

เครื่องควบคุมการสั่นสะเทือนของมือในแนวแกน Z
HANDHELD MICROMANIPULATOR IN Z AXIS



ปริญญา คำไม้

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เครื่องควบคุมการสั่นสะเทือนของมือในแนวแกน Z
HANDHELD MICROMANIPULATOR IN Z AXIS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ซึ่งใช้ในกิจการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2557

HANDHELD MICROMANIPULATOR IN Z AXIS



PRINYA KHAMAI

THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHATRONICS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ACADEMIC YEAR 2014

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง

เครื่องควบคุมการสั่นสะเทือนของมือในแนวแกน Z

HANDHELD MICROMANIPULATOR IN Z AXIS

ผู้จัดทำ

นายปริญญา คำไม้ 53010943


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นนทวัฒน์ จุลเดชะ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องควบคุมมือสั่นในทิศทางแนวแกน Z

โดย

นายปริญญา คำไม้ 53010943

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นนทวัฒน์ จุลเดชะ

ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องควบคุมการสั่นสะเทือนของมือในระดับไมโครเมตรโดยใช้เครื่อง Handheld Micromanipulator ซึ่งในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการออกแบบระบบและควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z โดยใช้เทคนิคการควบคุมมอเตอร์แบบ PI control ในการเคลื่อนที่ดังกล่าวจะใช้สกรูมอเตอร์ไฟฟ้าในการส่งกำลัง ซึ่งมีการศึกษาการทดลองผ่านโปรแกรม Matlab/Simulink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HANDHELD MICROMANIPULATOR IN Z AXIS

By

Mr.Prinya KHAMAI 53010943

Advisor

Asst.Prof.Nontawat Chuladaycha

Academic Year 2014

ABSTRACT

This thesis presents designing model and control system of Handheld Micromanipulator in Z axis. The handheld Micromanipulator allows controlling hand tremor in micro scale instead of using Micromanipulator which unmovable had been required. Actuator motor was used for movement in Z axis. The control system was designed by using PI controller from simulation in Matlab/Simulink program.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้ สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีตามจุดประสงค์เนื่องจากความอนุเคราะห์จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นนทวัฒน์ จุลเดชะ ที่ได้ให้คำปรึกษาและความรู้ วิธีคิด วิธีแก้ปัญหา พร้อมทั้งชี้แนะแนวทางให้ปฏิบัติอย่างถูกต้องตามขั้นตอนตลอดจนปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงอย่าง สมบูรณ์

ขอขอบคุณ Prof.AoyamaHisayuki อาจารย์ผู้ให้คำปรึกษาปริญญาานิพนธ์นี้ ขณะที่ได้ศึกษา อยู่ ณ ประเทศญี่ปุ่น และอาจารย์สังวาล บกสุวรรณ ที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำที่เป็น ประโยชน์อย่างมากต่อวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เป็นแหล่งประสิทธิ์ ประสาทวิชาความรู้ รวมทั้งห้องปฏิบัติการควบคุมการแปลงรูปกำลังงานไฟฟ้า(Power Conversion Control Lab) ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ พร้อมทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณ UEC (University of Electronics and Communication Tokyo Japan) รวมถึง Aoyama Lab ที่ให้โอกาสในการศึกษาในต่างประเทศ และเอื้อเฟื้อสถานที่ พร้อมทั้ง อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ ในห้องปฏิบัติการควบคุมการแปลงรูปกำลังงานไฟฟ้า (Power Conversion Control Lab) และ Aoyama Lab ทั้งที่เพิ่งไปแล้วก็ดียังไม่จบก็ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณ ไกรสร กลิ่นละออ และคุณกวีวิษฐ์ ทัตวิงษ์ ที่ได้คำแนะนำและให้กำลังใจในการทำปริญญาานิพนธ์ ตลอดมา

สุดท้ายนี้คุณงามความดีที่เกิดจากปริญญาานิพนธ์นี้ ขอมอบให้กับบิดา มารดา และครอบครัว ที่เป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ขัดเกลาสติปัญญา ประสิทธิ์ประสาท วิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ผู้จัดทำ

ปริญญา คำไม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการทำปริญญานิพนธ์	1
1.3 ขั้นตอนการศึกษาและจัดทำโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ขอบเขตการศึกษา	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 บทนำ	3
2.2 โครงสร้างและการเคลื่อนที่ในแนวแกน X และ Y	4
2.2.1 การเคลื่อนที่ทางกลในแนวแกน X และ Y	4
2.3 ระบบควบคุม PID Controller	6
2.3.1 เทอมของสัดส่วน	6
2.3.2 เทอมของปริพันธ์	6
2.3.3 เทอมของอนุพันธ์	7
2.4 สมการทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบเครื่องควบคุมการสั่นของมือในแนวแกน Z	12
3.1 บทนำ	12
3.2 การออกแบบทางกลของเครื่องควบคุมการสั่นของมือในแนวแกน Z	12
3.2.1 อุปกรณ์ส่งกำลังเพื่อใช้ในการเคลื่อนที่	12
3.2.2 หลักการออกแบบเครื่องควบคุมการสั่นของมือในแนวแกน Z	13
3.2.3 ระบบทางกลเครื่องควบคุมการสั่นของมือในแนวแกน Z	16
3.3 การออกแบบระบบควบคุมของเครื่องควบคุมการสั่นของมือในแนวแกน Z	20
3.3.1 องค์ประกอบของทฤษฎีระบบควบคุม	20
3.3.2 การออกแบบระบบควบคุมด้วยการ Simulation	22
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	29
4.1 ผลการทดลองเมื่อให้ค่า $K_1 = 1.44$ และ 4	29
4.1.1 เมื่อ $K = 3, K_1 = 4$	29
4.1.2 เมื่อ $K = 3, K_1 = 1.44$	30
4.2 ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนค่า K เมื่อ K เท่ากับ 1, 2, 3, 4 และ 5	31
4.3 ผลการทดลองเมื่อนำข้อมูลการสั่นของมือมาควบคุมด้วย PID Controller	34
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	35
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน	35
5.2 ข้อเสนอแนะ	35
เอกสารอ้างอิง	36
ภาคผนวก	37
ภาคผนวก ก	37
ภาคผนวก ข	42
ภาคผนวก ค	52
ภาคผนวก ง	54
ประวัติผู้เขียน	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แนวคิดเครื่องควบคุมการสั่นของมือ	3
2.2 แบบจำลองการเคลื่อนที่ในทิศทางแกน X ด้วยแผ่น PZT	4
2.3 แสดงความถี่ และระยะการแกว่ง เมื่อมีขนาดมวลมากยึดติดอยู่	5
2.4 แสดงความถี่ และระยะการแกว่ง เมื่อมีขนาดมวลน้อยกว่า ยึดติดอยู่	5
2.5 การหาค่าตัวแปรในการจูนโดยใช้ทฤษฎี Skogestad จากสัญญาณขาออกของระบบ	8
2.6 แสดงสมการทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์	11
3.1 แบบจำลองของ Actuator MUDEO1	12
3.2 แสดงแบบจำลองของเครื่องควบคุมมือสั่นในแนวแกน X และ Y	14
3.3 แนวคิดการออกแบบการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z	15
3.4 การออกแบบโครงสร้างการเคลื่อนที่ของเครื่องควบคุมมือสั่นที่ในแนวแกน Z	16
3.5 ชั้นส่วนโครงสร้างการเคลื่อนที่ของเครื่องควบคุมมือสั่นในแนวแกน Z (แยกส่วน)	17
3.6 ชั้นส่วนโครงสร้างการเคลื่อนที่ของเครื่องควบคุมมือสั่นในแนวแกน Z	17
3.7 แสดงชั้นส่วนของเครื่องควบคุมมือสั่นในแนวแกน Z เมื่อเทียบกับชั้นส่วนทั้งหมด	19
3.8 โครงสร้างทฤษฎีควบคุม	20
3.9 ค่า Duty Cycle ของสัญญาณในเปอร์เซ็นต์ที่ต่างกัน	21
3.10 หัวปากกาที่ถูกถือให้อยู่นิ่งด้วยมือ วัดความคลาดเคลื่อนด้วย Microscope	22
3.11 Microscope	23
3.12 จอแสดงผลที่ได้จาก Microscope ซึ่งสามารถแสดงค่าความคลาดเคลื่อนเชิงตัวเลขได้	23
3.13 กราฟผลของการสั่นสะเทือนของมือเมื่อวัดด้วย Microscope	24
3.14 กราฟการเคลื่อนที่ของมอเตอร์เมื่อเทียบกับเวลา	25
3.15 แบบจำลองด้วย Simulink โครงสร้างระบบควบคุม	26
3.16 กราฟแสดงผลตอบสนองของมอเตอร์เทียบกับ Unit Step	28
4.1 การเปรียบเทียบสัญญาณเมื่อถูกควบคุมด้วยทฤษฎีที่ต่างกัน	29
4.2 การเปรียบเทียบสัญญาณเมื่อถูกควบคุมด้วยทฤษฎีที่ต่างกัน	30
4.3 การเปรียบเทียบสัญญาณเมื่อถูกควบคุมด้วยทฤษฎีที่ต่างกัน เมื่อค่า $K = 1$	31
4.4 การเปรียบเทียบสัญญาณเมื่อถูกควบคุมด้วยทฤษฎีที่ต่างกัน เมื่อค่า $K = 2$	31
4.5 การเปรียบเทียบสัญญาณเมื่อถูกควบคุมด้วยทฤษฎีที่ต่างกัน เมื่อค่า $K = 3$	32
4.6 การเปรียบเทียบสัญญาณเมื่อถูกควบคุมด้วยทฤษฎีที่ต่างกัน เมื่อค่า $K = 4$	32
4.7 การเปรียบเทียบสัญญาณเมื่อถูกควบคุมด้วยทฤษฎีที่ต่างกัน เมื่อค่า $K = 5$	33

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

4.8 กราฟการสั้นสะเทือนที่ถูกควบคุมด้วยระบบควบคุม

หน้า

34



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 หลักการปรับค่าของ PID ตามทฤษฎี Skogestad	7
3.1 คุณสมบัติของมอเตอร์กระแสตรง MUDEO1	13



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีได้พัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็วในทุกด้าน ด้านการแพทย์ ซึ่งการมีเทคโนโลยีที่ดี ทันสมัย ก็หมายถึงการมีเครื่องมือที่มีความเที่ยงตรง ความแน่นอน และแม่นยำที่สูงกว่าในอดีตซึ่ง สามารถช่วยชีวิตผู้ป่วยให้มีประสิทธิภาพได้อย่างมาก

ในปัจจุบันด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยี ทำให้มนุษย์เรามีอายุยืนยาวยิ่งขึ้น เนื่องจากมียารักษาโรคที่รักษาอย่างรวดเร็ว หรือหากเกิดเหตุการณ์ที่มีความรุนแรง ก็สามารถผ่าตัดช่วยชีวิตมาได้ โดยการผ่าตัดส่วนใหญ่จะกระทำโดยมือหมอผู้ชำนาญลงมือผ่าตัดด้วยมือตนเอง มีส่วนน้อยที่ให้แขนกลในการผ่าตัดแม้ว่าแขนกลที่ใช้ผ่าตัดจะมีความแม่นยำสูง แต่ก็มีราคาแพงเช่นกัน โดยส่วนมากการใช้แขนกลแทนการผ่าตัดด้วยมือของหมอนั้น จะกระทำในกรณีของการผ่าตัดขนาดเล็กที่มีมือของมนุษย์ไม่นิ่ง หรือไม่แม่นยำพอที่จะทำได้ ยกตัวอย่างเช่น การผ่าตัดของแก้วตาซึ่งมีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางการผ่าตัดที่ 1 มิลลิเมตร

แม้ว่าการใช้แขนกลในการผ่าตัดจะมีความแม่นยำสูง แต่ก็มีราคาที่สูง และผู้ที่ต้องการเข้ารับการผ่าตัดจำเป็นต้องเข้าผ่าตัดในห้องที่ติดตั้งแขนกลสำหรับผ่าตัดเท่านั้น ซึ่งแขนกลนั้นไม่สามารถเคลื่อนย้ายทำการผ่าตัดนอกสถานที่ได้ จากเหตุผลข้างต้นทำให้ในพื้นที่ห่างไกลจากความเจริญ เช่น ในหุบเขา หรือการผ่าตัดฉุกเฉินนอกสถานที่จึงยังคงต้องใช้การผ่าตัดจากมือแพทย์โดยตรง

จากข้อจำกัดของแขนกล และมือของมนุษย์ที่ใช้ในการผ่าตัดที่ได้กล่าวมานั้น ในปัจจุบันหนึ่งในวิธีการแก้ปัญหาคือสร้างเครื่องมือเพื่อลด หรือขจัดเขยการสั่นสะเทือนที่เกิดจากของมือมนุษย์ โดยการใช้เครื่องควบคุมมือสั่น หลักการทำงานคือ การสร้างการเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามของแรงสั่นสะเทือน ผลที่ได้คือปลายของเครื่องควบคุมมือสั่นซึ่งอาจจะต่อกับมีด หรือเข็มฉีดยา จะนิ่งแม้ว่ามือที่จับยังคงสั่นตามปกติ

1.2 วัตถุประสงค์ในการหาปริญญาโท

1. ออกแบบระบบควบคุมโดยใช้การควบคุมแบบ PID Controller
2. ออกแบบทางกลของชิ้นส่วน พร้อมทั้งขึ้นรูปชิ้นงานด้วยโปรแกรม CAD/CAM
3. ออกแบบการทดลองโดยใช้โปรแกรม MATHLAB/Simulink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขั้นตอนการศึกษาและจัดทำโครงการงาน

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.1 ศึกษาระยะ และความถี่ของการสั่นสะเทือนโดยปกติของมือมนุษย์ จากรายงานทางการแพทย์

1.2 ศึกษาระบบการเคลื่อนที่ในแนวแกน X และ Y ของชิ้นงาน

1.3 ศึกษาคำสั่งและวิธีการใช้งาน โปรแกรม MATLAB/Simulink

1.4 ศึกษาทฤษฎีระบบควบคุม PID Controller

1.5 ศึกษาการออกแบบทางกลโดยใช้โปรแกรม Solid Work

1.6 ศึกษาคำสั่งและวิธีการใช้งานเครื่อง CNC

2. ออกแบบและทดลอง

2.1 ออกแบบทางกลของระบบกลางเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

2.2 ออกแบบระบบควบคุมสำหรับการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z โดย PI controller

2.3 จำลองระบบควบคุมโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจในหลักการออกแบบระบบควบคุมโดยใช้ทฤษฎี PID Controller

2. มีความรู้ความชำนาญในการใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

3. มีความรู้ความชำนาญในการออกแบบทางกลโดยใช้โปรแกรม Solidwork

4. มีความรู้ความชำนาญในการใช้โปรแกรม CAD/CAM และเครื่อง CNC

1.5 ขอบเขตการศึกษา

ในการศึกษาและออกแบบเครื่องควบคุมมือสั่นนั้น โดยหลักจะแบ่งการเคลื่อนที่ในแนวแกนออกเป็น 3 ส่วนคือ การเคลื่อนที่ในแนวแกน X, Y และ Z แม้ว่าทั้งสามแกนจะเคลื่อนไหวแยกออกจากกัน แต่ทั้งสามแกนจะมีจุดเชื่อมต่อเพื่อรวมให้เป็นอุปกรณ์ชิ้นเดียว ซึ่งในโครงการนี้จะเป็นการออกแบบการเคลื่อนที่ในทิศทางแกน Z เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

จากข้อมูลทางการแพทย์ระบุว่า การสั่นสะเทือนโดยปกติของมือมนุษย์ขณะอยู่นิ่ง จะมีความถี่อยู่ที่ประมาณ 50 เฮิร์ต และจะมีระยะกระจัดของการแกว่งอยู่ในช่วง 1 เซนติเมตร ดังนั้นเราจึงสามารถจำกัดขอบเขตการเคลื่อนที่เพื่อใช้ออกแบบการชดเชยระยะกระจัดที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของมือมนุษย์ได้



รูปที่ 2.1 แนวคิดเครื่องควบคุมมือสั่น

จากรูปที่ 2.1 จะเป็นแนวคิดของเครื่องควบคุมมือสั่น จะได้ว่าตัวเครื่องจะต้องมีขนาดที่กระชับ น้ำหนักเบา เพื่อที่เมื่อถือแล้วจะไม่ส่งผลให้มีการสั่นสะเทือนเพิ่มเติม ปลายของอุปกรณ์สามารถประยุกต์ได้ โดยในรูปปลายจะมีเข็มยึดติดอยู่ หากเครื่องเป็นไปตามสมมติฐาน เมื่อถืออุปกรณ์ถึงแม้ว่ามือจะสั่น ปลายเข็มก็จะนิ่งไม่มีการสั่นสะเทือน

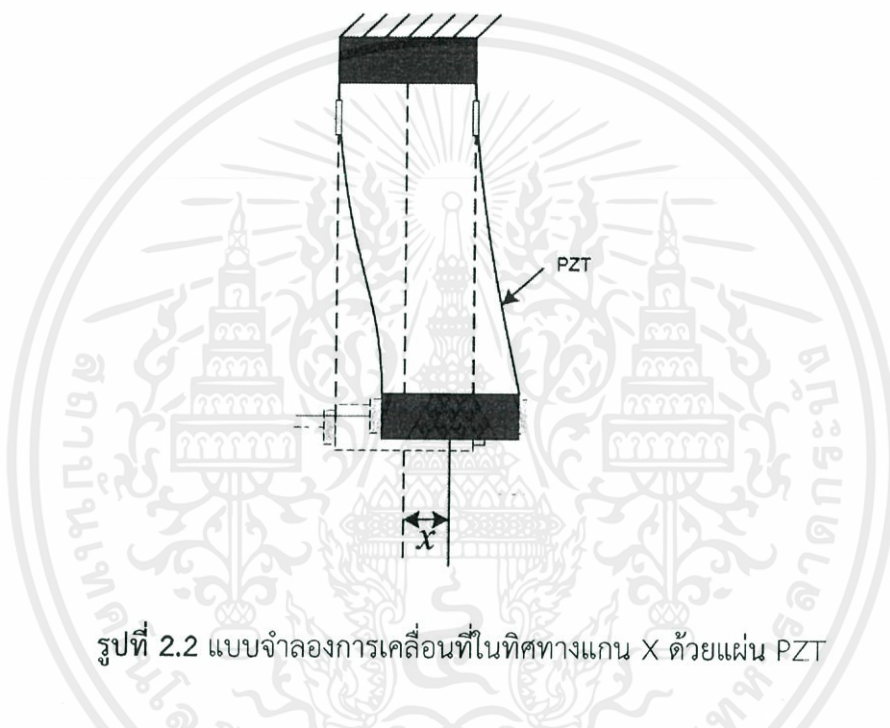
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 โครงสร้างและการเคลื่อนที่ในแนวแกน X และ Y

เนื่องจากโครงสร้างของแนวแกนทั้งสามเชื่อมต่อเป็นชั้นเดียวกัน ในการออกแบบการเคลื่อนที่ของแนวแกน Z จึงมีผลต่อการเคลื่อนที่ในแกนอื่นๆ ดังนั้นก่อนการออกแบบการเคลื่อนที่ในแกน Z จึงจำเป็นต้องรู้หลักการทํางานและระบบการเคลื่อนที่ของแกน X และ Y ก่อน

2.2.1 การเคลื่อนที่ทางกลในแนวแกน X และ Y

การเคลื่อนที่ในทิศทางแกน X และ Y จะใช้แผ่น PZT (piezoelectric) บางสองแผ่นวางขนานกัน โดยที่คุณสมบัติของ PZT คือเมื่อมีแรงกลมากระทำ จะสามารถสร้างพลังงานทางไฟฟ้าได้ ในทางตรงกันข้ามก็จะมีการขยายตัวเมื่อได้รับพลังงานทางไฟฟ้าเช่นกัน



รูปที่ 2.2 แบบจำลองการเคลื่อนที่ในทิศทางแกน X ด้วยแผ่น PZT

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ในแนวทิศทางแกน X นั้น จะเกิดขึ้นเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับ PZT ด้านใดด้านหนึ่ง ผลที่ได้คือ PZT ยึดตัวออกส่งผลทำให้ด้านที่ถูกจ่ายกระแสไฟฟ้ามืดยาวมากกว่าด้านที่ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า ส่งผลทำให้ชิ้นส่วนเคลื่อนที่ เช่นเดียวกับ การเคลื่อนที่ในทิศทางแกน Y

ในการเคลื่อนแนวแกน X และ Y โดยใช้การยึดและหดตัวของของแผ่น PZT อย่างรวดเร็ว เพื่อให้ได้ระยะกระจัด และความไวในการเคลื่อนที่ตามต้องการนั้น จะเกิดปรากฏการณ์ การแกว่งตัวของชิ้นส่วนทั้งหมด ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยกฎการเคลื่อนที่ของสปริงดังสมการที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

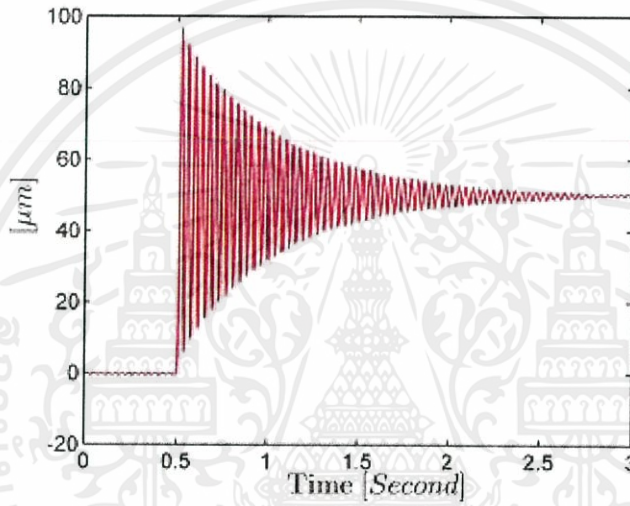
$$\Sigma F = ma \quad (2.1)$$

$$F = kx \quad (2.2)$$

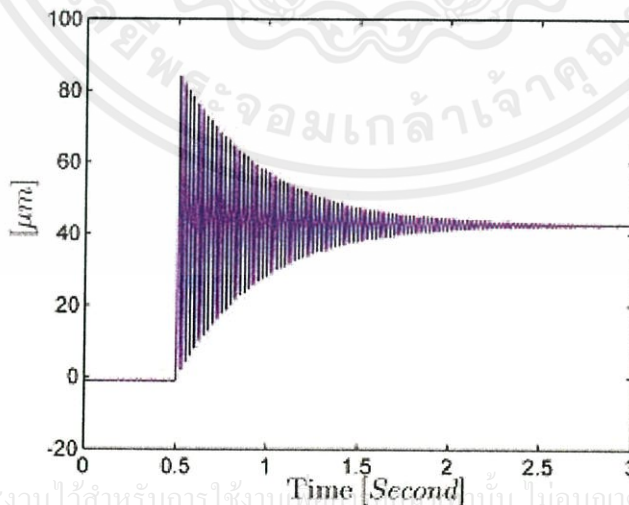
$$kx = ma \quad (2.3)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่ของสปริง

และ x คือ ระยะยืดตัวของสปริง



รูปที่ 2.3 ความถี่และระยะการแกว่ง
เมื่อมีมวลมากยืดติดอยู่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.4 ความถี่และระยะการแกว่ง
เมื่อมีมวลที่น้อยกว่ายืดติดอยู่

จากกฎของนิวตันในสมการที่ (2.3) ได้ว่าระยะเวลาการแกว่งตัวของสปริง หรือการแกว่งตัวของ ชิ้นส่วนเมื่อเปลี่ยนตำแหน่ง จะมากหรือน้อยเป็นผลโดยตรงกับน้ำหนักของชิ้นส่วนที่ต่อมาจากรูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.4 จะเป็นกราฟการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้กับกระจัดของการแกว่งตัวเมื่อมีมวลที่ต่างกันมากกระทำ ในรูปที่ 2.3 จะมีมวลที่มีน้ำหนักมากกว่ารูป 2.4 มากกระทำ จากกราฟจะเห็นได้ว่าที่มีมวลมากกว่า ระยะเวลาการแกว่งตัวของชิ้นส่วนก็จะมากกว่า หรือสามารถอธิบาย อีกนัยหนึ่งคือ มีการสั่นที่มากกว่าชิ้นส่วนที่มีมวลน้อยกว่ามากกระทำ

ผลการทดลองและทฤษฎีข้างต้น สามารถนำมาสรุปได้ว่า ในการออกแบบโครงสร้างทางแกน Z ซึ่งจะถูกติดตั้งอยู่ที่ปลาย หรือลำดับสุดท้ายของอุปกรณ์ จะส่งผลกระทบต่อโดยรวมแก่ระบบ ดังนั้น ข้อสรุปจากการทดลองคือ ในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องควบคุมมือสั่นในแนวแกน Z ชิ้นส่วน จะต้อง มีน้ำหนักที่เบาเพื่อส่งผลกระทบต่อระบบทางแกน X และ Y น้อยที่สุด

2.3 ระบบควบคุม PID Controller

การเคลื่อนที่ในทิศทางแกน Z นั้นในโครงงานนี้จะใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นตัวส่งกำลัง การเคลื่อนที่ ซึ่งในการควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์กระแสตรง จะใช้ระบบควบคุมแบบ PID

PID หรือระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการ ตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ค่าตัวแปรของ PID ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบ ในการตั้งค่าการควบคุมแบบ PID นั้นจะมีตัวแปรในการควบคุมอยู่ สามตัวแปรคือ

2.3.1 เทอมของสัดส่วน

เทอมของสัดส่วนจะเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนของค่าความผิดพลาด การตอบสนองของ สัดส่วนสามารถทำได้โดยการคูณค่าความผิดพลาดด้วยค่าคงที่ K_p หรือเรียกว่าอัตราขยายสัดส่วน ผลของอัตราขยายที่มีค่าสูงขึ้นไปจะทำให้ระบบตอบสนองมากขึ้น แต่ก็ทำให้เกิดค่าความผิดพลาดมากขึ้นเช่นกัน ในทางตรงกันข้าม ผลของอัตราขยายสัดส่วนที่ต่ำ ระบบควบคุมจะมีผลตอบสนองต่อ กระบวนการน้อยตามไปด้วย

2.3.2 เทอมของปริพันธ์

ผลจากเทอมปริพันธ์ เป็นสัดส่วนของขนาดความผิดพลาด และระยะเวลาของความผิดพลาด ผลรวมของความผิดพลาดในทุกช่วงเวลา จะให้ออฟเซตสะสมที่ควรจะเป็นในก่อนหน้าความผิดพลาด ที่สะสมจะถูกคูณโดยอัตราขยายปริพันธ์ขนาดของผลของเทอมปริพันธ์จะกำหนดโดยอัตราขยาย

ปริพันธ์ K_i เทอมปริพันธ์ จะเร่งกระบวนการให้เข้าสู่จุดที่ต้องการ ความผิดพลาดที่ เหลืออยู่ ที่ เกิดจากการใช้เพียงเทอมสัดส่วน แต่เทอมปริพันธ์นั้นเป็นการตอบสนองต่อความผิดพลาด สะสมในอดีตจึงสามารถทำให้เกิดโอเวอร์ชุตได้หากมีการตั้งค่าที่สูง

2.3.3 เทอมของอนุพันธ์

เทอมของอนุพันธ์คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาดจากกระบวนการที่ได้มานั้น คำนวณหาจากความชันของ ความผิดพลาดทุกๆ เวลา (นั่นคือเป็นอนุพันธ์อันดับหนึ่งสัมพันธ์กับเวลา) และคูณด้วยอัตราขยายอนุพันธ์ K_d เทอมอนุพันธ์จะชะลออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขาออก ของระบบควบคุมและด้วยผลนี้จะช่วยให้ระบบควบคุมเข้าสู่จุดที่ต้องการ ดังนั้นเทอมอนุพันธ์จะใช้ในการลดขนาดของโอเวอร์ชูตที่เกิดจาเทอมปริพันธ์ และทำให้เสถียรภาพของการรวมกันของระบบ ควบคุมดีขึ้น

จากทฤษฎีข้างต้น เมื่อนำเอาทั้งสามตัวแปรควบคุมรวมเข้าด้วยกันจะได้เป็นสมการ การควบคุมแบบ PID คือ

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.4)$$

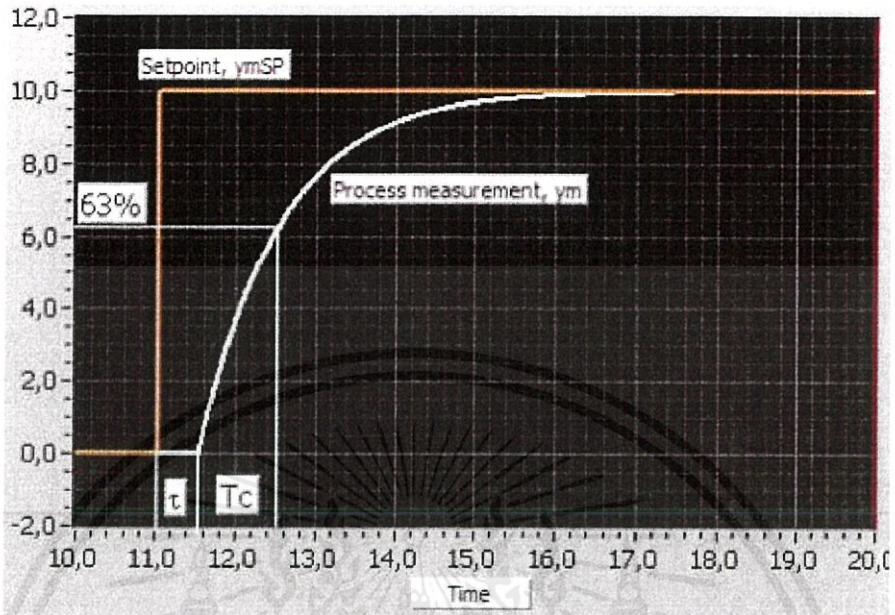
ซึ่งในการตั้งค่าหรือการปรับจูน PID นั้นจะมีทฤษฎีในการปรับจูนหลายทฤษฎี ขึ้นอยู่กับ ความชำนาญ และการประยุกต์ใช้ ยกตัวอย่างการปรับจูน เช่น การปรับจูนด้วยมือ ซึ่งจำเป็นต้องใช้ผู้ ที่มีความชำนาญ หรือวิธีทาง Ziegler-Nichols แต่ในโครงงานฉบับนี้ จะใช้วิธีการปรับจูนตามทฤษฎี ของ Skogestad หลักการของวิธีทาง Skogestad คือการคำนวณและเก็บข้อมูล ซึ่งสามารถจำแนกได้ ดังตาราง

ตารางที่ 2.1 หลักการปรับจูน PID ตามทฤษฎี Skogestad

$H_p(s)$ (process)	K_p	T_i	T_d
$\frac{K}{s} e^{-\tau s}$	$\frac{1}{K(T_C + \tau)}$	$k_1 (T_C + \tau)$	0
$\frac{K}{Ts+1} e^{-\tau s}$	$\frac{T}{K(T_C + \tau)}$	$\min [T, k_1 (T_C + \tau)]$	0
$\frac{K}{(Ts+1)s} e^{-\tau s}$	$\frac{1}{K(T_C + \tau)}$	$k_1 (T_C + \tau)$	T
$\frac{K}{(T_1s+1)(T_2s+1)} e^{-\tau s}$	$\frac{T_1}{K(T_C + \tau)}$	$\min [T_1, k_1 (T_C + \tau)]$	T_2
$\frac{K}{s^2} e^{-\tau s}$	$\frac{1}{4K(T_C + \tau)^2}$	$4(T_C + \tau)$	$4(T_C + \tau)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ K1 คือค่าคงที่มีค่า 1.44 และค่าอื่นๆ หาได้จากสัญญาณที่ต้องการควบคุมดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การหาค่าตัวแปรในการจูนโดยใช้ทฤษฎี Skogestad จากสัญญาณขาออกของระบบ

จากตารางที่ 2.1 เป็นการปรับจูน PID โดยใช้ทฤษฎีของ Skogestad ซึ่งตารางค่าที่ได้ ได้จากสถิติผลการทดลองแล้วเก็บข้อมูลสร้างขึ้นมาเป็นสมการจะเห็นว่าในตารางทฤษฎีของ Skogestad จะสามารถใช้ในการปรับจูนโดยการนำข้อมูลตัวแปรต้นมาใช้คิดในสมการ รวมถึงสามารถปรับจูนจากสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นสมการหลายตัวแปรได้ ข้อดีในการใช้ทฤษฎีนี้คือผู้ปรับจูนไม่จำเป็นต้องมีความชำนาญในการจูน อาศัยเพียงข้อมูลตัวแปรต้นเพื่อคำนวณหาค่าเกณฑ์ตามแต่ตัวแปรที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 สมการทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากที่ได้กล่าวในข้างต้นว่าการส่งกำลังเพื่อใช้ในการเคลื่อนที่ตามทิศทางแนวแกน Z นั้นจะใช้มอเตอร์กระแสตรงในการส่งกำลัง โดยในการทดลองเราจะจำลองสมการคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมผ่านกระบวนการ Simulation ในโปรแกรม MATLAB/Simulink

สมการทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรง จะใช้ทฤษฎีกฎการเคลื่อนที่ของ Newton และทฤษฎีทางไฟฟ้าของ Kirchhoff

แรงบิดของมอเตอร์หาได้จาก

$$T = NBILb \quad (2.5)$$

เมื่อ N คือ จำนวนรอบของขดลวดรอบมอเตอร์

B คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (เวเบอร์/ตารางเมตร)

l คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเคลื่อนที่ (แอมแปร์)

Lb คือ ความยาวของกรอบพันขดลวด (เมตร)

ซึ่งค่า N, B, Lb จะเป็นค่าคงที่ของมอเตอร์แต่ละตัว สามารถแทนค่าได้ด้วยตัวแปร K จะได้

$$T = KI \quad (2.6)$$

ค่าแรงไฟฟ้าเคลื่อนกลับ(Back Emf) หาได้จาก

$$V_b = K\omega \quad (2.7)$$

$$V_b = K \frac{d\theta}{dt} \quad (2.8)$$

สมการของมอเตอร์จะสามารถเขียนได้โดย

$$V - K \frac{d\theta}{dt} = L \frac{di}{dt} + R_i \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$KI = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{bd\theta}{dt} \quad (2.10)$$

จากการรวมกันของกฎของ *Newton* และ *Kirchhoffs* ในสมการที่ (2.9) และ สมการที่ (2.10)

เมื่อ J คือ โมเมนต์ของความเฉื่อยในโรเตอร์ (กิโลกรัม/ตารางเมตร)

b คือ ค่าความฝืดทางกลของมอเตอร์ (นิวตันเมตรวินาที)

K คือ ค่าคงที่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าป้อนกลับ (นิวตันเมตร/แอมแปร์)

R คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าในมอเตอร์ (โอห์ม)

L คือ ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (เฮนรี่)

จากสมการจะเป็นสมการเทียบกับแกนเวลา แต่การออกแบบระบบควบคุมจะใช้สมการเทียบกับความถี่ เพราะฉะนั้นจึงต้องเปลี่ยนสมการบนโดเมนเวลา ให้อยู่บนโดเมนความถี่ด้วยวิธี *Laplace Transform*

จากสมการที่ (2.9) เมื่อเปลี่ยนจากโดเมนเวลาให้อยู่บนโดเมนความถี่จะได้

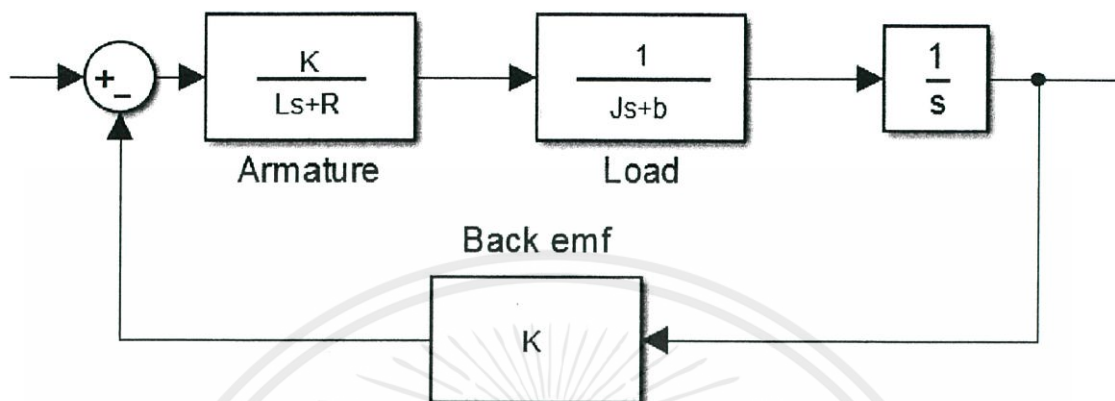
$$I(s) = \frac{V(s) - Ks\theta(s)}{R + Ls} \quad (2.11)$$

จากสมการที่ (2.10) เมื่อเปลี่ยนให้อยู่บนแกนของความถี่จะได้

$$Is^2\theta(s) + bs\theta(s) = \frac{KV(s) - Ks\theta(s)}{R + Ls} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการแบบจำลองของมอเตอร์สามารถเขียนอธิบายได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 สมการทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบเครื่องควบคุมมือสั่นในแนวแกน Z

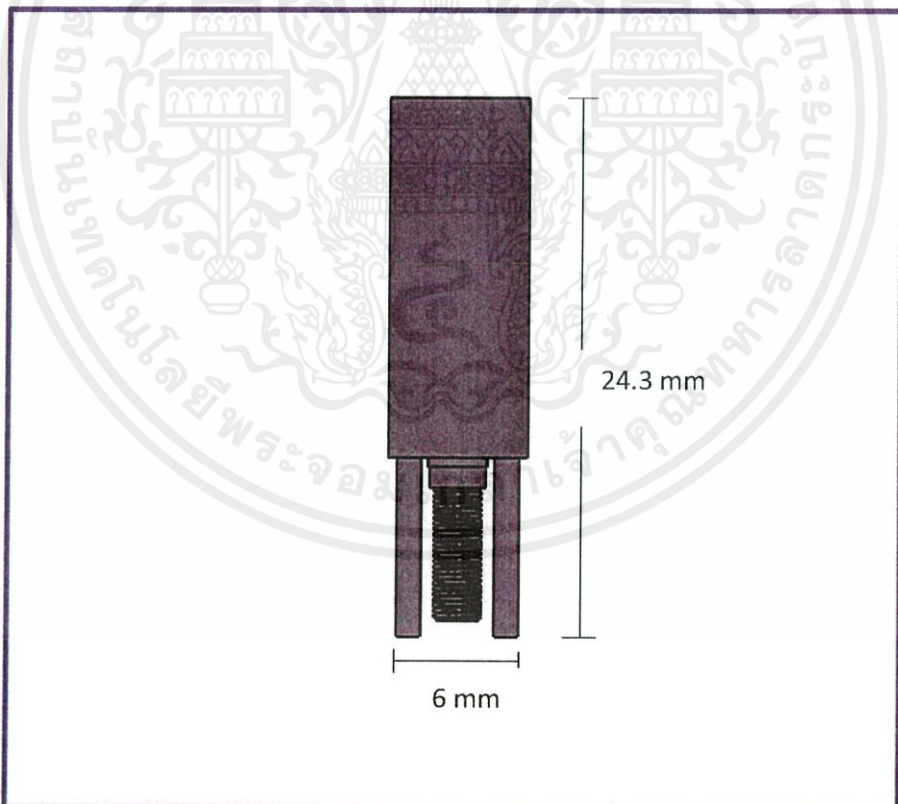
3.1 บทนำ

ในขั้นตอนการออกแบบเครื่องควบคุมมือสั่นในแนวแกน Z นั้นจะแบ่งการออกแบบเป็นสองส่วนคือ การออกแบบทางกล และการออกแบบระบบควบคุม

3.2 การออกแบบทางกลของเครื่องควบคุมมือสั่นในแนวแกน Z

3.2.1 อุปกรณ์ส่งกำลังเพื่อใช้ในการเคลื่อนที่

อุปกรณ์ส่งกำลังเพื่อใช้ในการเคลื่อนที่ตามแนวแกน Z ในโครงงานนี้จะใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง MUDEO1 ริงมีลักษณะเป็นมอเตอร์ซึ่งมีเกลียวยึดติดเพื่อให้เกิดการหมุนของเกลียวเมื่อมอเตอร์มีการหมุนดังรูปที่ 3.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.1 แบบจำลองของ Actuator MUDEO1
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติของมอเตอร์กระแสตรง MUDEO1

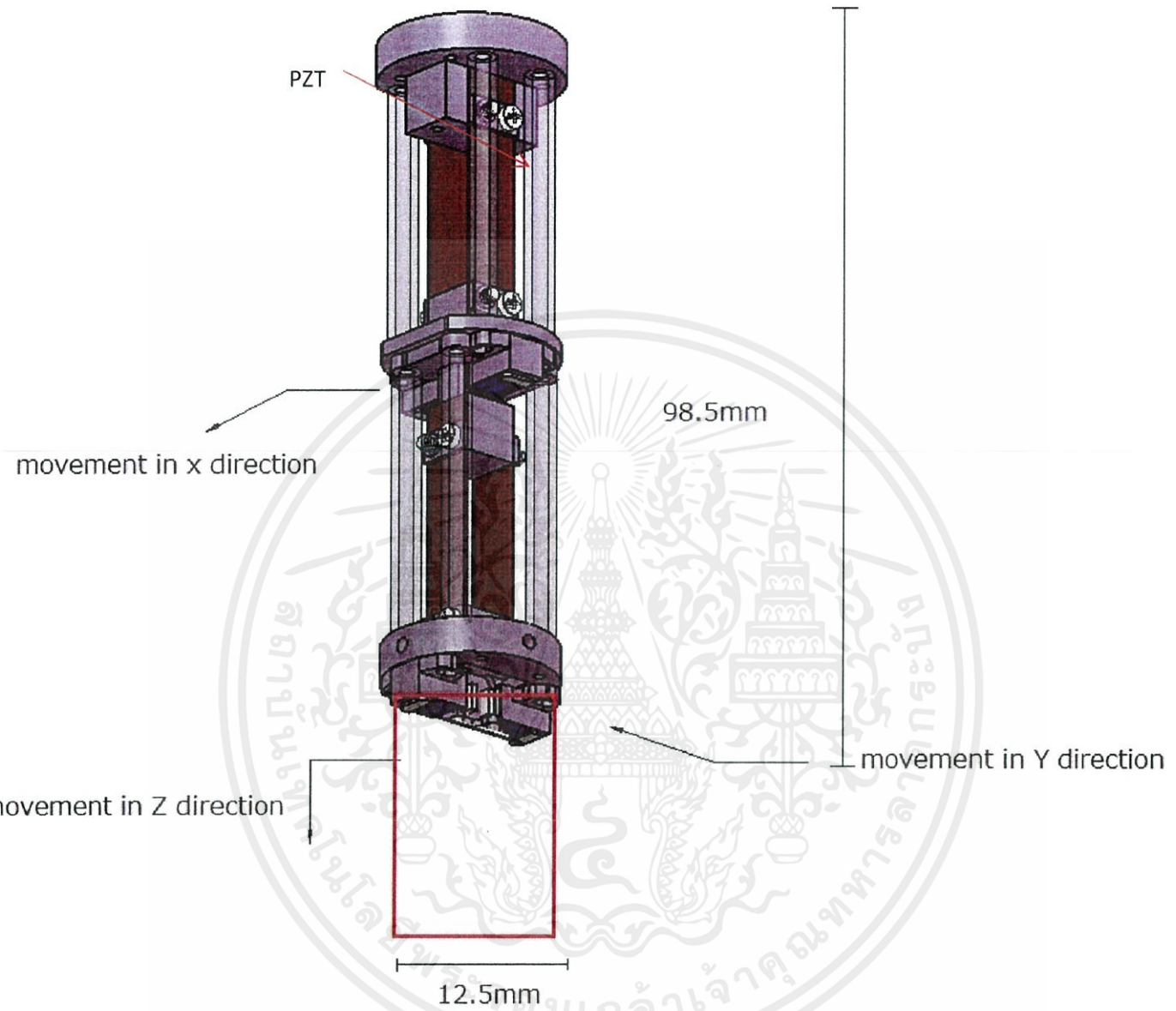
Items	Specifications
Size	$\phi 6 \times L24.3$ (without terminal place and output shaft.)
Weight	1.5g
Maximum stroke	4mm
Theoretical resolution	$0.24 \mu\text{m}/1\text{pulse}$
Thrust	4N(with 0.4mm/s)
Maximum response-speed	0.8mm/s
Voltage rating	5V
Electric current	0.17A
Reduction ratio	1:83.3

จากตารางที่ 3.1 มอเตอร์กระแสตรง MUDEO1 มีขนาดเล็ก มีน้ำหนักเพียง 1.5 กรัม มีระยะการเคลื่อนที่อยู่ที่ 4 มิลลิเมตร มีระยะการเคลื่อนที่ต่อ 1 คลื่นคือ 0.24 ไมโครมิลลิเมตร ซึ่งจากข้อกำหนดของการเคลื่อนที่ระยะกระจัดที่ได้จากการสั่นสะเทือนของมือมนุษย์อยู่ในช่วง 1 มิลลิเมตร ซึ่งมอเตอร์ชนิดนี้ครอบคลุมระยะกระจัดดังกล่าว

3.2.2 หลักการออกแบบเครื่องควบคุมมือสั่นในแนวแกน Z

จากที่ได้กล่าวไปในบทก่อนหน้าว่าเครื่องควบคุมมือสั่นทั้งสามแนวแกนนั้น จะเชื่อมติดกันเป็นชั้นเดียว ดังนั้นการออกแบบจึงต้องคำนึงถึงชั้นส่วนอื่น โดยที่ชั้นส่วนในแนวแกน Z จะอยู่ปลายของอุปกรณ์ นั่นคือชั้นส่วนในแนวแกน Z จะส่งผลกระทบต่อตรงกับชิ้นงานทั้งหมดดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

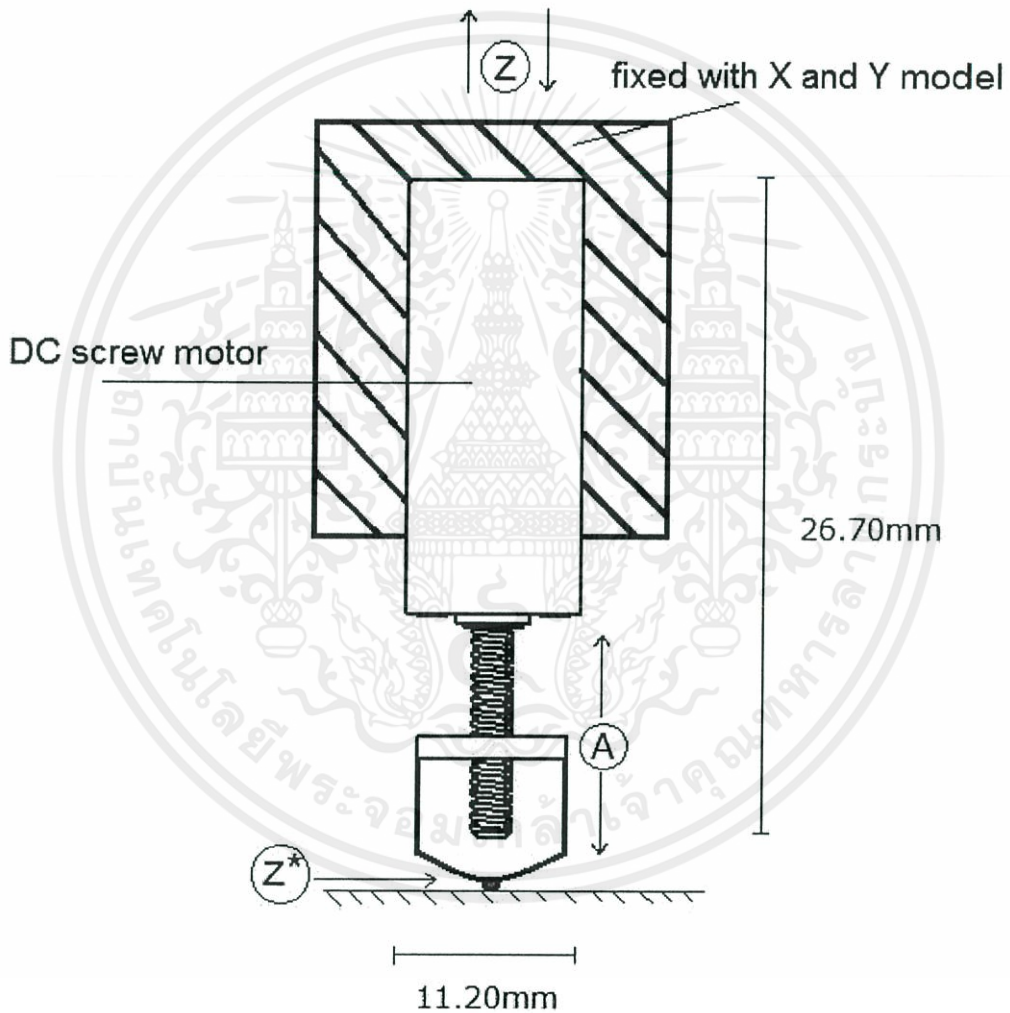


รูปที่ 3.2 แสดงแบบจำลองของเครื่องควบคุมมือสั่นในแนวแกน X และ Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.2 แสดงระบบการเคลื่อนที่ทางกลของแกน X และแกน Y ซึ่งหลักการเคลื่อนที่ตามแนวแกนดังกล่าวได้อธิบายไปในบทก่อนหน้านี้ ชั้นส่วนในแกน Z จะถูกติดตั้งอยู่ภายในช่องสี่เหลี่ยมสีแดง ซึ่งจะเป็นจุดปลายของชิ้นงานซึ่งจะต้องต่อกับอุปกรณ์อื่น เช่น เข็มหรือมีด

ในการออกแบบเครื่องควบคุมมือสั่นในแนวแกน Z จะมีหลักการออกแบบดังรูปที่ 3.3



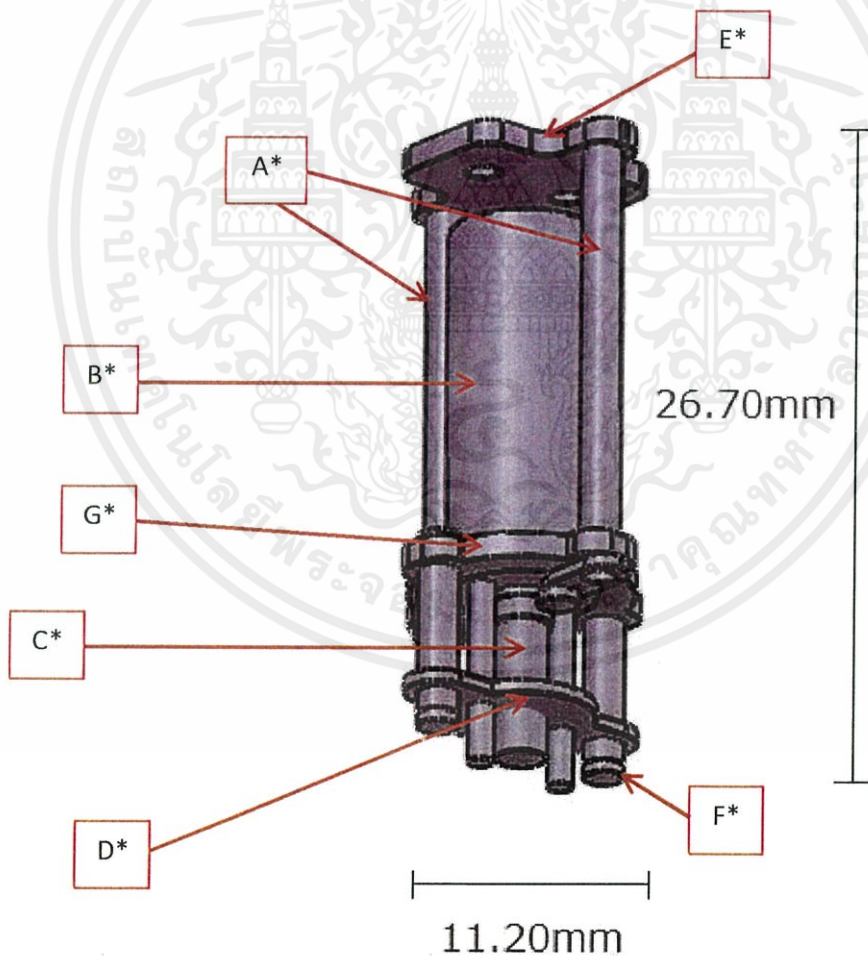
รูปที่ 3.3 แนวคิดการออกแบบการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 แนวทางการออกแบบการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z สามารถอธิบายด้วยรูปที่ 3.3 ด้านบนของ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากศูนย์เทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯ วิศวกรรมศาสตร์
 มอเตอร์จะยึดติดอยู่กับชิ้นส่วนของการเคลื่อนที่ในแกน X และ Y โดยเมื่อมีการเคลื่อนที่ (มือสั่น) ใน

แนวแกน Z มอเตอร์จะหมุนในทิศทาง และทวนเข็มนาฬิกาตามคาบของระยะการสั่นสะเทือน เมื่อมอเตอร์หมุนจะส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงของตัวเครื่องตามการสั่นของมือ เกลียวของมอเตอร์จะหมุนตามระยะของจุด A ที่ออกแบบให้มีโครงสร้างเหมือนน็อตตัวเมียสามารถเคลื่อนที่ขึ้น-ลงได้ ผลจากการเคลื่อนที่ดังกล่าวจะทำให้ที่จุดปลาย หรือจุด Z* ซึ่งเป็นจุดที่จะสัมผัสกับวัตถุเกิดการเคลื่อนที่ให้น้อยที่สุด หรือไม่มีการเคลื่อนที่ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

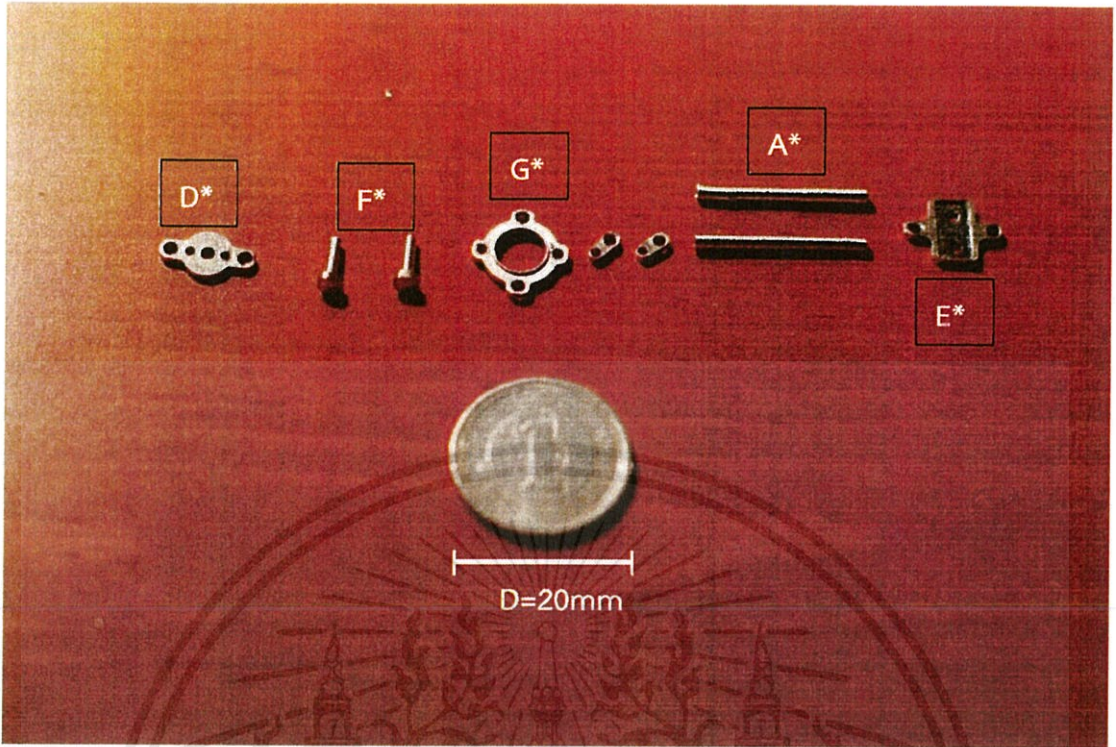
3.2.3 ระบบทางกลเครื่องควบคุมมือสั่นในแนวแกน Z

จากแนวคิดของการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z นำเอาหลักการที่ได้ออกแบบโครงสร้างโดยใช้โปรแกรม Solid Work

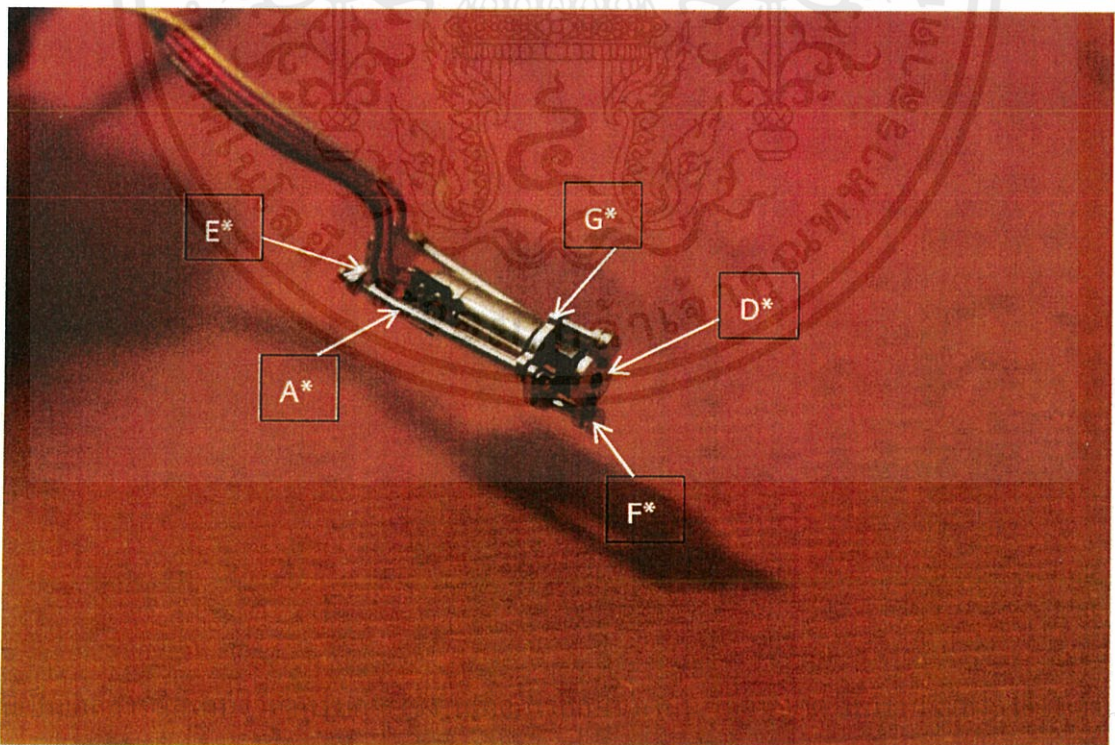


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.4 การออกแบบโครงสร้างการเคลื่อนที่ของเครื่องควบคุมมือสั่นที่ในแนวแกน Z



รูปที่ 3.5 ชิ้นส่วนโครงสร้างการเคลื่อนที่ของเครื่องควบคุมมือสั่งในแนวแกน Z (แยกส่วน)



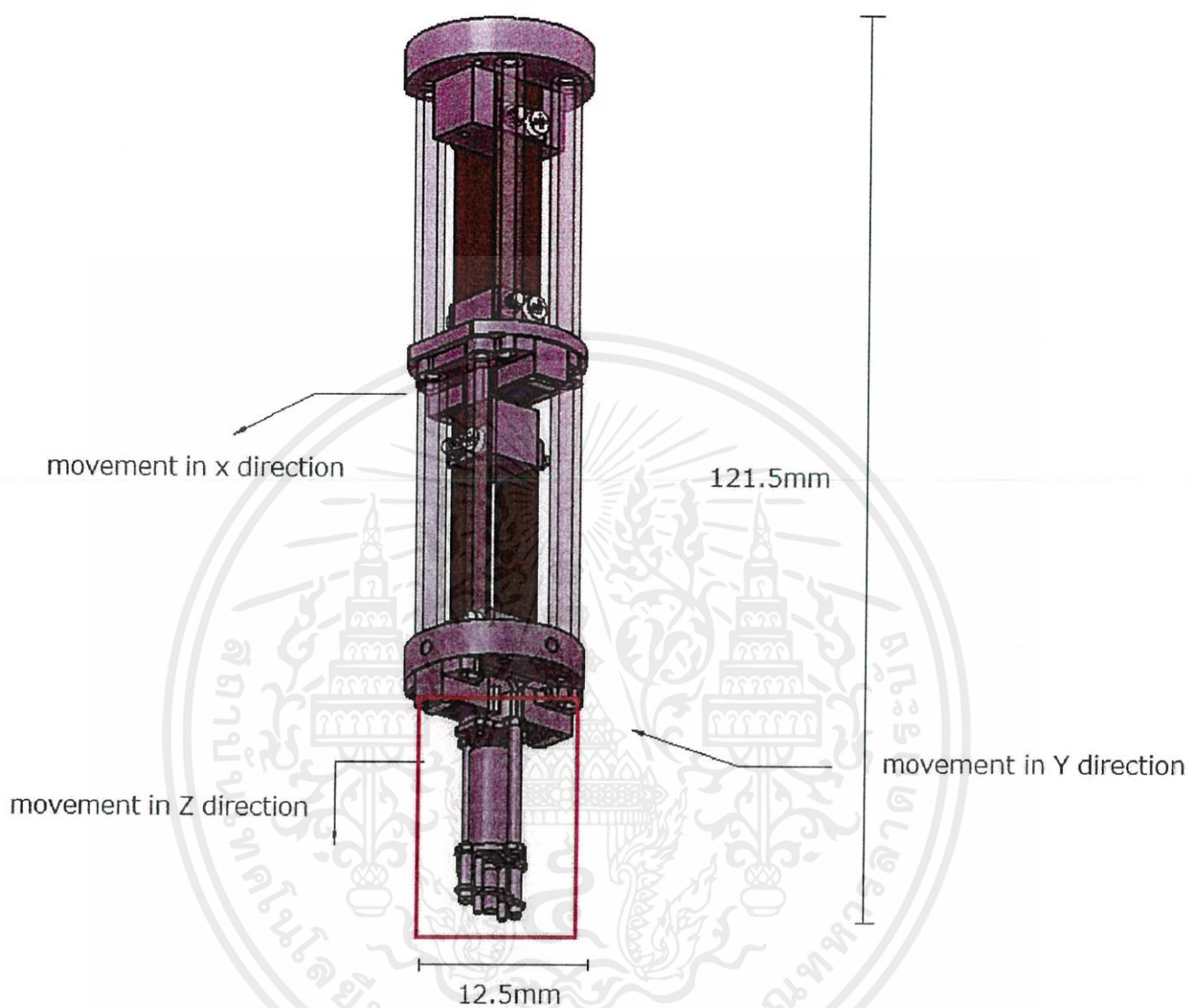
รูปที่ 3.6 ชิ้นส่วนโครงสร้างการเคลื่อนที่ของเครื่องควบคุมมือสั่งในแนวแกน Z

จากรูปที่ 3.4, รูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 สามารถจำแนกหน้าที่ของแต่ละชั้นส่วนได้ดังต่อไปนี้

- ที่จุด A* คือ ขาใช้สำหรับเป็นโครงสร้างหลักของอุปกรณ์
- B* คือ มอเตอร์กระแสตรง MUDEO1
- C* คือ เกลียวของมอเตอร์กระแสตรง
- D* คือ จุดอ้างอิงซึ่งออกแบบเพื่อให้สวมกับเกลียวของมอเตอร์ ใช้สำหรับการเคลื่อนที่ ซึ่งสามารถประยุกต์เอาอุปกรณ์อื่น เช่น เข็มมาติดได้
- E* คือ ฐานของโครงสร้าง ออกแบบเพื่อนำไปยึดติดกับชิ้นส่วนในแนวแกน X และ Y
- F* คือ เป็นตัวกันไม่ให้ชิ้นส่วน D* หลุดจากอุปกรณ์
- G* คือ โครงสร้างสำหรับยึดมอเตอร์

พิจารณาตามโครงสร้างเมื่อมอเตอร์มีการหมุน ชิ้นส่วน C* ก็จะมีการหมุนทั้งในทิศทางทวน และตามเข็มนาฬิกา ทำให้ชิ้นส่วน D* ขยับขึ้น-ลง เพื่อชดเชยระยะกระจัดซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือน โดยระยะกระจัดจะกระทำกับชิ้นส่วนทั้งชิ้นส่วน เว้นแต่จุด D* ที่มีการควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



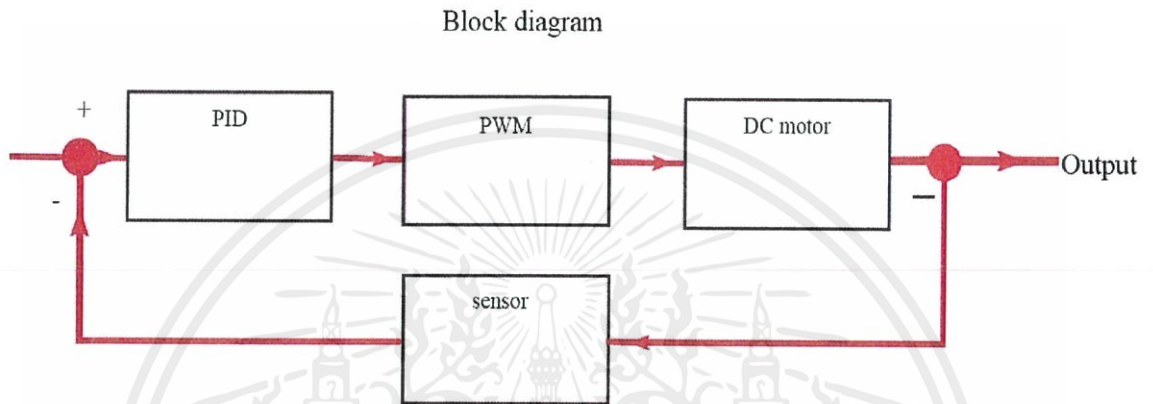
รูปที่ 3.7 ชั้นส่วนของเครื่องควบคุมมือสั่นในแนวแกน Z เมื่อต่อกับชั้นส่วนทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบระบบควบคุมของเครื่องควบคุมมือสั่นในแนวแกน Z

3.3.1 องค์ประกอบของทฤษฎีระบบควบคุม

จากที่ได้กล่าวไปในขั้นต้น การทดลองควบคุมโดยใช้ทฤษฎี PID Controller ในโครงการนี้จะใช้วิธี Simulation แต่โดยทฤษฎีในระบบควบคุมจะประกอบด้วย



รูปที่ 3.8 โครงสร้างทฤษฎีควบคุม

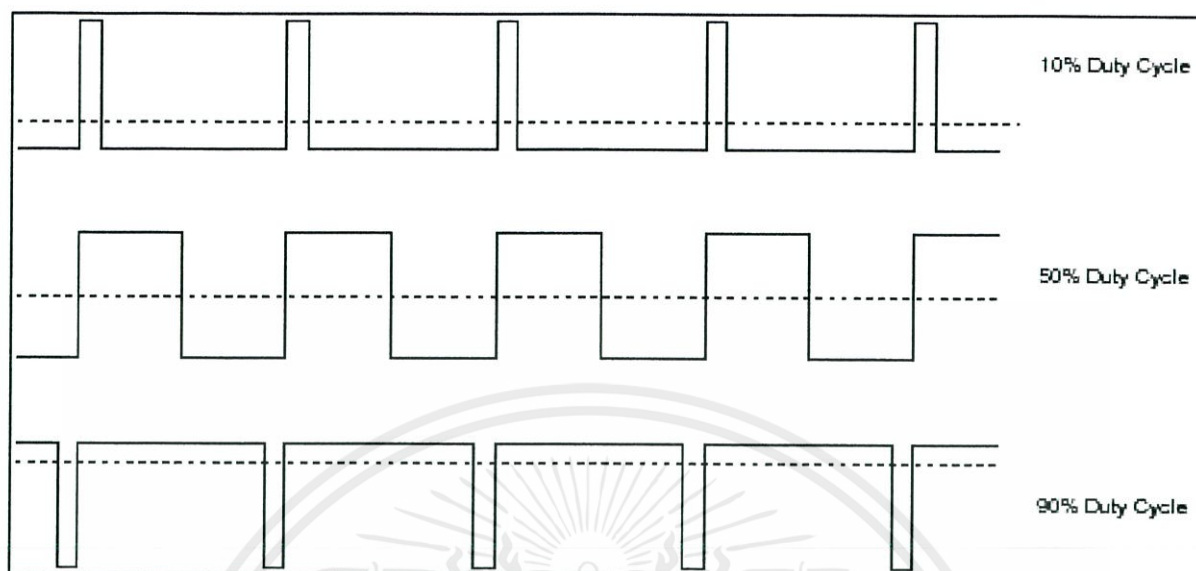
3.3.1.1 สิ่งที่ต้องการควบคุม

ในโครงการนี้สิ่งที่ต้องการควบคุมซึ่งมีผลต่อการ เคลื่อนที่ในแนวแกน Z คือมอเตอร์ กระแสตรง ซึ่งต้องการพลังงานทางไฟฟ้าเพื่อขับมอเตอร์ คำสั่งเพื่อเพิ่มหรือลดความเร็ว และคำสั่งในการเปลี่ยนทิศทางการหมุนของมอเตอร์ซึ่งตัวของมอเตอร์ไม่สามารถควบคุมด้วยตัวเองได้

3.3.1.2 สัญญาณพัลส์ (PWM)

สัญญาณพัลส์จะถูกใช้เมื่อต้องการปรับความเร็ว หรือทิศทางการหมุนของมอเตอร์ หลักการของการเพิ่มหรือลดความเร็วด้วยสัญญาณพัลส์คือ การปรับค่า Duty Cycle ของสัญญาณดัง ตัวอย่างในรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ค่า Duty Cycle ของสัญญาณในเปอร์เซ็นต์ที่ต่างกัน

จากรูปที่ 3.9 จะเห็นว่าเมื่อต้องการให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วค่อยๆ ก็ปรับเปอร์เซ็นต์ของ Duty Cycle ให้น้อยเช่นในตัวอย่างปรับที่ 10 เปอร์เซ็นต์ หากต้องการให้มีค่ามากก็ปรับค่า Duty Cycle ให้สูงขึ้น และหากต้องการให้มอเตอร์หมุนกลับทางค่า Duty Cycle ก็จะมีค่าติดลบ

หลักการของการสร้างพัลส์คือ การเปิด และปิดของสัญญาณ หากต้องการค่า Duty cycle ค่าสูง ก็จะต้องปิดวงจรให้มีระยะเวลานานกว่าช่วงที่เปิดวงจร

3.3.1.3 ระบบควบคุม ซึ่งในโครงการนี้ใช้ระบบควบคุม PID ดังที่อธิบายในบทก่อนหน้า โดยจะใช้ค่าความผิดพลาดที่อ่านได้จากเซนเซอร์ นำมาประมวลผลและปรับแต่งสัญญาณให้เหมาะสมต่อระบบ

3.3.1.4 เซนเซอร์ ในระบบคอนโทรลแบบปิด จำเป็นต้องมีเซนเซอร์เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบสัญญาณก่อนหน้า และสัญญาณปัจจุบันเพื่อนำข้อมูลค่าความผิดพลาดไปใช้ในการควบคุม หากปราศจากเซนเซอร์ระบบควบคุมของเราจะกลายเป็นระบบเปิดที่ไม่มีเสถียรภาพ

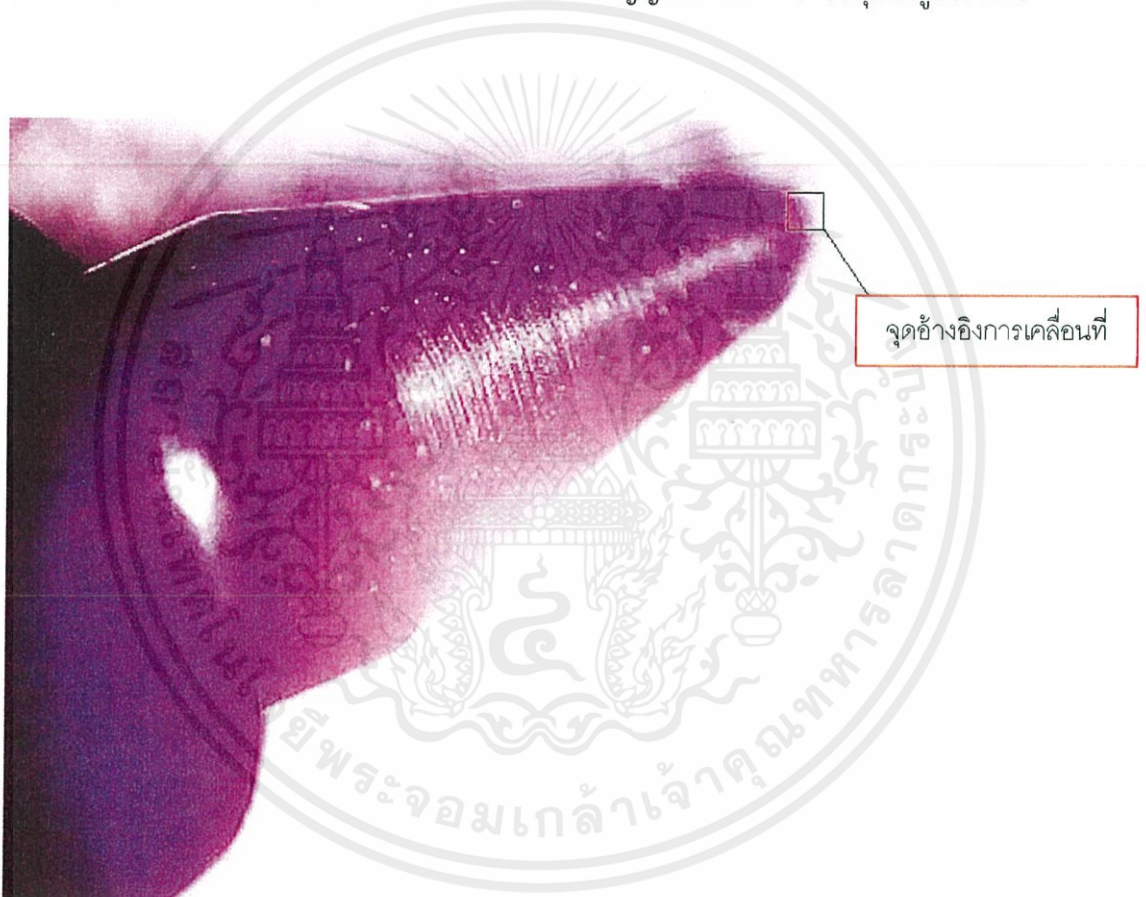
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ออกแบบระบบควบคุมโดยใช้กระบวนการ Simulation

ในกระบวนการ Simulation มีความจำเป็นต้องนำข้อมูลทางกายภาพที่ได้มาแสดงผลเป็นข้อมูลเชิงตัวเลข เพื่อให้สามารถนำข้อมูลนั้นไปใช้ในการคำนวณภายใต้เงื่อนไขของโปรแกรมได้ โดยข้อมูลที่จำเป็นต่อการสร้างระบบควบคุมโดยวิธี Simulation มีดังต่อไปนี้

3.3.2.1 ข้อมูล หรือสัญญาณที่ต้องการควบคุม

สัญญาณที่ต้องการควบคุม ในกระบวนการ Simulation นี้สัญญาณที่ใช้ในการควบคุมคือสัญญาณการสั่นสะเทือนของมือในทิศทางแนวแกน Z ซึ่งวัดด้วยเครื่อง Microscope และประมวลผลผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink จะได้สัญญาณที่ต้องการควบคุมดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 หัวปากกาที่ถูกถือให้อยู่นิ่งด้วยมือ วัดความคลาดเคลื่อนด้วย Microscope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



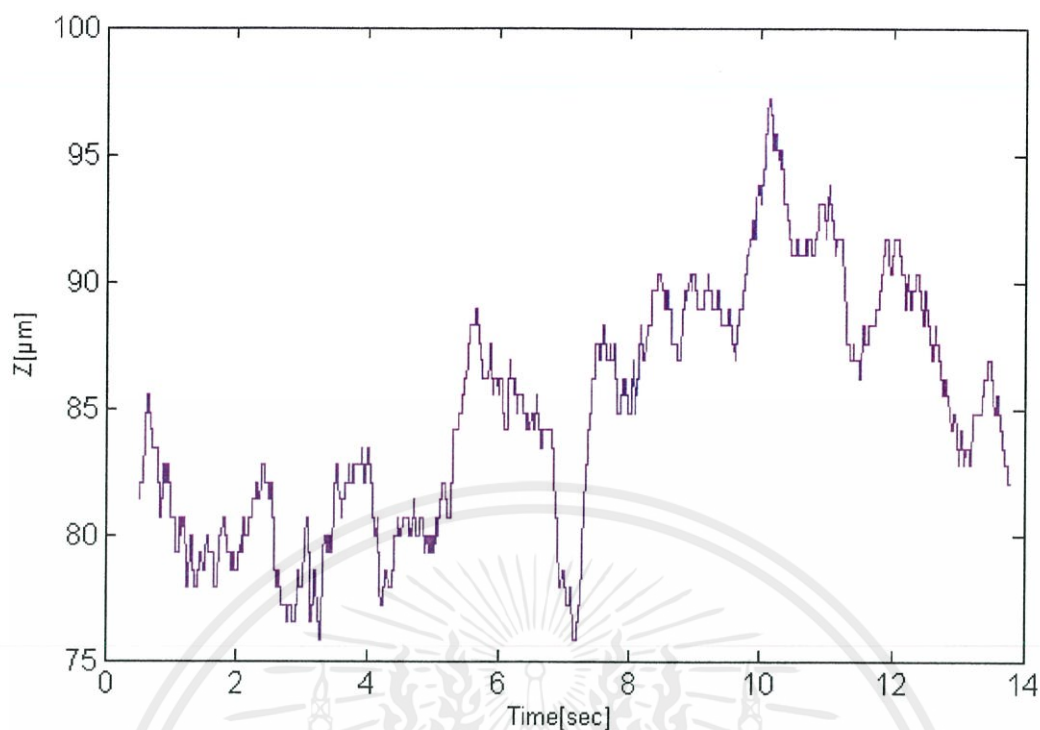
รูปที่ 3.11 Microscope



เอกสารนี้เป็นเอกสาร
"ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้"

ชั้นด้านการค้า
นำไปใช้

รูปที่ 3.12 จอแสดงผลที่ได้จาก Microscope ซึ่งสามารถแสดงค่าความคลาดเคลื่อนเชิงตัวเลขได้



รูปที่ 3.13 กราฟผลของการสั่นสะเทือนของมือเมื่อวัดด้วย Microscope

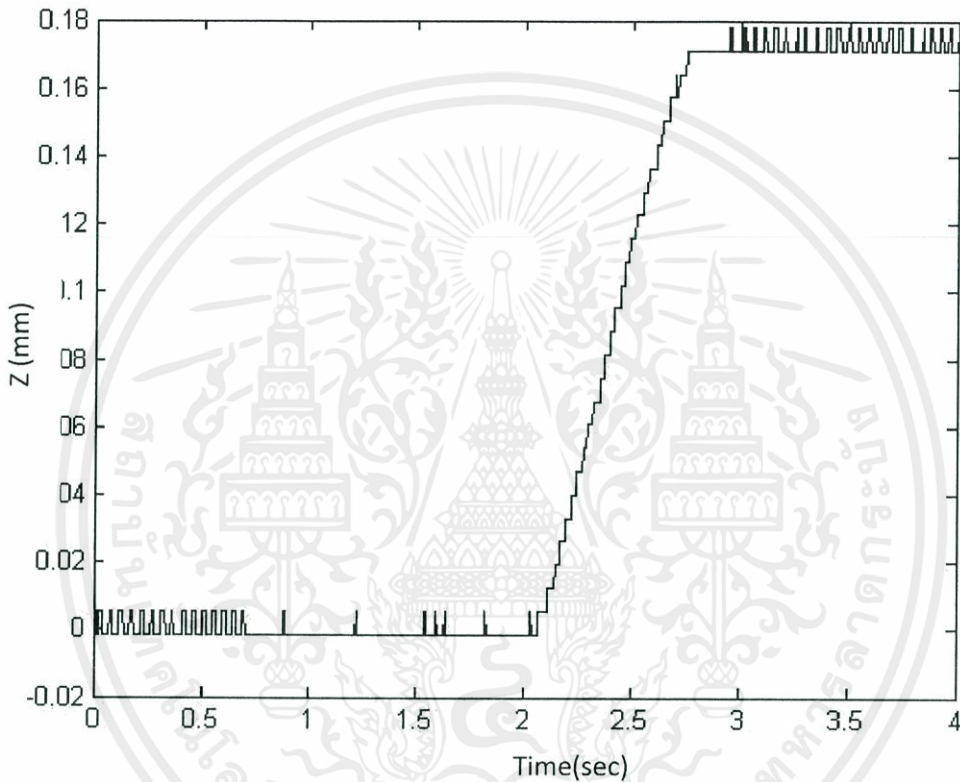
จากรูปที่ 3.13 เป็นภาพแสดงสัญญาณการสั่นสะเทือนของมือผู้ทดลอง ซึ่งวัดจากการถือปากกาแล้วใช้ Microscope ดังรูปที่ 3.11 วัดปลายปากกา รูปที่ 3.10 แสดงปลายปากกาที่ถูกวัดด้วย Micro scope ปลายปากกาที่ใช้วัดจะถูกนำมาใช้เป็นจุดอ้างอิงในเครื่อง Microscope ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเครื่องเพื่อหาระยะกระจัดเมื่อเกิดการสั่น จุดอ้างอิงก็จะมีค่าความคลาดเคลื่อนที่เป็นค่าความผิดพลาดจากจุดอ้างอิงเดิมและจุดใหม่ แสดงผลเป็นระยะกระจัดเชิงตัวเลข ข้อมูลที่วัดได้จะถูกส่งมายังจอแสดงผลในรูปที่ 3.12 ซึ่งตัวเครื่องสามารถแสดงผลเชิงตัวเลข (Excel File) และนำข้อมูลที่ได้แสดงเป็นกราฟดังที่เห็นจากรูปที่ 3.13

จากข้อมูลดังกล่าวเราก็จะได้สัญญาณที่ต้องการควบคุม ซึ่งสัญญาณนี้จะเป็นสัญญาณที่มีการป้อนกลับแล้ว ดังนั้นในการออกแบบสัญญาณดังกล่าวจะทำหน้าที่แทนตำแหน่งของเซนเซอร์ ในระบบควบคุมแบบปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.2 สมการทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรง MUDEO1

จากที่ได้กล่าวไปในบทก่อนหน้าว่า สมการคณิตศาสตร์ของมอเตอร์สามารถหาได้จากการรวมกันของกฎของ Newton และ Kirchhoff แต่มอเตอร์แต่ละตัวก็มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไป การหาสมการทางคณิตศาสตร์ในมอเตอร์แต่ละชนิดจึงมีวิธีการหาต่างกันไป ในโครงการนี้จะหาสมการทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์โดยใช้ผลจากการทดลอง



รูปที่ 3.14 กราฟการเคลื่อนที่ของมอเตอร์เมื่อเทียบกับเวลา

จากรูปที่ 3.14 ความชันของกราฟก็คือ ความเร็วของมอเตอร์ ซึ่งสามารถนำไปหาสมการทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ ด้วยวิธี Fitting Graph ซึ่งเป็นฟังก์ชันของโปรแกรม MATLAB (วิธีการสามารถดูได้ที่ภาคผนวก

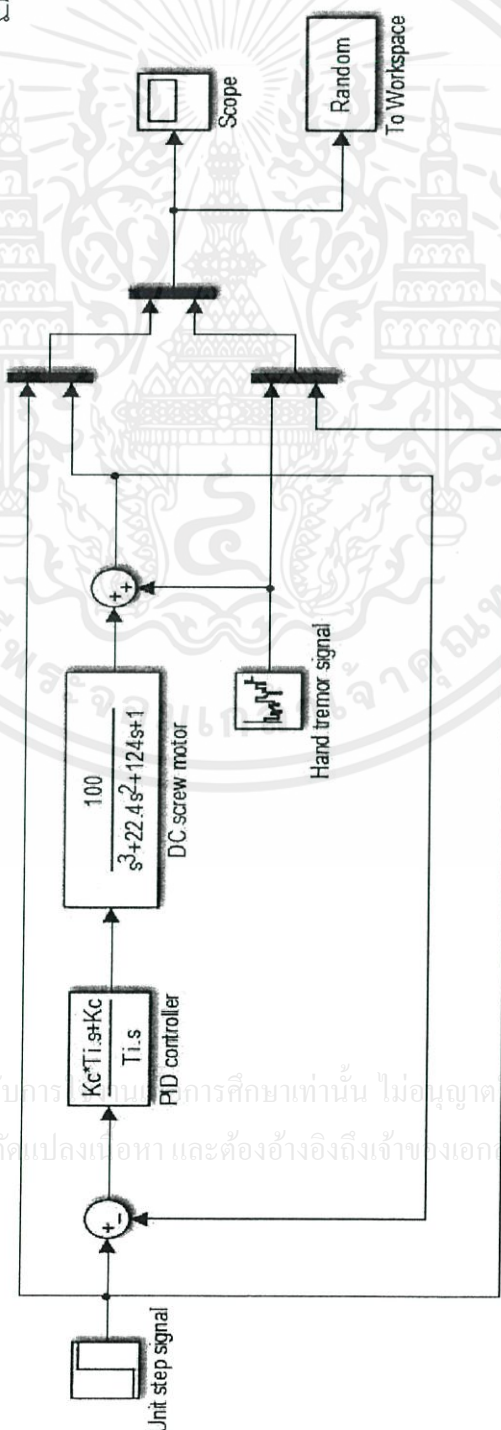
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้สมการทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรง MUDEO1 คือ

$$\frac{100}{s^3 + 22.4s^2 + 124s + 1} \quad (3.1)$$

สมการที่ (3.1) เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ MUDEO1 ซึ่งได้จากผลการทดลองสมการที่ได้จะเป็นตัวเป็นต้น ในกระบวนการ Simulation

จากข้อมูลที่ได้อีกแล้วไปข้างต้น สามารถนำมาออกแบบระบบควบคุมผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink ได้ดังนี้



รูปที่ 3.15 แบบจำลองด้วย Simulink โครงสร้างระบบควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบการเคลื่อนที่ในทิศทางแนวแกน Z นี้จากที่ได้กล่าวในข้างต้นว่าจะใช้มอเตอร์กระแสตรงเป็นตัวส่งกำลังการเคลื่อนที่ โดยที่มอเตอร์กระแสตรงจะมีสมการทางคณิตศาสตร์เป็นโพลีโนเมียล สมการกำลังสอง ซึ่งจะตรงกับตารางของ Skogestad คือ

$$G(s) = \frac{K}{(Ts+1)s} e^{-\tau s} \quad (3.2)$$

ซึ่งจะสามารถหาค่าเกณฑ์ได้โดย

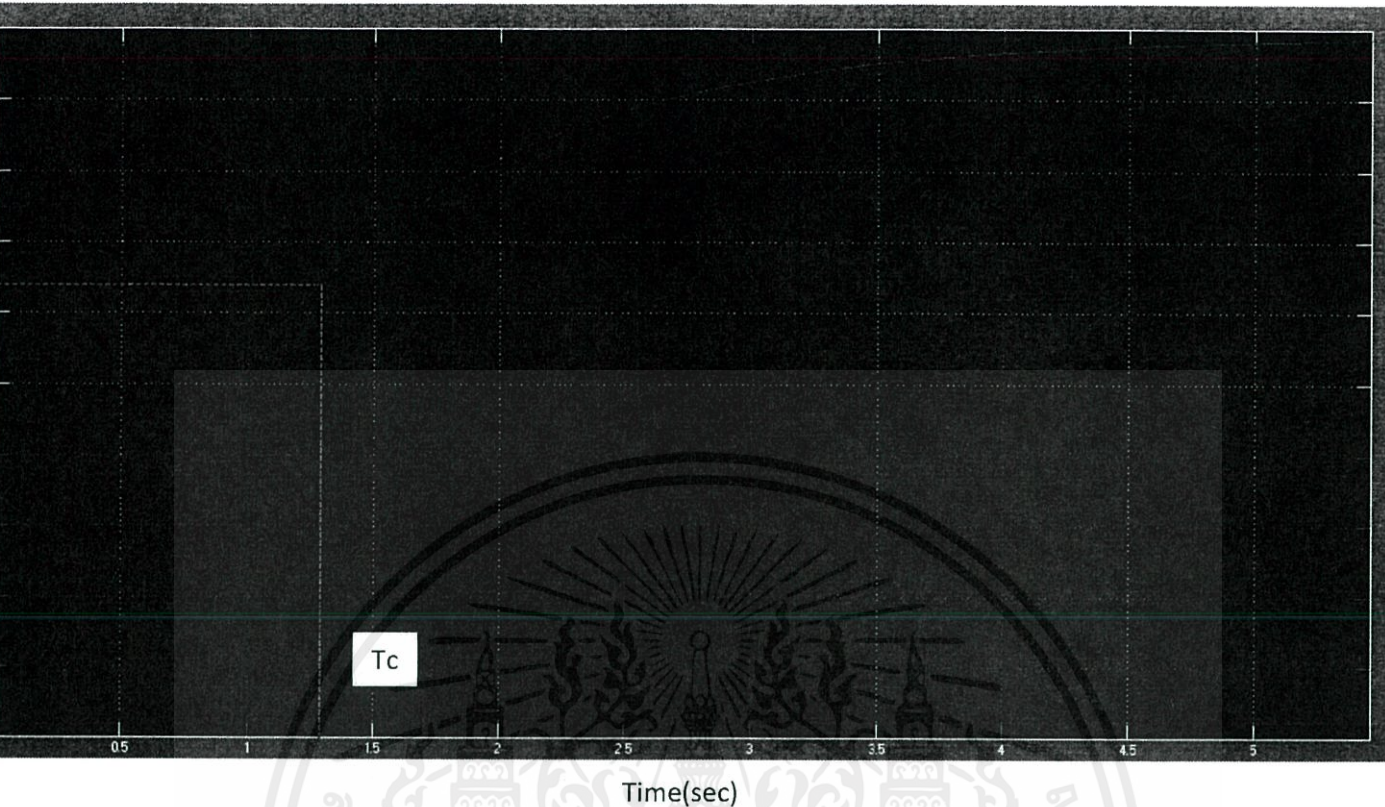
$$K_p = \frac{1}{K(Tc+\tau)} \quad (3.3)$$

$$T_i = K1(Tc + \tau) \quad (3.4)$$

$$Td = T \quad (3.5)$$

เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ส่วนใหญ่สามารถหาได้จากสมการ ดังนั้นจะเหลือเพียงค่า K ที่จะต้องมีการปรับจูนตามความเหมาะสมด้วยตนเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 กราฟแสดงผลตอบสนองของมอเตอร์เทียบกับ Unit Step

เมื่อค่า K_1 เป็นค่าที่กำหนดให้อยู่ในช่วง 1.44-4 แล้วแต่การปรับแต่ง

ค่า T มีค่าน้อยมากสามารถประมาณเป็น 0

ค่า T_c หาได้จากกราฟในรูปที่ 3.16 มีค่าประมาณ 1.3

เพราะฉะนั้นเหลือค่าที่เราต้องกำหนดขึ้นคือ ค่า K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ทดลองและผลการทดลอง

จากที่ได้กล่าวในบทก่อนหน้า หลักการจูน PID โดยใช้ทฤษฎีของ Skogestad จะใช้ค่าตัวแปรที่หาได้จากการคำนวณจากกราฟแทนค่าลงในสมการ โดยจะเหลือเพียงตัวแปร K ที่ต้องปรับจูน และตัวแปร K_1 ที่จะต้องเลือกระหว่างค่า 1.44-4

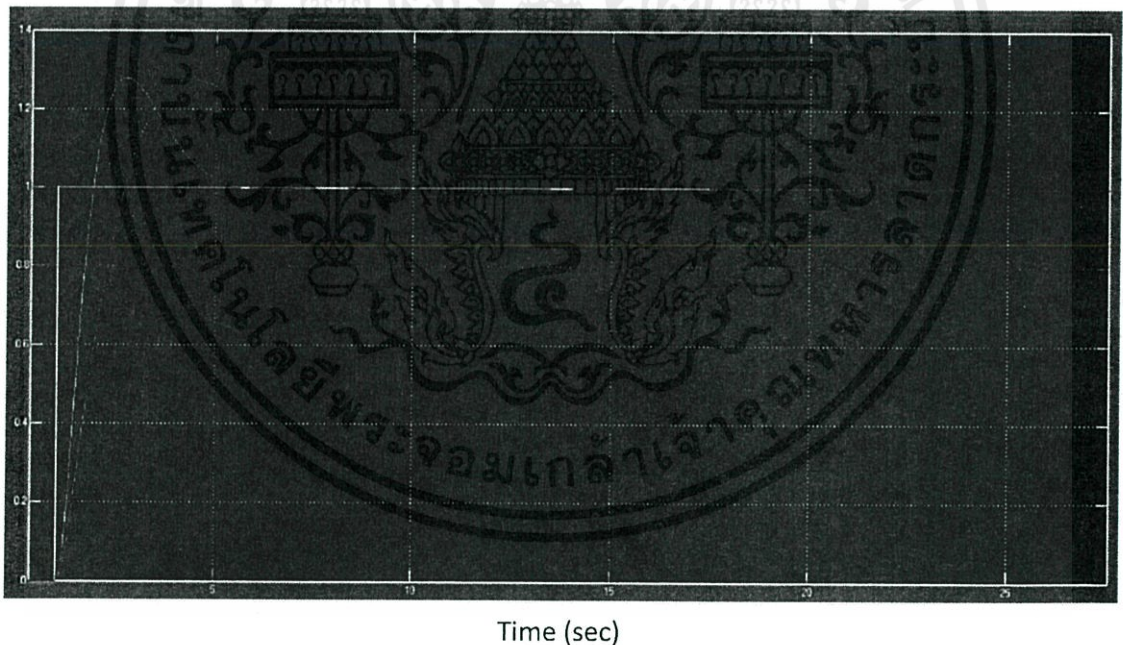
ในการออกแบบการทดลอง จะนำผลการทดลองของระบบที่ควบคุมด้วย PID ในการปรับจูนอย่างง่าย เทียบกับ ผลการทดลองปรับจูน PID ที่ใช้ทฤษฎีของ Skogestad

4.1 ผลการทดลองเมื่อให้ค่า $K_1 = 1.44$ และ 4

4.1.1 เมื่อ $K = 3$, $K_1 = 4$

เมื่อ เส้นสีแดงคือ ระบบที่ถูกควบคุม PID อย่างง่าย

เส้นสีม่วงคือ ระบบที่ถูกควบคุม PID ที่ใช้ทฤษฎีของ Skogestad



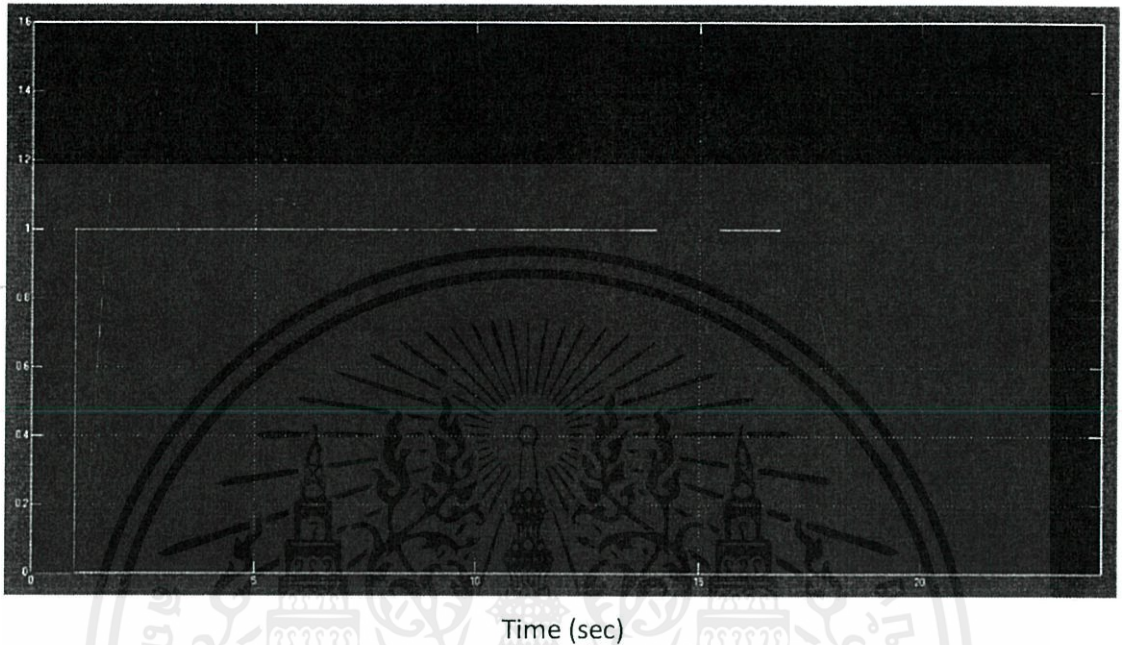
รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบสัญญาณที่ถูกควบคุมต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 เมื่อ $K = 3$, $K1 = 1.44$

เมื่อ เส้นสีแดงคือ ระบบที่ถูกควบคุมด้วย PID อย่างง่าย

เส้นสีม่วงคือ ระบบที่ถูกควบคุมด้วย PID ที่ใช้ทฤษฎีของ Skogestad



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบสัญญาณที่ถูกควบคุมต่างกัน

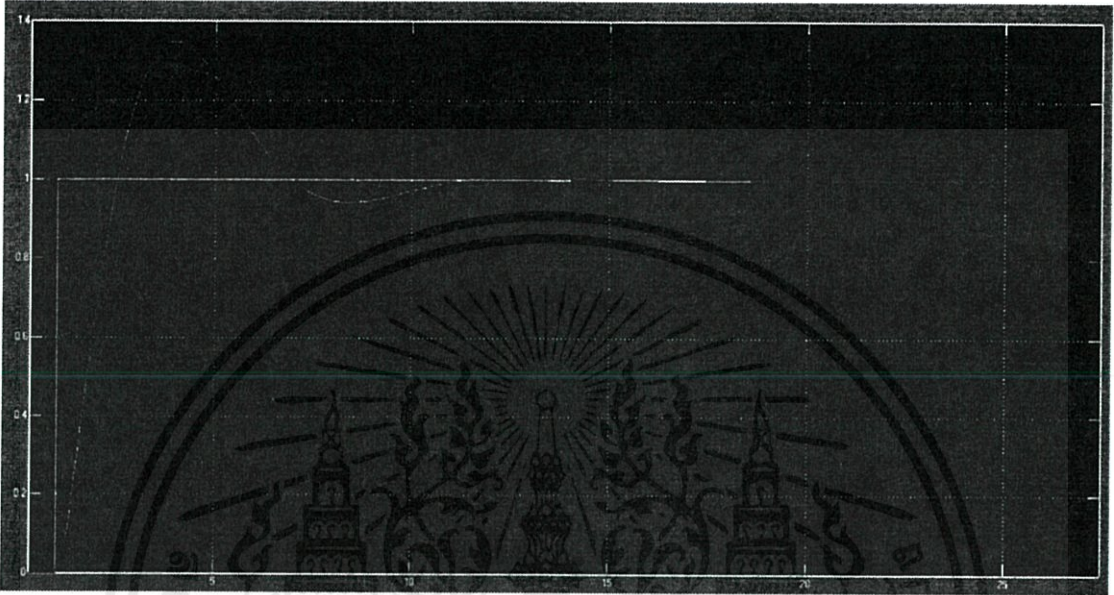
จากรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 เมื่อให้ค่า $K1$ มีค่าน้อย จะเกิด Over Shoot มากกว่าและเข้าสู่จุดสมดุลช้ากว่า ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะใช้ค่า $K1$ เท่ากับ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

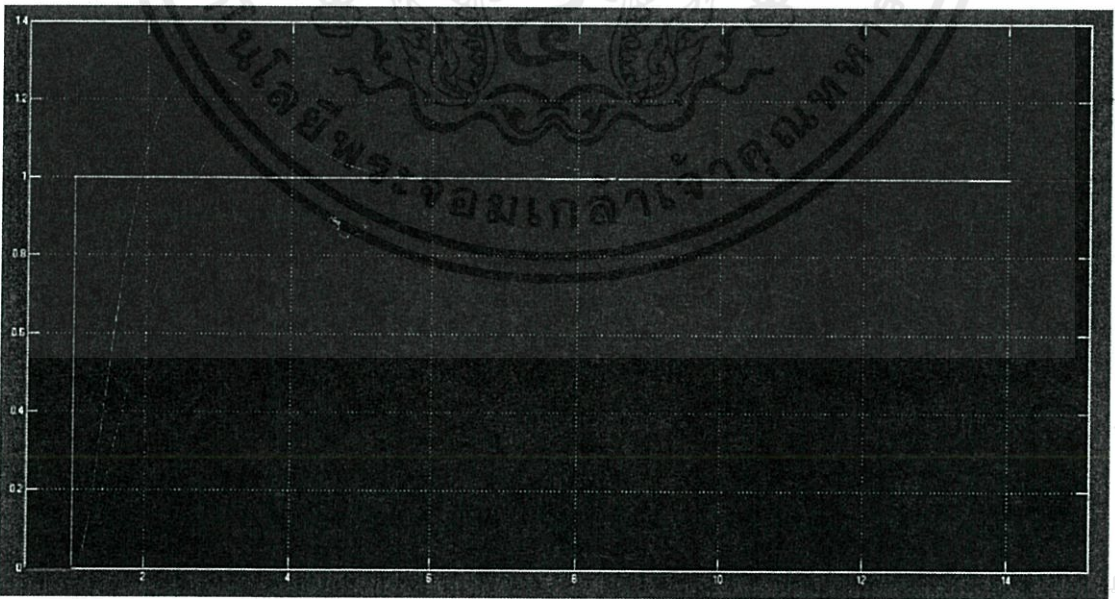
4.2 ผลการทดลองเมื่อเปลี่ยนค่า K เมื่อ K เท่ากับ 1, 2, 3, 4 และ 5

เมื่อ เส้นสีแดงคือ ระบบที่ถูกควบคุมด้วย PID อย่างง่าย

เส้นสีม่วงคือ ระบบที่ถูกควบคุมด้วย PID ที่ใช้ทฤษฎีของ Skogestad



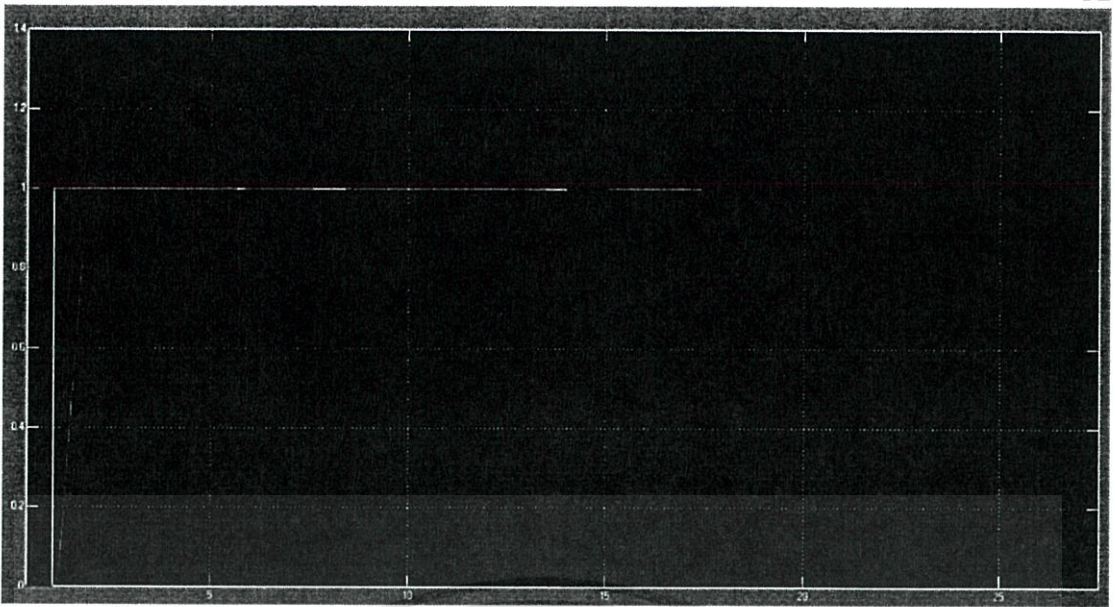
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบสัญญาณที่ถูกควบคุมต่างกันเมื่อค่า $K = 1$



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบสัญญาณที่ถูกควบคุมต่างกัน เมื่อค่า $K = 2$

เอกสาร การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

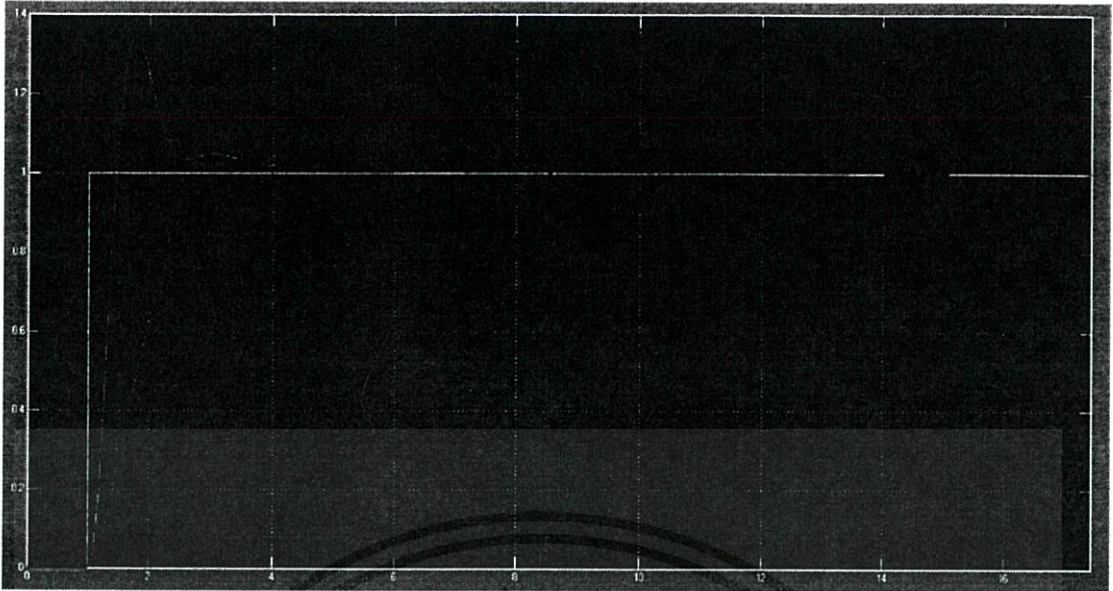


รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบสัญญาณที่ถูกควบคุมต่างกัน เมื่อค่า $K = 3$



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบสัญญาณที่ถูกควบคุมต่างกัน เมื่อค่า $K = 4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



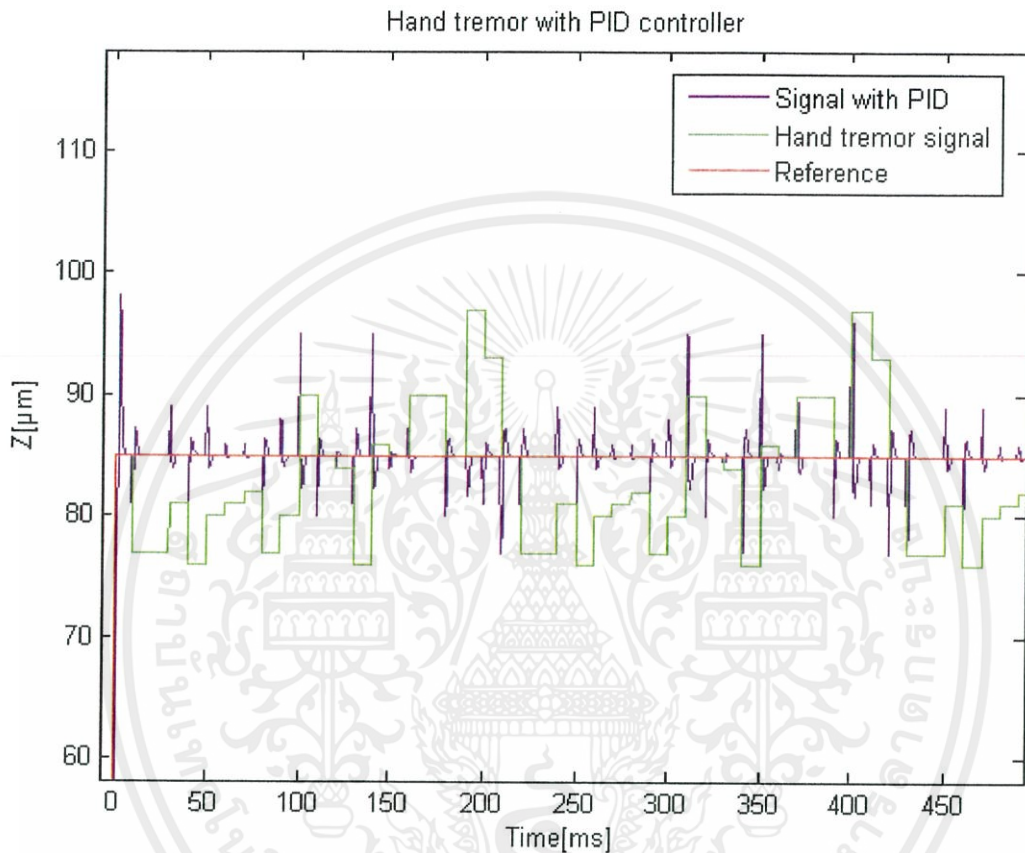
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบสัญญาณที่ถูกควบคุมต่างกัน เมื่อค่า $K = 5$

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า เมื่อค่า K มีค่าเท่ากับ 1 สัญญาณที่ได้จะมี Overshoot ที่สูง และใช้เวลานานกว่าจะเข้าสู่จุดสมดุล เมื่อเทียบกับการใช้ค่า K ที่เท่ากับ 2 และ 3 ตามลำดับ แต่เมื่อปรับค่า K สูงขึ้นเป็น 4 และ 5 จะพบว่า Overshoot จะมีแนวโน้มสูงขึ้น รวมถึงการเข้าสู่จุดสมดุลก็เริ่มที่จะใช้เวลานานมากขึ้น โดยในการเลือกตัวแปรจะขึ้นอยู่กับแต่ละระบบว่าต้องการระบบแบบใด เช่น ต้องการระบบที่เข้าสู่จุดสมดุลเร็ว แม้ว่าจะมี Overshoot มาก หรือระบบที่มี Overshoot น้อย แต่ก็ใช้เวลามากกว่าเพื่อเข้าสู่จุดสมดุล โดยจะเลือกค่า K ที่เท่ากับ 3 เพื่อใช้ในการ Simulation ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดลองเมื่อนำข้อมูลการสั่นสะเทือนของมือมาควบคุมด้วย PID Controller

จากข้อสรุปในหัวข้อที่ 4.1 และ หัวข้อ 4.2 จะได้ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับควบคุม PID ควบ แล้วนั้นคือใช้ค่า K_1 ที่ 4 และใช้ค่า K ที่ 3 ต่อไปจะเป็นการนำเอาระบบควบคุมมาควบคุมด้วยระบบ PID ดังกล่าว



รูปที่ 4.8 กราฟการสั่นสะเทือนที่ถูกควบคุมด้วยระบบควบคุม

จากรูปที่ 4.8 สัญญาณการสั่นสะเทือนของมือจะแสดงในกราฟสีเขียว ซึ่งสัญญาณที่เห็นเป็นสัญญาณที่มีความช้ากว่าปกติ 5 เท่า กราฟสีน้ำเงินคือสัญญาณการสั่นสะเทือนดังกล่าวนำไปควบคุมด้วย PID Controller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

จากการควบคุมมือสั่นด้วยการใช้การส่งกำลังจากการหมุนของมอเตอร์ โดยใช้ PID Controller ในการควบคุมมอเตอร์พบว่า ไม่สามารถควบคุมสัญญาณการสั่นสะเทือนของมือได้ เนื่องจากสัญญาณดังกล่าวมีความถี่มากเกินไป สัญญาณการสั่นสะเทือนของมือที่สามารถควบคุมได้นั้น เป็นสัญญาณที่ช้ากว่าสัญญาณจริงอยู่ถึงห้าเท่า ซึ่งแม้ว่าจะทำการลดความถี่ของสัญญาณให้ช้าลง แต่ผลการควบคุมก็ยังไม่สามารถควบคุมได้เท่าที่ควร ยังคงมีโอเวอร์ชูตหลงเหลืออยู่ในระบบ

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากสัญญาณที่ต้องการควบคุมมีความถี่ที่สูง และเร็วเกินกว่าที่ระบบที่ได้ออกแบบไว้จะควบคุมได้ ดังนั้นจึงมีข้อเสนอแนะเพื่อที่จะสามารถนำไปต่อยอดได้คือ

1. ข้อเสนอแนะในระบบทางกล มอเตอร์อาจมีความไวต่อการตอบในการเคลื่อนที่ไม่เพียงพอ ดังนั้นในการต่อยอดอาจจะใช้อุปกรณ์อื่นที่มีความไวต่อการเคลื่อนที่มากกว่า เช่น PZT
2. ข้อเสนอแนะในระบบควบคุม เนื่องจากระบบควบคุมที่ใช้เป็นระบบควบคุมพื้นฐานไม่สามารถควบคุมสัญญาณที่มีความละเอียด ความถี่ และความไวสูงได้ ในการต่อยอดควรจะใช้ระบบควบคุมอื่นที่สามารถติดตามสัญญาณที่มีความไวสูงได้ เช่น Robust Control หรือ LQR Control

เอกสารอ้างอิง

- [1]. S. Yang, R.A. MacLachlan and C.N. Riviere, “Design and analysis of 2DOF handheld micromanipulator,” in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., May 14-18, 2012, pp. 196-1951.
- [2]. A. Bemporad, F. Borrelli and M. Morari, “Model predictive control based on linear programming the explicit solution,” IEEE Trans. Autom. Control, 47, 2002, pp. 1974-1985.
- [3]. R.A. MacLachlan, B.C. Becker, J.C. Tabarés, G.W. Podnar, L. A. Lobes, Jr. and C.N. Riviere, “Micron: An Actively Stabilized Handheld Tool for Microsurgery,” IEEE Transactions on robotics, Vol.28, No.1, pp. 195-212, 2012. No.1, pp. 195-212, 2012.
- [4]. S. Skogestad, “Simple Analytic Rule for Model Reduction and PID Controller Tuning,” J.of Process Control, Vol.13, pp. 291-309, 2003.
- [5]. S. Yang, R. A. MacLachlan, and C. N. Riviere, “Design and Analysis of 6 DOF Handheld Micromanipulator,” 2012 IEEE Int. Conf. Robot. Autom., USA, pp. 1946-1951, May 2012.
- [6]. S.Boksuwan, T.Benjanarasuth, C.Kanamori and H.Aoyama, “Robust Hybrid Control for Two-Dimensional Handheld Micromanipulator,” Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.26, No.3, pp. 331-340, 2014.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

โปรแกรม MATLAB สำหรับการหาค่าสมการทางคณิตศาสตร์
ของ Actuator จากการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม MATLAB สำหรับการหาค่าสมการทางคณิตศาสตร์ของ Actuator จากการทดลอง



1. ป้อนข้อมูลการทดลองเทียบกับเวลาเข้าโปรแกรม MATLAB

The screenshot shows the MATLAB Command Window with the following data entered:

```

>> x=[
-21.59042
-21.46864
-21.46239
-21.47838
-21.47437
-21.47035
-21.46634
-21.46233
-21.45831
-21.4543
-21.45029
-21.44627
-21.44226
-21.43825
-21.43423
-21.43022
-21.42621
-21.4222
-21.41818
-21.41417
-21.41016
-21.40614
-21.40213
-21.39812
-21.3941
-21.39009
-21.38608
-21.38206
  ]
  
```

The Command Window also shows the following data in the Workspace:

```

Name      Value
-----
x         <60x1 double>
y         <355x1 double>
  
```

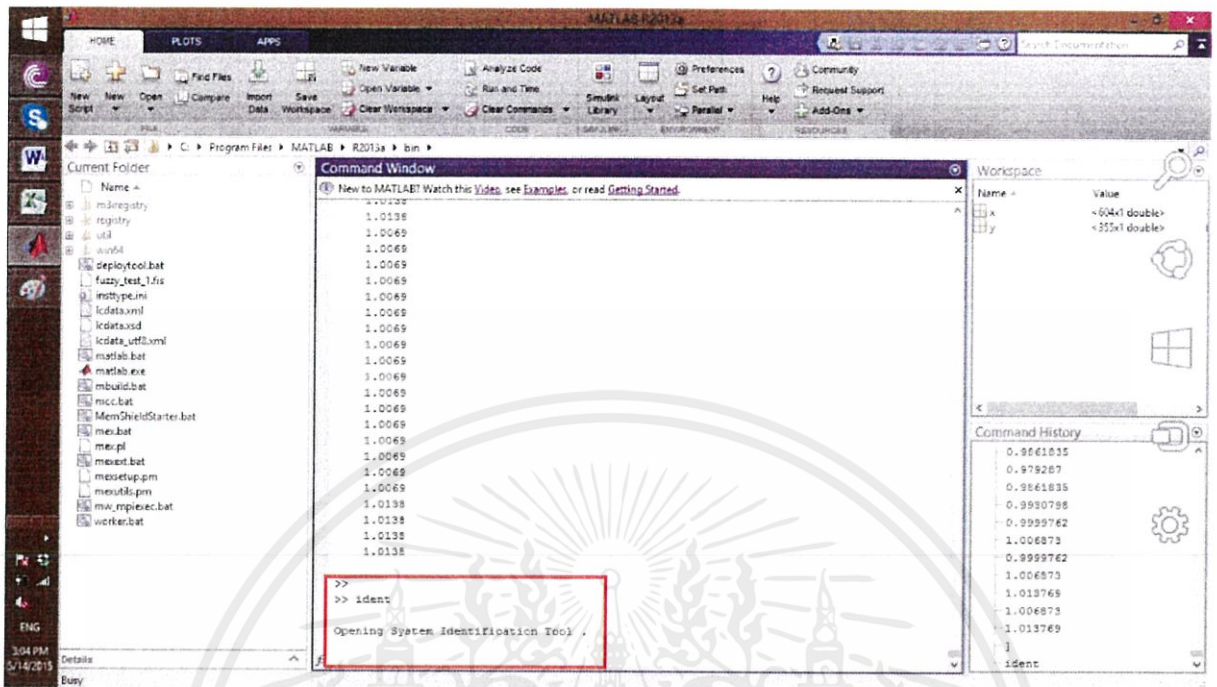
The Command History shows the following commands:

```

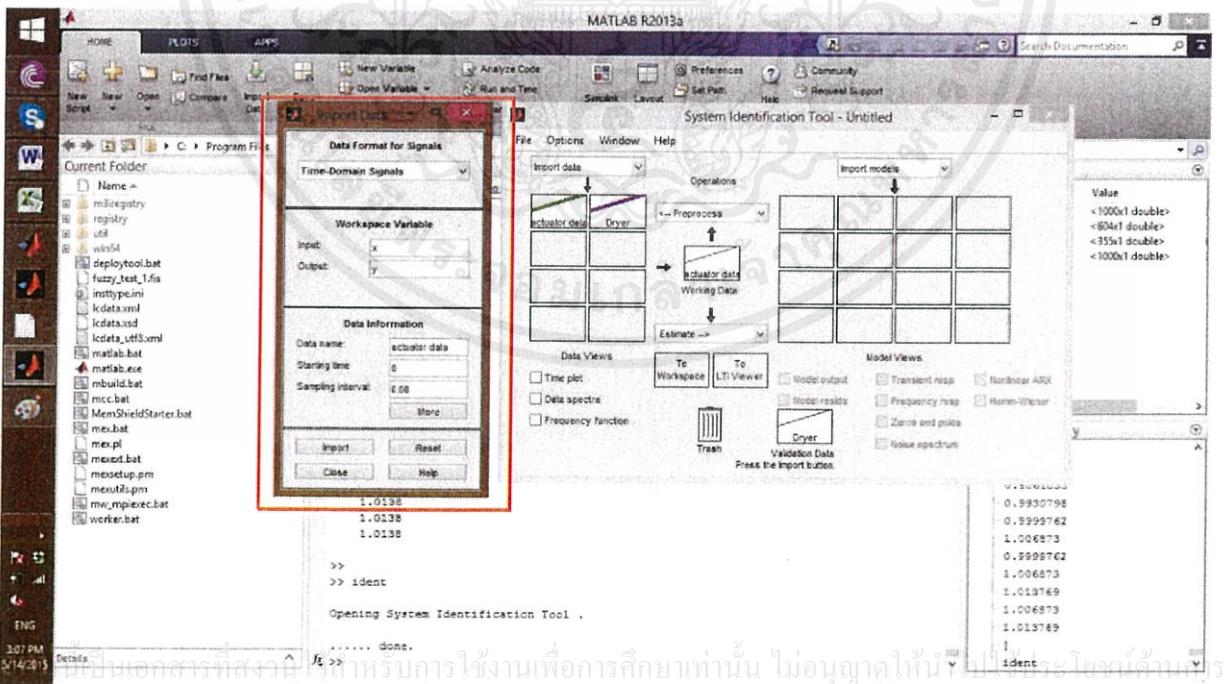
0.9930798
0.9861835
0.979287
0.9861835
0.9930798
0.9999762
1.006873
0.9999762
1.006873
1.013769
1.006873
1.013769
  
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ใช้ฟังก์ชัน ident ซึ่งเป็นฟังก์ชันในโปรแกรม MATLAB



3. ใส่ข้อมูลการทดลอง



เอกสารที่ส่งมาไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำหรือเผยแพร่
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ตั้งค่าข้อมูลเพื่อให้อยู่ในรูปแบบของสมการที่ต้องการ

The screenshot shows the MATLAB R2013a System Identification Tool. The 'Estimate' dropdown menu is open, and the 'Nonlinear Models' option is selected. The 'Transfer Functions' window in the background shows the following parameters:

- Model name: #2
- Number of poles: 2
- Number of zeros: 1
- Continuous-time (selected) / Discrete-time (Ts = 0.05) / Feedthrough
- I/O Delay
- Estimation Options

The 'Workspace' window on the right shows the following values:

Variable	Value
ans	<1000x1 double>
geto_ws	<604x1 double>
u2	<355x1 double>
y	<1000x1 double>
y2	<1000x1 double>

5. เมื่อรูปแบบของสมการแล้ว กด estimate จะได้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ถูกประมาณตามที่ต้องการ

The screenshot shows the MATLAB R2013a System Identification Tool. The 'Estimate' dropdown menu is open, and the 'Transfer Function Models' option is selected. The 'Diary and Notes' window is open, showing the following text:

From input "power" no output "temperature":
 $4.748e05 s + 2.58e05$
 $s^2 + 4.744e05 s + 2.581e05$
 Name: #2
 Continuous-time identified transfer function.
 Parameterization:
 <

The 'Workspace' window on the right shows the following values:

Variable	Value
ans	[]
geto_ws	0
u2	<1000x1 double>
x	<804x1 double>
y	<355x1 double>
y2	<1000x1 double>

ภาคผนวก ข

การปรับจูน PID Controller ด้วยวิธีของ Skogestad



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 7.13 shows the simulated responses for the two control systems due to a setpoint step and a disturbance step. The dead-time compensator gives better setpoint tracking and better disturbance compensation than ordinary feedback control does.

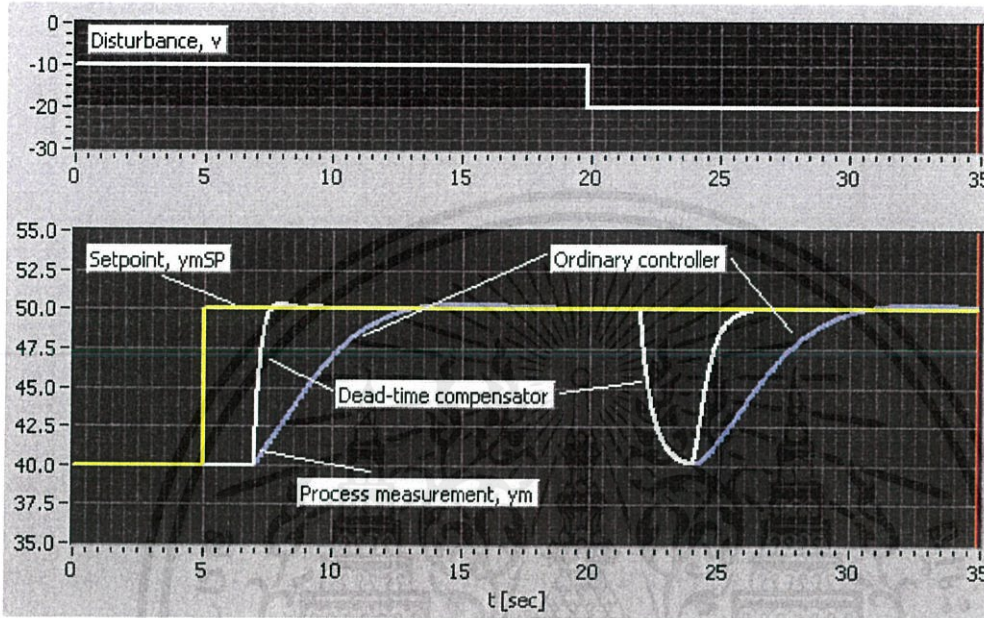


Figure 7.13: Example 7.6: Simulated responses for the two control systems due to a setpoint step and a disturbance step

[End of Example 7.6]

The dead-time compensator is model-based since the controller includes a model of the process. Consequently, the stability and performance robustness of the control system depend on the accuracy of the model. Running a sequence of simulations with a varied process model (changed model parameters) in each run is one way to investigate the robustness.

7.5 Skogestad's method

7.5.1 Introduction

[17] describes controller tuning for several types of transfer function processes – with and without time delay (dead-time). It is assumed that

นอกจากนี้ ยังมีการปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ให้เหมาะสมกับลักษณะของกระบวนการนำเข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

the block diagram of the control system is as shown in Figure 7.2. The method, which can be denoted Skogestad's method after the originator⁸, is based on the direct method described in Section 7.3: The control system tracking function $T(s)$ is specified as a first order transfer function with time delay:

$$T(s) = \frac{y_m(s)}{y_{mSP}(s)} = \frac{1}{T_C s + 1} e^{-\tau s} \quad (7.87)$$

where T_C is the time constant of the control system which the user must specify, and τ is the process time delay which is given by the process model (the method can however be used for processes without time delay, too). Figure 7.14 shows the step response for (7.87).

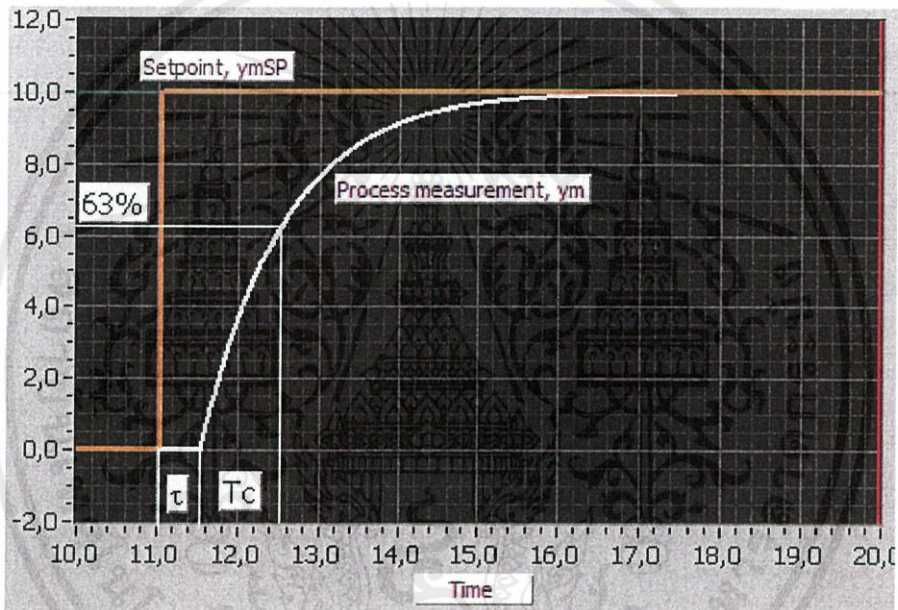


Figure 7.14: Step response of the specified tracking transfer function (7.87) in Skogestad's PID tuning method

The method is based on initially calculating the controller transfer function, $H_c(s)$, by (7.68) which is repeated here:

$$H_c(s) = \frac{1}{H_p(s)} \cdot \frac{T(s)}{1 - T(s)} \quad (7.88)$$

The process transfer function $H_p(s)$ may be of higher order than $T(s)$. Therefore, the specification (7.87) implies pole-zero cancellations in the control system loop transfer function, $L(s) = H_c(s)H_p(s)$. It is assumed

⁸Prof. Sigurd Skogestad

that the process $H_p(s)$ contains a time delay, $e^{-\tau s}$. The controller $H_c(s)$ according to (7.88) will contain the term $e^{-\tau s}$. This term is in $H_c(s)$ approximated by a first order Taylor series expansion which is $1 - \tau s$, and it turns out that the controller is a PI controller or a PID controller (depending on the process to be controlled).

Skogestad's method is in principle the same as dead-time compensation, which is described in Section 7.4, but in the latter there is no approximation of the time delay term. As with dead-time compensation Skogestad's method gives good setpoint tracking. The method gives formulas for the integral time, T_i , which are supposed to avoid slow disturbance compensation. In other controller design methods based on pole-zero cancellations there is a danger of slow disturbance compensation if the cancelled pole is close to zero (corresponding to cancellation of a large process time constant using a large T_i). This problem was demonstrated in Section 7.2.3.

The PID controller is assumed to be on serial form:

$$H_c(s) = K_p \frac{(T_i s + 1)(T_d s + 1)}{T_i s (T_f s + 1)} \quad (7.89)$$

If the PID controller you are going to apply is actually on parallel form,

$$H_c(s) = K_p + \frac{K_p}{T_i s} + \frac{K_p T_d s}{T_f s + 1} \quad (7.90)$$

you should consider *transforming* the PID parameters from serial form to parallel form to be sure that your parallel controller behaves like a serial controller. The transformation formulas are (2.51) - (2.53). (If the controller is a P or a PI controller, the transformation formulas need not be applied since in that case the serial and the parallel form are identical.)

7.5.2 Skogestad's tuning formulas

Skogestad's tuning formulas for several processes are shown in Table 7.1.⁹ According to [17] the factor k_1 in Table 7.1 is 4, but there may be reasons to give it a different value, as argued on page 216. For the second order the process in Table 7.1 T_1 is the largest and T_2 is the smallest time constant.¹⁰

⁹[17] describes controller tuning for one additional process, namely a pure time delay, and the resulting controller is an I controller (Integral controller). However, a pure time delay can be approximated by a first order system with a small time constant (compared to the time delay), and this process is one of the processes in Table 7.1.

¹⁰[17] also describes methods for model reduction so that more complicated models can be approximated with one of the models shown in Table 7.1.

$H_p(s)$ (process)	K_p	T_i	T_d
$\frac{K}{s} e^{-\tau s}$	$\frac{1}{K(T_C + \tau)}$	$k_1 (T_C + \tau)$	0
$\frac{K}{Ts+1} e^{-\tau s}$	$\frac{1}{K(T_C + \tau)}$	$\min [T, k_1 (T_C + \tau)]$	0
$\frac{K}{(Ts+1)s} e^{-\tau s}$	$\frac{1}{K(T_C + \tau)}$	$k_1 (T_C + \tau)$	T
$\frac{K}{(T_1s+1)(T_2s+1)} e^{-\tau s}$	$\frac{1}{K(T_C + \tau)}$	$\min [T_1, k_1 (T_C + \tau)]$	T_2
$\frac{K}{s^2} e^{-\tau s}$	$\frac{1}{4K(T_C + \tau)^2}$	$4(T_C + \tau)$	$4(T_C + \tau)$

Table 7.1: Skogestad's formulas for PI(D) tuning. Standard value of k_1 is 4, but a smaller value, e.g. $k_1 = 1.44$ can give faster disturbance compensation. For the second order the process T_1 is the largest and T_2 is the smallest time constant. (min means the minimum value.)

Unless you have reasons for a different specification, [17] suggests

$$T_C = \tau \quad (7.91)$$

to be used for T_C in Table 7.1.

The Ziegler-Nichols' closed loop method may be applied to most of the processes in Table 7.1 (since the processes have time delay). Generally, Skogestad's method results in better tracking property of the control system (without the quite large overshoot in the response after a step in the setpoint which is typical with Ziegler-Nichols' method), but the disturbance compensation may for some processes become more sluggish than with the Ziegler-Nichols' method. This sluggish compensation can however be speeded up by selecting a smaller value of k_1 , cf. the discussion on page 216. It is here assumed that the disturbance is an input disturbance as explained on page 190.

Example 7.7 Control of first order system with time delay

Let us try Skogestad's method and Ziegler-Nichols' closed loop method for tuning a PI controller for the process

$$H_p(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-\tau s} \quad (7.92)$$

where

$$K = 1; T = 0.5; \tau = 1 \quad (7.93)$$

(The time delay is relatively large compared to the time constant.) The controller parameters are as follows:

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Skogestad’s method, cf. Table 7.1 with (7.91) and $k = 4$:

$$K_p = 0.25; T_i = 0.5 \tag{7.94}$$

- Ziegler-Nichols’ closed loop method:

$$K_p = 0.68; T_i = 2.43 \tag{7.95}$$

Figure 7.15 shows control system responses for the two controller tunings. Skogestad’s method works clearly better than Ziegler-Nichols’ method, both with respect to setpoint tracking and disturbance compensation.

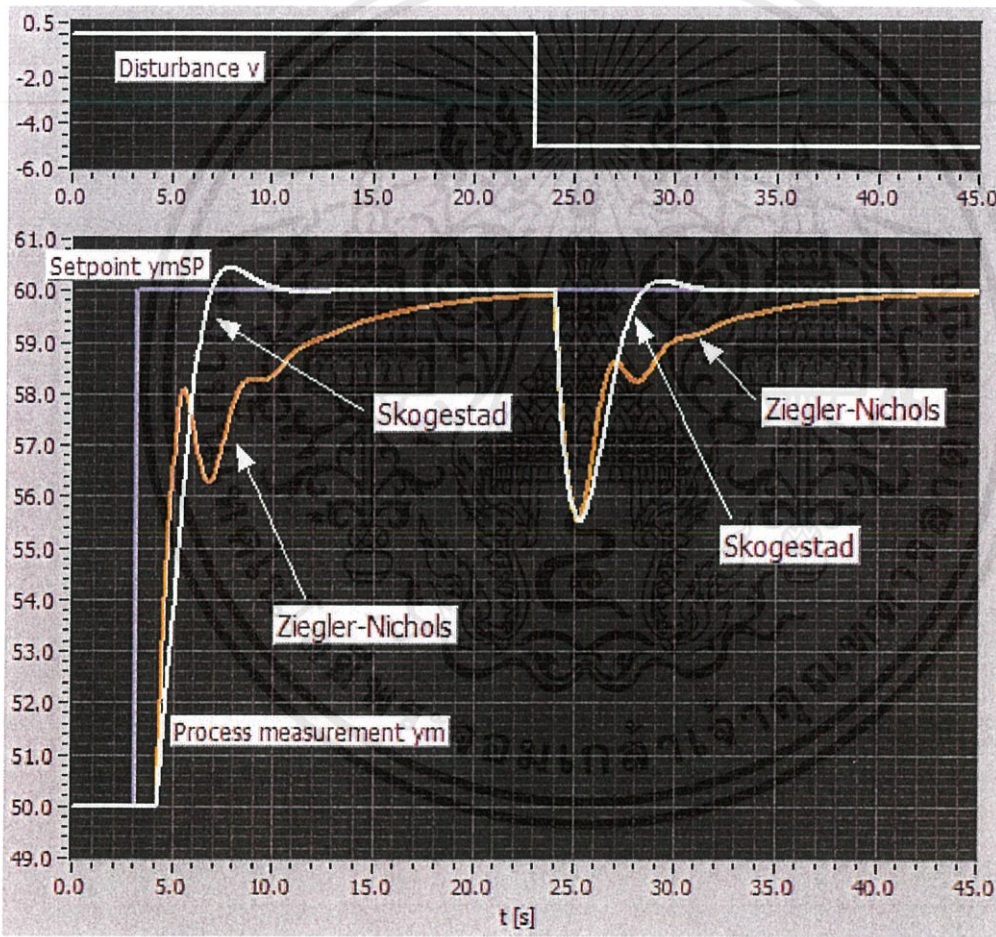


Figure 7.15: Example 7.7: Simulated responses in the control system for two different controller tunings

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 [End of Example 7.7]
 ไม่ว่าจะฉีกใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.5.3 Skogestad's method with faster disturbance compensation

According to [17], k_1 is 4 in Table 7.1. However, through simulations I have observed that $k_1 = 4$ in several cases gives quite sluggish disturbance compensation, although the parameter formulas in Table 7.1 are developed to avoid unnecessary sluggish compensation. A reduced k_1 value, as $k_1 = 1.44$, can give considerably faster disturbance compensation (since the integral time T_i is reduced).¹¹ A drawback of this modification of Skogestad's method is that there will be somewhat larger overshoot in the response after setpoint step, but in most cases such an increased overshoot is acceptable (if the setpoint is constant, which is typical, there is no overshoot, of course). Another drawback of the modification is that the stability robustness of the loop is somewhat reduced because of the reduced T_i .

Example 7.8 PI control of integrator with time delay

The process

$$H_p(s) = \frac{K}{s} e^{-\tau s} \quad (7.96)$$

where

$$K = 1; \tau = 0.5 \quad (7.97)$$

will be controlled by a PI controller. (The wood-chip tank described in Example 2.3 has such a transfer function model.) Below are the PI parameters according to various tuning methods:

- Skogestad's method, cf. Table 7.1, with (7.91) and $k_1 = 4$:

$$K_p = 1; T_i = 4 \quad (7.98)$$

- Skogestad's method, cf. Table 7.1, with (7.91) and $k_1 = 1.44$:

$$K_p = 1; T_i = 1.44 \quad (7.99)$$

¹¹ According to [17] the standard value $k_1 = 4$ gives a transfer function from disturbance v to process measurement y_m in the control system with characteristic polynomial as of a critically damped second order system, i.e. the relative damping factor is $\zeta = 1$. This is quite a conservative choice. Faster but less damped dynamics is obtained with $\zeta < 1$. Simulations shows that $\zeta = 0.6$ is a reasonable value. It gives almost 3 times smaller T_i and therefore faster disturbance compensation. $\zeta = 0.6$ is obtained with $k_1 = 1.44$. It can be shown that the phase margin, PM , of a loop having second order characteristic polynomial is approximately equal to $100^\circ \cdot \zeta$. With $\zeta = 0.6$ this equals 60° a reasonable value in most cases.

- Ziegler-Nichols' closed loop method:

$$K_p = 1.3; T_i = 1.78 \tag{7.100}$$

Figure 7.16 shows simulated responses in the control system for the three different sets of PI parameter values. Skogestad's method with $k_1 = 4$ seems to give the best set point tracking, but there are no oscillations, indicating good (too good?) stability. The disturbance compensation with Skogestad's method with $k_1 = 4$ is clearly the slowest of the three alternatives.

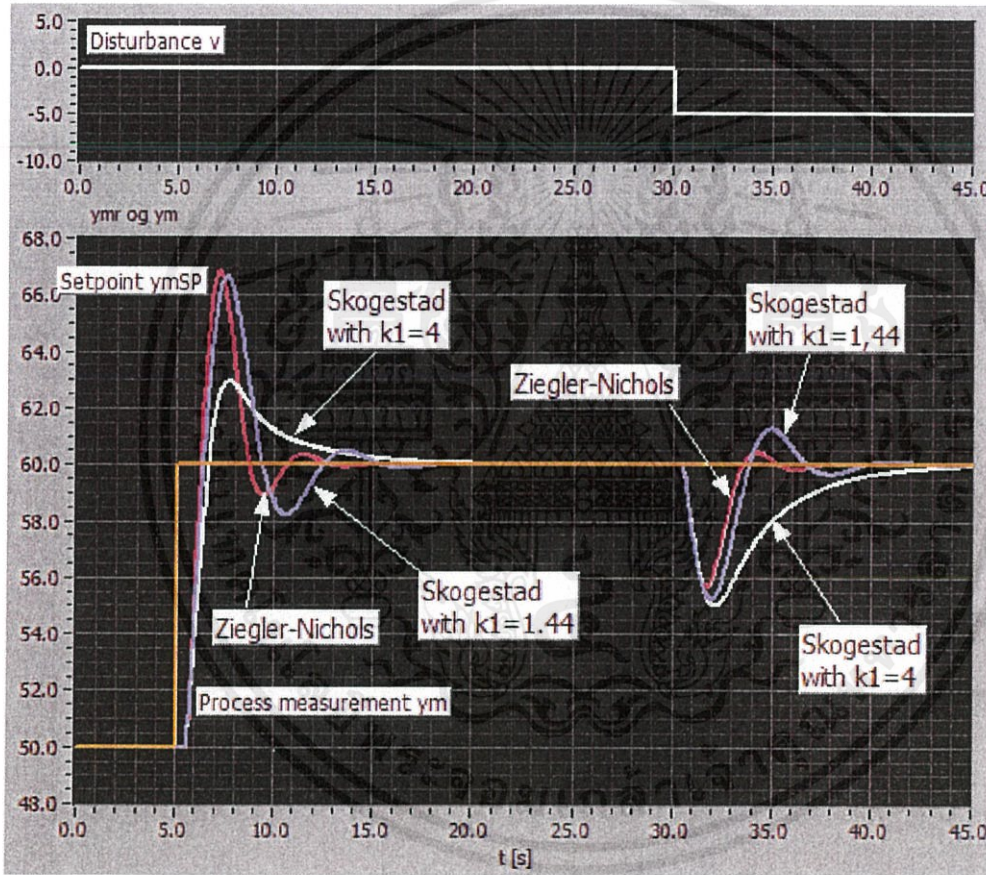


Figure 7.16: Example 7.8: Simulated responses in the control system for various PI tunings

[End of Example 7.8]

Example 7.7 demonstrated that it may be beneficial to set $k_1 = 1.44$ in place of the standard value $k_1 = 4$ because faster disturbance is then

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

obtained. Let us review Example 7.7 which demonstrated that $k_1 = 4$ gave fast and properly damped disturbance compensation. Since $k_1 = 4$ worked well in that example, will the disturbance compensation in that example be worse with $k_1 = 1.44$ than with $k_1 = 4$? The answer is no, because: K_p is in any case independent of k_1 , so it has value 0.25. However, T_i is dependent of k_1 . According to Table 7.1, $T_i = \min [T, k_1 (T_C + \tau)] = \min [T, 2k_1\tau]$, but this minimum value is 0.5 no matter if k_1 is 4 or 1.44. So, this example has indicated that even if $k_1 = 4$ works fine, the suggestion $k_1 = 1.44$ makes no harm in this case.

7.5.4 Skogestad's method for processes without time delay

Each of the processes in Table 7.1 has time delay ($\tau > 0$). Can Skogestad's method be applied to processes *without* time delay? Yes, but in such cases we can not specify T_C according to (7.91) since τ is zero. We must specify T_C larger than zero. The controller parameter formulas are as shown in Table 7.2 (which is equal to Table 7.1 with $\tau = 0$).

$H_p(s)$ (process)	K_p	T_i	T_d
$\frac{K}{s}$	$\frac{1}{KT_C}$	$k_1 T_C$	0
$\frac{K}{Ts+1}$	$\frac{T}{KT_C}$	$\min [T, k_1 T_C]$	0
$\frac{K}{(Ts+1)s}$	$\frac{1}{KT_C}$	$k_1 T_C$	T
$\frac{K}{(T_1s+1)(T_2s+1)}$	$\frac{T_1}{KT_C}$	$\min [T_1, k_1 T_C]$	T_2
$\frac{K}{s^2}$	$\frac{1}{4K(T_C)^2}$	$4T_C$	$4T_C$

Table 7.2: Skogestad's formulas for PID tuning for processes without time delay. Standard value of k_1 is 4, but a smaller value, e.g. $k_1 = 1.44$ can give faster disturbance compensation. For the second order the process T_1 is the largest and T_2 is the smallest time constant. (min means the minimum value.)

Example 7.9 PI control of first order system without time delay

Given the following process:

$$H_p(s) = \frac{K}{Ts + 1} \quad (7.101)$$

where

$$K = 1; T = 5 \quad (7.102)$$

Let us specify $T_C = 1$. We try both $k_1 = 4$ (the standard value) and $k_1 = 1.44$ (which may give faster disturbance compensation). According to Table 7.2 the controller parameters (of a PI controller) are as follows:

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Skogestad’s method, cf. Table 7.2, with $T_C = 1$ and $k_1 = 4$:

$$K_p = 5; T_i = 4 \tag{7.103}$$

- Skogestad’s method, cf. Table 7.2, with $T_C = 1$ and $k_1 = 1.44$:

$$K_p = 1; T_i = 1.44 \tag{7.104}$$

Figure 7.17 shows simulated responses in the control system with the PI parameters values given above. We see that $k_1 = 1.44$ gives somewhat faster setpoint tracking, but with some overshoot, and in addition better disturbance compensation than with $k_1 = 4$.

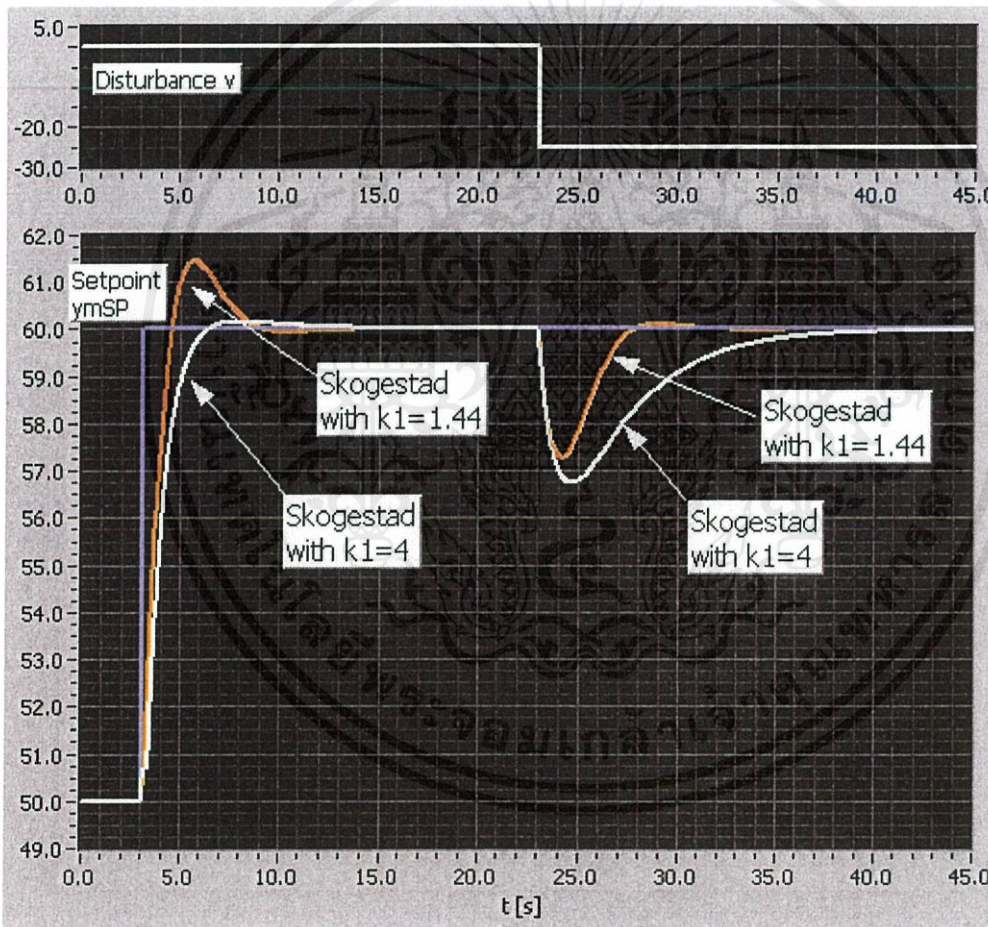


Figure 7.17: Example 7.9: Simulated responses in the control system for two different PI tunings

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 [End of Example 7.9]
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ข้อมูลของ Actuator MUDEO1



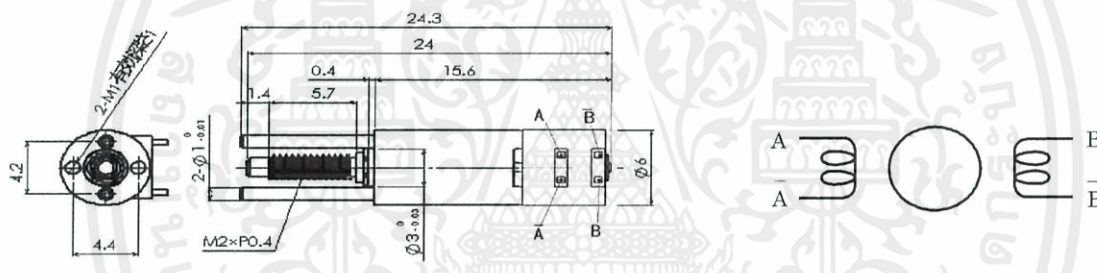
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

φ6MICRO LINER ACTUATOR machines(MUEDO 1)

We developed [φ6Micro liner actuator] with [Micro plastic-gear reducer] and [Stepping motor]. This machine will be used to micro machines of micro-robot-joint, micro-pump, micro-manipulator, etc.

SPECIFICATION

Items	Specifications
Size	φ6×L24.3 (without terminal place and output shaft.)
Weight	1.5g
Maximum stroke	4mm
Theoretical resolution	0.24 μm/1pulse
Thrust	4N(with 0.4mm/s)
Maximum response-speed	0.8mm/s
Voltage rating	5V
Electric current	0.17A
Reduction ratio	1:83.3

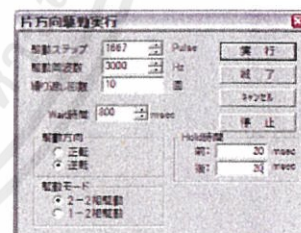


OPTION

- Stepping motor driver kit for 1 ch model
(Model number : SDAB01)
- Size : 65mm x45mm x25mm
- Control method : PC control for USB
(come with demonstration software)
- Electric source : 5V for USB



Motor driver kit



Demonstration software

PRECAUTIONS FOR USE

- Motor heating by long run.
- Restore gear by high-power force of output shaft.
- Motor-terminal burnout by high-power force.

CONTACT ADDRESS

ICOMES LAB CO., LTD,

4-3-5 ueda, morioka-city, iwate-pref, 020-8551, japan collabo-MIU #201

URL <http://www.icomes.co.jp> E-mail info@icomes.co.jp



ภาคผนวก ง

บทความทางวิชาการขณะเข้าร่วม JUSST Program

ประเทศญี่ปุ่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Hand Held Micromanipulator for Micro Scale Operation

KHAMAI Prinya *

UEC Student No. 1395014

King Mongkut's institute of technology
Ladkrabang
Bangkok, Thailand

AOYAMA Hisayuki

Department of Mechanical Engineering
and Intelligent Systems
The University of Electro-Communications
Tokyo, Japan

Abstract

A micromanipulator is a device which is used to physically interact with a sample under a microscope. It is required because the level of precision obtained cannot be achieved by the unaided human hand. However, its only problem is that it currently requires the object to be at a fixed position. Currently Aoyama's lab is working to create a portable manipulator called hand held manipulator. It is much more convenient because the portability allows use of the device anywhere. This research is to allow movement of the hand held micromanipulator in the Z-axis and to control it with high accuracy and stability. This will be achieved by using a linear actuator to create Z-axis movement and a PID controller to accurately control the movement.

Keywords: PID,PZT, micromanipulator, linear actuator, microscope

1 Introduction

A micromanipulator is a device which is used to physically interact with a sample under a microscope, where a level of precision of movement is necessary that cannot be achieved by the unaided human hand. It may typically consist of an input joystick, a mechanism for reducing the range of movement and an output section with the means of holding a microtool to hold, inject, cut or otherwise manipulate the object as required.

Micromanipulators are normally used in conjunction with microscopes. Depending on the application and case, usually micromanipulators may be fitted to a microscope stage or rigidly mounted to a bench next to a microscope. A typical application of micromanipulation is human intracytoplasmic sperm injection.

As the micromanipulator is usually fixed with the bench many composition tools, such as a joystick are required. These tools are inconvenient in an urgent situation and difficult to install. Instead, we can use a handheld micromanipulator in order to avoid these disadvantages. Since we can hold it in real human hand, the joystick and other tools are not required, making it more convenient.

The aim of developing a handheld micromanipulator is to reduce vibration from the human hand for use on bio cells, especially in microsurgery. An active handheld micromanipulator, known as Micron, has been developed for microsurgery and cell manipulation.

When holding a handheld micromanipulator there is in-

evitable vibration from the human hand. The force vibration on handheld manipulator can be analyzed in 3 separate dimensions - X-axis, Y-axis and Z-axis. When a human hand holds an object, even without moving, there is an error vibration. This vibration occurs around 100micrometer, and is the basis of our limited experiments.

However, the specific goal of this research covers the movement of a handheld micromanipulator in the Z-Axis using a microactuator and PID controller for control feedback error.

2 Method

When holding an object, the human hand has a small vibration called human hand tremor. It can be described in 3 dimensions(X, Y, and Z). For each axis the vibration range that occurs is around approximately 100 μm . This paper will describe the movement of the hand hold micromanipulator on Z axis, which is separated into 2 parts: The mechanical part and the control part. The mechanics are based on physical theory and designed using a computer graphic program(Solidwork). The controls are based on static and experiment data and are designed with a simulation program(Matlab).

*the author is supported by UEC Scholarship.

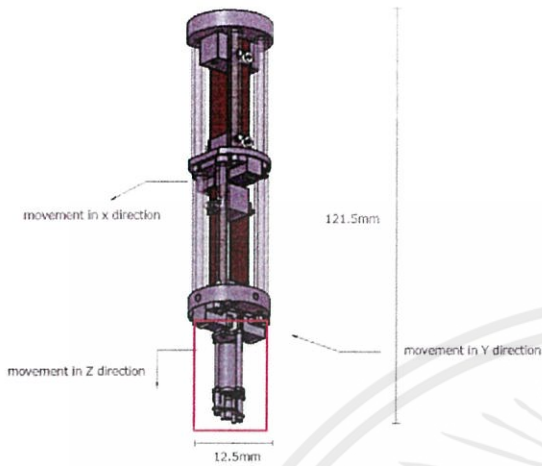


Figure 1: Hand hold micromanipulator in X, Y and Z axis

3 Mechanical Design

The handheld micromanipulator normally moves in Z plane with a range of approximately 100µm range. Figure 1 shows the X, Y and Z axis handheld micromanipulator model. Movement of handheld micromanipulator was divided into 3 parts. Using PZT for movement in X and Y plane. The movement which PZT move on X and Y plane be able to describe as the spring theory.

Based on Newton's law

$$F = ma \tag{1}$$

and

$$F = kx \tag{2}$$

From (1) and (2)

$$ma = kx \tag{3}$$

In (1)-(3), F is force, m is the mass of the mechanism, k is the spring constant and x is distance. This formula is able to explain behavior of the mechanism movement model.

From the formula mass has an effect to the system which 3 part of mechanics was altogether fixed, that mean movement in any plane will has an effect to others. From theory and experiment massy mass cause high vibration than the other.

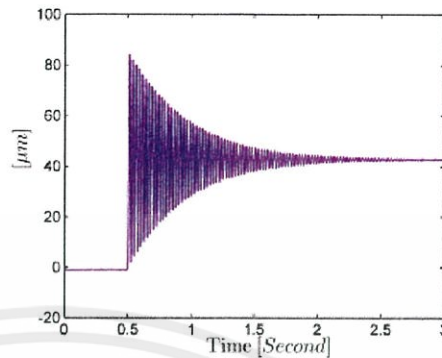


Figure 2: Resonance frequency with light weigh

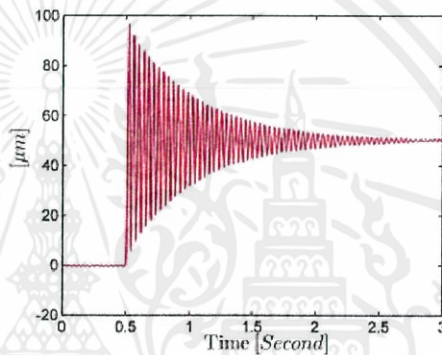


Figure 3: Resonance frequency with heavy weigh

Figures 2 and 3 show the comparison of the resonance frequencies and amplitude with different weights. The heavy weight has higher amplitude than light one as shown in the results. Higher amplitude is one of the factors which make handheld micromanipulator stabilize slower, along with various outside factors. Additionally, due to the added weight of Z-axis manipulator attached at the bottom, the manipulator's weight increases the effect of the resonance frequency on other parts of the manipulator. For this reason, the Z axis design part is required to be lightweight.

Designing Z movement part. Stationary at point z^* is require while z fluctuate moving belong to human hand tremor. In order to control the Z axis, micro linear actuator(MUEDO1) which a DC screw motor is used. For movement in Z direction point A will be fastened with screw as similar as nut, rotation of motor achieve rotation of screw. Rotation of screw make point A move up and down along Z direction. Effect from Point A make point z^* immovable while the hole model moving. Point A be able to apply for other application such as knife or syringe. Linear actuator also used because its size and stroke be able to cover the hand tremor range.

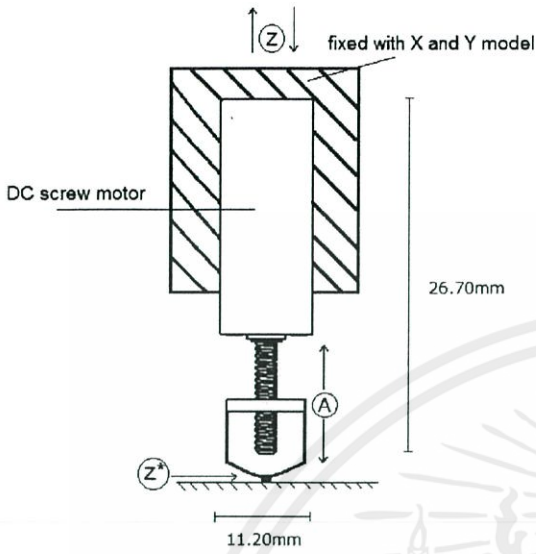


Figure 4: Hand hold micromanipulator in Z axis

4 Control Method

The proposed system is an automatic and continuous system. Because the PID controller is a basic controller which is able to adapt to various mathematic model, it was used in our control system. The input signal is a PWM signal that is capable of controlling speed and direction by turning duty cycle of signal.

4.1 Mathematical Modeling

Because of dynamic behavior of Z axis be able to create a mathematical model. Mathematical model was created for using instead of real mechanic behavior. A graph on figure 5 shows a behavior of Z axis model. Its a linear formula which is able to create a mathematic model.

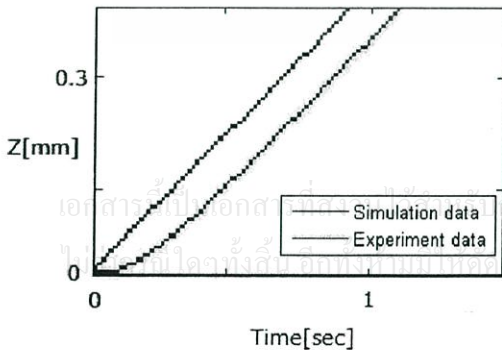


Figure 5: Graph shows a comparing of velocity

between theory and experiment

From graph a linear actuator is a D.C. motor actuator that allow for analyze based on the Newtons law combined with Kirchoffs law and the motor torque is

$$T = NBILb \quad (4)$$

In (4), F is motor force, N is number of turns, B is magnetic field strength, I is current and L is length.

The motor torque is related to the armature current by a constant K

$$T = KI \quad (5)$$

The back electromotive force V_b is related to angular velocity by

$$V_b = K\omega \quad (6)$$

The motor mathematic model can be written

$$V - K\frac{d\theta}{dt} = L\frac{di}{dt} + Ri \quad (7)$$

and

$$Ki = J\frac{d^2\theta}{dt^2} + b\frac{d\theta}{dt} \quad (8)$$

From the Newtons law combined with Kirchoffs law

In (7) and (8), J is moment of inertia of the rotor, b is damping (friction) of the mechanical system, R is electric resistance and L is electric inductance.

Since the formula is in a discrete transform, but to create a system the control required linear transform. To convert transfer function the system allows transferring by using Laplace transform as

From(7),

$$I(s) = \frac{V(s) - Ks\theta(s)}{R + Ls} \quad (9)$$

From(8),

$$Is^2\theta(s) + bs\theta(s) = \frac{KV(s) - Ks\theta(s)}{R + Ls} \quad (10)$$

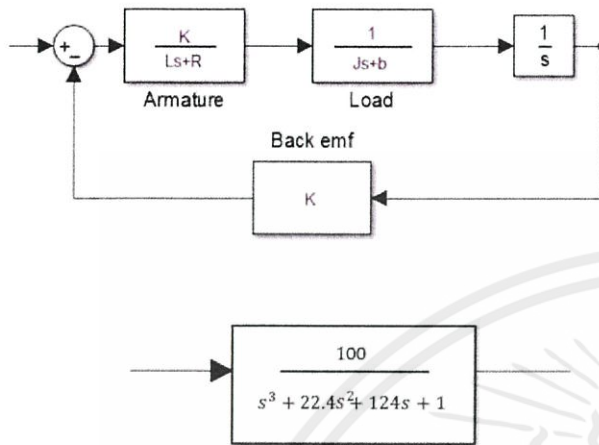


Figure 6: Block diagram and mathematical model of motor

For unknown parameter which each motor has a specific value. An unknown parameter was solved by comparing an experiment data and theory. Variable parameter which has an effect to the system that depending on velocity of motor. Which the experiment data be able to get by comparing position and time from movement of screw of D.C. motor or point A as shown in figure 2. Microscope was used for being a movement sensor that a position and time data can be get. Using function ident in matlab program for fitting experiment data graph. So the final result is mathematical model of this motor appeared and be able to use for simulation experiment.

4.2 Controller Design

A PID controller was used because its a basic controller which is able to solve a different order of DC motor mathematical model by using uncomplicated parameter. Turning PID controller required 3 parameter those are K_p , K_i and K_d . The reason for using PI controller in this project because PI controller be able to reach a steady state rapidly and small steady state error. The important of derivative term is decreasing overshoot but in contrast its make a system become slower for reach to stable.

4.3 PID using Skogestad Method

For turning PID a formality does not fixed solution. Its depend on system and satisfaction of people those designed a system. But the mainstream of turning PID or other control system is tag in equilibrium. For this paper turning PID by using Skogestad was used because of a model is suitable which can be turn with

Skogestad by change a few parameter and not turning as randomly. A solution to reach a parameter by using this method had done by purpose from correct experiment static data. Due to the mechanic formula the formula of Skogestad is

$$G(s) = Kp + Ki + Kd \quad (11)$$

which

$$Gp(s) = Kp, Gi(s) = \frac{Kp}{Tis}, Gd(s) = \frac{KpTds}{Tfs + 1} \quad (12)$$

Figure 9 shows block diagram of Z-axis handheld micromanipulator which using PID control be a controller and simulation of hand tremor signal be a noise for error feedback. Simulation of scope is used for monitoring signal and input signal is unit step signal. As a picture we had already compare a input and out put signal for analyze a result.

5 Results

As a result of mathematical model of the motor which is already had converted to continues transform, its can be solved by using Skogestad's formula[5]

$H_p(s)$ (process)	K_p	T_i	T_d
$\frac{K}{s} e^{-r_s}$	$\frac{1}{K(T_C + \tau)}$	$k_1(T_C + \tau)$	0
$\frac{K}{Ts+1} e^{-r_s}$	$\frac{1}{K(T_C + \tau)}$	$\min[T, k_1(T_C + \tau)]$	0
$\frac{K}{(Ts+1)^2} e^{-r_s}$	$\frac{1}{K(T_C + \tau)}$	$k_1(T_C + \tau)$	T
$\frac{K}{(T_1s+1)(T_2s+1)} e^{-r_s}$	$\frac{1}{K(T_C + \tau)}$	$\min[T_1, k_1(T_C + \tau)]$	T_2
$\frac{K}{s^2} e^{-r_s}$	$\frac{1}{4K(T_C + \tau)^2}$	$4(T_C + \tau)$	$4(T_C + \tau)$

Figure 7: Skogestad's formula

base on Skogestad's formula a mathematical model of motor can be paired with

$$G(s) = \frac{K}{(Ts + 1)s} e^{-r_s} \quad (13)$$

Which

$$Kp = \frac{1}{K(Tc + \tau)} \quad (14)$$

$$Ti = K1(Tc + \tau) \quad (15)$$

$$Td = T \quad (16)$$

Skogestads formulas for PID tuning. Standard value of $K1$ is 4, but a smaller value, e.g. $K1 = 1.44$ can give faster disturbance compensation.

From the formula, fixed parameters are T and

Tc which can be found from signal graph and variable parameters are K and tau which required turning.

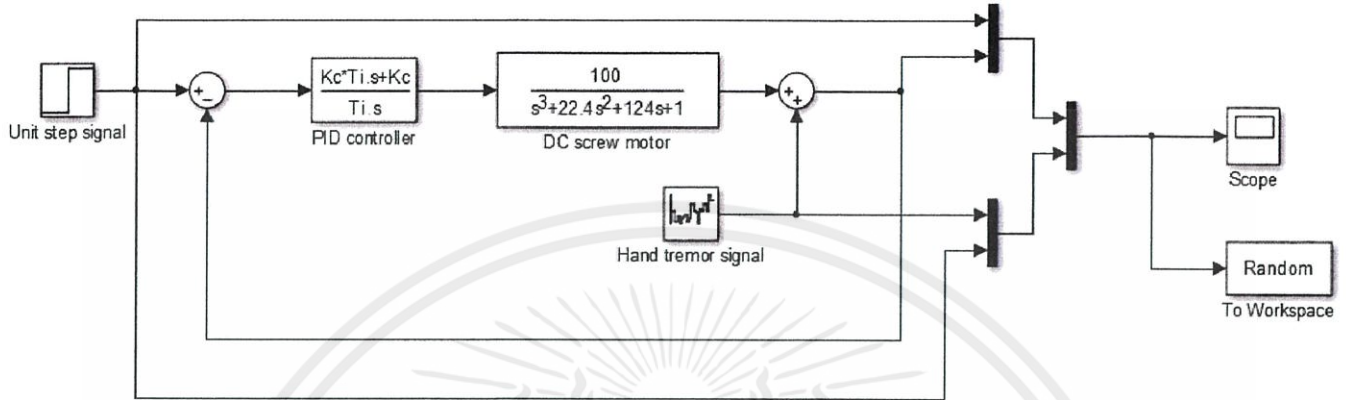


Figure 9: Block diagram of Z-axis handheld micromanipulator

The final solution we be able to define $K_p=1.2504$ and $T_i=1.4$. From this result, controller formula was created and be able to use this formula for control the system.

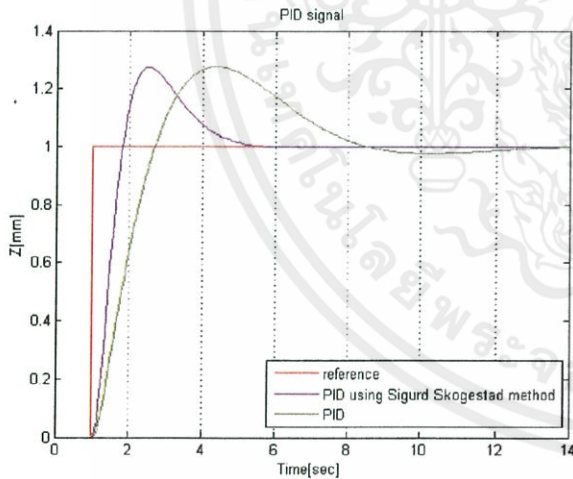


Figure 8: Comparison signal between using Skogestad's formula and general

Figure 8 shows comparison of both signal. The over shoot for both signal are almost similar, but for steady state a signal which using Skogedstad's formula log in equilibrium earlier around approximately 2 time of the other also equilibrium.

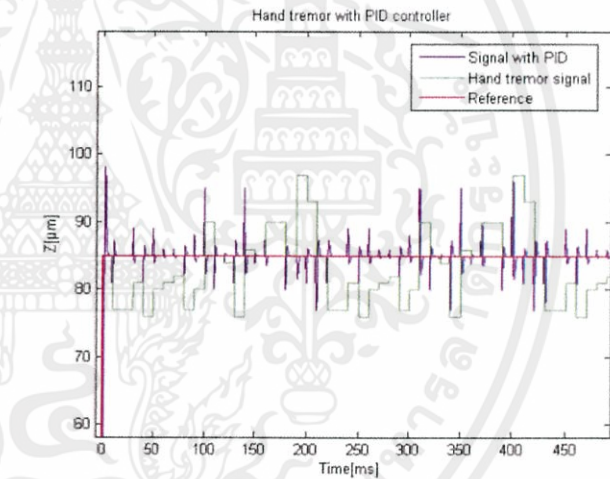


Figure 10: Comparison of hand tremor graph with and with out controller

As a result, this hand tremor graph is 5 time slower than usual. From figure 10, blue line is a hand tremor signal with 5 time behind and red line is a signal which had already controlled.

6 Conclusions

By using Skogestad's formula for turning PID control to be a controller of handheld micromanipulator in Z-axis be able to control vibration signal from hand tremor in Z plane, but a small over shoot and error still cannot removeable. However, the signal which had been done in the experiment is approximately 5 time slower than real normal human hand. If we used this system for control real scale of hand tremor, this controller cannot control the system because the system is too fast.

7 Discussion and Future work

As the result ,from this controller which used Skogestad's formula to turning PID controller be able to control a human hand tremor signal. But the hand tremor signal which used in simulation is 5 time slower than usual. Accordingly, this controller can control the signal from 5 time slower, but unable to control form human hand normal speed. For discussing to find a solution, replace PID controller with another controller which has more proficient including small over shoot, reach to steady state and stable earlier than PID controller such as Robust or Hybrid control. In the other hand, change a new mechanism for movement instead of microlinear actuator which be able to move faster for example piezoelectric.

References

- [1] S. Yang, R.A. MacLachlan and C.N. Riviere, Design and analysis of 2DOF handheld micromanipulator, in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., May 14-18, 2012, pp. 196-1951.
- [2] A. Bemporad, F. Borrelli and M. Morari, Model predictive control based on linear programming the explicit solution, IEEE Trans. Autom. Control, 47, 2002, pp. 1974-1985.
- [3] R.A. MacLachlan, B.C. Becker, J.C. Tabares, G.W. Podnar, L. A. Lobes, Jr. and C.N. Riviere, Micron: An Actively Stabilized Handheld Tool for Microsurgery, IEEE Transactions on robotics, Vol.28, No.1, pp. 195-212, 2012.
- [4] Seborg, D., Edgar, T., and Mellichamp, D. Handbook of Controller Tuning Rules. Process Dynamics and Control, 2004.
- [5] S. Skogestad, Simple Analytic Rule for Model Reduction and PID Controller Tuning, J.of Process Control, Vol.13, pp. 291-309, 2003.
- [6] S. Yang, R. A. MacLachlan, and C. N. Riviere, Design and Analysis of 6 DOF Handheld Micromanipulator, 2012 IEEE Int. Conf. Robot. Autom., USA, pp. 1946-1951, May 2012.
- [7] M. Mayer, "presentation title," presented at the 4th Congr. Permanent Magnets, Grenoble, France, Mar. 1995.
- [8] S.Boksuwan, T.Benjanarasuth, C.Kanamori and H.Aoyama, Robust Hybrid Control for Two-Dimensional Handheld Micromanipulator, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.26, No.3, pp. 331-340, 2014.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายปริญญา คำไม้
วัน เดือน ปีเกิด	6 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2535 ที่จังหวัดลำปาง
ที่อยู่	154 หมู่ 10 ตำบลปงแสนทอง อ.เมือง จังหวัดลำปาง 52100 โทร. 081-469-5366
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา สายการเรียน วิทยาศาสตร์ – คณิตศาสตร์ ปีการศึกษา 2552 โรงเรียนบุญวาทย์วิทยาลัย จังหวัดลำปาง นักศึกษาทุนรัฐบาลญี่ปุ่น JASSO Program University of Electronics and Communication 2014
ปัจจุบัน	นักศึกษาปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้