวคล้ายกับกำแพงกั้นไม่ให้ปลายแขนกลเคลื่อนที่ออกนอกบริเวณดังรูปที่ 2.2 โดยในงานวิจัยนี้สนใจเฉพาะกำแพงเสมือน



รูปที่ 2.1 ขอบเขตเสมือนสำหรับนำทาง [9]



รูปที่ 2.2 กำแพงเสมือน [9]

2.1 กำแพงเสมือน

โดยทั่วไปกำแพงเสมือนจะกำหนดตำแหน่งของกำแพงเสมือนขอบเขตครึ่งเสมือนอยู่ตำแหน่งเดียวกับขอบเขตของบริเวณที่ห้ามเข้าถึง

2.1.1 กำแพงเสมือนแบบสปริงและตัวหน่วง

เมื่อกำหนดให้แรงที่เกิดจากกำแพงเสมือนอยู่ในรูปแบบของสปริงและตัวหน่วง [2], [9] สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงของกำแพงเสมือนได้ดังสมการที่ (2.1)

$$F = \begin{cases} 0 & ; x_t \leq x_w \\ -k_w \Delta x_t - b_w \dot{x}_t & ; x_t > x_w \end{cases} \quad (2.1)$$

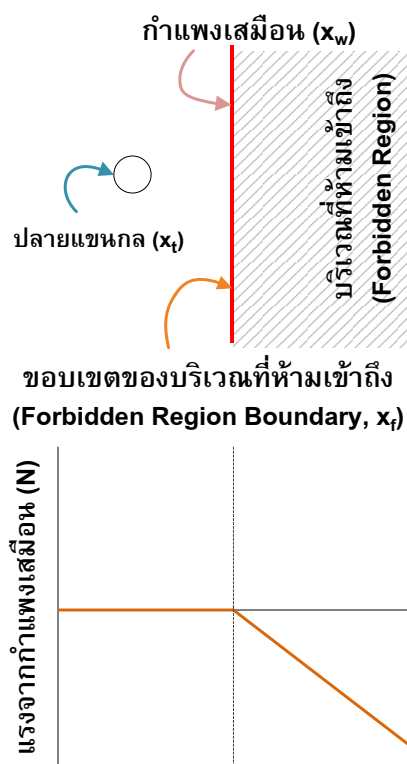
$$\Delta x_t = x_t - x_w \quad (2.2)$$

โดย F = แรงจากกำแพงเสมือน
 k_w = ค่าคงตัวสปริงของกำแพงเสมือน
 b_w = ค่าคงที่ความหน่วงของกำแพงเสมือน
 x_w = ตำแหน่งของกำแพงเสมือน
 x_t = ตำแหน่งของปลายแขนกล
 \dot{x}_t = ความเร็วของปลายแขนกลในขณะนั้น

2.1.2 กำแพงเสมือนแบบสปริง

เป็นรูปแบบย่อยของกำแพงเสมือนแบบสปริงและตัวหน่วง โดยกำหนดให้ $b_w = 0$ [10], [11] และเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการ (2.3) และแสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของปลายแขนกลและแรงที่เกิดขึ้นได้ดังรูปที่ 2.3

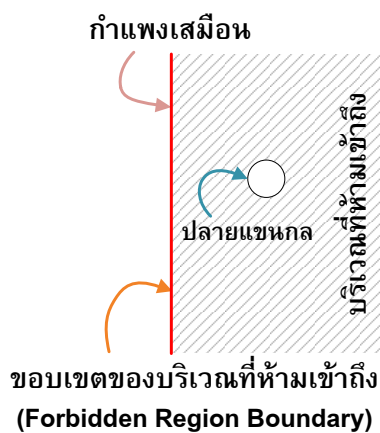
$$F = \begin{cases} 0 & ; x_t \leq x_w \\ -k_w \Delta x_t & ; x_t > x_w \end{cases} \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.3 กำแพงเสมือนและแรงเนื่องจากกำแพงเสมือนแบบสปริง

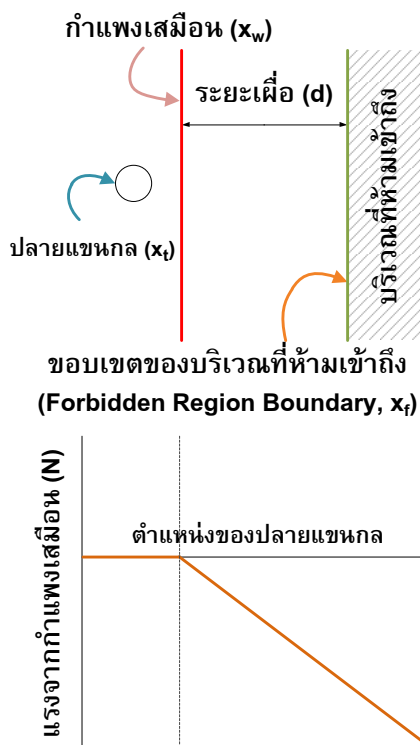
2.2 กำแพงเสมือนแบบเคลื่อนที่ได้

จากเงื่อนไขของสมการที่ (2.1), (2.3) และรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นว่าปลายแขนกลต้องเกิดการล้าแนวของขอบเขตบริเวณที่ห้ามเข้าถึงไปแล้วจึงมีการสร้างแรงสะท้อนกลับขึ้น ดังนั้นผู้ควบคุมจะรู้สึกถึงกำแพงและหยุดการเคลื่อนที่เมื่อเกิดการล้าแนวแล้วดังรูปที่ 2.4 และสำหรับงานบางประเภท เช่น งานผ่าตัดนั้นไม่ต้องการให้เกิดการล้าแนวขึ้นเนื่องจากบริเวณที่ห้ามเข้าถึงอาจเป็นเนื้อเยื่อซึ่งอาจทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ป่วยได้

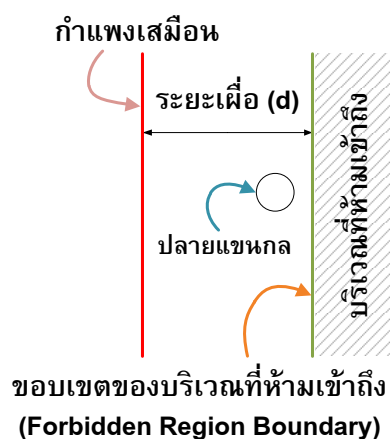


รูปที่ 2.4 การล้าแนวขอบเขตของบริเวณที่ห้ามเข้าถึงของกำแพงเสมือน

วิธีแก้ไขอันหนึ่งคือกำพวงเสมือนแบบเคลื่อนที่ได้ซึ่งปรับตำแหน่งของกำพวงเสมือนให้อยู่ห่างจากขอบเขตของบริเวณที่ห้ามเข้าถึงด้วยระยะเผื่อ (Safety margin, d) ดังรูปที่ 2.5 เพื่อให้ปลายแขนกลหยุดการเคลื่อนที่และไม่ล้ำแนวเข้าสู่บริเวณที่ห้ามเข้าถึงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 กำพวงเสมือนแบบเคลื่อนที่ได้และแรงเนื่องจากกำพวงเสมือนแบบเคลื่อนที่ได้ชนิดสปริง



รูปที่ 2.6 การหยุดของปลายแขนกลเมื่อชนกำพวงเสมือนแบบเคลื่อนที่ได้

ตำแหน่งของกำพวงเสมือนจะกำหนดตามเงื่อนไขในสมการ (2.4)

$$x_w = \begin{cases} x_t & ; x_t + x_{t,pre} > x_f \\ x_f & ; x_t + x_{t,pre} \leq x_f \end{cases} \quad (2.4)$$

$$d = x_f - x_w \quad (2.5)$$

โดย x_j = แนวขอบเขตของสิ่งติดตริงเสมือน

d = ระยะเพื่อสำหรับกำแพงเสมือน

$x_{t,pre}$ = ระยะการเคลื่อนที่ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจากการกำหนดรูปแบบการเคลื่อนที่และเงื่อนไขบางประการ

การหาระยะการเคลื่อนที่ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นแบ่งออกเป็น 3 วิธีหลัก [5] คือ การเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ การเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกำแพงเสมือน และการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลและมือเมื่อชนกำแพงเสมือน

2.2.1 การเคลื่อนที่ที่ความเร็วคงที่

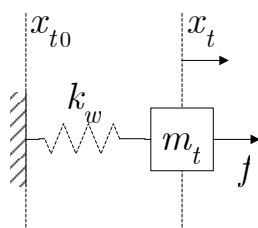
คาดการณ์ระยะเพื่อจากระยะการเคลื่อนที่ที่คาดว่าจะเกิดขึ้น เมื่อสมมติให้ผู้ควบคุมเคลื่อนที่ด้วยความเร็วในขณะนั้นแบบคงที่ ดังนั้นระยะการเคลื่อนที่จะมีค่าดังสมการที่ (2.6)

$$x_{t,pre} = \dot{x}_t \Delta t \quad (2.6)$$

โดย Δt = เวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อการกระตุ้นผ่านการสัมผัสมีค่า 0.12 วินาที [12]

2.2.2 การเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกำแพงเสมือน

เงื่อนไขในการคาดการณ์ระยะการเคลื่อนที่ คือ สมมติให้มีแรงกระทำคงที่และเกิดการชนกับกำแพงเสมือนตามลักษณะของกำแพงเสมือนที่กำหนด คือกำแพงเสมือนแบบสปริง และกำแพงเสมือนแบบสปริงกับตัวหน่วงดังแบบจำลองของระบบในรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8 ตามลำดับ



รูปที่ 2.7 แบบจำลองของระบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริง

สมการของระบบในรูปที่ 2.7 เขียนได้ดังสมการที่ (2.7) และสามารถคำนวณหาระยะการเคลื่อนที่สูงสุดได้ดังสมการที่ (2.8) เมื่อ t_{max} เป็นเวลาที่เกิดการเคลื่อนที่สูงสุด

$$m_t \ddot{x}_t + k_w x_t = f \quad (2.7)$$

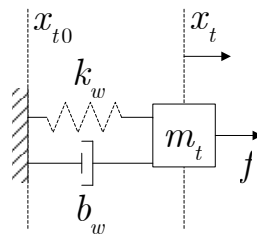
$$x_{t,pre} = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \sin \omega t_{max} + \psi + \frac{f}{k_w} \quad (2.8)$$

โดย $\omega = \sqrt{\frac{k_w}{m_t}}$

$$\alpha = \sqrt{\frac{m_t}{k_w}} \dot{x}_{t0}$$

$$\beta = x_{t0} - \frac{f}{k_w}$$

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)$$



รูปที่ 2.8 แบบจำลองของระบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกล
เมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริงกับตัวหน่วง

สามารถเขียนสมการของระบบในรูปที่ 2.8 ได้ดังสมการ (2.9) และสามารถคำนวณหาระยะการเคลื่อนที่สูงสุดได้ดังสมการ (2.10) เมื่อ t_{\max} เป็นเวลาที่เกิดการเคลื่อนที่สูงสุด

$$m_t \ddot{x}_t + b_w \dot{x}_t + k_w x_t = f \quad (2.9)$$

$$x_{t,pre} = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} e^{-\frac{b_w}{2m_t} t_{\max}} \sin \omega t_{\max} + \psi + \frac{f}{k_w} \quad (2.10)$$

โดย
$$\omega = \frac{\sqrt{4m_t k_w - b_w^2}}{2m_t}$$

$$\alpha = \frac{2\dot{x}_{t0} m_t + b_w \beta}{\sqrt{4m_t k_w - b_w^2}}$$

$$\beta = \frac{k_w x_{t0} - f}{k_w}$$

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)$$

โดย m_t = มวลของปลายแขนกล

k_w = ค่าคงตัวสปริงของกำแพงเสมือน

b_w = ค่าคงที่ความหน่วงของกำแพงเสมือน

f = แรงที่กระทำกับระบบ

x_t = ตำแหน่งของปลายแขนกล โดยในทุกเวลาสุ่ม (Sampling Time) กำหนดให้ $x_{t_0} = 0$ สำหรับการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกำแพงเสมือนที่เวลา 0.120 s คือ การหาระยะการเคลื่อนที่โดยแทนค่า t_{\max} ในสมการที่ (2.8) และ (2.10) ด้วย 0.120 s ซึ่งเป็นเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อการกระตุ้นผ่านการสัมผัส [12]

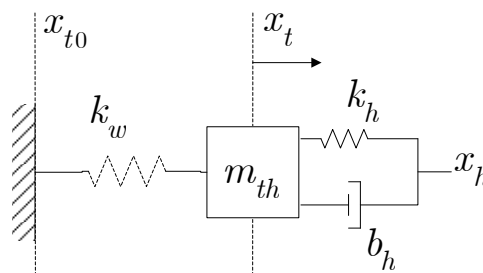
2.2.3 การเคลื่อนที่ของปลายแขนกลและมือเมื่อชนกำแพงเสมือน

ข้อแตกต่างระหว่างวิธีนี้และวิธีการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกำแพงเสมือน คือ การนำพลศาสตร์ของมือ ได้แก่ มวลของมือ ค่าคงตัวสปริงของมือ และค่าคงที่ความหน่วงของมือมารวมในระบบด้วย เมื่อพิจารณาาระบบตามลักษณะของกำแพงเสมือนที่กำหนด คือ กำแพงเสมือนแบบสปริง และกำแพงเสมือนแบบสปริงกับตัวหน่วงสามารถเขียนแบบจำลองระบบได้ดังรูปที่ 2.9 และรูปที่ 2.10 ตามลำดับ

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ว่า ในการเคลื่อนที่ของมือแรงที่แขนกระทำเป็นส่วน โดยตรงกับค่าคงตัวของแขน และส่วนต่างของตำแหน่งสมมูลเสมือนกับตำแหน่งจริงของแขน [5] ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการ (2.11)

$$f = k_h x_h - x_{actual} \quad (2.11)$$

จากสมการ (2.9) เมื่อกำหนดให้แรงที่กระทำต่อปลายแขนกลมีขนาดคงที่ และมือกับปลายแขนกลเคลื่อนที่ไปด้วยกันจะได้ว่า $x_{actual} = x_t$ และสมมติให้พารามิเตอร์ของมือขณะนั้นมีค่าคงที่ ดังนั้น $x_h = \frac{f}{k_h} + x_{t_0}$ และ \dot{x}_h มีค่าเป็น 0



รูปที่ 2.9 แบบจำลองของระบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลและมือเมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริง

สมการของระบบในรูปที่ 2.9 เขียนได้ดังสมการ (2.12) และสามารถคำนวณหาระยะการเคลื่อนที่สูงสุดได้ดังสมการ (2.13) เมื่อ t_{\max} เป็นเวลาที่เกิดการเคลื่อนที่สูงสุด

$$m_{th}\ddot{x}_t + b_h\dot{x}_t + k_w x_t = k_h x_h + b_h \dot{x}_h \quad (2.12)$$

$$x_{t,pre} = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} e^{-\frac{b_h}{2m_{th}} t_{\max}} \sin \omega t_{\max} + \psi + \gamma \quad (2.13)$$

โดย

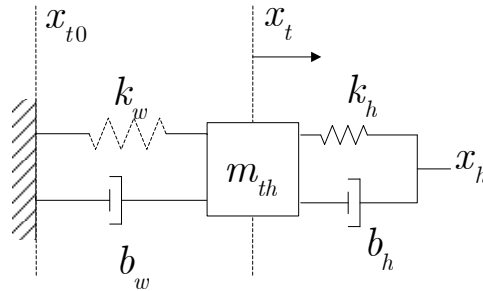
$$\omega = \frac{\sqrt{4m_{th}k_{wh} - b_h^2}}{2m_{th}}$$

$$\alpha = \frac{2\dot{x}_{t0}m_{th} + b_h\beta}{\sqrt{4m_{th}k_{wh} - b_h^2}}$$

$$\beta = \frac{k_w x_{t0} - f}{k_{wh}}$$

$$\psi = \tan^{-1}\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)$$

$$\gamma = \frac{k_h x_{t0} + f}{k_{wh}}$$



รูปที่ 2.10 แบบจำลองของระบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลและมือ
เมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริงกับตัวหน่วง

สมการของระบบในรูปที่ 2.10 เขียนได้ดังสมการ (2.14) และสามารถคำนวณหาคำนวนหา
ระยะการเคลื่อนที่สูงสุดได้ดังสมการ (2.15) เมื่อ t_{\max} เป็นเวลาที่เกิดการเคลื่อนที่สูงสุด

$$m_{th}\ddot{x}_t + b_{wh}\dot{x}_t + k_{wh}x_t = k_h x_h + b_h\dot{x}_h \quad (2.14)$$

$$x_{t,pre} = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} e^{-\frac{b_{wh}}{2m_{th}}t_{\max}} \sin \omega t_{\max} + \psi + \gamma \quad (2.15)$$

โดย

$$\omega = \frac{\sqrt{4m_{th}k_{wh} - b_{wh}^2}}{2m_{th}}$$

$$\alpha = \frac{2\dot{x}_{t0}m_{th} + b_{wh}\beta}{\sqrt{4m_{th}k_{wh} - b_{wh}^2}}$$

$$\beta = \frac{k_w x_{t0} - f}{k_{wh}}$$

$$\psi = \tan^{-1}\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)$$

$$\gamma = \frac{k_h x_{t0} + f}{k_{wh}}$$

โดย m_{th} = มวลของปลายแขนกรวมกับมวลของมือ

m_h = มวลของมือมีค่า 0.0591 kg [5]

k_{wh} = ผลรวมค่าคงตัวสปริงของกล้ามเนื้อและมือ

k_h = ค่าคงตัวสปริงของมือมีค่า 0.46072 N/mm [5]

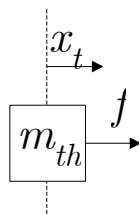
b_{wh} = ผลรวมค่าคงที่ความหน่วงของกล้ามเนื้อและมือ

b_h = ค่าคงที่ความหน่วงของมือ 0.008 N.s/mm [3]

x_t = ตำแหน่งของปลายแขนกล โดยในทุกเวลาสุ่ม (Sampling Time) กำหนดให้ $x_{t0} = 0$ สำหรับการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลและมือเมื่อชนกล้ามเนื้อที่เวลา 0.120 s คือ การหาระยะการเคลื่อนที่โดยแทนค่า t_{\max} ในสมการที่ (2.13) และ (2.15) ด้วย 0.120 s ซึ่งเป็นเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อการกระตุ้นผ่านการสัมผัส [12]

2.2.4 แรงที่กระทำกับปลายแขนกล

พิจารณาปลายแขนกลและมือขณะเคลื่อนที่อิสระดังรูปที่ 2.11 สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการ (2.16)



รูปที่ 2.11 แบบจำลองของปลายแขนกลขณะเคลื่อนที่อิสระ

$$f = m_{th} \ddot{x}_t \quad (2.16)$$

2.3 กำแพงเสมือนแบบสมการซิกมอยด์ (Sigmoid)

สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและขนาดของแรงได้ดังสมการที่ (2.17)

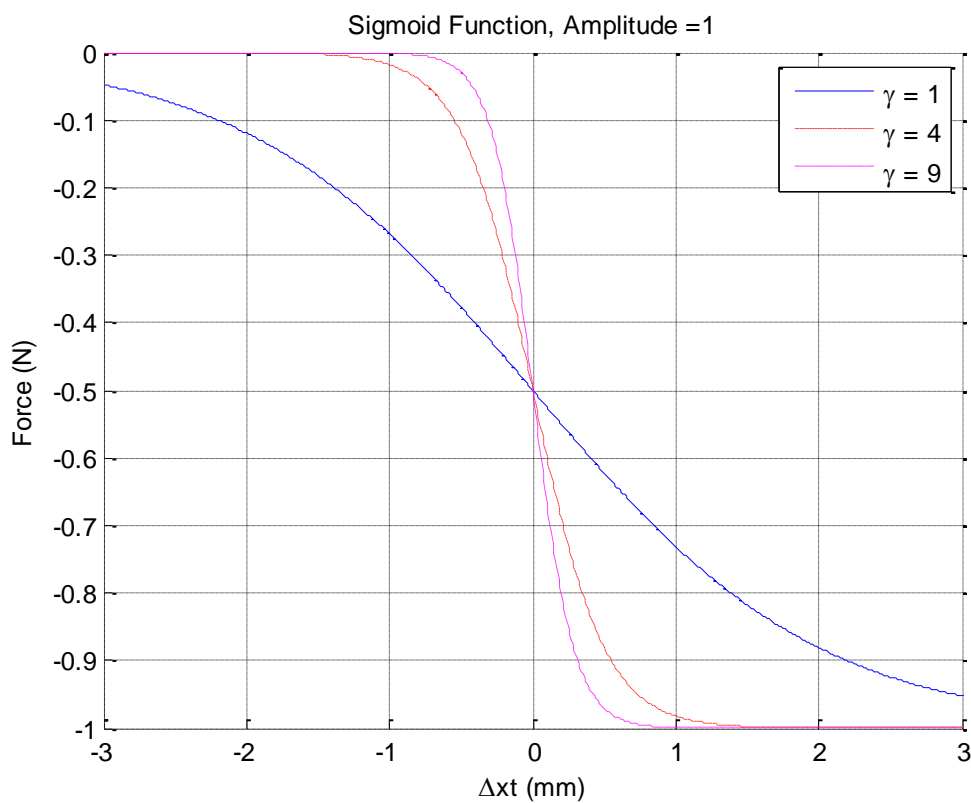
$$F = -a \left(\frac{1}{1 + \exp(-\gamma \Delta x_t)} \right) \quad (2.17)$$

โดย a = ขนาดแรงสูงสุดของกำแพงเสมือน

Δx_t = ระยะห่างระหว่างปลายแขนกล และกำแพงเสมือน $= x_t - x_w$

γ = ใช้สำหรับปรับลักษณะความชันของกราฟดังรูปที่ 2.12

รูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นว่ามีการสร้างแรงต้านการเคลื่อนที่ก่อนถึงตำแหน่งของกำแพงเสมือน ($\Delta x_t < 0$) และมีขนาดเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเป็นครึ่งหนึ่งของแรงสูงสุดที่กำหนด (a) ที่ตำแหน่งของกำแพงเสมือน และเพิ่มขึ้นจนถึงแรงสูงสุดที่กำหนด ($\Delta x_t > 0$) โดยเราสามารถปรับความกว้างของช่วงที่เกิดแรงได้จากการปรับค่า γ โดยเมื่อ γ มีค่ามากขึ้น ความกว้างของช่วงการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงจะแคบลง



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและตำแหน่งของปลายแขนกล เมื่อแรงสูงสุดมีค่า 1 N

บทที่ 3

หุ่นยนต์แขนกลนำ

แขนกลนำ The PHANTOM® Premium 1.5 Haptic device ดังรูปที่ 3.1 เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท SensAble Technologies ซึ่งแขนกลแพนทอมนี้ถูกนำไปใช้ในงานวิจัยเกี่ยวกับหุ่นยนต์แขนกลนำ และการจำลองวัตถุเสมือนจริง (Virtual object) อย่างกว้างขวางจากหลายเหตุผล เช่น แขนกลแพนทอมสามารถใช้มือควบคุมได้สะดวก เคลื่อนที่ได้ 6 องศาอิสระซึ่งนำไประบุตำแหน่ง (Position) และทิศทาง (Orientation) ใน 3 มิติได้ รวมถึงความสามารถสร้างแรงสะท้อนกลับได้ 3 ทิศทางในแนวพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinates) เป็นต้น

จากคุณสมบัติที่แขนกลแพนทอมมี 6 องศาอิสระ และสามารถสร้างแรงสะท้อนกลับได้ งานวิจัยนี้จึงเลือกแขนกลแพนทอมเป็นแขนกลนำในการควบคุมแขนกลตาม และสร้างแรงสะท้อนกลับเนื่องจากกำแพงเสมือน โดยกำหนดให้ปุ่มกดของแขนกลแพนทอมบริเวณปากกา Stylus ดังรูปที่ 3.1 ทำหน้าที่สลับการทำงานของแขนกลตามระหว่างการเคลื่อนที่แบบละเอียด (เคลื่อนที่ช้า) และการเคลื่อนที่แบบหยาบ (เคลื่อนที่เร็ว)

3.1 ข้อมูลทางเทคนิคของแขนกล

รายละเอียดต่างๆ เช่น ขอบเขตพื้นที่ทำงาน น้ำหนักของแขนกล ความละเอียดในการอ่านค่าตำแหน่ง ค่าแรงสะท้อนกลับที่แขนกลสามารถสร้างได้ ค่าความเฉื่อยของแขนกล เป็นต้น สามารถหาได้จากหนังสือคู่มือการใช้งาน (User Manual) หรือเว็บไซต์ผู้ผลิต [13] ซึ่งรายละเอียดข้างต้นสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลักษณะของแขนกล PHANTOM® Premium 1.5

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลทางเทคนิคของแขนกลแฟนท่อม (Technical specifications [13])

Force feedback workspace	15 W x 10.5 H x 7.5 D inches 381 W x 267 H x 191 D mm
Footprint	13 W x 10 D inches 330 W x 254 D mm
Range of motion	Lower arm movement pivoting at elbow
Nominal position resolution	860 dpi 0.03 mm
Backdrive friction	0.15 oz 0.04 N
Maximum exertable force (nominal position)	1.9 lbf 8.5 N
Continuous exertable force (nominal position)	0.3 lbf 1.4 N
Stiffness	20 lbf in ⁻¹ 3.5 N mm ⁻¹
Inertia (apparent mass at tip) – without encoder gimbal	< 0.17 lbm < 75 g
Force feedback	x, y, z
Position sensing	x, y, z (roll, pitch, yaw optional)
Interface	Parallel Port
Supported platforms	Intel-based PCs
OpenHaptics™ Toolkit Compatibility	Yes

3.2 การเขียนโปรแกรมเชื่อมต่อแขนกลนำแฟนท่อม

แขนกลนำแฟนท่อมกับระบบคอมพิวเตอร์ทำการเชื่อมต่อข้อมูลผ่านทางซอฟต์แวร์ชื่อ “The OpenHaptics toolkit” และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- Haptic Device API (HDAPI) : ครอบคลุมในส่วนของการควบคุมระดับต่ำ (Low-level control) ผู้ใช้งานสามารถดึงข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่ง ทิศทาง และความเร็วของปลายแขนกล รวมถึงการกำหนดค่าแรงสะท้อนกลับที่ต้องการให้แขนกลทำการสร้างขึ้นมาด้วย

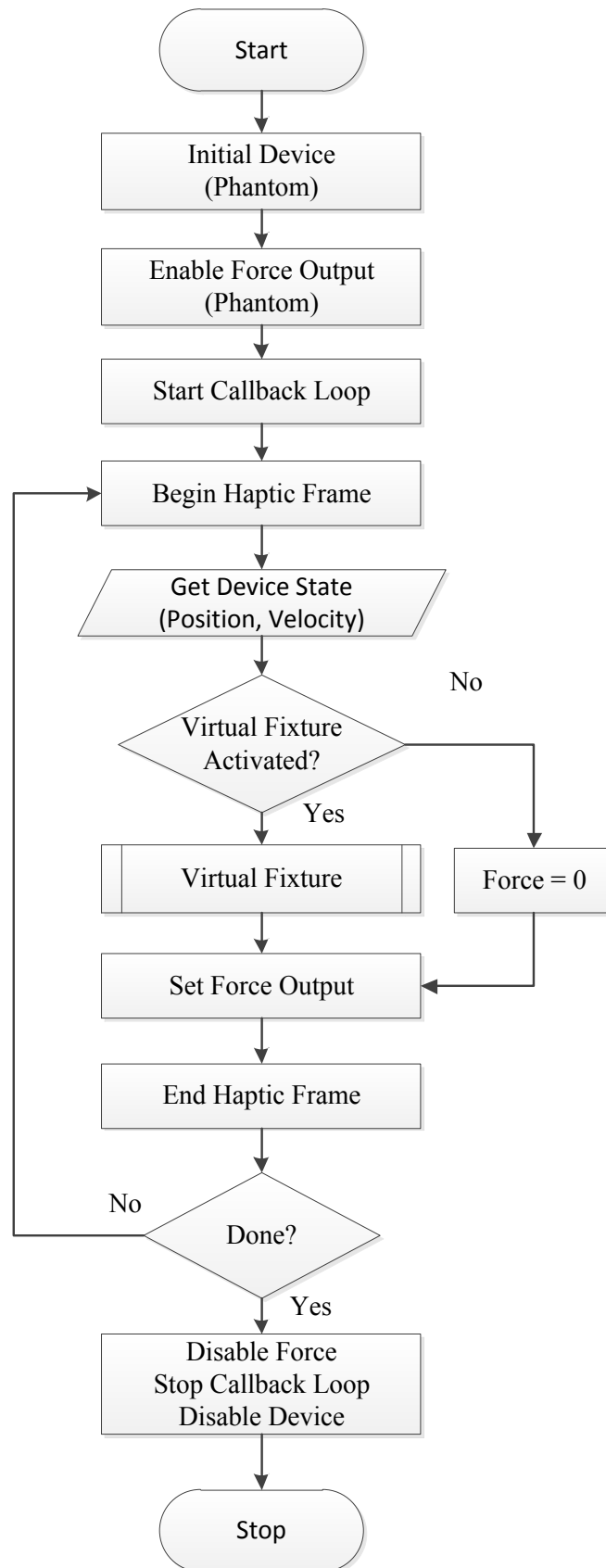
- Haptic Library API (HLAPI) : ครอบคลุมในส่วนของ การควบคุมระดับสูง (High-level control) ซึ่งเกี่ยวข้องกับระบบกราฟิก โดยเป็นส่วนที่เขียนขึ้นบน OpenGL อีกทีหนึ่ง
- Phantom Device Drivers (PDD) : ช่วยสนับสนุนการทำงานของ แขนกลแฟนท่อมให้ใช้งานได้
- Utilities : โปรแกรมย่อยอื่น ๆ ที่มีประโยชน์ สำหรับผู้ใช้งาน
- Source Code Examples : ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมเพื่อการควบคุมและใช้งาน แขนกลแฟนท่อม
- Programmer's Guide : เป็นคู่มืออธิบายภาพรวมการเขียนโปรแกรมเชื่อมต่อกับ แขนกล และขั้นตอนการทำงานต่างๆ [14]
- API Reference : แสดงรายละเอียดของคำสั่งต่างๆที่ใช้ทำงานร่วมกับ แขนกลแฟนท่อม [15]

ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม HDAPI เนื่องจากเพียงพอต่อการดึงข้อมูลตำแหน่ง ทิศทาง และแรงสะท้อนกลับของ แขนกลแฟนท่อม โดยลำดับขั้นตอนการทำงานของ แขนกลแฟนท่อมแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

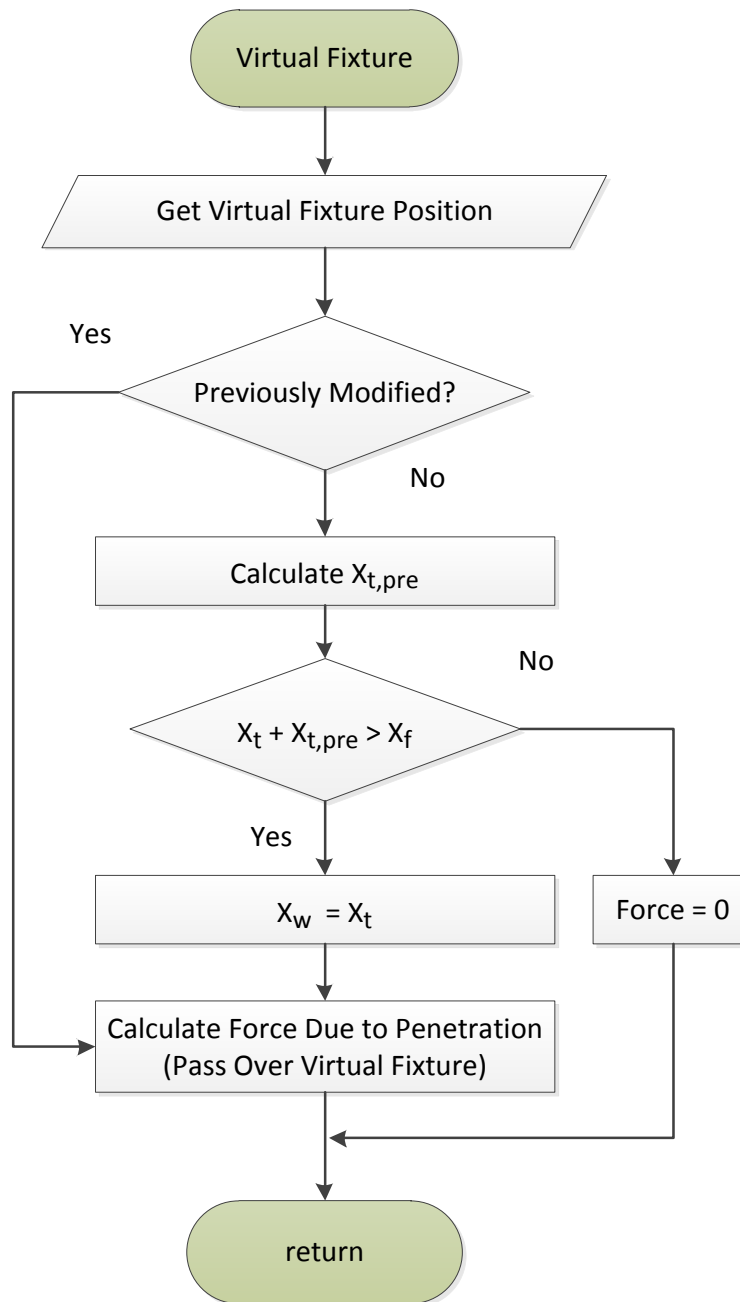
- Initialize Device : ทำการเชื่อมต่อ แขนกลแฟนท่อมเข้ากับระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการรับ-ส่งข้อมูลต่อไป
- Enable Force Output : ค่าเริ่มต้น (Default) ของ แขนกลแฟนท่อมจะปิดการทำงานของ ส่วนการแรงสะท้อนกลับไว้ จึงต้องทำการเปิดการทำงานในส่วนนี้ก่อนทำงาน
- Start Callback Loop : เริ่มวนรอบการทำงาน โดยทำงานที่รอบการทำงาน 1000 Hz เพื่อความต่อเนื่องของแรงสะท้อนกลับ และการควบคุมตำแหน่ง แขนกลตามต่อไป [7], [8]
- Begin Haptic Frame : กำหนดจุดเริ่มต้นการเชื่อมต่อ แขนกลแฟนท่อมในรอบการทำงาน
- Get Device State : เป็นการดึงข้อมูลของ แขนกลแฟนท่อมเพื่อมาใช้งานต่อไป เช่น ตำแหน่ง และความเร็วของปลาย แขนกลแฟนท่อม
- ตรวจสอบการทำงานของขอบเขตตรงเสมือน หากเลือกทำงานจะเรียกส่วนคำนวณ Virtual Fixture ต่อไป หากไม่มีการทำงานจะกำหนดค่าแรงจาก แขนกลแฟนท่อมเป็น 0
- Set Force Output : เป็นการสั่งให้ แขนกลแฟนท่อมสร้างแรงสะท้อนกลับด้วยแรงที่กำหนด
- End Haptic Frame : กำหนดตำแหน่งสิ้นสุดการเชื่อมต่อ แขนกลแฟนท่อมในรอบการทำงานนั้น
- ตรวจสอบว่าเสร็จสิ้นการทำงานหรือไม่ หากไม่ จะทำงานวนรอบต่อไป หากจบการทำงานจะเข้าสู่การตัดการเชื่อมต่อของ แขนกลต่อไป
- Disable Force, Stop Callback Loop, Disable Device : ปิดการทำงานของส่วนสร้างแรงสะท้อน ปิดการวนรอบการทำงานของ แขนกลแฟนท่อม และตัดการเชื่อมต่อระหว่าง แขนกลนำแฟนท่อมกับระบบคอมพิวเตอร์ตามลำดับ

สำหรับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม Virtual Fixture สำหรับกำแพงเสมือนแบบเคลื่อนที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.3 ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- Get Virtual Fixture Position : รับค่าตำแหน่งขอบเขตตรึงเสมือน
- ตรวจสอบว่าตำแหน่งของกำแพงเสมือนมีการเคลื่อนที่แล้วหรือไม่ หากเคยเคลื่อนที่แล้วจะคำนวณแรงที่กำแพงเสมือนสร้างขึ้นมาต่อไป หากยังไม่เคยเคลื่อนที่จะทำการคำนวณระยะเมื่อต่อไป
- Calculate $X_{t,pre}$: คำนวณระยะการเคลื่อนที่ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นตามรูปแบบของกำแพงเสมือนที่กำหนด
- ตรวจสอบเงื่อนไข หากตำแหน่งปัจจุบันของแขนกลรวมกับระยะการเคลื่อนที่ที่จะเกิดขึ้นเลยตำแหน่งขอบเขตห้ามเข้าถึง ให้ทำการปรับตำแหน่งของกำแพงเสมือนให้ตรงกับตำแหน่งของปลายแขนกล ณ ขณะนั้น หากไม่เกิดการเลยขอบเขตให้แรงจากกำแพงเสมือนมีค่าเป็น 0
- Calculate Force due to Penetration : คำนวณแรงที่เกิดขึ้นจากการล้ำแนวตามลักษณะของกำแพงเสมือนที่กำหนด เช่น ค่าคงตัวสปริง และค่าคงที่ความหน่วงของกำแพง



รูปที่ 3.2 แผนภาพลำดับการทำงานในแต่ละรอบของแขนกลแฟนท่อม



รูปที่ 3.3 แผนภาพขั้นตอนการทำงานของกำแพงเสมือนแบบเคลื่อนที่ได้

บทที่ 4

แขนกลตาม

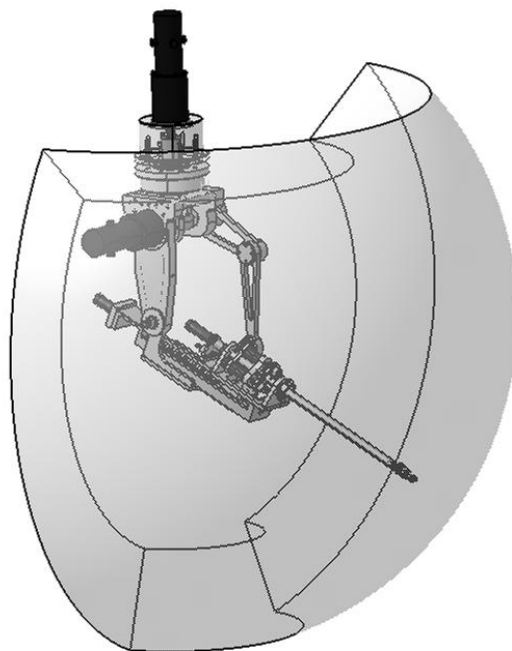
หุ่นยนต์แขนกล Regional Center of Robotic Technology – no.1 Manipulator (RCRT-1) มีลักษณะดังรูปที่ 4.1 โดยแขนกล RCRT-1 ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเป็นแขนกลตามสำหรับการทำงานภายในพื้นที่ขนาดเล็กพร้อมกับแขนกลนำแพนท่อม [10]



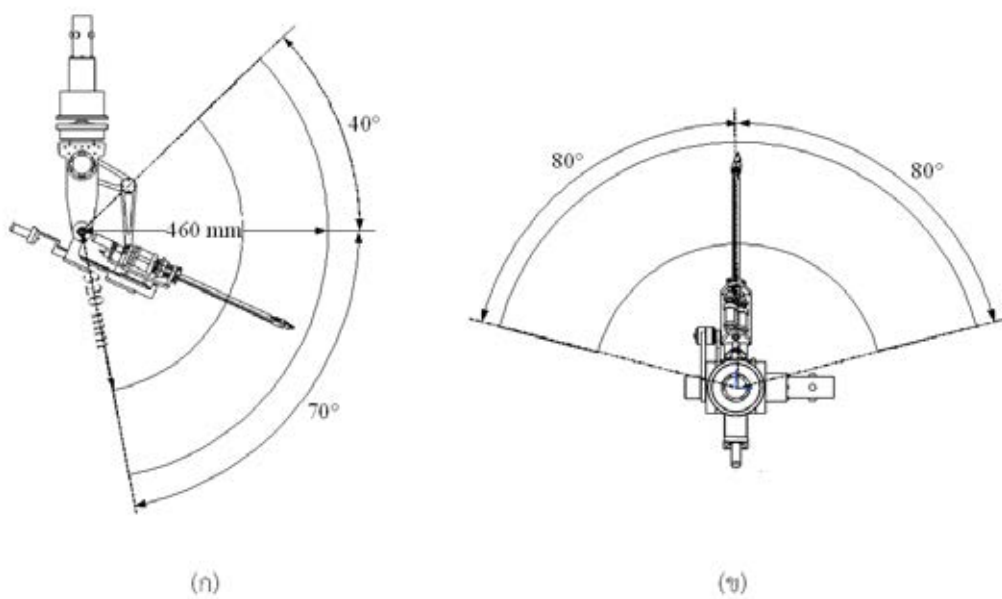
รูปที่ 4.1 หุ่นยนต์แขนกลตาม RCRT-1

4.1 ขอบเขตพื้นที่ทำงานของแขนกล RCRT-1

หุ่นยนต์แขนกล RCRT-1 เป็นแขนกลที่มีการเคลื่อนที่แบบ 6 องศาอิสระ โดยมีพื้นที่การทำงานใน 3 มิติ และขอบเขตพื้นที่ทำงานดังรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 พื้นที่ทำงานของแขนกล RCRT-1 ใน 3 มิติ [10]



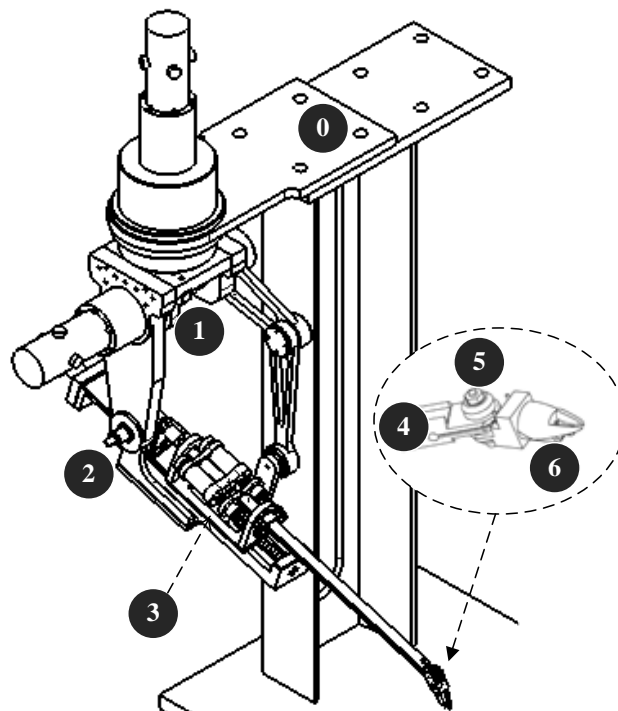
รูปที่ 4.3 ขอบเขตพื้นที่ทำงานของแขนกล RCRT-1 [10]

(ก) มุมมองด้านข้าง

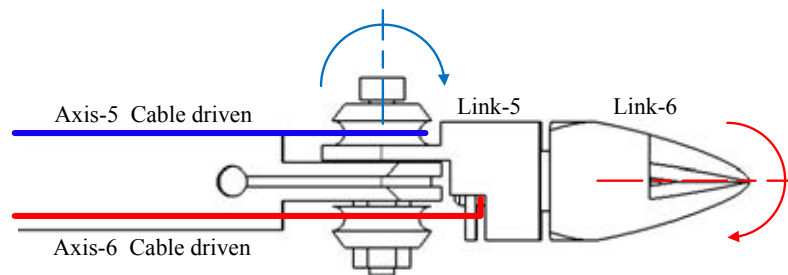
(ข) มุมมองด้านบน

4.2 ลักษณะโครงสร้างและการติดตั้งแกนบนแขนกล RCRT-1

แขนกล RCRT-1 ถูกออกแบบให้สามารถเคลื่อนที่เข้าไปในพื้นที่ทำงานที่มีขนาดเล็กได้สะดวก ข้อต่อที่ 1-3 เป็นส่วนหลักในการกำหนดตำแหน่งของปลายแขนกล ในขณะที่ข้อต่อที่ 4-6 เป็นส่วนหลักในการกำหนดทิศทางของปลายแขนกล โครงสร้างกลไกและแกนเคลื่อนที่ของแขนกล RCRT-1 สามารถจำลองได้ดังรูปที่ 4.4 ขณะที่ข้อต่อที่ 5 และ 6 ถูกขับเคลื่อนด้วยเซอร์โวมอเตอร์ที่ส่งกำลังผ่านระบบสายเคเบิลดังรูปที่ 4.5

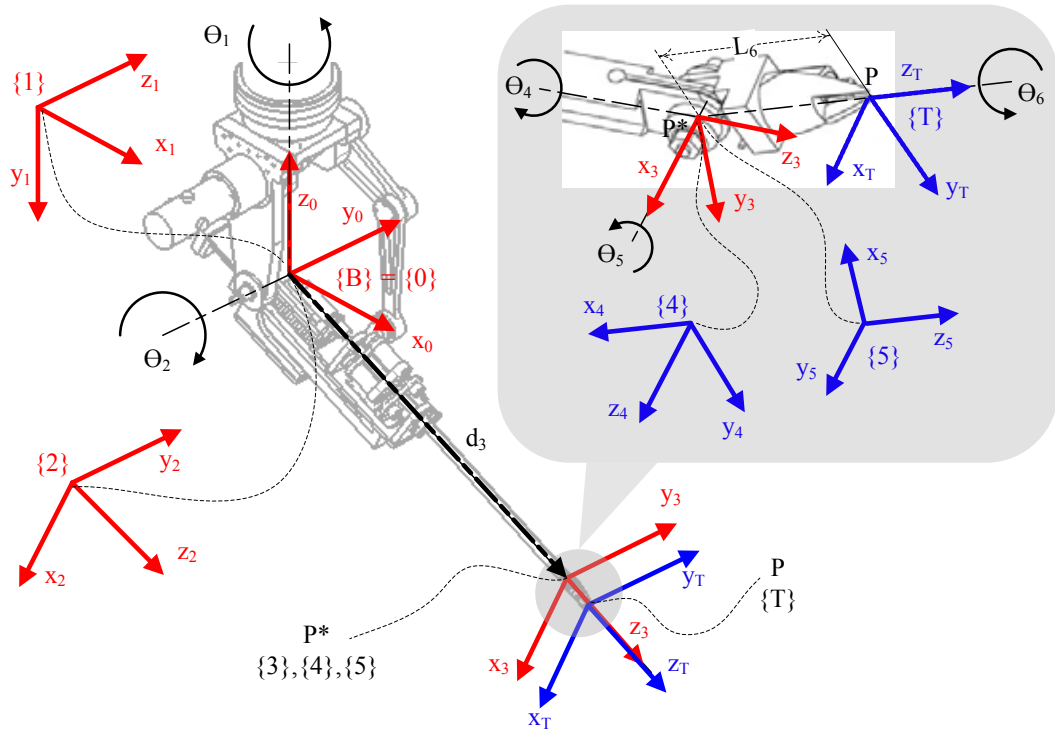


รูปที่ 4.4 โครงสร้างกลไกและแกนเคลื่อนที่ของแขนกล RCRT-1 [10]



รูปที่ 4.5 การส่งกำลังผ่านสายเคเบิลของข้อต่อที่ 5 และ 6 ของแขนกล RCRT-1 [10]

การติดตั้งแกนของแขนกล RCRT-1 แสดงได้ดังรูปที่ 4.6 และเขียนพารามิเตอร์ของเดนาวิต-ฮาร์เทนเบอร์ก (Denavit-Hartenberg parameters [16], [17]) ได้ดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.6 การติดตั้งแกนลงบนโครงสร้างของแขนกล RCRT-1 [10]

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของเดนาวิต-ฮาร์เทนเบอร์เกอร์ของแขนกล RCRT-1

i	$a_{i-1} (mm)$	α_{i-1}	$d_i (mm)$	θ_i
1	0	-90°	0	θ_1
2	0	90°	0	θ_2
3	0	0	d_3	0
4	0	-90°	0	θ_4
5	0	90°	0	θ_5
6	0	0	L_6	θ_6

4.3 จลศาสตร์ไปข้างหน้า (Forward kinematics)

จลศาสตร์ไปข้างหน้าใช้เพื่อคำนวณตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกลในพื้นที่ทำงานของปลายแขนกลจากข้อมูลตัวแปรค่ามุม (joint variables) ของข้อต่อแกนต่างๆ และเขียนเป็นเมตริกซ์การแปลงดั่งสมการ (4.1)

$${}^0T_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.1}$$

โดย

$$\begin{aligned}
n_x &= c_1 [c_2 (c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6) - s_2 s_5 s_6] - s_1 (s_4 c_5 c_6 + c_4 c_6) \\
n_y &= s_1 [c_2 (c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6) - s_2 s_5 s_6] + c_1 (s_4 c_5 c_6 + c_4 c_6) \\
n_z &= -s_2 (c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6) - c_2 s_5 c_6 s \\
o_x &= c_1 [-c_2 (c_4 c_5 s_6 + s_4 c_6) + s_2 s_5 s_6] - s_1 (-s_4 c_5 s_6 + c_4 c_6) \\
o_y &= s_1 [-c_2 (c_4 c_5 s_6 + s_4 c_6) + s_2 s_5 s_6] + c_1 (-s_4 c_5 s_6 + c_4 c_6) \\
o_z &= s_2 (c_4 c_5 s_6 + s_4 c_6) + c_2 s_5 s_6 \\
a_x &= c_1 (c_2 c_4 s_5 + s_2 c_5) - s_1 s_4 s_5 \\
a_y &= s_1 (c_2 c_4 s_5 + s_2 c_5) + c_1 s_4 s_5 \\
a_z &= -s_2 c_4 s_5 + c_2 c_5 \\
p_x &= (c_1 s_2 d_3 - s_1 d_2) + d_6 a_x \\
p_y &= (s_1 s_2 d_3 + c_1 d_2) + d_6 a_y \\
p_z &= (c_2 d_3) + d_6 a_z \\
p_x, p_y, p_z &= \text{ตำแหน่งของปลายแขนกลเมื่อเทียบกับเฟรม } \{0\} \\
s_i &= \sin(\theta_i) \text{ และ } c_i = \cos(\theta_i) \\
s_{ij} &= \sin(\theta_i + \theta_j) \text{ และ } c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)
\end{aligned}$$

4.4 จลศาสตร์ย้อนกลับ (Inverse kinematics)

จลศาสตร์ย้อนกลับใช้เพื่อคำนวณหาค่าตัวแปรค่ามุมที่สอดคล้องกับตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกลในพื้นที่การทำงาน สำหรับแขนกล RCRT-1 สามารถหาจลศาสตร์ย้อนกลับได้จากความสัมพันธ์ของสมการ (4.2) ถึง (4.10)

$$p_x = p_x^* + d_6 a_x \quad (4.2)$$

$$p_y = p_y^* + d_6 a_y \quad (4.3)$$

$$p_z = p_z^* + d_6 a_z \quad (4.4)$$

$$\theta_1 = \arctan2\left(\frac{p_y^*}{p_x^*}\right) \quad (4.5)$$

$$\theta_2 = \arctan2\left(\frac{c_1 p_x^* + s_1 p_y^*}{p_z^*}\right) \quad (4.6)$$

$$d_3 = s_2 (c_1 p_x^* + s_1 p_y^*) + c_2 p_z^* \quad (4.7)$$

$$\theta_4 = \arctan2\left(\frac{-s_1 a_x + c_1 a_y}{c_2(c_1 a_x + s_1 a_y) - s_2 a_z}\right); \theta_4 \neq 0 \quad (4.8)$$

ภาวะเอกฐาน (Singularity) เกิดเมื่อ $\theta_5 = 0$ เนื่องจากแกนที่ 4 และ 6 จะเกิดการซ้อนทับกัน
หนทางหนึ่งในการแก้ไขเหตุการณ์นี้คือ การหยุดการเคลื่อนที่ของมัมอันไดอันหนึ่ง ซึ่งในที่นี้เลือกให้
 θ_4 หยุดการเคลื่อนที่

$$\theta_5 = \arctan2\left(\frac{c_4(c_2(c_1 a_x + s_1 a_y) - s_2 a_z) + s_4(-s_1 a_x + c_1 a_y)}{s_2(c_1 a_x + s_1 a_y) + c_2 a_z}\right) \quad (4.9)$$

$$\theta_6 = \arctan2\left(\frac{s_6}{c_6}\right) \quad (4.10)$$

โดย

$$s_6 = -c_5(c_4(c_2(c_1 o_x + s_1 o_y) - s_2 o_z) + s_4(-s_1 o_x + c_1 o_y))$$

$$+ s_5(s_2(c_1 o_x + s_1 o_y) + c_2 o_z)$$

$$c_6 = -s_4(c_2(c_1 o_x + s_1 o_y) - s_2 o_z) + c_4(-s_1 o_x + c_1 o_y)$$

บทที่ 5

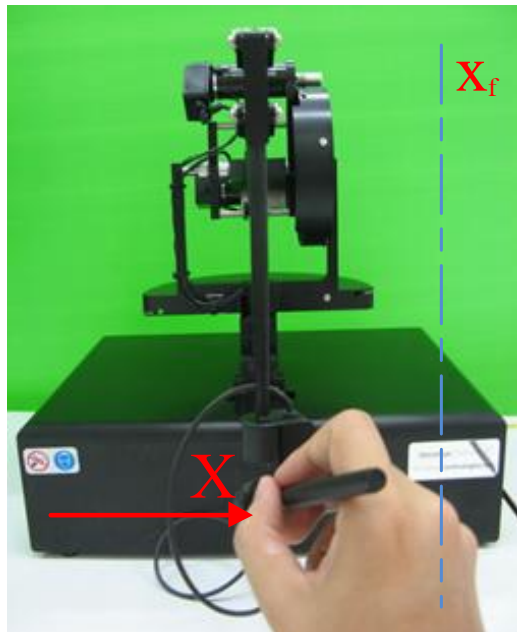
การทดลอง

การทดลองที่ 1 : การทดสอบกำแพงเสมือนชนิดต่างๆ

การทดลองนี้เป็นการทดสอบการป้องกันการเข้าถึงบริเวณห้ามเข้าถึงด้วยกำแพงเสมือนแบบสปริง และกำแพงเสมือนแบบเคลื่อนที่ได้ซึ่งมี 3 แบบดังกล่าวไว้ในบทที่ 2 และทำการเปรียบเทียบผลการทดลองโดยคำนึงถึงการล้าแนวของแกนกลนำเทียบกับขอบเขตของบริเวณที่ห้ามเข้าถึงของกำแพงเสมือนชนิดต่างๆ

โดยให้ผู้ทำการทดลองควบคุมปากกาของแกนกลนำให้เคลื่อนที่ไปทางขวา (ตามแนวแกน X ของแกนกลนำ) ดังรูปที่ 5.1 และเมื่อรู้สึกว่าการกำแพงเสมือนให้ผู้ทดลองถอยปากกากลับ และวัดตำแหน่งที่มากที่สุดเทียบกับขอบเขตของบริเวณที่ห้ามเข้าถึง (x_j) โดยทดลองกับกำแพงเสมือนทั้งหมด 10 รูปแบบ รูปแบบละ 5 ครั้ง และกำหนดค่าคงตัวสปริงของกำแพงเสมือน (k_w) 2 ค่า คือ $k_w = 2.0$ N/mm และ $k_w = 4.0$ N/mm กำแพงเสมือนที่ทดสอบมีดังนี้

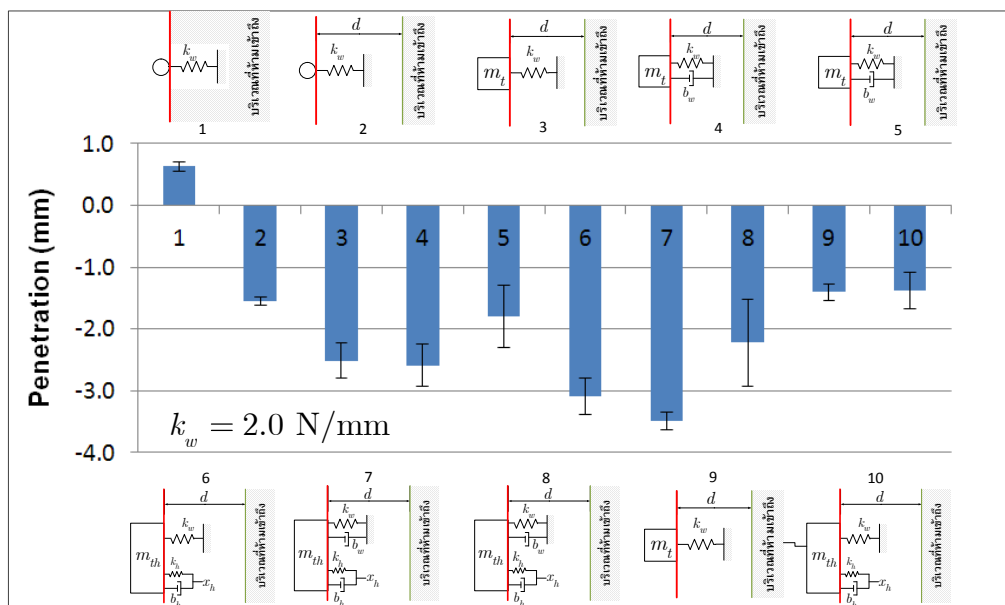
1. กำแพงเสมือนแบบสปริง
2. กำแพงเสมือนแบบสปริงที่เคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ที่ความเร็วคงที่
3. กำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแกนกลเมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริง
4. กำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแกนกลเมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริงและตัวหน่วง โดย $b_w = 0.01$ N.s/mm
5. กำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแกนกลเมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริงและตัวหน่วง โดย $b_w = 0.05$ N.s/mm
6. กำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแกนกลและมือเมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริง
7. กำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแกนกลและมือเมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริงและตัวหน่วง โดย $b_w = 0.01$ N.s/mm
8. กำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแกนกลและมือเมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริงและตัวหน่วง โดย $b_w = 0.05$ N.s/mm
9. กำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแกนกลเมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริงที่เวลา 0.120 วินาที
10. กำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแกนกลและมือเมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริงที่เวลา 0.120 วินาที



รูปที่ 5.1 ทิศทางการเคลื่อนที่ของแกนกลนำ และลักษณะของกำแพงเสมือน

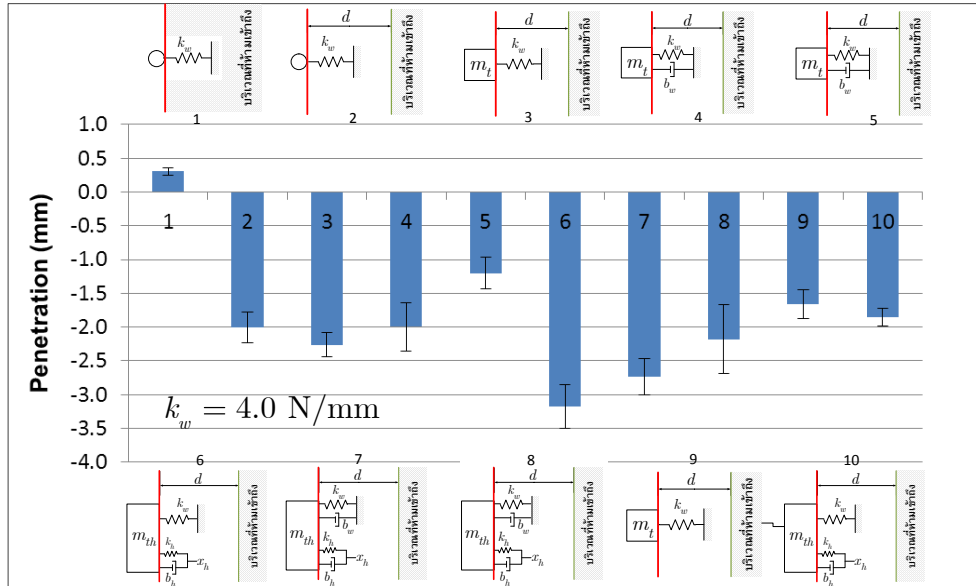
ผลการทดลองการที่ 1

เมื่อกำหนดให้ $k_w = 2.0$ N/mm กำแพงเสมือนแบบที่ 1 จะเกิดการล้าแนวขอบเขตของบริเวณที่ห้ามเข้าถึงเป็นระยะ 0.6 mm และกำแพงเสมือนแบบที่ 2 ถึง 10 จะไม่เกิดการล้าแนวขอบเขตของบริเวณที่ห้ามเข้าถึง แต่จะเหลือระยะระหว่างปลายแกนกลถึงแนวขอบเขตของบริเวณที่ห้ามเข้าถึงเป็นระยะ 1.5, 2.5, 2.6, 1.8, 3.1, 3.5, 2.2, 1.4 และ 1.4 mm ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ตำแหน่งของปลายแกนกลเมื่อใช้กำแพงเสมือนแบบต่างๆ เทียบกับตำแหน่งของพื้นที่ห้ามเข้าถึง เมื่อ $k_w = 2.0$ N/mm

เมื่อกำหนดให้ $k_w = 4.0 \text{ N/mm}$ กำแพงเสมือนแบบที่ 1 จะเกิดการล้าแนวขอบเขตของบริเวณที่ห้ามเข้าถึงเป็นระยะ 0.3 mm และกำแพงเสมือนแบบที่ 2 ถึง 10 จะไม่เกิดการล้าแนวขอบเขตของบริเวณที่ห้ามเข้าถึง แต่จะเหลือระยะระหว่างปลายแขนกลถึงแนวขอบเขตของบริเวณที่ห้ามเข้าถึงเป็นระยะ 2.0, 2.2, 2.0, 1.2, 3.2, 2.7, 2.2, 1.7 และ 1.9 mm ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ตำแหน่งของปลายแขนกลเมื่อใช้กำแพงเสมือนแบบต่างๆ เทียบกับตำแหน่งของพื้นที่ห้ามเข้าถึง เมื่อ $k_w = 4.0 \text{ N/mm}$

สรุปผลการทดลองที่ 1

จากการทดลองพบว่ากำแพงเสมือนรูปแบบสปริงจะเกิดการเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณห้ามเข้าถึงเสมอ (ไม่สามารถป้องกันการเข้าถึงบริเวณที่ห้ามเข้าถึงได้) และกำแพงเสมือนแบบเคลื่อนที่ได้สามารถป้องกันการเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นที่ห้ามเข้าถึงได้ การเพิ่มค่าคงตัวสปริง (k_w) พบว่าส่วนใหญ่เคลื่อนที่เข้าใกล้พื้นที่ห้ามเข้าถึงได้มากขึ้น การเพิ่มค่าคงตัวความหน่วงของกำแพงเสมือนมีแนวโน้มลดระยะเพื่อได้ หากมีค่าน้อยจะใกล้เคียงกับระบบที่ไม่มีตัวหน่วง แต่เมื่อมากเกินไปจะเกิดการสั่นขึ้น

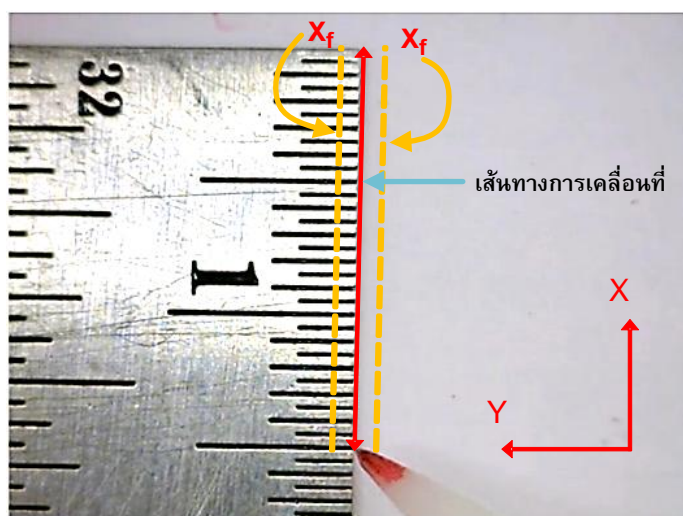
การทดลองที่ 2 : เปรียบเทียบกำแพงเสมือนแบบเคลื่อนที่ได้รูปแบบสปริง และสมการชิกมอยด์

การทดลองนี้มีการแสดงภาพการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลตามดังรูปที่ 5.4 จากกล้องที่ติดตั้งอยู่ในทิศทางขนานกับแกน Z ของแขนกลตามดังรูปที่ 5.5 เมื่อพิจารณาในระนาบ XY จะมีขอบเขตบริเวณที่ห้ามเข้าถึงเฉพาะแนวแกน Y ดังรูปที่ 5.6 (ก) และมีลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดด้านละ 2 mm ในระนาบ YZ ดังรูปที่ 5.6 (ข)

ให้ผู้ทดลองเคลื่อนที่ปลายแขนกลในทิศทางขนานแกน X ดังรูปที่ 5.4 จากตำแหน่ง 15 mm ถึง 0 mm ของไม้บรรทัด โดยเคลื่อนที่ไปและกลับจำนวน 5 ครั้ง ผู้ทดลองได้รับคำแนะนำว่าเมื่อ

รู้สึกถึงแรงที่กระทำที่มือในแกน Y และ Z ให้ทำการเคลื่อนที่กลับในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของแรงจากกำแพงเสมือน ขณะที่พยายามเคลื่อนที่ตามแนวเส้นทางที่กำหนดไว้ตั้ง และทำการทดลองกับกำแพงเสมือนทั้งหมด 11 รูปแบบ รูปแบบละ 5 ครั้ง ดังต่อไปนี้

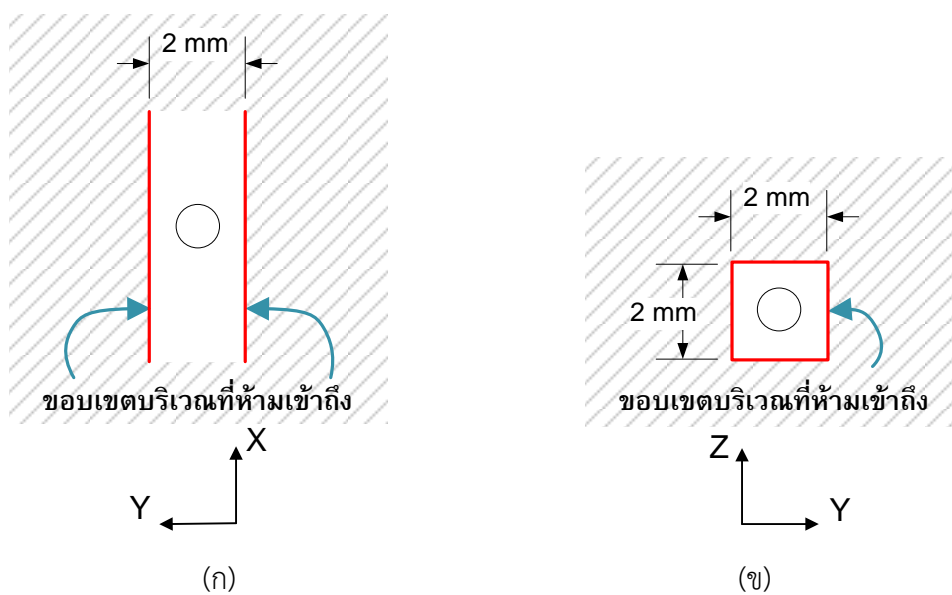
1. กำแพงเสมือนแบบสปริง โดย $k_w = 0.3 \text{ N/mm}$
2. กำแพงเสมือนแบบสปริง โดย $k_w = 0.8 \text{ N/mm}$
3. กำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริง โดย $k_w = 0.3 \text{ N/mm}$
4. กำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริง โดย $k_w = 0.8 \text{ N/mm}$
5. กำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริงที่เวลา 0.120 วินาที โดย $k_w = 0.3 \text{ N/mm}$
6. กำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริงที่เวลา 0.120 วินาที โดย $k_w = 0.8 \text{ N/mm}$
7. กำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลและมือเมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริง โดย $k_w = 0.3 \text{ N/mm}$
8. กำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลและมือเมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริง โดย $k_w = 0.8 \text{ N/mm}$
9. กำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลและมือเมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริงที่เวลา 0.12 วินาที โดย $k_w = 0.3 \text{ N/mm}$
10. กำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลและมือเมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริงที่เวลา 0.12 วินาที โดย $k_w = 0.8 \text{ N/mm}$
11. กำแพงเสมือนแบบสมการซิกมอยด์โดย $a = 3$ และ $\gamma = 9$



รูปที่ 5.4 ภาพปลายแขนกลจากกล้องและเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนกลในการทดลองที่ 2



รูปที่ 5.5 ชุดทดลอง



รูปที่ 5.6 แผนภาพลักษณะขอบเขตของบริเวณที่ห้ามเข้าถึงของการทดลองที่ 2

(ก) มุมมองในระนาบ XY

(ข) มุมมองในระนาบ YZ

ผลการทดลองที่ 2

เมื่อทดลองด้วยกัมพางเสมีอนชนิดสปริง เนื่องจากกล้องของชุดทดลองมีมุมมองในระนาบ XY ทำให้ผู้ทดลองสามารถควบคุมตำแหน่งในแกน Y ให้อยู่ภายในขอบเขตได้ เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ในแกน Z พบว่าเกิดการล้าแนวเป็นระยะ ผู้ทดลองรู้สึกว่าคุณค่าคงตัวสปริง 0.8 N/mm มีแรงสะท้อนกลับมากกว่า และสามารถรับรู้ทิศทางของแรงได้อย่างชัดเจน แต่ขณะเดียวกันก็ส่งผลให้คุณทิศทางของแขนกลเมื่อเกิดการชนกัมพางได้ยากกว่า

เมื่อทดลองด้วยกัมพางเสมีอนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกัมพางเสมีอนชนิดสปริง พบว่ากัมพางจะมีการปรับขนาดเข้ามามากทำให้พื้นที่การเคลื่อนที่ในแกน Y และ Z แคบ แต่สามารถเคลื่อนที่ตามแนวเส้นได้ง่ายโดยการเคลื่อนที่ไปตามแนวขอบเขตของกัมพางเสมีอนเมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าคงตัวสปริง 2 ค่า ผู้ทดลองรู้สึกว่าคุณค่าการทำงานใกล้เคียงกัน แต่พอใจค่าสปริง 0.3 N/mm มากกว่า เนื่องจากมีอิสระในการเคลื่อนที่ได้ระดับหนึ่ง และแรงผลักดันน้อยกว่าเมื่อเทียบคุณสมบัติโดยรวมผู้ทดลองชอบค่าคงตัวสปริง 0.3 N/mm มากกว่า

เมื่อทดลองด้วยกัมพางเสมีอนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลและมือเมื่อชนกัมพางเสมีอนชนิดสปริง ผู้ทดลองรู้สึกว่าคุณค่าคงตัวสปริง 0.8 N/mm มีพื้นที่การเคลื่อนที่มากกว่า (กัมพางปรับขนาดเข้ามาน้อยกว่า) ทิศทางแรงชัดเจน แต่เมื่อกัมพางไม่ตรงแนวเส้นจะต้องใช้แรงค่อนข้างมาก เมื่อเทียบคุณสมบัติโดยรวมผู้ทดลองชอบค่าคงตัวสปริง 0.3 N/mm มากกว่า

เมื่อทดลองด้วยกัมพางเสมีอนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลและมือเมื่อชนกัมพางเสมีอนชนิดสปริงที่เวลา 0.120 วินาที ผู้ทดลองรู้สึกว่ามีพื้นที่ของกัมพางกว้างกว่ากัมพางเสมีอนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกัมพางเสมีอนชนิดสปริง และกัมพางเสมีอนที่เคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลและมือเมื่อชนกัมพางเสมีอนชนิดสปริงอย่างชัดเจน ที่ค่าคงตัวสปริง 0.3 N/mm ส่วนใหญ่จับทิศทางของแรงในแกน Z ได้ลำบากกว่าที่ค่าคงตัวสปริง 0.8 N/mm ซึ่งมีแรงชัดเจน และการสะท้อนค่อนข้างมาก เมื่อเทียบคุณสมบัติโดยรวมผู้ทดลองพอใจค่าคงตัวสปริง 0.8 N/mm มากกว่า เนื่องจากสามารถรับรู้ทิศทางแรงสะท้อนในแกน Z ได้ดีกว่า

เมื่อทดลองด้วยกัมพางเสมีอนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกัมพางเสมีอนชนิดสปริงที่เวลา 0.120 วินาที ผู้ทดลองรู้สึกว่ามีพื้นที่ของกัมพางกว้างกว่ากัมพางเสมีอนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกัมพางเสมีอนชนิดสปริง และกัมพางเสมีอนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลและมือเมื่อชนกัมพางเสมีอนชนิดสปริงอย่างชัดเจน สำหรับค่าคงตัวสปริง 0.8 N/mm สามารถรับรู้ทิศทางของแรงได้อย่างชัดเจน เกิดการสะท้อนค่อนข้างมาก เมื่อเทียบคุณสมบัติโดยรวมผู้ทดลองชอบค่าคงตัวสปริง 0.3 N/mm มากกว่าเนื่องจากมีการสะท้อนที่น้อยทำให้ควบคุมตำแหน่งในแกนอื่นพร้อมกันได้ง่ายกว่า

ผู้ทดลองรู้สึกว่าการทดลองนี้กัมพางเสมีอนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกัมพางเสมีอนชนิดสปริง และกัมพางเสมีอนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลและมือเมื่อชนกัมพางเสมีอนชนิดสปริงมีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยแยกความแตกต่างได้เฉพาะค่าคงตัวสปริงที่แตกต่างกันในแต่ละครั้ง

เมื่อเปรียบเทียบกัมพางเสมีอนชนิดต่างๆข้างต้น ผู้ทดลองพึงพอใจค่าคงตัวสปริง 0.3 N/mm มากกว่า แต่มีข้อเสียเปรียบ คือ รับรู้ทิศทางของแรงได้ลำบากกว่า แต่เมื่อเคลื่อนที่เร็วจะรู้สึกทิศทาง

ของแรงได้ชัดเจนขึ้น ในขณะที่ค่าคงตัวสปริง 0.8 N/mm เมื่อเคลื่อนที่เร็วจะเกิดการสะท้อนมาก คู่มือตำแหน่งและทิศทางได้ยากยิ่งขึ้น

สำหรับกำแพงเสมือนแบบสมการซิกมอยด์ ผู้ทดลองรู้สึกว่าการแกว่งกวัดมากกว่ากำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริง และกำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลและมือเมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริง โดยมีขนาดใกล้เคียงกับกำแพงเสมือนแบบปกติมากกว่า ขณะที่ขนาดของแรงใกล้เคียงกับค่าคงตัวสปริง 0.8 N/mm แต่การกระเด็นออกน้อยกว่ามาก

ผู้ทดลองคิดว่างานที่ต้องวิ่งเรียดตามขอบเขตของกำแพงเสมือน ควรใช้แบบกำแพงสปริงที่ค่าคงตัวสปริงอ่อนมากกว่า แต่หากเป็นการผลัดกับกำแพงขอบแบบซิกมอยด์มากกว่า

สรุปผลการทดลองที่ 2

เมื่อพิจารณาจากตำแหน่งการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลในขณะทดลองพบว่าการทำงานโดยมีการใช้กล้องประกอบการทำงานทำให้สามารถควบคุมตำแหน่งในระนาบ (XY) ที่เห็นผ่านกล้องได้อย่างดี แต่จะควบคุมตำแหน่งในแนวแกน Z ซึ่งขนานกับกล้องได้ลำบาก

สำหรับกำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริงและกำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลและมือเมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริงสามารถป้องกันการล้าแนวสู่บริเวณห้ามเข้าถึงในแกน Z ได้โดยสมบูรณ์ แต่บริเวณที่ทำงานได้จะลดลง

สำหรับกำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริงที่เวลา 0.120 วินาที และกำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลและมือเมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริงที่เวลา 0.120 วินาทีนั้นที่ค่าคงตัวสปริง 0.8 N/mm สามารถป้องกันการล้าแนวในแกน Z ได้ ในขณะที่ที่ค่าคงตัวสปริง 0.3 N/mm จะเกิดการล้าแนวเล็กน้อยในบางครั้ง

กำแพงเสมือนแบบสมการซิกมอยด์สามารถป้องกันการล้าแนวของบริเวณห้ามเข้าถึงในแกน Z ได้อย่างสมบูรณ์

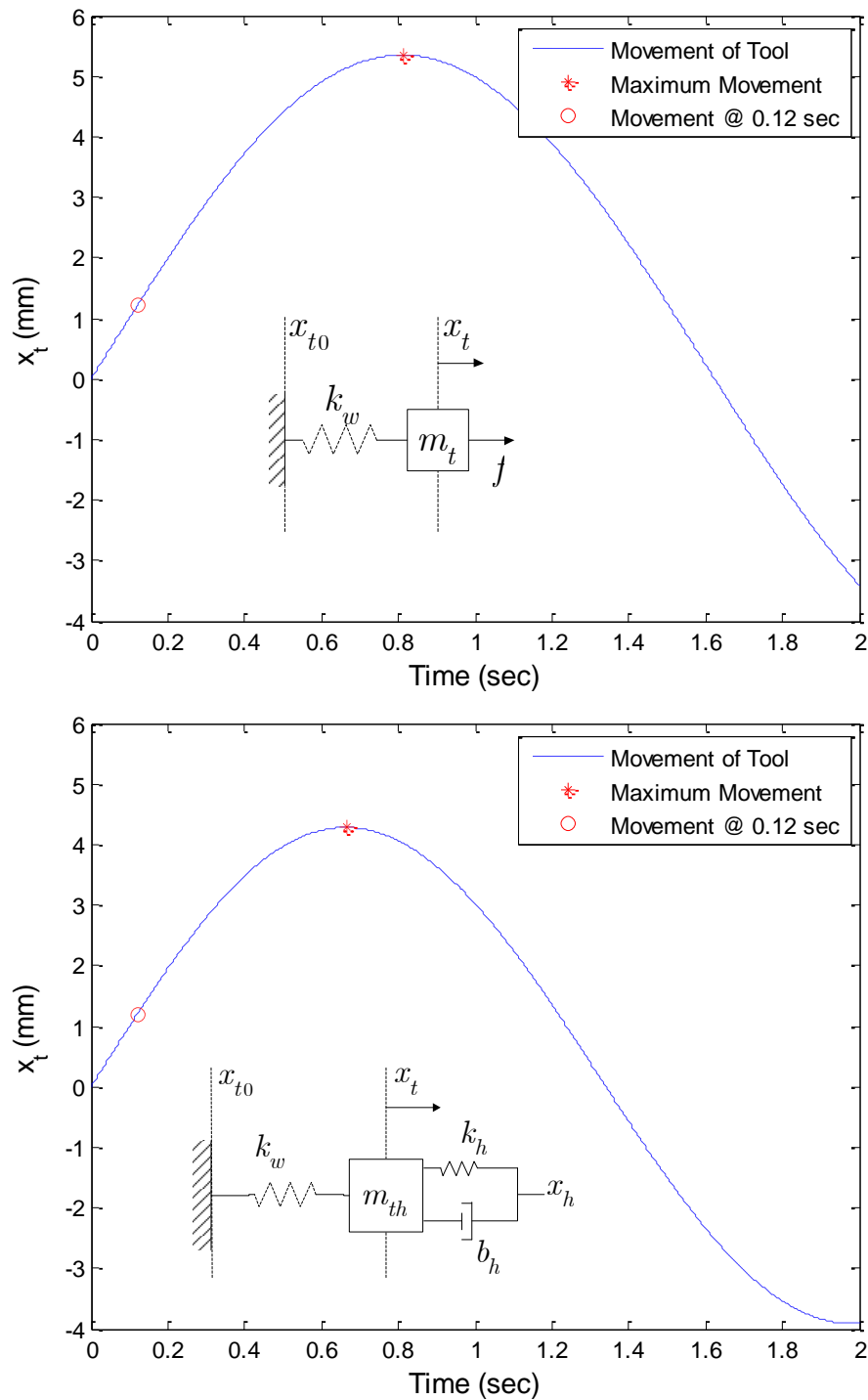
การจำลองการเคลื่อนที่ของระบบ

เมื่อจำลองการเคลื่อนที่ด้วยค่าเริ่มต้นจากตำแหน่งที่กำแพงเสมือนแบบเคลื่อนที่ได้ในการทดลองที่ 2 ทำการปรับตำแหน่ง โดยสุ่มมา 3 ค่าดังตารางที่ 5.1 และจำลองระบบด้วยค่าคงตัวสปริง 2 ค่า คือ 0.3 N/mm และ 0.8 N/mm ด้วยวิธีกำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริง และกำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลและมือเมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริงดังความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.6) และ (2.11) ตามลำดับ โดยสามารถหาตำแหน่งของปลายแขนกลที่เวลาต่างๆ และระยะการเคลื่อนที่สูงสุดที่เป็นไปได้ดังรูปที่ 5.7 ถึงรูปที่ 5.12 และสรุปได้ดังตารางที่ 5.2

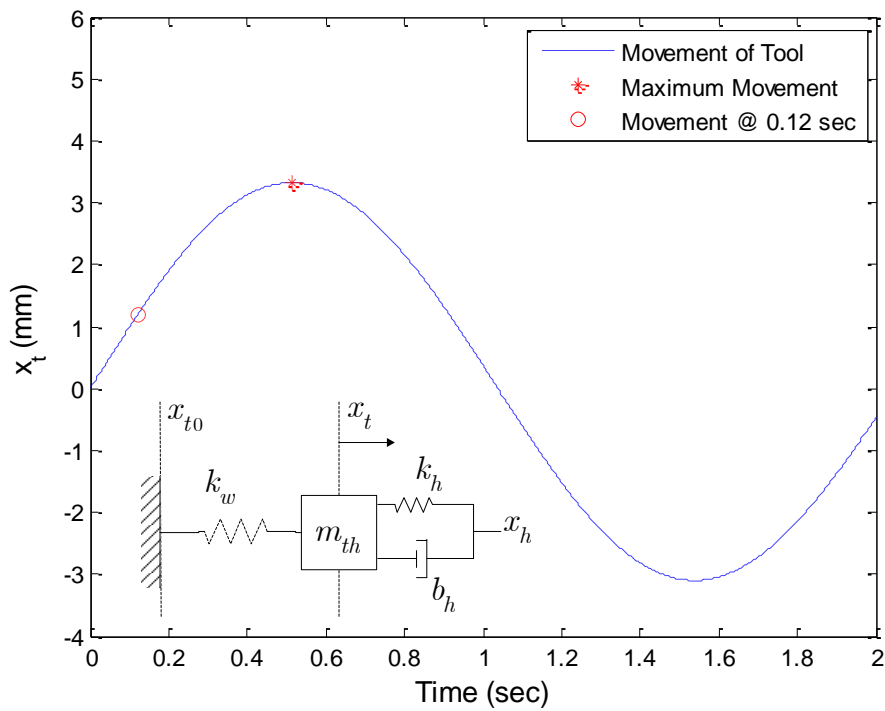
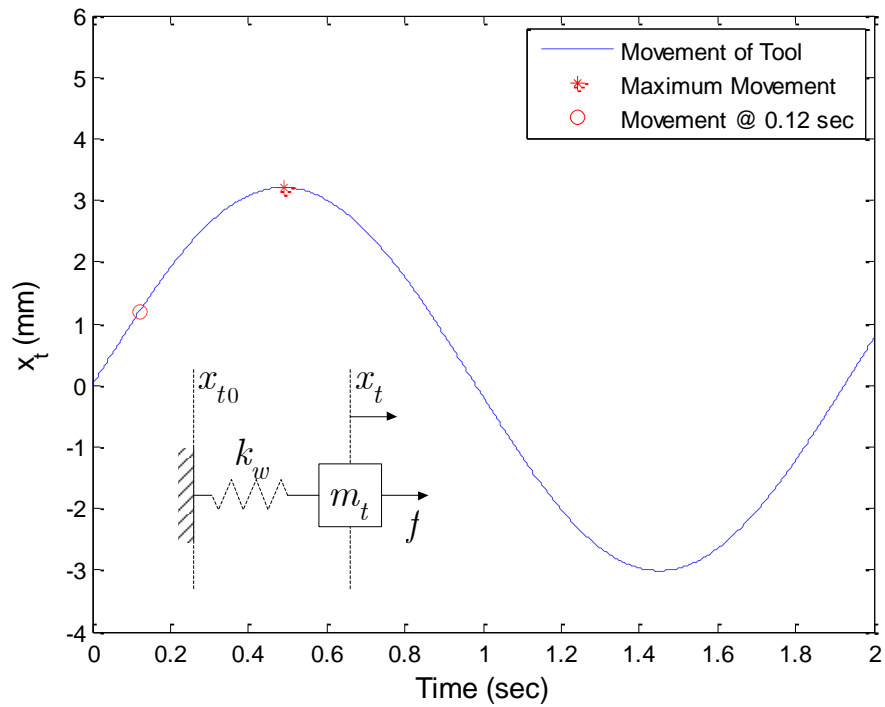
ตารางที่ 5.2 ระยะการเคลื่อนที่ในกรณีต่างๆ

	ค่าคงตัว สปริง	ค่า เริ่มต้น 1	ค่า เริ่มต้น 2	ค่า เริ่มต้น 3
ระยะการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกำแพง เสมือนชนิดสปริงที่เวลา 0.120 วินาที (mm)	0.3	1.21	0.99	4.72
	0.8	1.20	0.98	4.65
ระยะการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลและมือเมื่อชน กำแพงเสมือนชนิดสปริงที่เวลา 0.120 วินาที (mm)	0.3	1.20	0.97	4.68
	0.8	1.20	0.96	4.64
ระยะการเคลื่อนที่มากที่สุดของปลายแขนกลเมื่อชน กำแพงเสมือนชนิดสปริง (mm)	0.3	5.36	5.54	20.40
	0.8	3.22	3.00	12.30
ระยะการเคลื่อนที่มากที่สุดของปลายแขนกลและมือ เมื่อชนกำแพงเสมือนชนิดสปริง (mm)	0.3	4.28	3.85	16.50
	0.8	3.30	2.90	12.90

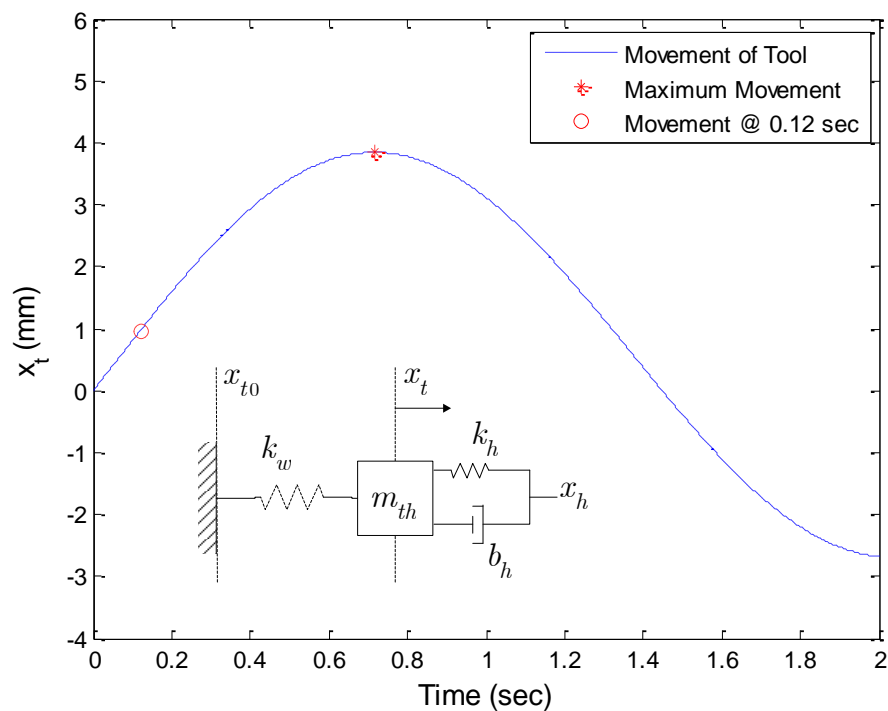
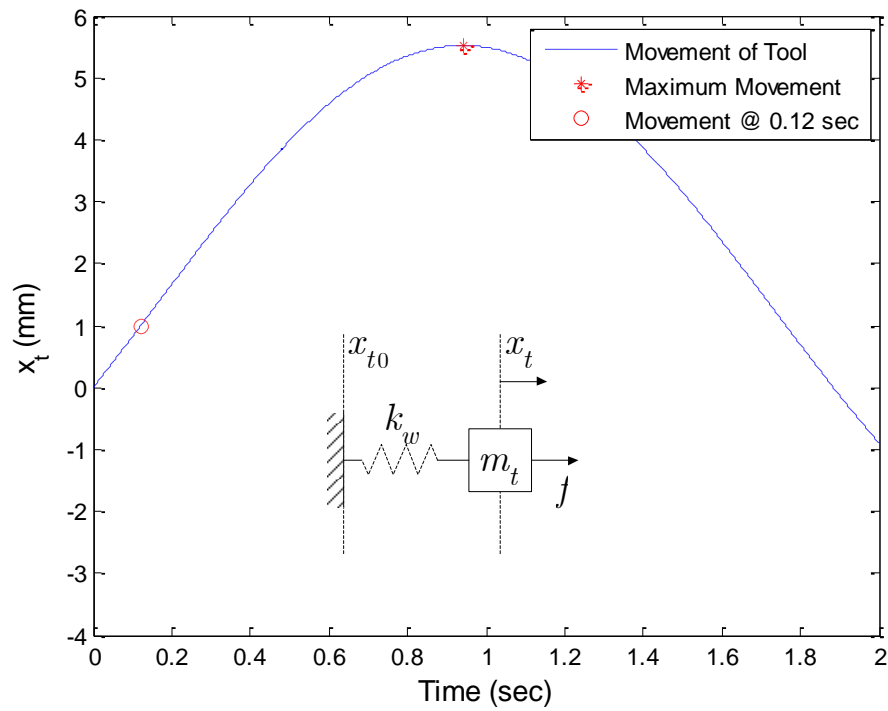
จากผลการจำลองข้างต้นดังแสดงในตารางที่ 5.2 พบว่าในแต่ละชุดค่าเริ่มต้นตำแหน่งของปลายแขนกลจากวิธีการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกำแพงเสมือนที่เวลา 0.120 วินาที และการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลและมือเมื่อชนกำแพงเสมือนที่เวลา 0.120 วินาที เมื่อใช้ค่าคงตัวสปริง 0.3 N/mm และ 0.8 N/mm มีค่าใกล้เคียงกันจึงสนใจวิธีการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกำแพงเสมือนที่เวลา 0.120 วินาทีมากกว่า เนื่องจากมีการคำนวณที่น้อยกว่า



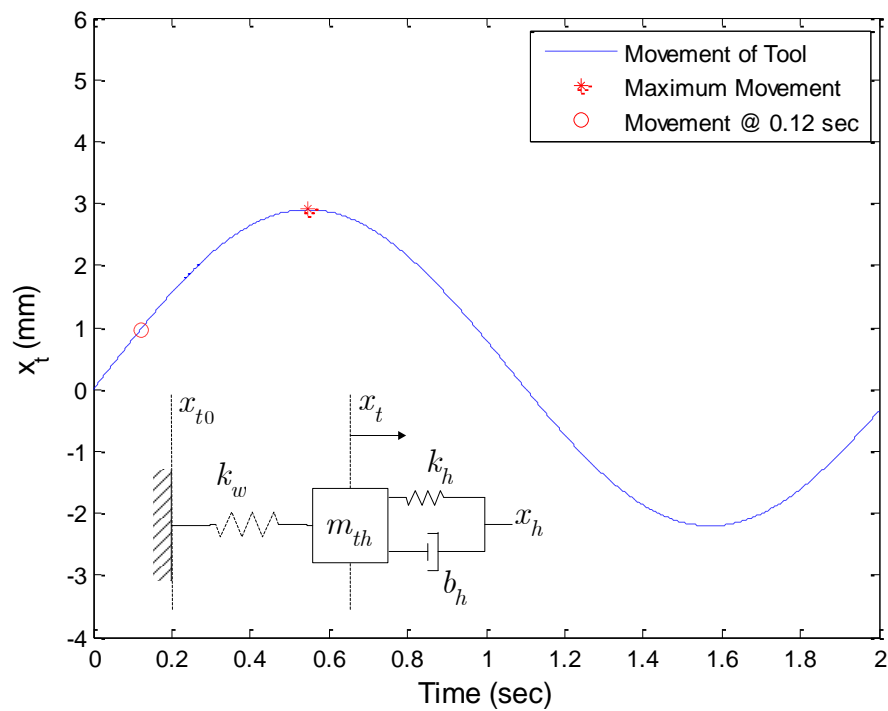
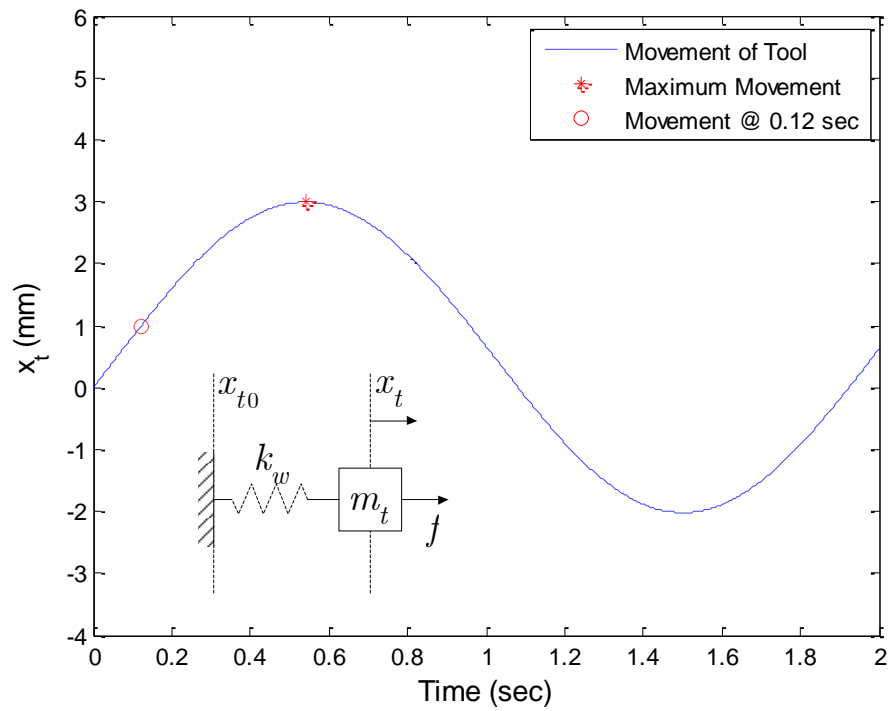
รูปที่ 5.7 ตำแหน่งของปลายแกนกลที่เวลาต่างๆ (เส้นประ), ระยะการเคลื่อนที่สูงสุด (เครื่องหมายดาว), ระยะการเคลื่อนที่ที่เวลา 0.120 วินาที (วงกลม) เมื่อค่าคงตัวสปริงของกำแพงเสมือนเป็น 0.3 N/mm และค่าเริ่มต้นการเคลื่อนที่ครั้งที่ 1



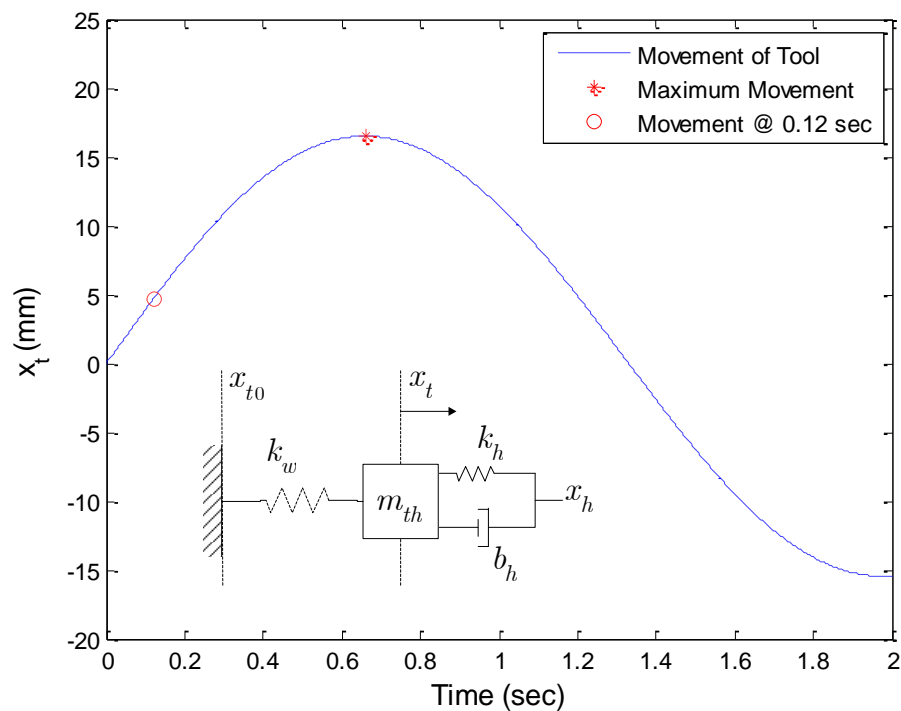
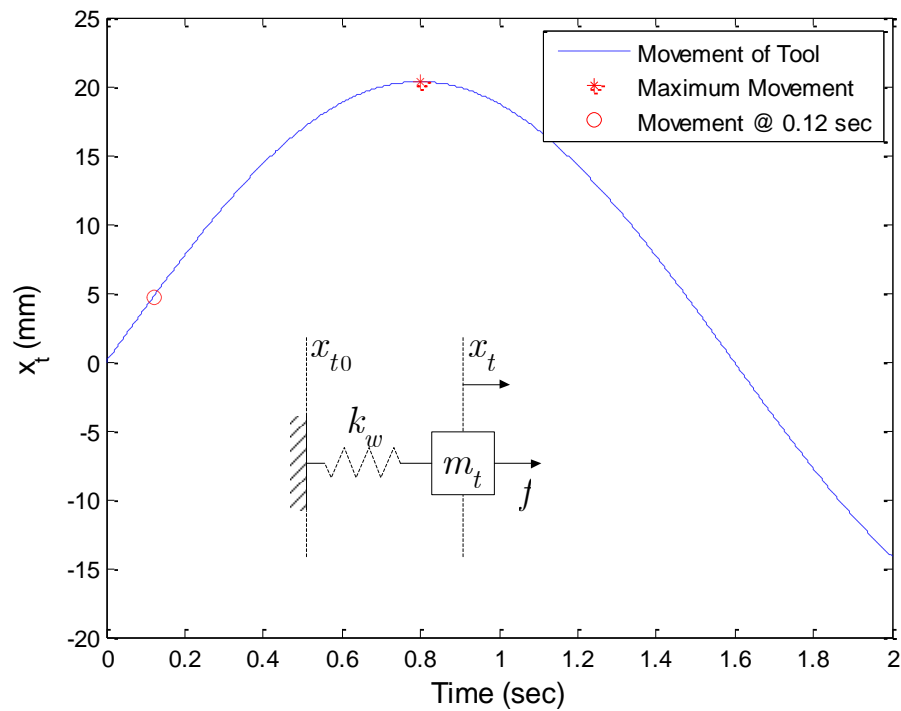
รูปที่ 5.8 ตำแหน่งของปลายแขนกลที่เวลาต่างๆ (เส้นประ), ระยะการเคลื่อนที่สูงสุด (เครื่องหมายดาว), ระยะการเคลื่อนที่ที่เวลา 0.120 วินาที (วงกลม) เมื่อค่าคงตัวสปริงของกำแพงเสมือนเป็น 0.8 N/mm และค่าเริ่มต้นการเคลื่อนที่ครั้งที่ 1



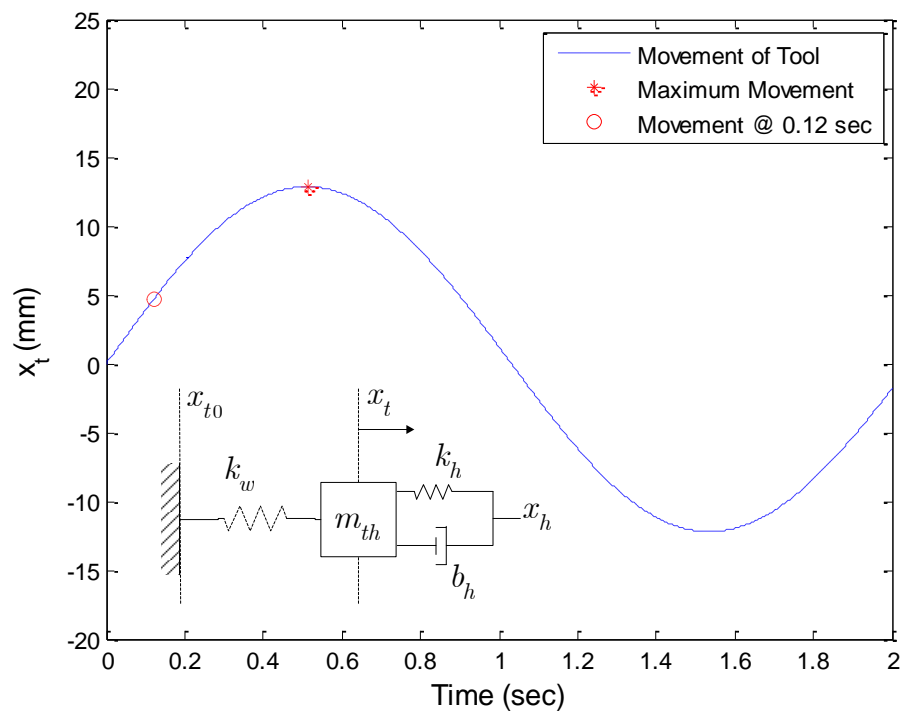
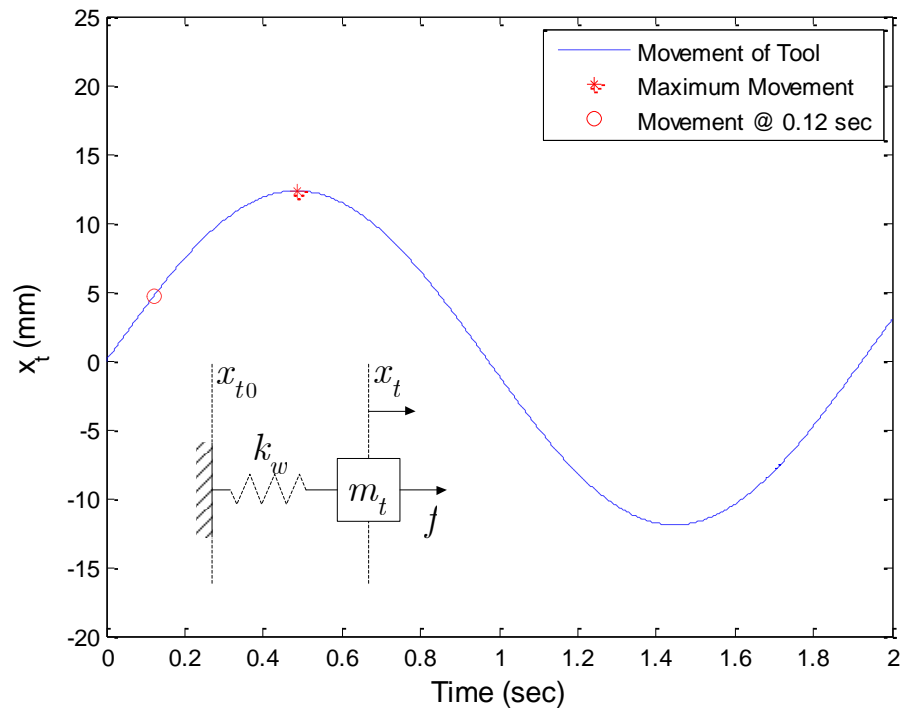
รูปที่ 5.9 ตำแหน่งของปลายแกนกลที่เวลาต่างๆ (เส้นประ), ระยะการเคลื่อนที่สูงสุด (เครื่องหมายดาว), ระยะการเคลื่อนที่ที่เวลา 0.120 วินาที (วงกลม) เมื่อค่าคงตัวสปริงของกำแพงเสมือนเป็น 0.3 N/mm และค่าเริ่มต้นการเคลื่อนที่ครั้งที่ 2



รูปที่ 5.10 ตำแหน่งของปลายแขนกลที่เวลาต่างๆ (เส้นประ), ระยะการเคลื่อนที่สูงสุด (เครื่องหมายดาว), ระยะการเคลื่อนที่ที่เวลา 0.120 วินาที (วงกลม) เมื่อค่าคงตัวสปริงของกำแพงเสมือนเป็น 0.8 N/mm และค่าเริ่มต้นการเคลื่อนที่ครั้งที่ 2



รูปที่ 5.11 ตำแหน่งของปลายแขนกลที่เวลาต่างๆ (เส้นประ), ระยะการเคลื่อนที่สูงสุด (เครื่องหมายดาว), ระยะการเคลื่อนที่ที่เวลา 0.120 วินาที (วงกลม) เมื่อค่าคงตัวสปริงของกำแพงเสมือนเป็น 0.3 N/mm และค่าเริ่มต้นการเคลื่อนที่ครั้งที่ 3



รูปที่ 5.12 ตำแหน่งของปลายแขนกลที่เวลาต่างๆ (เส้นประ), ระยะการเคลื่อนที่สูงสุด (เครื่องหมายดาว), ระยะการเคลื่อนที่ที่เวลา 0.120 วินาที (วงกลม) เมื่อค่าคงตัวสปริงของกำแพงเสมือนเป็น 0.8 N/mm และค่าเริ่มต้นการเคลื่อนที่ครั้งที่ 3

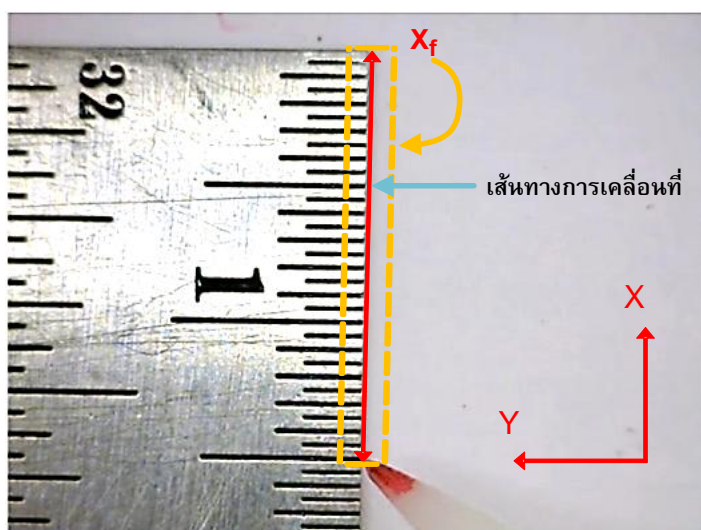
การทดลองที่ 3 : การทดลองเมื่อเทียบค่าพารามิเตอร์ของกำแพงเสมือน

การทดลองนี้เป็นการหาค่าพารามิเตอร์ของกำแพงเสมือนที่เหมาะสม โดยใช้ภาพการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลตามดั่งรูปที่ 5.13 จากกล้องที่ติดตั้งอยู่ในทิศทางขนานกับแกน Z ของแขนกลตามดั่งรูปที่ 5.5 เมื่อพิจารณาในระนาบ XY จะมีขอบเขตบริเวณที่ห้ามเข้าถึงในแกน X กว้าง 15 mm แกน Y กว้าง 2 mm ดั่งรูปที่ 5.14 (ก) และมีลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดด้านละ 2 mm ในระนาบ YZ ดั่งรูปที่ 5.14 (ข)

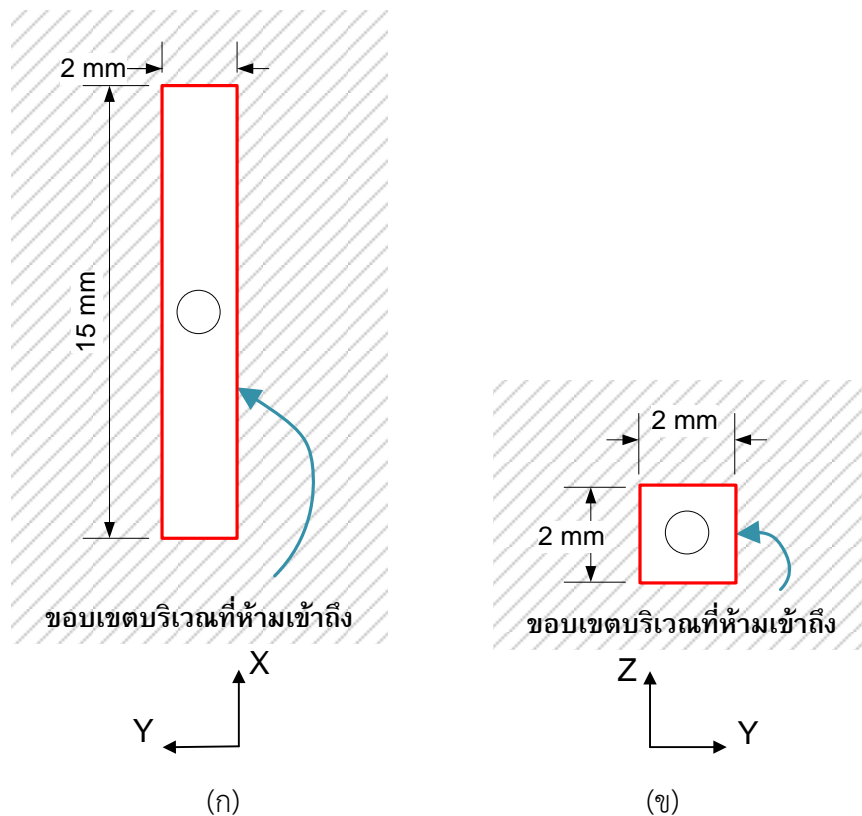
การทดลองนี้แบ่งกำแพงเสมือนที่ทดลองออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

1. กลุ่มกำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกำแพงเสมือนที่เวลา 0.120 วินาที และมีค่าคงตัวสปริง (k_w) แตกต่างกันดังต่อไปนี้
 - ค่าคงตัวสปริง 0.3 N/mm
 - ค่าคงตัวสปริง 0.4 N/mm
 - ค่าคงตัวสปริง 0.5 N/mm
 - ค่าคงตัวสปริง 0.6 N/mm
 - ค่าคงตัวสปริง 0.7 N/mm
2. กลุ่มกำแพงเสมือนแบบสมการซิกมอยด์ที่ $\gamma = 9$ และมีขนาดแรงสูงสุดของกำแพงเสมือน (a) แตกต่างกันดังต่อไปนี้
 - ขนาดแรงสูงสุดของกำแพงเสมือน 1.5 N
 - ขนาดแรงสูงสุดของกำแพงเสมือน 2 N
 - ขนาดแรงสูงสุดของกำแพงเสมือน 3 N

ให้ผู้ทดลองเคลื่อนที่ตามแนวแกน X ดั่งรูปที่ 5.13 จากตำแหน่ง 15 mm ถึง 0 mm ของไม้บรรทัด โดยเคลื่อนที่ไปและกลับ 5 ครั้ง เมื่อรู้สึกถึงแรงของกำแพงในทิศทางใดให้ปรับการเคลื่อนที่ในทิศทางนั้นเพื่อรักษาตำแหน่งการเคลื่อนที่ไว้ และทำการสอบถามความรู้สึกและความพึงพอใจของผู้ทดลองหลังการทดลอง



รูปที่ 5.13 ภาพปลายแขนกลจากกล้องและเส้นทางการเคลื่อนที่ปลายแขนกลในการทดลองที่ 3



รูปที่ 5.14 แผนภาพลักษณะขอบเขตของบริเวณที่ห้ามเข้าถึงของการทดลองที่ 3
 (ก) มุมมองในระนาบ XY
 (ข) มุมมองในระนาบ YZ

ผลการทดลองที่ 3

ผู้ทดลองที่ 1

กลุ่มกำลังเหมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกำลังเหมือนที่เวลา 0.120 วินาที

- ค่าคงตัวสปริง 0.3 N/mm

บางครั้งไม่แน่ใจในทิศทางของแรงสะท้อนกลับของปลายแขนกล เมื่อเคลื่อนที่เร็วขึ้นสามารถรู้สึกถึงแรงได้มากกว่า

- ค่าคงตัวสปริง 0.4 N/mm

รู้สึกว่าทิศทางและขนาดของแรงชัดเจนกว่า 0.3 N/mm สามารถเคลื่อนที่ตามแนวขอบเขตของกำลังเหมือนได้ค่อนข้างเร็ว ไม่เกิดการกระเด็นของตัวแขนกลนำ นอกจากตั้งใจผลักต้านกับกำลัง

- ค่าคงตัวสปริง 0.5 N/mm

ในแกน Z รู้สึกแรงเยอะกว่าค่าคงตัวสปริง 0.4 N/mm แต่ไม่รู้สึกแข็งจนเกินไป ทิศทางของแรงชัดเจนขึ้นกว่า 0.4 N/mm มีการกระเด็นของแขนกลนำ

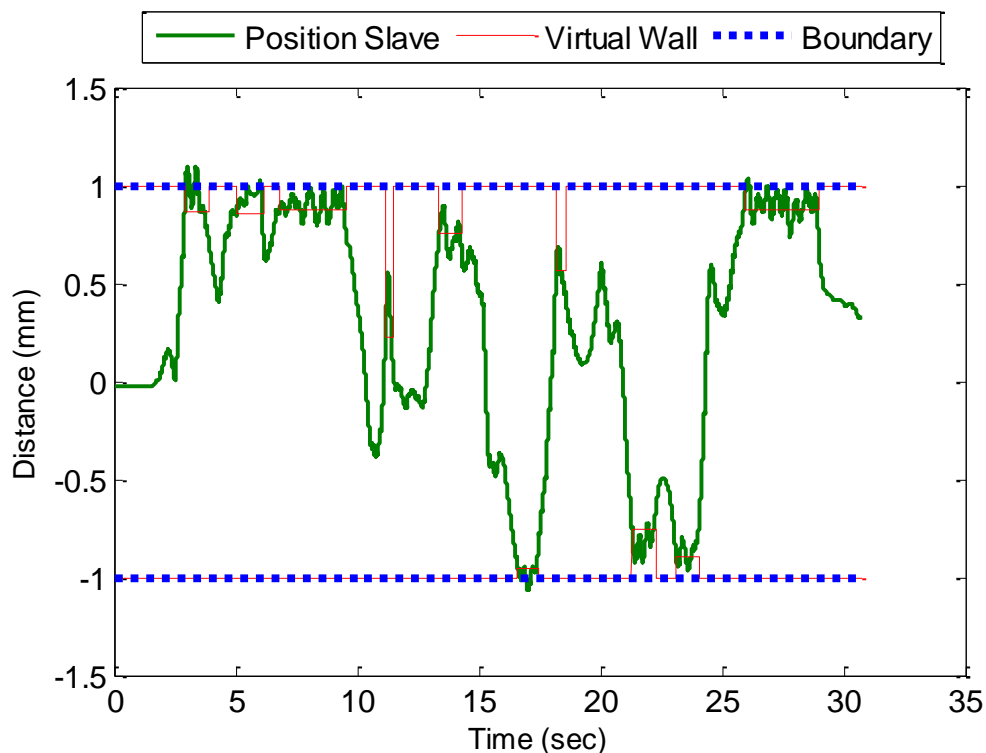
- ค่าคงตัวสปริง 0.6 N/mm

รู้สึกว่าการเคลื่อนที่ใกล้เคียงกับ 0.5 N/mm แต่การสะท้อนใกล้เคียงกับค่าคงตัวสปริง 0.7 N/mm ความแข็งแรงอยู่ในระดับที่สามารถฝืนฝ่าได้

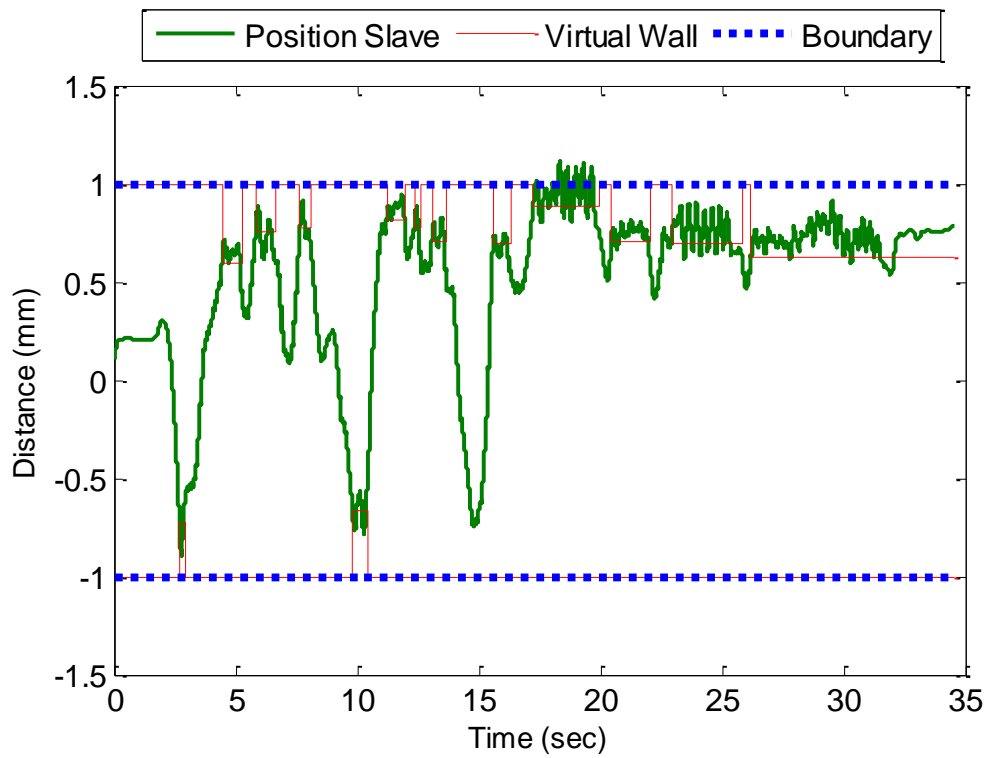
- ค่าคงตัวสปริง 0.7 N/mm

รู้สึกว่าการต้านเยอะขึ้น ค่อนข้างแข็งเมื่อเทียบกับค่าคงตัวสปริง 0.5 N/mm ซึ่งรู้สึกอ่อนๆบ้าง การเคลื่อนที่แบบซ้ารู้สึกถึงแรงได้ชัดเจน เมื่อเคลื่อนที่ตามแนวขอบเขตของกำแพงเสมือนแบบค่อนข้างเร็วพบว่าเกิดการกระเด็นมากคล้ายการปาก้อนหินสะท้อนผิวน้ำ

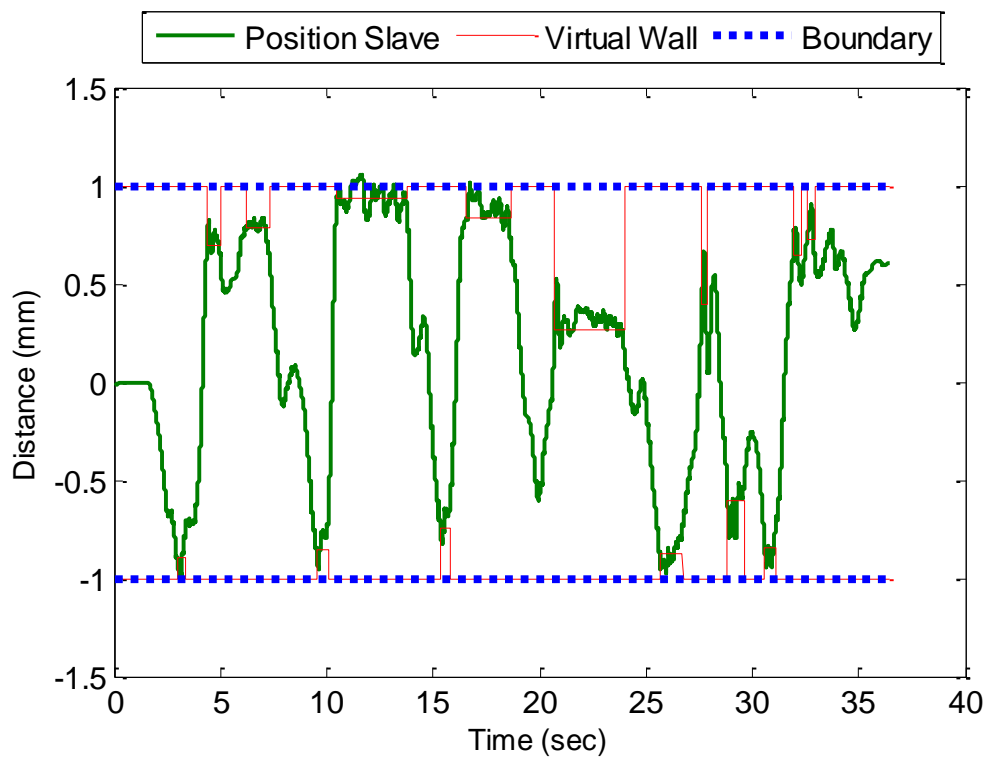
เนื่องจากความลำบากในการระบุตำแหน่งที่แน่นอนในแนวแกน Z ทำให้เกิดการล้าแนวขอบเขตห้ามเข้าถึงในพื้นที่แคบๆได้ง่าย ขณะที่การเคลื่อนที่ในแนวแกน X และ Y สามารถควบคุมให้อยู่ในขอบเขตได้จากการมองผ่านกล้อง ดังนั้นจึงแสดงผลการทดลองครั้งที่เกิดการล้าแนวเข้าสู่บริเวณห้ามเข้าถึงที่มากที่สุดในแกน Z ของแต่ละค่าคงตัวสปริงดังรูปที่ 5.15 ถึงรูปที่ 5.19 โดยตำแหน่งปลายแขนกลในแกน Z มีแนวโน้มเกิดการล้าแนวที่น้อยลงเมื่อค่าคงตัวสปริงมากขึ้น



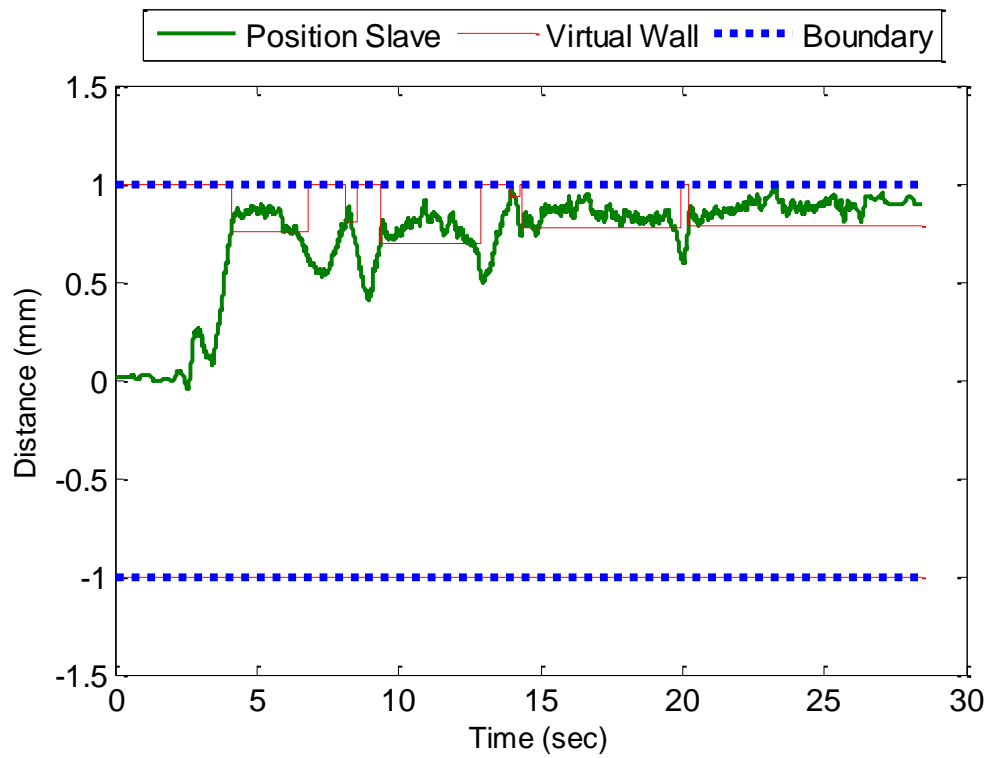
รูปที่ 5.15 ตำแหน่งของปลายแขนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 1 เมื่อค่าคงตัวสปริง 0.3 N/mm



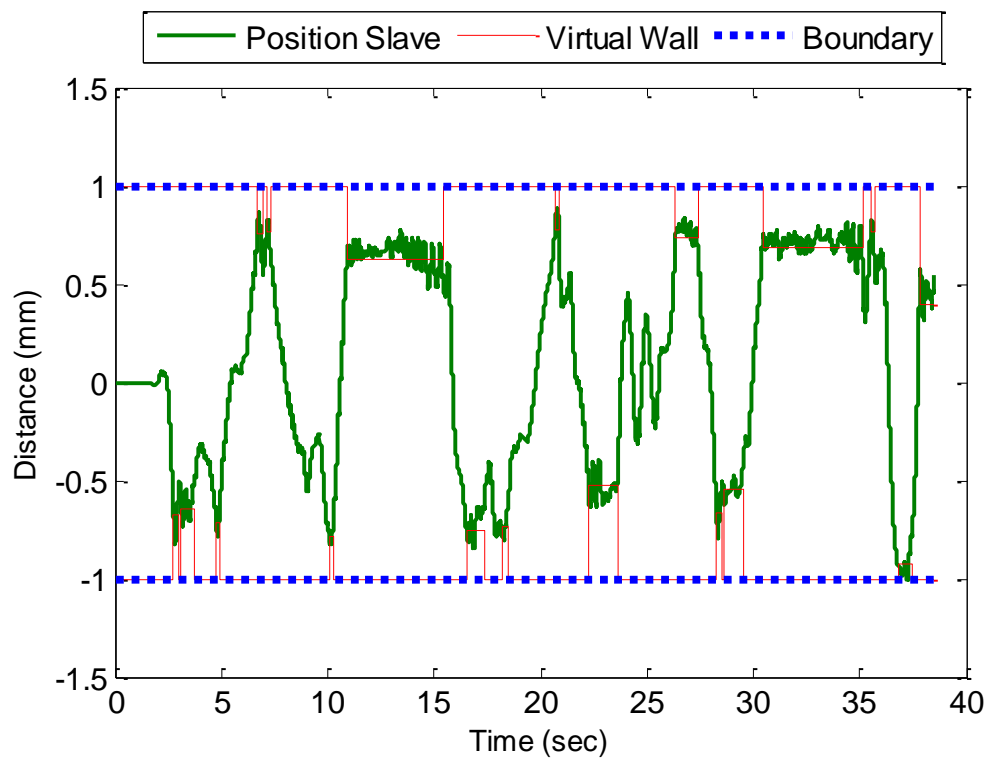
รูปที่ 5.16 ตำแหน่งของปลายแขนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 1 เมื่อค่าคงตัวสปริง 0.4 N/mm



รูปที่ 5.17 ตำแหน่งของปลายแขนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 1 เมื่อค่าคงตัวสปริง 0.5 N/mm



รูปที่ 5.18 ตำแหน่งของปลายแขนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 1 เมื่อค่าคงตัวสปริง 0.6 N/mm



รูปที่ 5.19 ตำแหน่งของปลายแขนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 1 เมื่อค่าคงตัวสปริง 0.7 N/mm

กลุ่มกำแพงเสมือนแบบสมการชิกมอยด์ที่ $\gamma = 9$

- สมการชิกมอยด์ โดย $a = 1.5$, $\gamma = 9$

คิดว่าขนาดแรงกำลังดี ไม่รุนแรงเกินไป ไม่ต้องฝืน แรงต้านในแกน X มีเบาๆ พอผลักได้ เมื่อเคลื่อนที่เร็วมีแรงสะท้อนมาก เหมาะกับใช้ทำงานช้าๆ

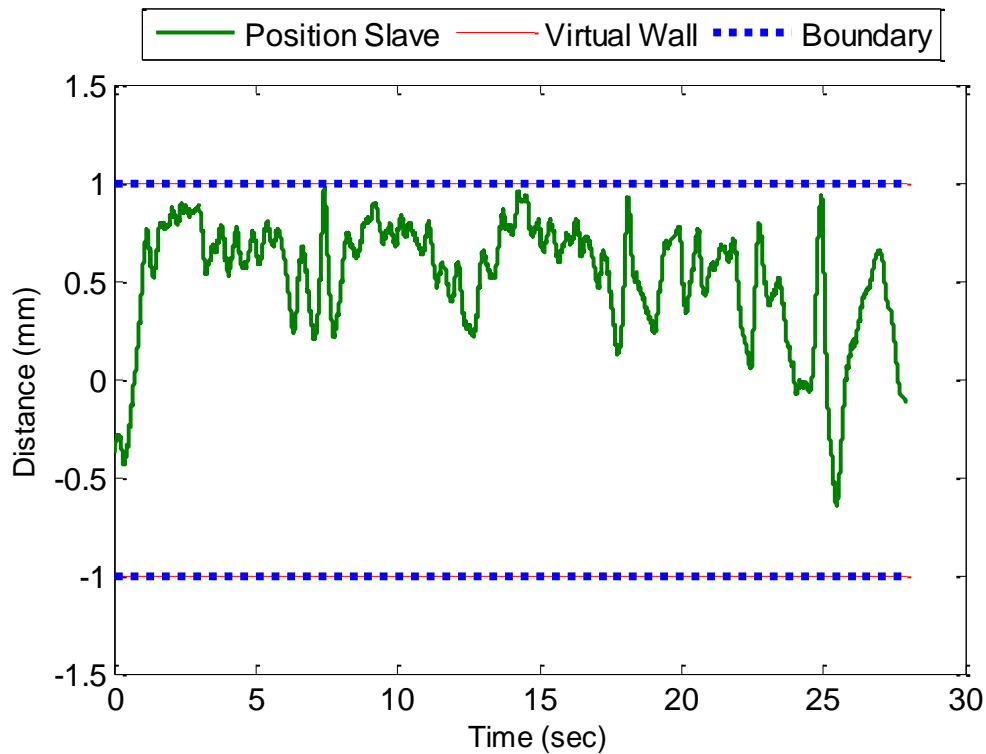
- สมการชิกมอยด์ โดย $a = 2$, $\gamma = 9$

ขนาดของแรงมากกว่าชนิดสมการชิกมอยด์แบบ $a = 1.5$ แต่คิดว่าแรงเกินไป ถ้าผลักเข้าเกิดการสะท้อนค่อนข้างแรงแรงต้านในแกน X ค่อนข้างมาก

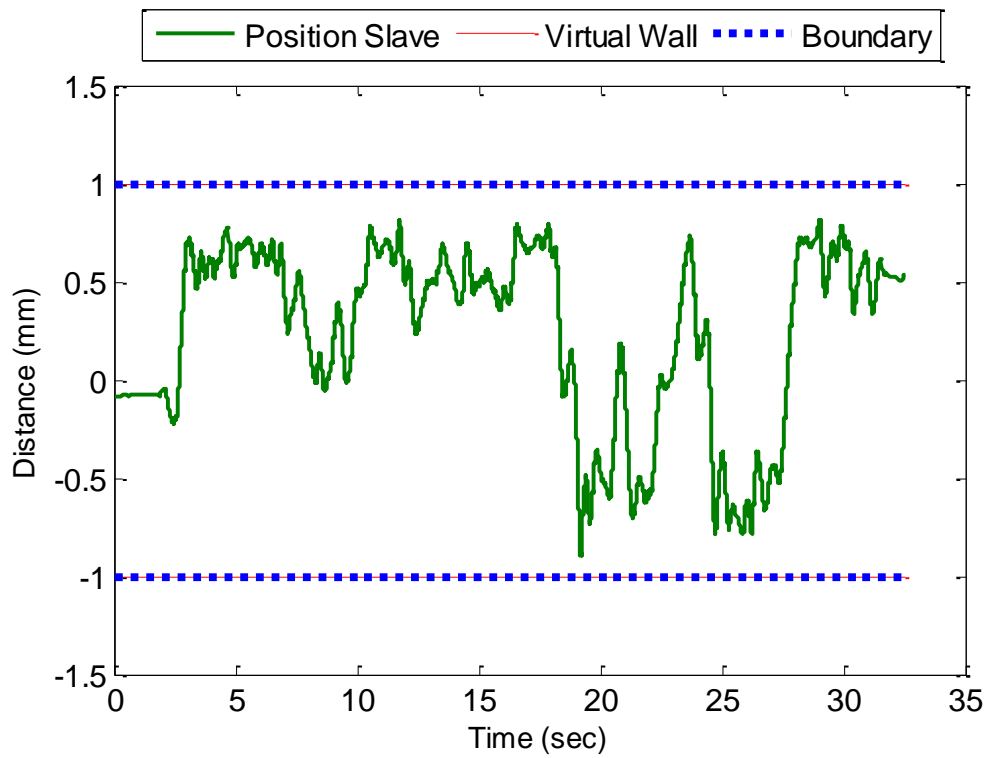
- สมการชิกมอยด์ โดย $a = 3$, $\gamma = 9$

ขนาดของแรงมากกว่าค่าคงตัวสปริง 0.4 N/mm ทิศทางของแรงชัดเจน ขนาดของแรงมากกว่าชนิดสมการชิกมอยด์แบบ $a = 2$ ในทุกแกน เสียพื้นที่การทำงานบริเวณใกล้ขอบเขตพื้นที่ห้ามเข้าถึงไปส่วนหนึ่ง และมีแรงต้านในแกน X บริเวณใกล้ขอบเขตพื้นที่ห้ามเข้าถึงมาก

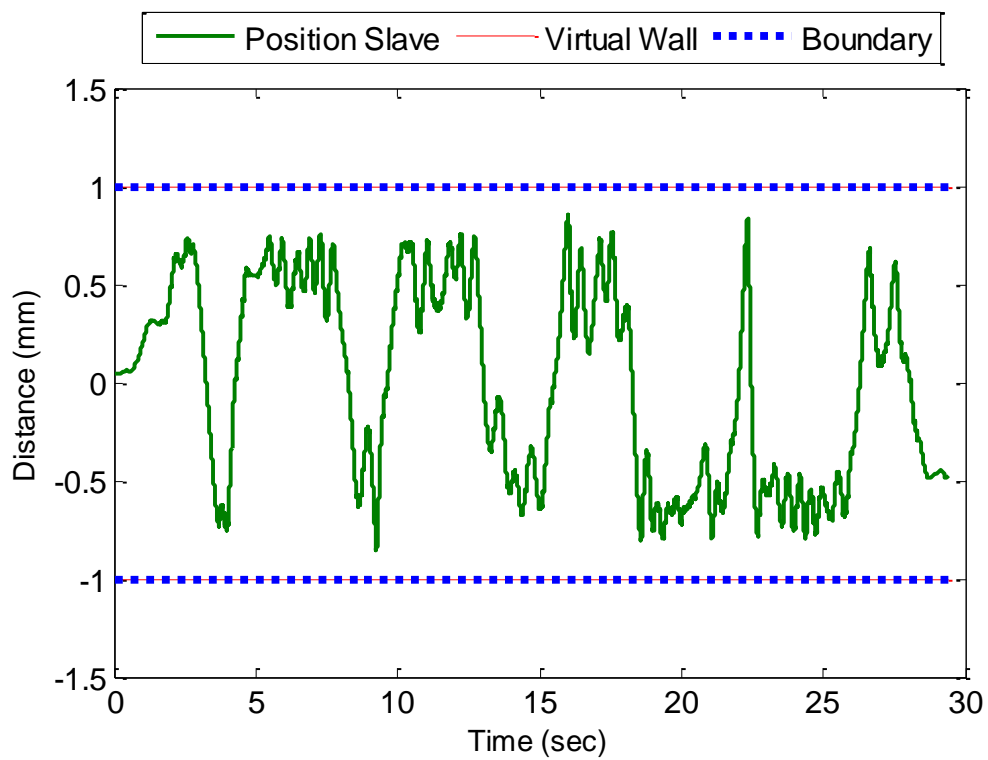
สำหรับรูปแบบสมการชิกมอยด์ ตำแหน่งของปลายแขนกลในแกน Z จะเข้าใกล้ขอบเขตห้ามเข้าถึงได้น้อยลงเมื่อ a มากขึ้นดังรูปที่ 5.20 ถึงรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.20 ตำแหน่งของปลายแขนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 1 เมื่อ $a = 1.5$ และ $\gamma = 9$



รูปที่ 5.21 ตำแหน่งของปลายแขนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 1 เมื่อ $a = 2$ และ $\gamma = 9$



รูปที่ 5.22 ตำแหน่งของปลายแขนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 1 เมื่อ $a = 3$ และ $\gamma = 9$

เมื่อเปรียบเทียบภายในกลุ่มกำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกล เมื่อชนกำแพงเสมือนที่เวลา 0.120 วินาที ผู้ทดลองที่ 1 พอใจค่าคงตัวสปริง 0.4 N/mm เนื่องจากไม่เกิดการกระเด็นของตัวแขนกลนำเมื่อเคลื่อนที่ตามแนวขอบเขตของกำแพงเสมือน

เมื่อเปรียบเทียบภายในกลุ่มสมการซิกมอยด์ ผู้ทดลองที่ 1 พอใจแบบ $a = 1.5$, $\gamma = 9$ มากที่สุดเนื่องจากขนาดของแรงน้อยที่สุด

เมื่อเปรียบเทียบกำแพงเสมือนทั้งหมดผู้ทดลองที่ 1 พอใจกำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกำแพงเสมือนที่เวลา 0.120 วินาที ที่ค่าคงตัวสปริง 0.4 N/mm มากที่สุด เนื่องจากขนาดของแรงไม่มากจนเกินไป และเพียงพอให้สามารถรู้ทิศทางได้

ผู้ทดลองที่ 2

กลุ่มกำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกำแพงเสมือนที่เวลา 0.120 วินาที

- ค่าคงตัวสปริง 0.3 N/mm

รู้สึกทิศทางของแรงชัดเจน มีการติดกลับเล็กน้อย แรงไม่มาก สามารถรู้ได้ว่าการชนเกิดขึ้น เมื่อเคลื่อนที่ตามขอบเขตของกำแพงเสมือนรู้สึกแรงไม่รุนแรงสามารถเคลื่อนที่เรียดแนวขอบเขตของกำแพงเสมือนได้ มีการผลึกกลับเบาๆ

- ค่าคงตัวสปริง 0.4 N/mm

ขนาดแรงพอให้รู้สึกได้ และมีขนาดมากกว่าค่าคงตัวสปริง 0.3 N/mm เล็กน้อย แยกความแตกต่างค่อนข้างลำบาก มีการกระเด็นเล็กน้อย สามารถเคลื่อนที่เรียดตามแนวขอบเขตของกำแพงเสมือนเบาๆได้

- ค่าคงตัวสปริง 0.5 N/mm

รู้สึกถึงแรงได้ชัดเจน สามารถปรับตำแหน่งการเคลื่อนที่ได้ มีการกระเด็นบ้าง เมื่อเคลื่อนที่เรียดตามขอบเขตของกำแพงเสมือนมีการกระเด็นออก

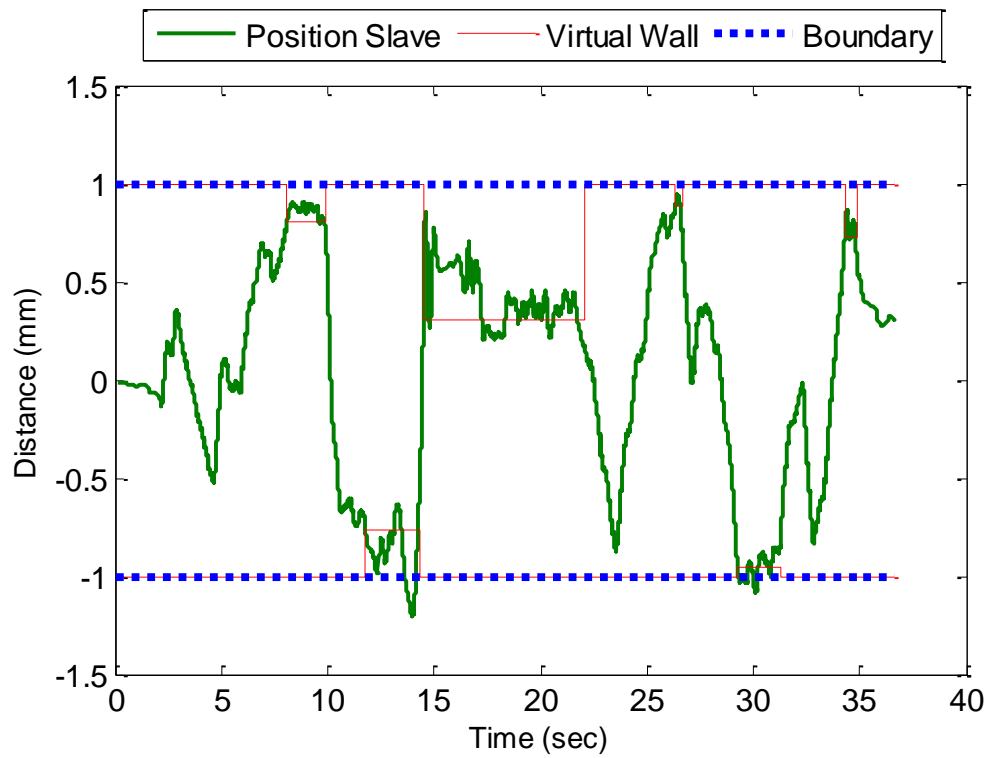
- ค่าคงตัวสปริง 0.6 N/mm

เมื่อวิ่งเรียดขอบเขตของกำแพงเสมือนรู้สึกที่แรงสะท้อนกลับแรงพอสมควร

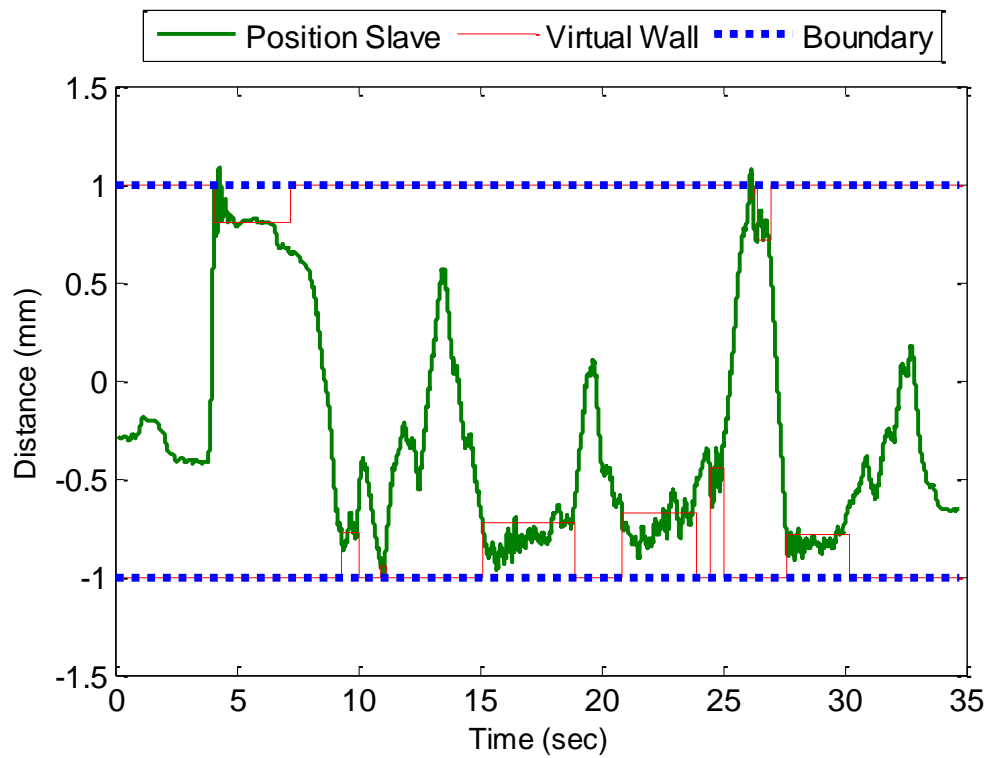
- ค่าคงตัวสปริง 0.7 N/mm

ขนาดของแรง และการกระเด็นใกล้เคียงกับค่าคงตัวสปริง 0.6 N/mm

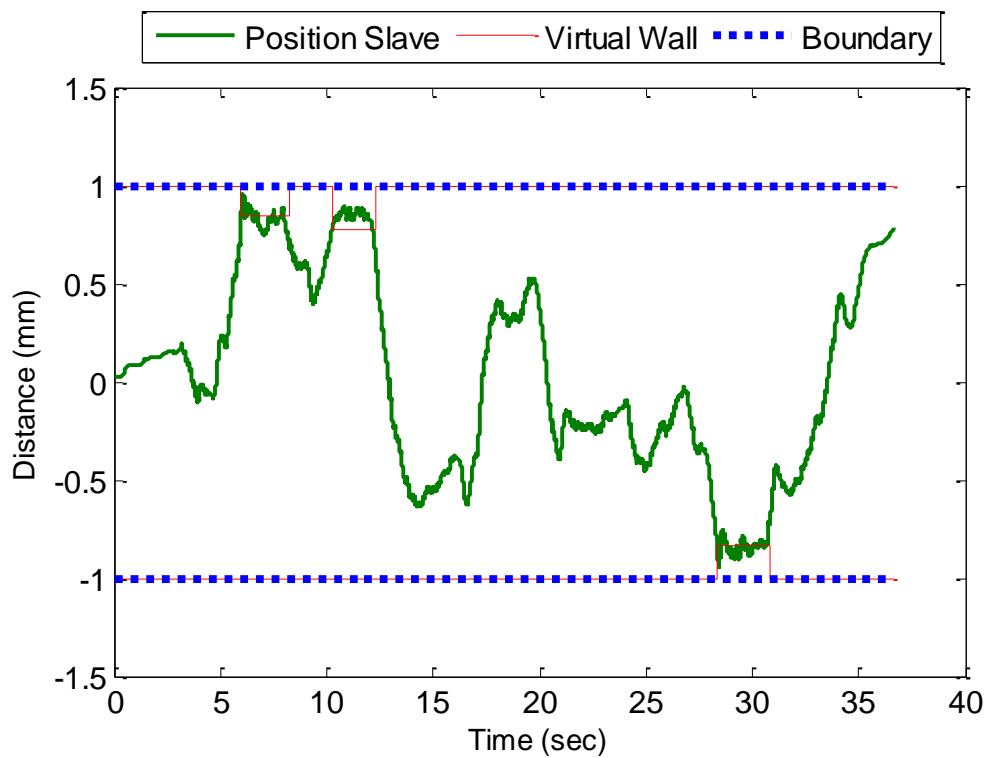
เนื่องจากความลำบากในการระบุตำแหน่งที่แน่นอนในแนวแกน Z ทำให้อาจเกิดการล้ำแนวขอบเขตห้ามเข้าถึงในพื้นที่แคบๆได้ง่าย ขณะที่การเคลื่อนที่ในแนวแกน X และ Y สามารถควบคุมให้อยู่ในขอบเขตได้จากการมองผ่านกล้อง ดังนั้นจึงแสดงผลการทดลองครั้งที่เกิดการล้ำแนวเข้าสู่บริเวณห้ามเข้าถึงที่มากที่สุดในแกน Z ของแต่ละค่าคงตัวสปริงดังรูปที่ 5.23 ถึงรูปที่ 5.27 โดยตำแหน่งปลายแขนกลในแกน Z มีแนวโน้มเกิดการล้ำแนวที่น้อยลงเมื่อค่าคงตัวสปริงมากขึ้น



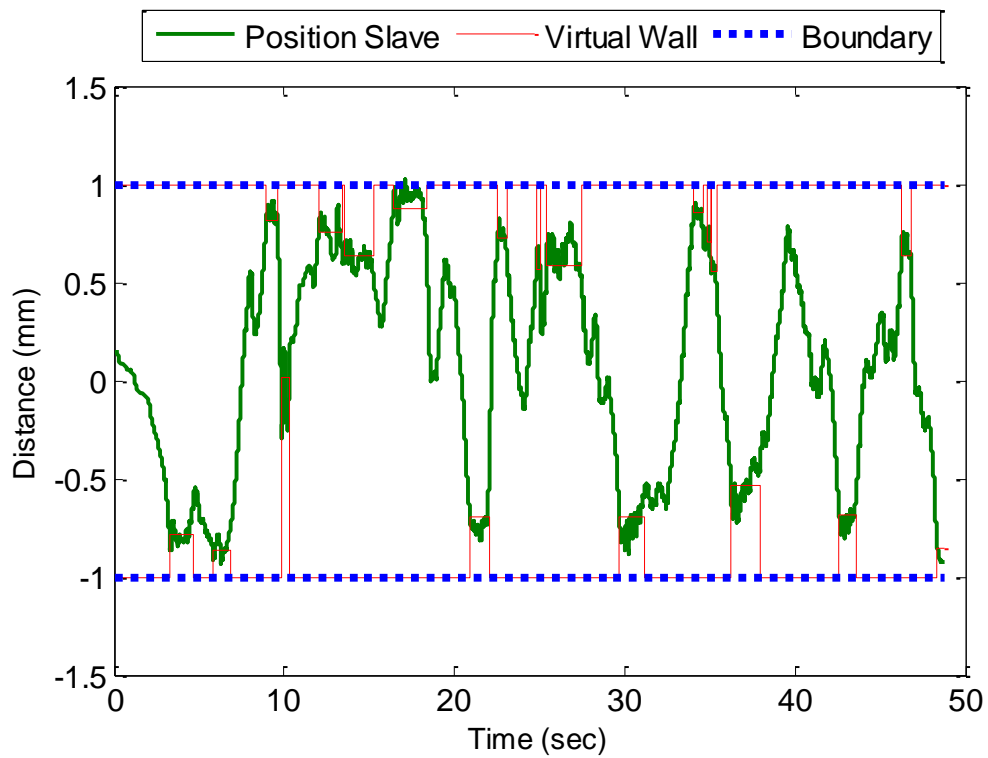
รูปที่ 5.23 ตำแหน่งของปลายแขนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 2 เมื่อค่าคงตัวสปริง 0.3 N/mm



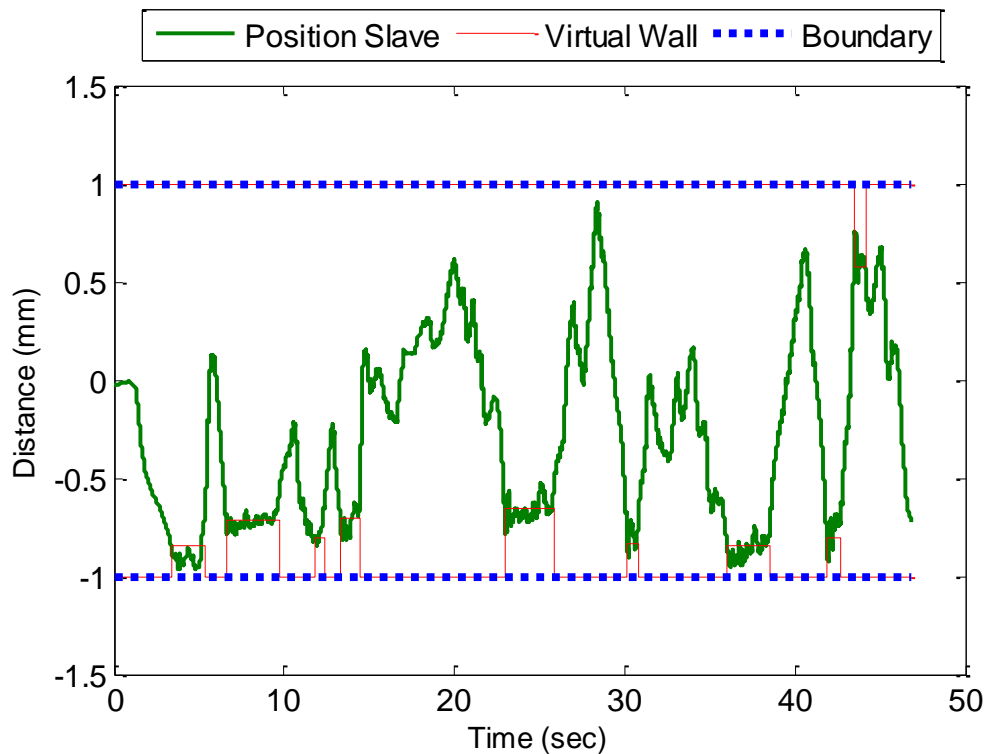
รูปที่ 5.24 ตำแหน่งของปลายแขนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 2 เมื่อค่าคงตัวสปริง 0.4 N/mm



รูปที่ 5.25 ตำแหน่งของปลายแกนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 2 เมื่อค่าคงตัวสปริง 0.5 N/mm



รูปที่ 5.26 ตำแหน่งของปลายแกนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 2 เมื่อค่าคงตัวสปริง 0.6 N/mm



รูปที่ 5.27 ตำแหน่งของปลายแขนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 2 เมื่อค่าคงตัวสปริง 0.7 N/mm

กลุ่มค่าพ่วงเสมือนแบบสมการซิกมอยด์ที่ $\gamma = 9$

- สมการซิกมอยด์ โดย $a = 1.5$, $\gamma = 9$

ชนแบบสบายๆ การสะท้อนกลับไม่รุนแรงแกน x มีแรงต้านบริเวณใกล้ขอบเขตบริเวณห้ามเข้าถึง

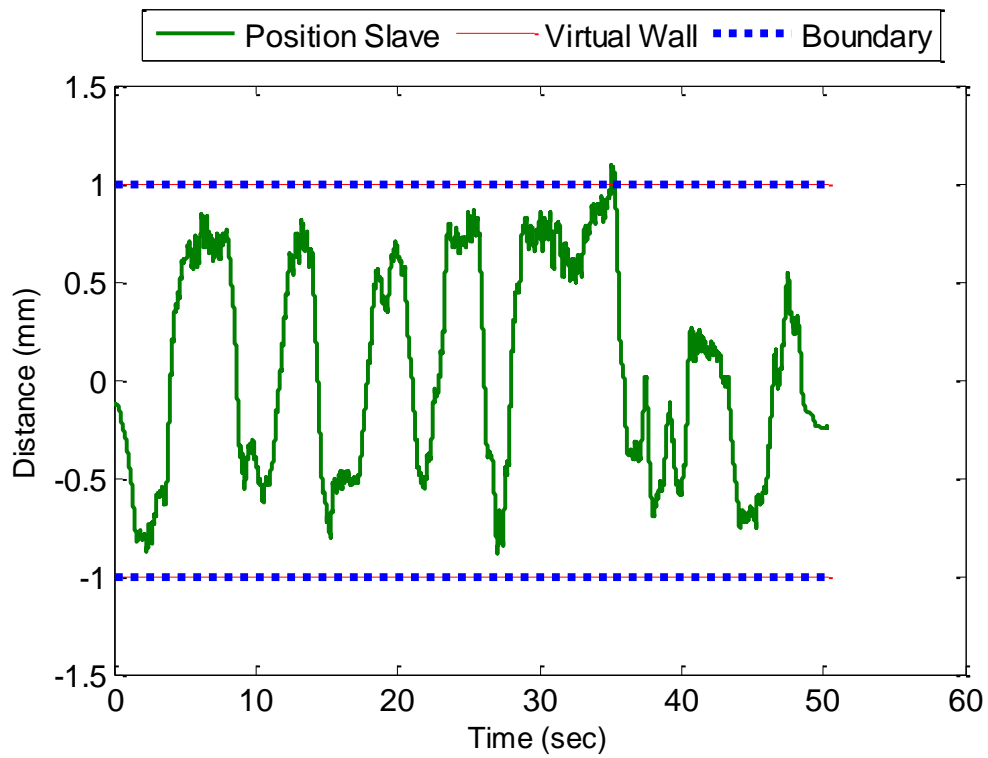
- สมการซิกมอยด์ โดย $a = 2$, $\gamma = 9$

สะท้อนกลับแรงกว่าสมการซิกมอยด์แบบ $a = 1.5$ มีแรงต้านบริเวณขอบเขตบริเวณห้ามเข้าถึง

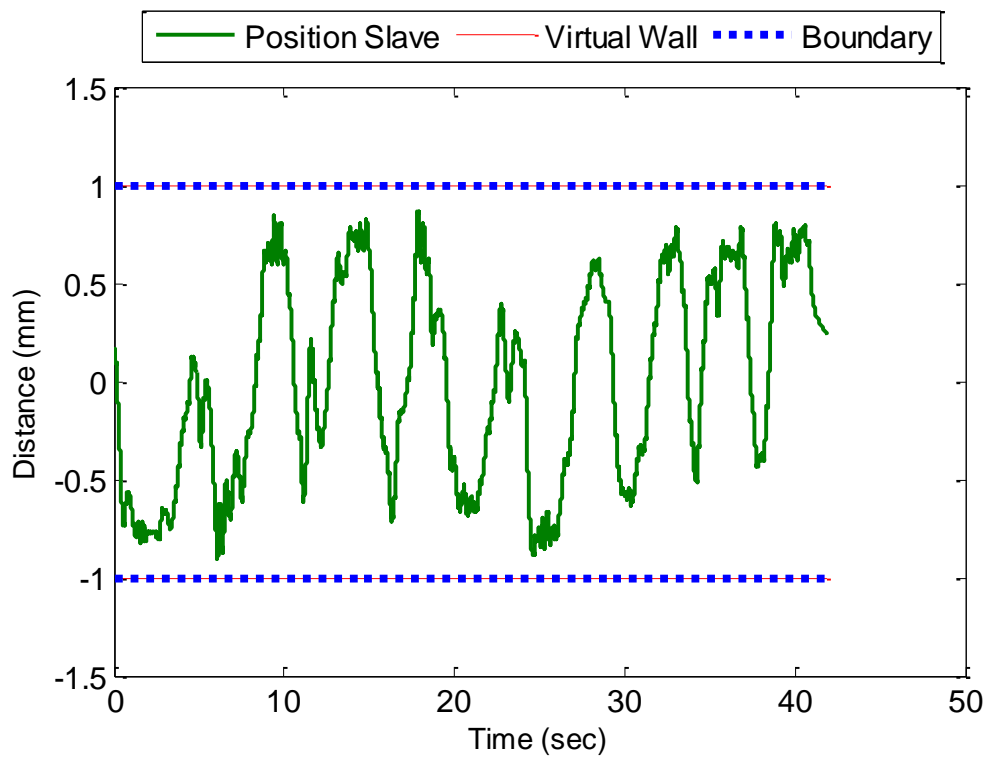
- สมการซิกมอยด์ โดย $a = 3$, $\gamma = 9$

ขนาดของแรงมากกว่าสมการซิกมอยด์แบบ $a = 1.5$ และ 2.0 ขนาดแรงชัดเจน ไม่เกิดการดีดกลับจากแรงของค่าพ่วง คล้ายการชนเบาๆ ไม่ใช่ค่าพ่วงแข็ง แกน x ด้านค่อนข้างมาก บริเวณขอบเขตของบริเวณห้ามเข้าถึง

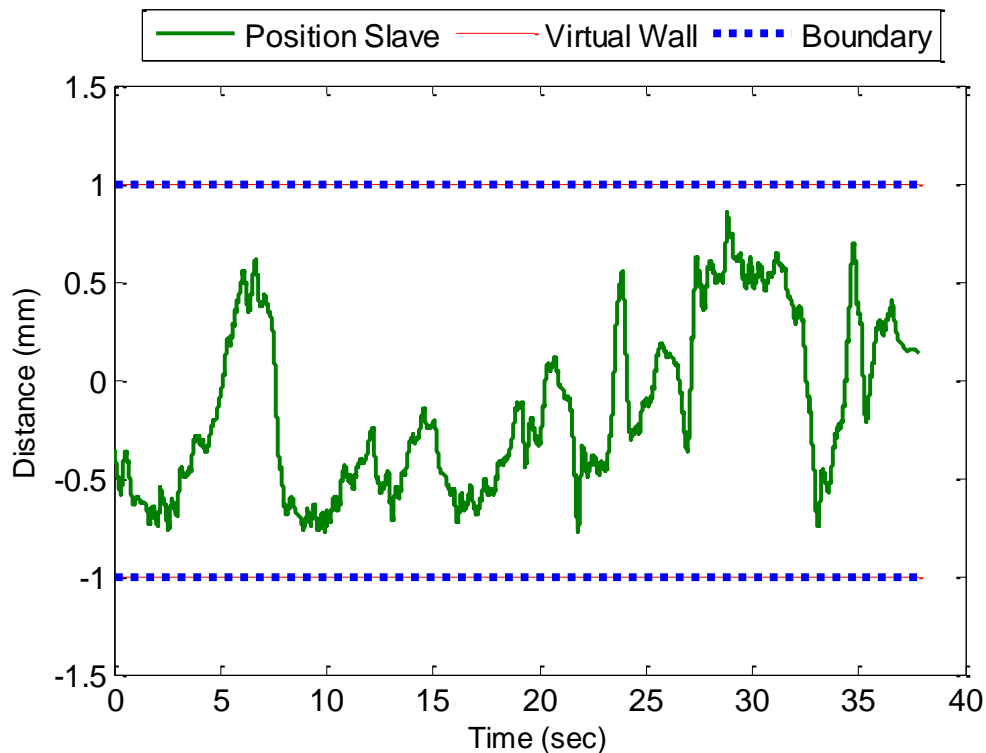
สำหรับรูปแบบสมการซิกมอยด์ ตำแหน่งของปลายแขนกลในแกน Z จะเข้าใกล้ขอบเขตห้ามเข้าถึงได้น้อยลงเมื่อ a มากขึ้นดังรูปที่ 5.28 ถึงรูปที่ 5.30 และสำหรับผู้ทดลองคนที่ 2 เกิดการล้าแนวขึ้นเล็กน้อยในกรณีที่ $a = 1.5$ ดังรูปที่ 5.28



รูปที่ 5.28 ตำแหน่งของปลายแขนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 2 เมื่อ $a = 1.5$ และ $\gamma = 9$



รูปที่ 5.29 ตำแหน่งของปลายแขนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 2 เมื่อ $a = 2$ และ $\gamma = 9$



รูปที่ 5.30 ตำแหน่งของปลายแขนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 2 เมื่อ $a = 3$ และ $\gamma = 9$

เมื่อเปรียบเทียบภายในกลุ่มกำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกำแพงเสมือนที่เวลา 0.120 วินาที ผู้ทดลองที่ 2 พอใจค่าคงตัวสปริง 0.3 N/mm มากที่สุดเนื่องจากการกระตังน้อย ไม่รุนแรง เมื่อรู้สึกแล้วสามารถปรับทิศทางได้

เมื่อเปรียบเทียบภายในกลุ่มสมการชิกมอยด์ ผู้ทดลองที่ 2 พอใจแบบ $a = 2$, $\gamma = 9$ มากที่สุดเนื่องจากรู้สึกว่าขนาดของแรงเหมาะสม

เมื่อเปรียบเทียบกำแพงเสมือนทั้งหมดผู้ทดลองที่ 2 พอใจกำแพงเสมือนแบบสมการชิกมอยด์ที่ $a = 2$ มากที่สุด

ผู้ทดลองที่ 3

กลุ่มกำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกำแพงเสมือนที่เวลา 0.120 วินาที

- ค่าคงตัวสปริง 0.3 N/mm

แรงผลึกของกำแพงไม่แรงมาก สามารถรู้ทิศทางได้และเคลื่อนที่ถอยออกจากกำแพงได้ กระตังไม่มาก สามารถวิ่งเรียดตามแนวขอบเขตของกำแพงเสมือนได้

- ค่าคงตัวสปริง 0.4 N/mm

รู้สึกใกล้เคียงกับแบบค่าคงตัวสปริง 0.3 N/mm

- ค่าคงตัวสปริง 0.5 N/mm
ขนาดของแรงเนื่องจากกำแพงเสมือนมากกว่าแบบค่าคงตัวสปริง 0.3 N/mm และ 0.4 N/mm สามารถเคลื่อนที่แบบช้าๆเรียดตามขอบเขตของกำแพงเสมือนได้ ถ้าเคลื่อนที่เร็วจะเกิดสั่นมาก โดยเฉพาะบริเวณขอบเขตของบริเวณที่ห้ามเข้าถึง

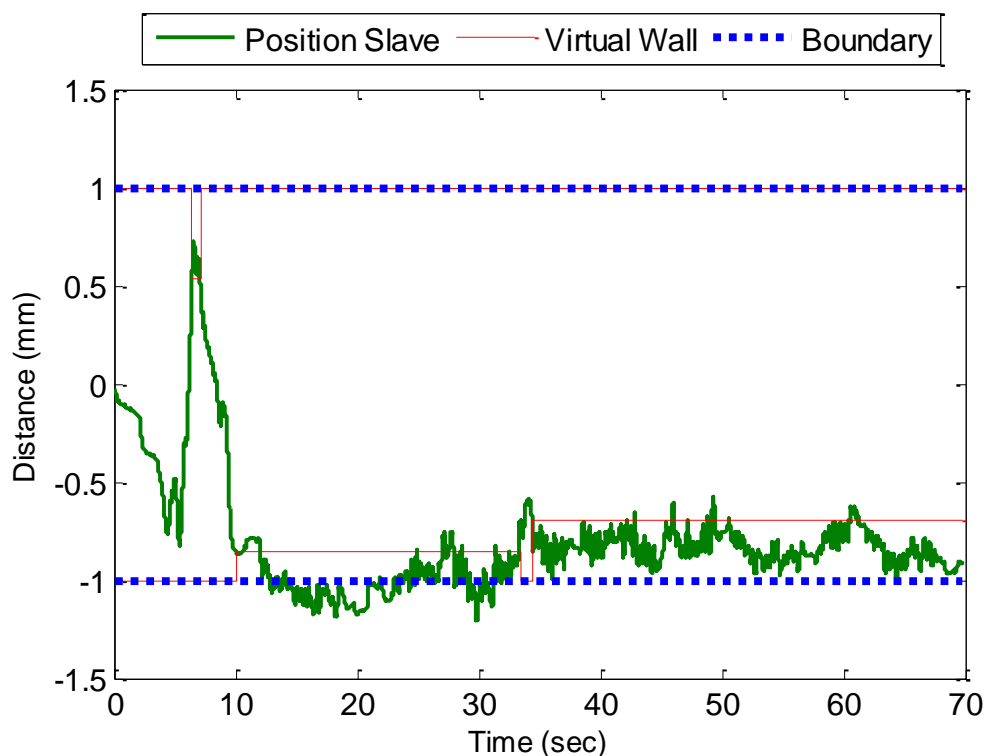
- ค่าคงตัวสปริง 0.6 N/mm

ขนาดของแรงที่ชนมากกว่าแบบค่าคงตัวสปริง 0.5 N/mm

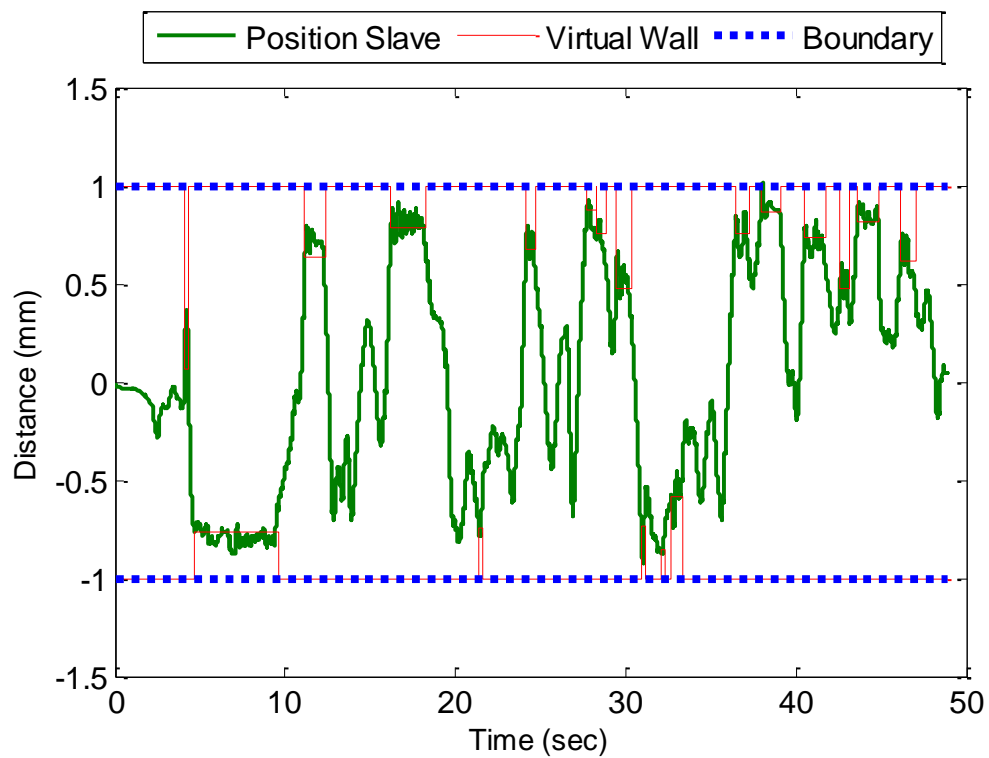
- ค่าคงตัวสปริง 0.7 N/mm

ขนาดของแรงที่ชนมากกว่าแบบค่าคงตัวสปริง 0.5 N/mm การกระเด็นใกล้เคียงกับแบบค่าคงตัวสปริง 0.6 N/mm

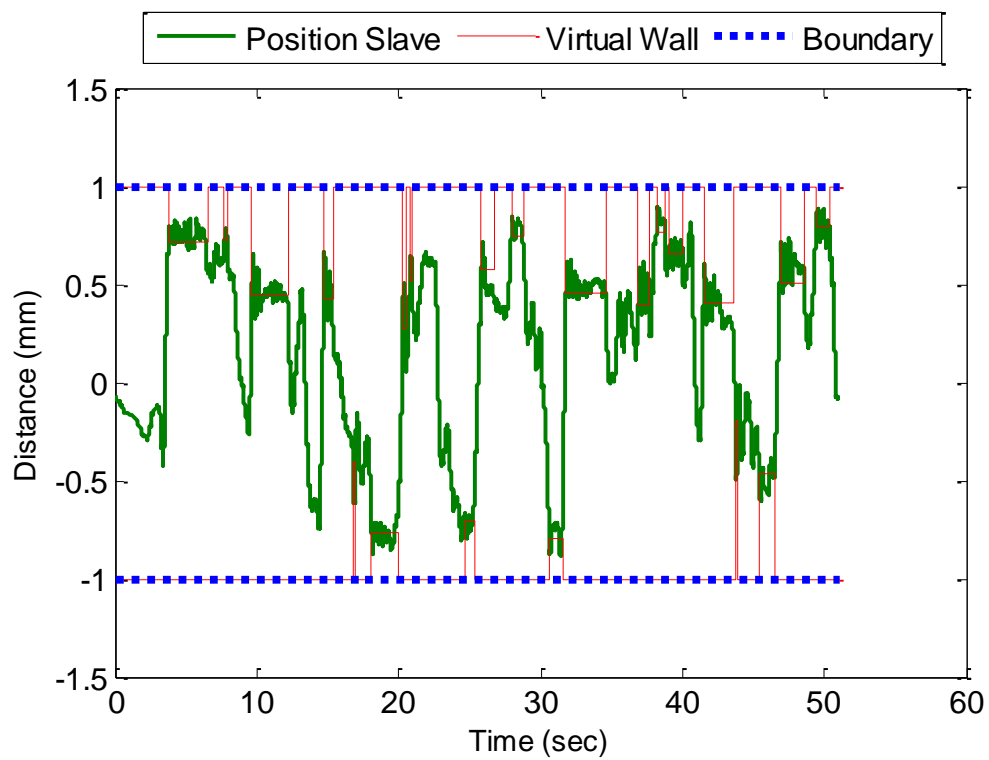
เนื่องจากความลำบากในการระบุตำแหน่งที่แน่นอนในแนวแกน Z ทำให้อาจเกิดการล้ำแนวขอบเขตห้ามเข้าถึงในพื้นที่แคบๆได้ง่าย ขณะที่การเคลื่อนที่ในแนวแกน X และ Y สามารถควบคุมให้อยู่ในขอบเขตได้จากการมองผ่านกล้อง ดังนั้นจึงแสดงผลการทดลองครั้งที่เกิดการล้ำแนวเข้าสู่บริเวณห้ามเข้าถึงที่มากที่สุด ในแกน Z ของแต่ละค่าคงตัวสปริงดังรูปที่ 5.31 ถึงรูปที่ 5.35 สำหรับผู้ทดลองคนที่ 3 เกิดการล้ำแนวที่ค่าคงตัวสปริง 0.3 N/mm ดังรูปที่ 5.31 และไม่เกิดการล้ำแนวที่ค่าคงตัวสปริงอื่นๆ



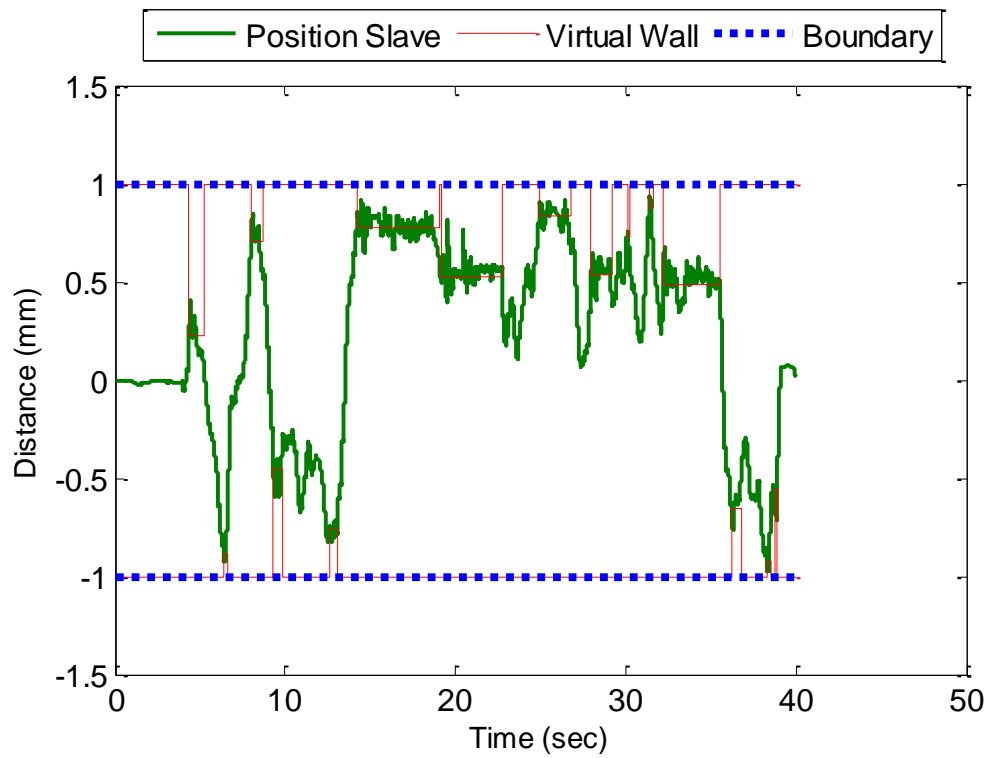
รูปที่ 5.31 ตำแหน่งของปลายแขนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 3 เมื่อค่าคงตัวสปริง 0.3 N/mm



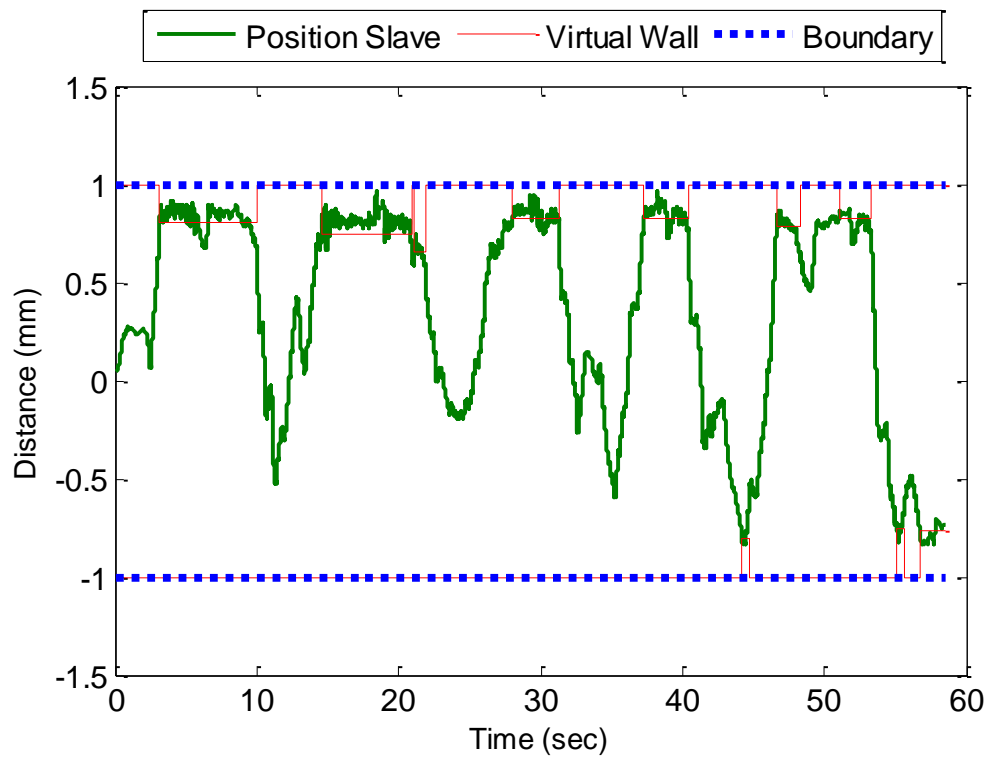
รูปที่ 5.32 ตำแหน่งของปลายแกนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 3 เมื่อค่าคงตัวสปริง 0.4 N/mm



รูปที่ 5.33 ตำแหน่งของปลายแกนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 3 เมื่อค่าคงตัวสปริง 0.5 N/mm



รูปที่ 5.34 ตำแหน่งของปลายแขนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 3 เมื่อค่าคงตัวสปริง 0.6 N/mm



รูปที่ 5.35 ตำแหน่งของปลายแขนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 3 เมื่อค่าคงตัวสปริง 0.7 N/mm

กลุ่มกำลังเสมือนแบบสมการชิกมอยด์ที่ $\gamma = 9$

- สมการชิกมอยด์ โดย $a = 1.5$, $\gamma = 9$

เมื่อเคลื่อนที่เข้าหากำลัง แรงผลักกลับจากกำลังน้อยกว่าค่าคงตัวสปริง 0.3 N/mm ไม่ค่อยเกิดการสั่น กระด้างน้อยถ้าลัดกับบริเวณขอบเขตบริเวณห้ามเข้าถึง มีการสั่นแต่ไม่สะท้อนเพิ่มมากนัก

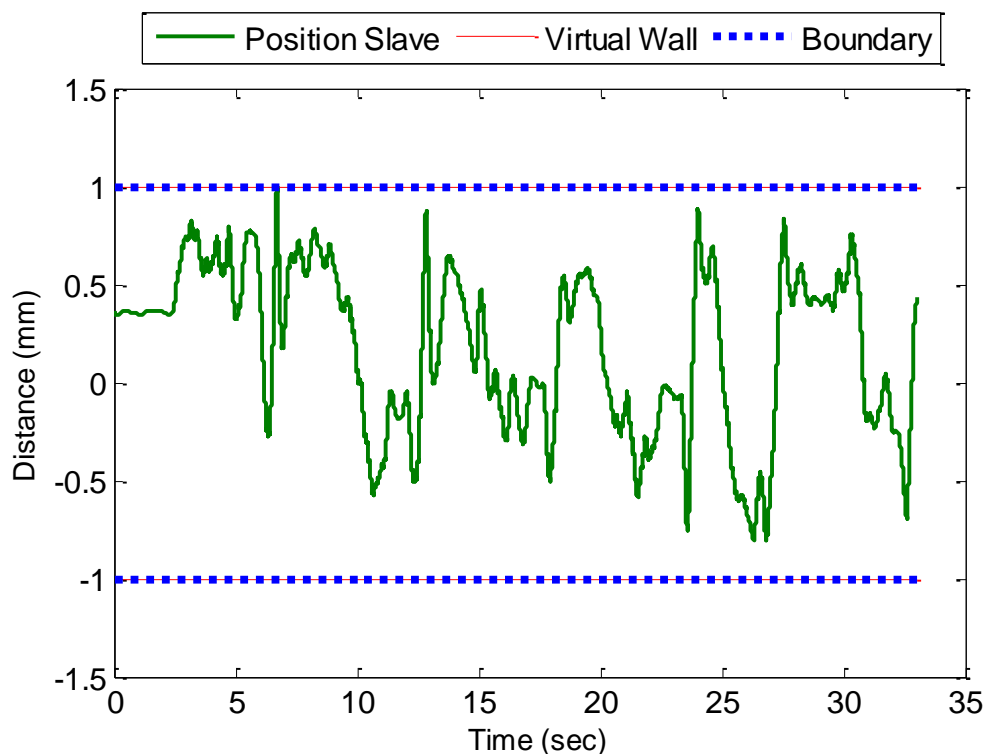
- สมการชิกมอยด์ โดย $a = 2$, $\gamma = 9$

เวลาหลักเข้าจะมีแรงผลักเยอะ เมื่อเคลื่อนที่เรียดขอบเขตบริเวณห้ามเข้าถึงเกิดการกระด้างมากกว่าสมการชิกมอยด์แบบ $a = 1.5$ และรู้สึกกำลังมีลักษณะหยุ่นๆ

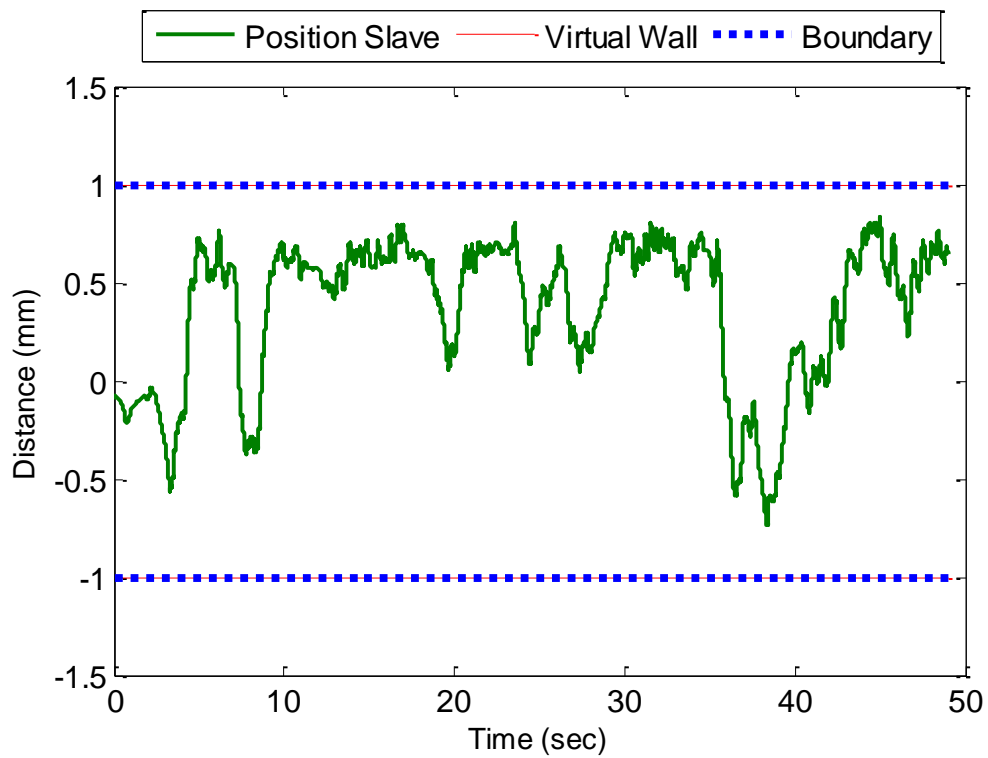
- สมการชิกมอยด์ โดย $a = 3$, $\gamma = 9$

การเคลื่อนที่เรียดตามขอบเขตของขอบเขตบริเวณห้ามเข้าถึงทำได้ลำบาก เมื่อผลักด้วยแรงที่น้อยการกระด้างที่เกิดมากกว่าของสมการชิกมอยด์แบบ $a = 2$ ถ้าเคลื่อนที่เข้าหากำลังแรงและเร็วจะกระด้างมาก เมื่อเข้าด้วยความเร็วขนาดของแรงมากกว่าค่าคงตัวสปริง 0.5 N/mm

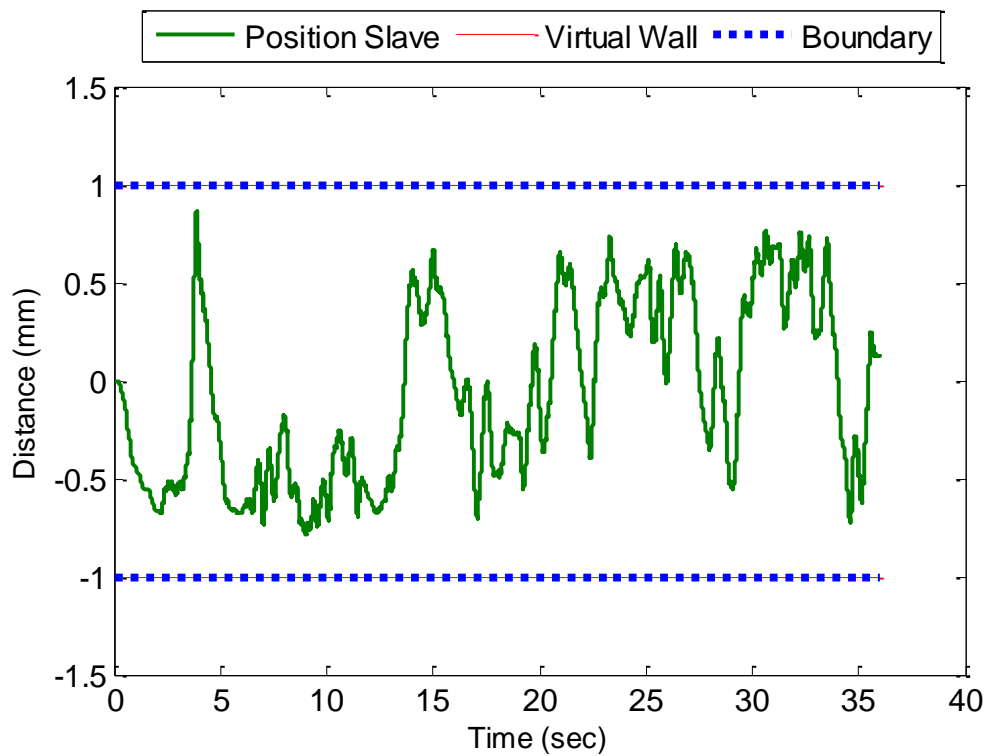
สำหรับรูปแบบสมการชิกมอยด์ ตำแหน่งของปลายแขนกลในแกน Z จะเข้าใกล้ขอบเขตห้ามเข้าถึงได้น้อยลงเมื่อ a มากขึ้นดังรูปที่ 5.36 ถึงรูปที่ 5.38



รูปที่ 5.36 ตำแหน่งของปลายแขนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 3 เมื่อ $a = 1.5$ และ $\gamma = 9$



รูปที่ 5.37 ตำแหน่งของปลายแขนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 3 เมื่อ $a = 2$ และ $\gamma = 9$



รูปที่ 5.38 ตำแหน่งของปลายแขนกลในแกน Z ของผู้ทดลองที่ 3 เมื่อ $a = 3$ และ $\gamma = 9$

เมื่อเปรียบเทียบในกลุ่มกำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกำแพงเสมือนที่เวลา 0.120 วินาที ผู้ทดลองที่ 3 พอใจค่าคงตัวสปริง 0.3 N/mm มากที่สุดเนื่องจากขนาดของแรงที่กำแพงเสมือนสร้างขึ้นไม่มากเกินไป และเพียงพอให้รู้ทิศทางของแรง

เมื่อเปรียบเทียบในกลุ่มสมการซิกมอยด์ ผู้ทดลองที่ 3 พอใจแบบ $a = 1.5$, $\gamma = 9$ มากที่สุดเพราะไม่ค่อยเกิดการกระเด็น

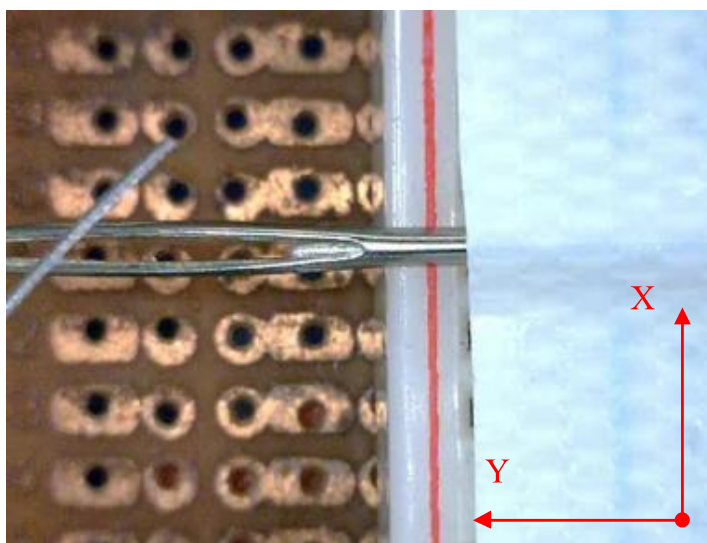
เมื่อเปรียบเทียบกำแพงเสมือนทั้งหมดผู้ทดลองที่ 3 พอใจกำแพงเสมือนแบบสมการซิกมอยด์ที่ $a = 1.5$ มากที่สุด เนื่องจากขนาดแรงผลักพอเหมาะ และกำแพงเสมือนไม่มีการหดเข้ามาทำให้มีพื้นที่ทำงานได้กว้างระดับหนึ่ง

สรุปผลการทดลองที่ 3

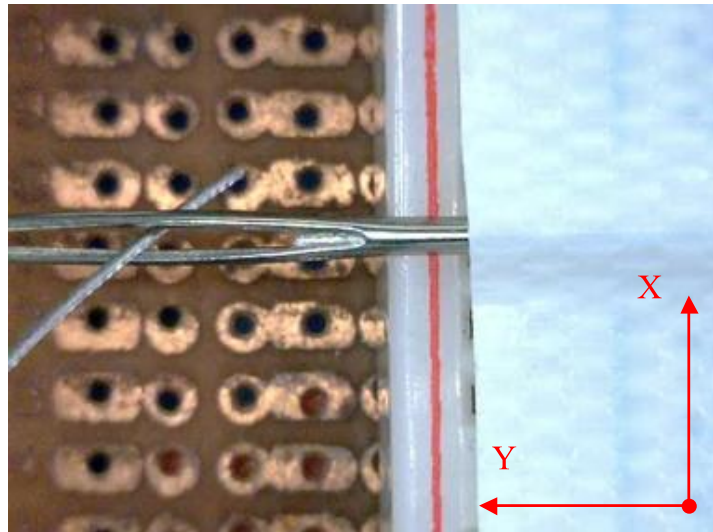
ผู้ทดลองส่วนใหญ่พอใจกำแพงเสมือนแบบสมการซิกมอยด์ที่ $a = 1.5$ และ $\gamma = 9$ มากกว่าเนื่องจากลักษณะของแรงที่เกิดจากการชนกำแพง และพื้นที่ของการทำงาน โดยส่วนใหญ่ไม่เกิดการล้าแนวขึ้น ขณะที่การเคลื่อนที่ไปขอบเขตบริเวณห้ามเข้าถึงต้องออกแรงฝืนกำแพง และใช้การมองจากกล้องช่วย

การทดลองที่ 4 : การทดลองหาความเร็วสำหรับการทำงานทั่วไป

การทดลองนี้ให้ผู้ทดลองควบคุมแขนกลตามให้ทำการร้อยปลายลวดโลหะซึ่งติดไว้กับปลายแขนกลตามให้เข้ารูเข็มที่ติดตั้งไว้ และใช้ภาพจากกล้องเพื่อช่วยในการควบคุมตำแหน่งของปลายลวดโลหะจากตำแหน่งในรูปที่ 5.39 และทำการร้อยปลายลวดโลหะเข้ารูเข็มได้ดังรูปที่ 5.40 โดยสนใจค่าความเร็วของแขนกลนำที่ใช้ในการทำงานจริง โดยในการทดลองนี้ใช้สัดส่วนการควบคุมของการเคลื่อนที่ละเอียดที่ 0.2 เท่าของแขนกลนำ



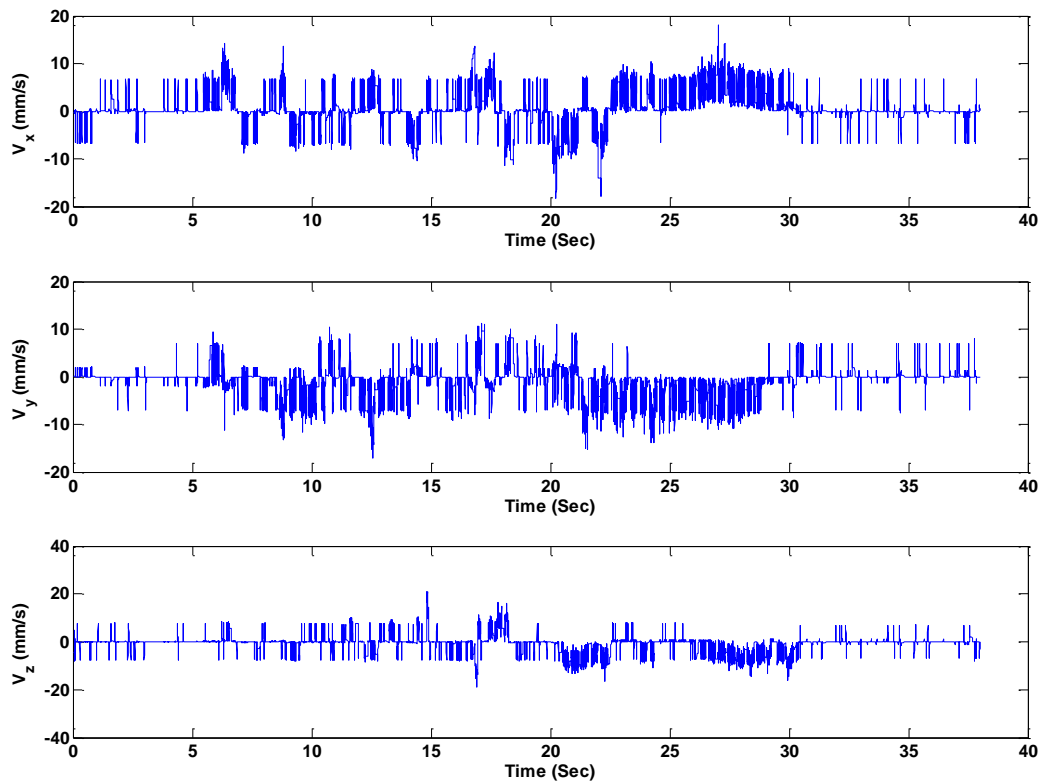
รูปที่ 5.39 ลักษณะปลายลวดและรูเข็มก่อนเริ่มการทดลอง



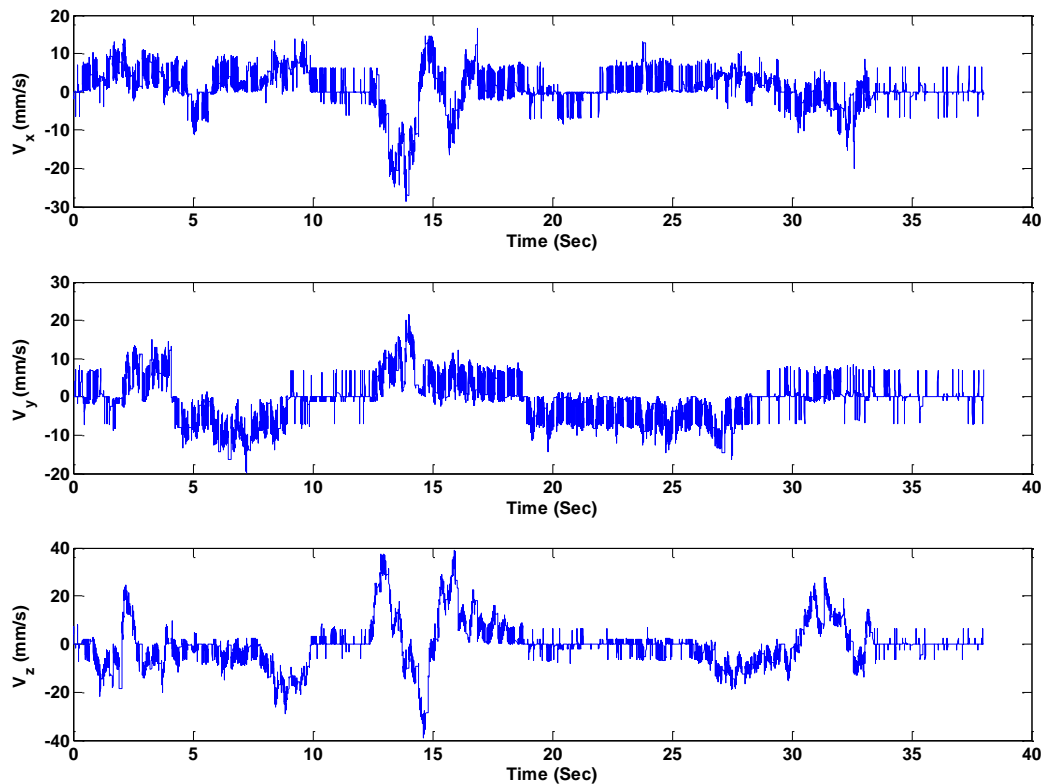
รูปที่ 5.40 ลักษณะปลายลวดและรูเข็มเมื่อเสร็จสิ้นการทดลอง

ผลการทดลองที่ 4

สามารถวัดค่าความเร็วของแขนกลนำได้รูปที่ 5.41 และรูปที่ 5.42



รูปที่ 5.41 ความเร็วของแขนกลแพนท่อมที่แปลงเทียบให้อยู่แกนเดียวกับแขนกลตามครั้งที่ 1



รูปที่ 5.42 ความเร็วของแกนกลแพนท่อมที่แปลงเทียบให้อยู่แกนเดียวกับแกนตามครั้งที่ 2

สรุปผลการทดลองที่ 4

ในการทำงานละเอียด เช่น การร้อยลวดโลหะเข้ารูเข็มนี้ จะมีความเร็วในแนวแกน X และ Y ค่อนข้างน้อย โดยส่วนใหญ่มีความเร็วอยู่ในช่วงระหว่าง -10 และ 10 mm/s ดังรูปที่ 5.41 และรูปที่ 5.42 เนื่องจากการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นใช้เพื่อควบคุมตำแหน่งของปลายให้ตรงกับรูเข็มเท่านั้น ในขณะที่ความเร็วในแกน Z จะมีความเร็วที่สูงกว่า โดยอยู่ในช่วงระหว่าง -40 ถึง 40 mm/s ดังรูปที่ 5.41 และรูปที่ 5.42

บทที่ 6

สรุปผลงานวิจัย และข้อเสนอแนะ

สรุปผลงานวิจัย

การใช้กำแพงเสมือนแบบเคลื่อนที่ได้สามารถลดการเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณที่ห้ามเข้าถึงได้ โดยขึ้นกับค่าคงตัวสปริงของกำแพงที่ใช้ ถ้าค่าคงตัวสปริงมากจะมีการล้าแนวที่น้อยลง ถ้าใช้ค่าคงตัวสปริงที่มากเพียงพอจะไม่เกิดการล้าแนว แต่จะเกิดการสะท้อนที่รุนแรงขึ้น สำหรับในงานที่มีพื้นที่ขนาดเล็กไม่ควรใช้ค่าคงตัวสปริงที่แข็งเนื่องจากการสะท้อนที่รุนแรงส่งผลให้ควบคุมแขนกลได้ลำบากขึ้น และอาจทำให้เกิดอันตรายในทิศทางอื่นได้

สำหรับในงานวิจัยนี้ พื้นที่การทำงานขนาดกว้าง 2 mm กำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกำแพงเสมือนที่เวลา 0.120 วินาที ที่ค่าคงตัวสปริงที่ 0.4 N/m มีความเหมาะสม เนื่องจากจะเกิดการล้าแนวเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ยังสามารถควบคุมปลายแขนกลได้ดี และผู้ทดลองสามารถรู้ทิศทางของแรงได้

สำหรับกำแพงเสมือนรูปแบบสมการซิกมอยด์ เมื่อกำหนดค่า a และ γ ที่เหมาะสมสามารถป้องกันการล้าแนวขอบเขตห้ามเข้าถึงได้

สำหรับในงานวิจัยนี้พื้นที่การทำงานขนาดกว้าง 2 mm ค่า $a = 1.5$ และ $\gamma = 9$ มีความเหมาะสม เนื่องจากผู้ทดลองส่วนใหญ่ไม่เกิดการล้าแนวขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบการล้าแนวที่เกิดขึ้นจากกำแพงเสมือนทั้งหมด กำแพงเสมือนแบบซิกมอยด์มีการล้าแนวโดยรวมที่น้อยกว่า ดังนั้นสำหรับการป้องกันการล้าแนวขอบเขตบริเวณห้ามเข้าถึงกำแพงเสมือนแบบซิกมอยด์มีความเหมาะสมมากกว่า

หากต้องการเข้าถึงบริเวณขอบเขตของกำแพงเสมือนเมื่อใช้กำแพงเสมือนแบบซิกมอยด์และกำแพงเสมือนแบบเคลื่อนที่ได้ ต้องออกแรงฝืนและควบคุมตำแหน่งผ่านการดูภาพจากกล้องเพื่อไม่ให้เกิดการล้าแนวมากเกินไป

ข้อเสนอแนะ

- หากต้องการกำหนดขอบเขตบริเวณห้ามเข้าถึงเป็นรูปแบบและขนาดอื่น เมื่อใช้กำแพงเสมือนแบบสมการซิกมอยด์ต้องปรับค่า a และ γ ทุกครั้ง
- เพื่อเพิ่มความถูกต้องของการใช้กำแพงเสมือนเคลื่อนที่ได้แบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเมื่อชนกำแพงเสมือน หรือแบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลและมือเมื่อชนกำแพงเสมือน ควรทดลองหาเวลาตอบสนองสำหรับการทำงาานนั้นๆอีกครั้ง
- หากใช้แขนกลตามที่มีตัวตรวจรู้แรงติดตั้งที่ปลายแขนกล จะสามารถนำมาประยุกต์โดยเพิ่มแรงสะท้อนกลับที่ด้านแขนกลนำ เพื่อลดการชนสิ่งแวดล้อมด้านแขนกลตามได้ดี และถูกต้องมากขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] Erdene Damdinsuren, Kazuhiro Kosuge, ZhiDong Wang, and Yasuhisa Hirata. Virtual elastic wall based motion control for teleoperated demining system, International Conference on Mechatronics & Automation, pp.1666-1671, 2005.
- [2] Angelo Basteris, Lino Bracco, and Vittorio Sanguineti, Robot-assisted intermanual transfer of handwriting skills, Human Movement Science 31, pp.1175-1190, 2012.
- [3] P. Marayong, G. D. Hager, and A. M. Okamura, Effect of hand dynamics on virtual fixtures for compliant human-machine interfaces. Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Tele-operator Systems, pp.109–115, 2006.
- [4] Louis B. Rosenberg, and Bernard D. Adelstein. Perceptual decomposition of virtual haptic surfaces, Proceeding of the 1993 IEEE Symposium on Research Frontiers in Virtual Reality, pp.46-53, 1993.
- [5] P. Marayong, Hye Sun Na, and A. M. Okamura. Virtual fixture control for compliant human-machine interfaces, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.4018–4024, 2007.
- [6] Jing Ren, Rajni V. Patel, Kenneth A. Mclsaac, Gerard Guiraudon, and Terry M. Peters. Dynamic 3-D virtual fixtures for minimally invasive beating heart procedures, IEEE Transactions on Medical Imaging 27, pp.1061-1070, 2008.
- [7] Stuart Booth, Franco De Angelis, and Thore Schmidt-Tjarksen. The influence of changing haptic refresh-rate on subjective user experiences – lessons for effective touch-based applications, Proceeding of the 2003 EuroHaptics Conference, pp.374-383, 2003.
- [8] Michele Scandola, Marco Vicentini, and Paolo Fiorini. How force perception changes in different refresh rate conditions, The 15th International Conference on Advanced Robotics, pp.322-327, 2011.
- [9] Viboon Sangveraphunsiri, Supachai Vongbunyong, Virtual Walls of the 6-DOF Master Slave System for Miniature Tasks, The 23rd Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, 2009.
- [10] สุภชัย วงศ์บุญยง. แขนกล 6 องศาอิสระ สำหรับงานขนาดเล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551

- [11] Jake J. Abbot, and Allison M. Okamura. Virtual fixture architectures for telemanipulation, Proceeding of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2798–2805, 2003.
- [12] K. R. Boff, and J. E. Lincoln. Engineering data compendium: Human perception and performance, volume 3, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1988.
- [13] SensAble Technologies Inc. PHANTOM Premium 1.5 Haptic Device. Available from: <http://www.sensable.com/phantom-premium-1-5.htm>, 2009.
- [14] SensAble Technologies Inc. Openhaptics™ toolkit version 3.0 : Programmer's guide. USA: SensAble Technologies, 2008.
- [15] SensAble Technologies Inc. Openhaptics™ toolkit version 3.0 : API reference manual. USA: SensAble Technologies, 2008.
- [16] John J. Craig. Introduction to robotics: Mechanical and control. International Edition. 3rd ed. USA: Pearson Prentice Hall, 2005.
- [17] Lorenzo Sciavicco, and Bruno Siciliano. Modeling and control of robot manipulators. Italy: McGraw-Hill Book, 1996.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายนวกกร ดิษริยะกุล เกิดเมื่อวันที่ 22 มิถุนายน พ.ศ. 2530 เป็นชาวกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปีการศึกษา 2551 และศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2552