

ระบบควบคุมแรงดึงสำหรับประยุกต์ใช้งานด้านการแพทย์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2562

**TENSION CONTROL SYSTEM FOR APPLYING
IN MEDICAL PROCESS**



Natthawut Prasoetkarn

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical and Process**

System Engineering

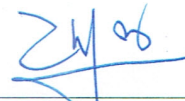
Suranaree University of Technology

Academic Year 2019

ระบบควบคุมแรงดึงสำหรับประยุกต์ใช้งานด้านการแพทย์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.บัณฑิต กฤตาคม)

ประธานกรรมการ



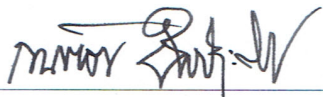
(รศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(อ. ดร.ธีทัต คลวิชัย)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ณัฐวุฒิ ประเสริฐการ : ระบบควบคุมแรงดึงสำหรับประยุกต์ใช้งานด้านการแพทย์
(TENSION CONTROL SYSTEM FOR APPLYING IN MEDICAL PROCESS)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล, 57 หน้า.

การดึงกระดูกข้อมือให้ออกจากกันเล็กน้อยเป็นหนึ่งในกระบวนการรักษากระดูกข้อมือที่แตกหัก ในปัจจุบันมีการใช้มวลถ่วง เช่น ทRAY งานวิจัยนี้จึงนำเสนอระบบควบคุมแรงดึงที่สามารถปรับตั้งค่าแรงดึงได้และสามารถชดเชยแรงดึงได้เมื่อเกิดการรบกวนอันเนื่องมาจากความไม่แน่นอนต่าง ๆ เช่น การยึดหรือหลุดของอุปกรณ์สวมล็อกนิ้ว (Finger trap) และสิ่งรบกวนอื่น ๆ ที่จะส่งผลทำให้แรงดึงเปลี่ยนแปลงไป จากผลการสำรวจน้ำหนักเฉลี่ยของคนไทยในปี พ.ศ. 2552 พบว่า น้ำหนักเพศชายและหญิง 68.83 และ 57.40 กิโลกรัม ตามลำดับ ประกอบกับข้อมูลจากแพทย์ศัลยกรรมกระดูกแนะนำว่าแรงดึงที่เหมาะสมต่อผู้ป่วย คือ แรงดึงร้อยละ 10 ของน้ำหนักตัวผู้ป่วย ซึ่งจะคิดเป็นน้ำหนักประมาณ 6.88 และ 5.74 กิโลกรัม ดังนั้น ระบบนี้จึงออกแบบมาให้ใช้งานได้ในช่วงแรงดึง 50 ถึง 80 นิวตัน ทั้งนี้เพื่อให้ครอบคลุมกับน้ำหนักเฉลี่ยของคนไทย การวิจัยเริ่มจากการออกแบบกลไกควบคุมแรงดึง การสอบเทียบแรงดึง การสร้างแบบจำลองการระบุเอกลักษณ์ของตัวแปรในแบบจำลองด้วย โปรแกรม MATLAB/SIMULINK การออกแบบตัวควบคุมพีไอโดยใช้ Response optimization หลังจากนั้นจะทดสอบการทำงาน ซึ่งมีเงื่อนไขการทำงาน 2 ประเภท คือ ประเภทแรกระบบควบคุมจะชดเชยแรงดึงตลอดเวลา ส่วนประเภทที่สองคือ ระบบควบคุมจะชดเชยแรงดึงเมื่อแรงดึงในระบบคลาดเคลื่อนเกินขอบเขตที่กำหนดไว้ จากนั้นได้ทดสอบการรักษาแรงดึงแบบไร้การรบกวนและแบบมีการรบกวนด้วยการเพิ่มแรงดึงและลดแรงดึงในระบบ นอกจากนี้ยังทดสอบด้วยการดึงข้อมือจริงด้วยเงื่อนไขของการควบคุมทั้ง 2 ประเภทข้างต้น ผลการทดสอบพบว่า หลังจากออกแบบตัวควบคุมพีไอแล้วมีผลทำให้ค่าพุ่งเกินน้อยลงและระบบควบคุมแรงดึงนี้สามารถรักษาแรงดึงได้ในช่วง 50 ถึง 80 นิวตัน แม้เกิดการรบกวนที่ทำให้แรงดึงคลาดเคลื่อนมอเตอร์ก็จะทำหน้าที่ชดเชยแรงดึงให้กลับเข้าสู่ค่าที่กำหนดไว้

NATTHAWUT PRASOETKARN : TENSION CONTROL SYSTEM FOR
APPLYING IN MEDICAL PROCESS. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.
JIRAPHON SRISERTPOL, 57 PP.

TENSION CONTROL/SYSTEM IDENTIFICATION/REDUCTION DEVICE

Pulling the wrist bone slightly apart is one process of treating a fractured wrist bone. At present, using masses such as sand, the research presented a tension control system that can be adjusted to the tension setting and able to compensate for the tension when disturbances caused by uncertainty such as the stretching or contraction of the finger traps and other disturbances that will result in the change of traction. The results of the survey of Thai average weight in 2009 found that the weight of males and females is 68.83 and 57.40 kg, respectively. Data from orthopedic doctors suggest that the ideal tensile force on the patient is 10 percent of Patient weight. The weight is approximately 6.88 and 5.74 kg, so this system is designed to be used in the tensile range of 50 to 80 N to cover the average weight of Thai people. The research began with the design of the tension control mechanism, load cell sensor calibration, system modelling and system identification. The design of the PI controller was performed using response optimization in MATLAB/SIMULINK. After that, it was tested for two operating cases. First, the control system compensated for the tension all the time. The second case is that the control system compensates for the tension when the tension is exceeded the boundary condition. After designing the controller, we tested the input tracking and robustness by increasing and decreasing traction in the system. In addition, it is also tested by pulling the wrist. With the conditions of the above 2 cases of control. The results showed that after the design of the PI controller, the overshoot was reduced

and the tension control system was able to maintain the tension in the range of 50 to 80 N even when the tension control system was disturbed by uncertainty. Motor will act to compensate for the tension back to the set value.



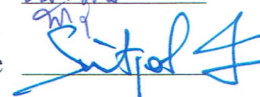
School of Mechanical Engineering

Academic year 2019

Student's Signature



Advisor's Signature



กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตาให้โอกาสให้ความรู้และคำแนะนำ ทั้งการทำวิทยานิพนธ์และมุมมองการใช้ชีวิตแก่ผู้วิจัยตลอดเวลาจนสำเร็จการศึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช จิตรสมบุญ อาจารย์ผู้สอนที่เมตตาให้โอกาสและความรู้แก่ผู้วิจัยทั้งการวิชาการและแนวความคิดที่แปลกใหม่

รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต กฤตาคม ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องโดยสมบูรณ์

อาจารย์ ดร.ธีทัต ดลวิชัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องโดยสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิรติ สุกฤษณ์ ที่กรุณาให้ความรู้และโอกาสในการทำงานในระหว่างที่ผู้วิจัยกำลังศึกษาอยู่

แพทย์หญิง ดร.ปิยาอร น้าไพศาล และนายแพทย์สุจินดา อินณรงค์ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำด้านการแพทย์เกี่ยวกับการรักษาฟันฟุอาการกระดูกข้อมือแตกหัก

นายนิติศักดิ์ หนูมาน้อย ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการทำงานวิจัยและการนำเสนอผลงานวิจัย ตลอดจนรุ่นพี่ เพื่อน ๆ และรุ่นน้องที่มีส่วนช่วยในการทำงานทำวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและบริษัท มณีสุรย์ กรุ๊ป จำกัด ให้การสนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้แก่ผู้วิจัย ขอบพระคุณบิดามารดาที่เลี้ยงดูส่งเสริมให้ได้รับการศึกษาที่ดีตลอดมา

ณัฐวดี ประเสริฐการ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ระบบควบคุม (Control system).....	3
2.1.1 ระบบควบคุมแบบเปิด (Open - loop control system).....	3
2.1.2 ระบบควบคุมแบบปิด Closed-loop control system).....	3
2.2 สัญญาณทดสอบ (Test input signal).....	4
2.3 ผลตอบสนองของระบบ (System response).....	4
2.3.1 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 1 (First order system).....	5
2.3.2 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 (Second order system).....	5
2.3.2.1 การตอบสนองแบบหน่วงต่ำกว่าวิกฤต (Underdamped response).....	6

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.2.2	การตอบสนองแบบหน่วงวิกฤต (Critically damped response).....	6
2.3.2.3	การตอบสนองแบบหน่วงเกิน (Over damped response).....	7
2.4	เสถียรภาพ (Stability).....	8
2.5	ความผิดพลาดในสถานะคงตัว (Steady state error).....	9
2.6	ชนิดของระบบ (System type).....	10
2.7	หน้าที่ของตัวควบคุม.....	10
2.8	ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID-controller).....	11
2.8.1	ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (P-controller).....	11
2.8.2	ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (I-controller).....	11
2.8.3	ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (D-controller).....	11
2.9	วิธีการปรับค่าพีไอดี (PID tuning method).....	13
2.10	มอเตอร์ไฟฟ้า.....	14
2.10.1	สมการทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	14
2.11	เซ็นเซอร์วัดแรง.....	16
2.12	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	21
3.1	บทนำ.....	23
3.2	กลไกสร้างแรงดึง.....	24
3.3	กล่องควบคุม.....	24
3.4	สอบเทียบแรงดึง.....	24
3.5	สมมุติค่าตัวควบคุมพีไอ (PI controller).....	26
3.6	ทดสอบและเก็บข้อมูล.....	27
3.7	สร้างแบบจำลองระบบ.....	28
3.8	ระบุเอกลักษณ์ของตัวแปรในแบบจำลองระบบ.....	29

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.9	ออกแบบตัวควบคุมพีไอ (PI controller).....	30
3.10	ทดสอบระบบควบคุม.....	30
4	ผลการดำเนินการวิจัยและการอภิปรายผล.....	32
4.1	บทนำ.....	32
4.2	ทดสอบระบบควบคุมที่ใช้การรบกวน.....	32
4.3	ทดสอบระบบควบคุมที่มีการรบกวน.....	34
4.3.1	ระบบควบคุมแบบปรับตัวทันที.....	34
4.3.2	ระบบควบคุมแบบปรับตัวเมื่อแรงดิ่งเกินขอบเขตที่กำหนด.....	35
4.4	ทดสอบระบบควบคุม โดยใช้การดิ่งข้อมือ.....	37
4.4.1	ระบบควบคุมแบบปรับตัวทันที.....	37
4.4.1.1	แรงดิ่ง 50 นิวตัน.....	38
4.4.1.2	แรงดิ่ง 60 นิวตัน.....	38
4.4.1.3	แรงดิ่ง 70 นิวตัน.....	39
4.4.1.4	แรงดิ่ง 80 นิวตัน.....	39
4.4.2	ระบบควบคุมแบบปรับตัวเมื่อแรงดิ่งเกินขอบเขตที่กำหนด.....	40
4.4.2.1	แรงดิ่ง 50 นิวตัน.....	40
4.4.2.2	แรงดิ่ง 60 นิวตัน.....	41
4.4.2.3	แรงดิ่ง 70 นิวตัน.....	41
4.4.2.4	แรงดิ่ง 80 นิวตัน.....	42
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	43
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	43
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	43
	รายการอ้างอิง.....	44
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	45
	ประวัติผู้เขียน.....	53

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลการสำรวจรูปร่างของคนไทย.....	20
3.1 ผลจากการเก็บข้อมูลระหว่างแรงดึงกับแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย	26
3.2 ผลจากการระบุค่าตัวแปรในสมการที่ 3.4.....	30



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ศัลยแพทย์สาธิตการดึงนิ้วด้วยการประยุกต์อุปกรณ์ช่วย 1
2.1	บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบเปิด (Open loop control system) 2
2.2	บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบปิด (Closed loop control system)..... 3
2.3	สัญญาณขั้นบันได (Step function signal) 4
2.4	กราฟผลตอบสนองของระบบอันดับ 1 5
2.5	กราฟการตอบสนองแบบหน่วงต่ำกว่าวิกฤต 6
2.6	กราฟการตอบสนองแบบหน่วงวิกฤต 6
2.7	กราฟการตอบสนองแบบหน่วงเกิน 7
2.8	กราฟแสดงผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบอันดับ 2 8
2.9	ลักษณะการตอบสนองโดยพิจารณาจากตำแหน่งของโพลบน S-plane 9
2.10	แผนภาพ Unity feedback 10
2.11	ความสัมพันธ์ระหว่าง Input, Steady state error และ Type 10
2.12	บล็อกไดอะแกรมการควบคุมความเร็วรอบสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แบบวงปิดที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี 12
2.13	หน้าต่าง Response optimization ด้วย MATLAB 13
2.14	โครงสร้างทางไฟฟ้าและโครงสร้างทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 14
2.15	บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมความเร็วรอบสำหรับมอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงเปิด 16
2.16	อุปกรณ์และระบบโหลดเซลล์ 17
2.17	ลักษณะของ Strain gauge 17
2.18	ลักษณะของเส้นลวดที่อยู่ใน Strain gauge 18
2.19	การนำเซ็นเซอร์วัดความเครียด (Strain gauges) ไปประยุกต์ใช้ในโหลดเซลล์ 18
2.20	กลไกอุปกรณ์ช่วยจัดกระดูกแตกหักบริเวณปลายแขน (Fracture reduction device for distal radius) 19

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 แผนภาพบล็อกไดอะแกรม (Block diagram) แสดงการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ในระบบ.....	21
3.2 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย	22
3.3 กลไกสร้างแรงดึง (Tension mechanism).....	23
3.4 อุปกรณ์ไฟฟ้าภายในกล่องควบคุม.....	24
3.5 จุดที่ติดตั้งเครื่องชั่งดิจิตอลชนิดแขวน	25
3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย	25
3.7 แผนภาพ Block diagram ที่ใช้เก็บข้อมูลใน MATLAB/SIMULINK.....	28
3.8 แบบจำลองระบบ.....	28
3.9 แผนภาพ block diagram ที่แยกพจน์ PI controller.....	29
3.10 การทดสอบด้วยการดึงข้อมือ	31
4.1 ผลตอบสนองหลังออกแบบตัวควบคุมใหม่ (Controller optimization)	33
4.2 ผลตอบสนองหลังออกแบบตัวควบคุมใหม่ (Controller optimization) ที่แรงดึง 80 นิวตัน	33
4.3 ผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบปรับตัวทันที	34
4.4 ผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบปรับตัวทันทีที่แรงดึง 80 นิวตัน.....	35
4.5 ผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบปรับตัวเมื่อแรงดึงเกินขอบเขตที่กำหนด	36
4.6 ผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบปรับตัวเมื่อแรงดึงเกินขอบเขตที่กำหนดที่แรงดึง 80 นิวตัน	36
4.7 ผลการทดสอบดึงข้อมือด้วยแรง 50 นิวตัน ของระบบควบคุมแบบปรับตัวทันที	38
4.8 ผลการทดสอบดึงข้อมือด้วยแรง 60 นิวตัน ของระบบควบคุมแบบปรับตัวทันที	38
4.9 ผลการทดสอบดึงข้อมือด้วยแรง 70 นิวตัน ของระบบควบคุมแบบปรับตัวทันที	39
4.10 ผลการทดสอบดึงข้อมือด้วยแรง 80 นิวตัน ของระบบควบคุมแบบปรับตัวทันที	39
4.11 ผลการทดสอบดึงข้อมือด้วยแรง 50 นิวตัน ของระบบควบคุมแบบปรับตัวเมื่อแรงดึงเกินขอบเขตที่กำหนด.....	40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ผลการทดสอบดึงข้อมือด้วยแรง 60 นิวตัน ของระบบควบคุมแบบปรับตัว เมื่อแรงดึงเกินขอบเขตที่กำหนด.....	41
4.13 ผลการทดสอบดึงข้อมือด้วยแรง 70 นิวตัน ของระบบควบคุมแบบปรับตัว เมื่อแรงดึงเกินขอบเขตที่กำหนด.....	41
4.14 ผลการทดสอบดึงข้อมือด้วยแรง 80 นิวตัน ของระบบควบคุมแบบปรับตัว เมื่อแรงดึงเกินขอบเขตที่กำหนด.....	42



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

τ	=	ค่าคงที่ของเวลา หน่วย วินาที (s)
$G(s), H(s)$	=	ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function)
K	=	อัตราส่วนขยาย (Constant)
N	=	หน่วยของแรงนิวตัน
ζ	=	อัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio)
ω_n	=	ความถี่ธรรมชาติ หน่วย เรเดียนต่อวินาที (rad/s)
s	=	พารามิเตอร์ใน S-domain
T_r	=	Rise time ช่วงเวลาที่มีการตอบสนองไต่ระดับจาก 0% ถึง 100% ของค่าสุดท้าย
M_p	=	Maximum Overshoot ค่าสูงสุดของการตอบสนองที่วัดจากค่าสุดท้าย
T_s	=	Settling time ช่วงเวลาที่มีการตอบสนองเริ่มเข้าสู่ค่าสุดท้ายภายในช่วงที่กำหนด 2% หรือ 5%
T_d	=	Delay time ช่วงเวลาที่มีการตอบสนองมีค่าครึ่งหนึ่งของค่าท้ายสุด
T_p	=	Peak time ช่วงเวลาที่มีการตอบสนองมีค่าสูงสุด
e_{ss}	=	Steady-state error ค่าผิดพลาดของการตอบสนองในสภาวะคงตัวเมื่อเทียบกับค่าอ้างอิง
$R(s)$	=	อินพุตใน S-domain
k_p	=	ค่าคงที่ตำแหน่ง (Position constant)
k_v	=	ค่าคงที่ความเร็ว (Velocity constant)
k_a	=	ค่าคงที่ความเร่ง (Acceleration constant)
z_n	=	ซีโร่ (Zero) เมื่อ n มีค่า 1, 2, 3, ...
p_n	=	โพล (Pole) เมื่อ n มีค่า 1, 2, 3, ...
$u(t)$	=	อินพุตใน โดเมนเวลา (Time domain)
$e(t)$	=	ค่าความผิดพลาด (Error) ใน โดเมนเวลา (Time domain)
$U(s)$	=	อินพุตใน โดเมน S (S-domain)
$E(s)$	=	ค่าความผิดพลาด (Error) ใน โดเมน S (S-domain)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

K_p	=	สัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional)
K_i	=	สัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral)
K_d	=	สัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative)
V_a	=	แรงดันไฟฟ้าคร่อมขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature voltage) หน่วย V
R_a	=	ความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature resistance) หน่วย Ω
L_a	=	ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature inductance) หน่วย H
i_a	=	กระแสไฟฟ้าของขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature current) หน่วย A
ω_m	=	ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ (Rotation speed) มีหน่วย rad/s
J	=	โมเมนต์ความเฉื่อยของแกนมอเตอร์ (Moment of inertia) หน่วย $\text{kg}\cdot\text{m}^2$
e_b	=	แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (Back electromotive force voltage) หน่วย V
T_m	=	แรงบิดของมอเตอร์ (Motor torque) หน่วย N.m
K_b	=	Back electromotive force coefficient หน่วย V.s/rad
K_t	=	Torque coefficient หน่วย N.m/A
B	=	Coefficient of viscous friction หน่วย N.m.s/rad
T_L, T_d	=	External load disturbance หน่วย N.m
θ_m	=	ตำแหน่งเชิงมุม หน่วย เรเดียน (rad)
F_a, F_m	=	แรงดึงที่เกิดขึ้นซึ่งได้จากการวัด (Measured tension) หน่วย N
F_d	=	แรงดึงที่กำหนด (Desired tension) หน่วย N
V_{av}	=	แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย หน่วย โวลต์ (V)
V	=	แรงดันไฟฟ้า หน่วย โวลต์ (V)
W	=	มวล หน่วย กิโลกรัม (kg)
K_1, K_2	=	ค่าคงที่

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

กระดูกข้อมือที่แตกร้าวและเคลื่อนไปจากตำแหน่งเดิม มีวิธีการรักษาอยู่ 2 ประเภทหลัก ๆ วิธีแรก คือ จัดเรียงกระดูกแบบไม่ผ่าตัด (Closed reduction) และส่วนวิธีที่สอง คือ จัดเรียงกระดูก ร่วมกับการผ่าตัด (Open reduction) ในระหว่างกระบวนการรักษาอาจจะต้องมีการยึดกระดูกบริเวณ ข้อมือออกจากกันเล็กน้อย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรณีวินิจฉัยของแพทย์

ในปัจจุบันวิธีการดิ่งนิ้วที่ใช้จะเป็นการประยুক্তสิ่งของขึ้นมาใช้ เช่น ใช้เสาแขวน น้ำเกลือมาแขวนตัวดิ่งนิ้ว (Finger trap) แล้วใช้กระปุกน้ำเกลือหรือขวดน้ำใส่ทราย เพื่อเป็นมวลถ่วงน้ำหนักบริเวณข้อศอก ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ศัลยแพทย์สาธิตการดิ่งนิ้วด้วยการประยুক্তอุปกรณ์ช่วย

(19 มิถุนายน พ.ศ. 2561 ณ โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)

น้ำหนักที่ใช้ดึงข้อมือของผู้ป่วยแปรผันตรงกับน้ำหนักตัว จากคำแนะนำของแพทย์ คือน้ำหนักที่ใช้ถ่วงควรจะเป็นร้อยละ 10 ของน้ำหนักตัวผู้ป่วย แต่เนื่องด้วยมวลถ่วงน้ำหนักมีน้ำหนักขึ้นอยู่กับขนาดของภาชนะบรรจุและความหนาแน่นของมวลนั้น ๆ ซึ่งไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้อย่างสะดวกนัก ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่มาของการวิจัยอุปกรณ์สร้างแรงดึงเพื่อการประยุกต์ใช้งานด้านการแพทย์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อออกแบบระบบควบคุมแรงดึงที่สามารถรักษาแรงดึงให้คงที่ในช่วงที่กำหนด
- 1.2.2 เพื่อสร้างต้นแบบอุปกรณ์ช่วยจัดกระดูกข้อมือให้กลับเข้าที่เดิม (Wrist fracture reduction device)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ควบคุมแรงดึงในช่วง 50-80 นิวตัน
2. ใช้คอมพิวเตอร์ร่วมกับบอร์ด RAPCON เป็นอุปกรณ์ควบคุม
3. ใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในการเขียนคำสั่งการทำงาน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

อุปกรณ์ต้นแบบ (Prototype) ของระบบควบคุมแรงดึงที่สามารถพัฒนาเพื่อใช้งานด้านการแพทย์ได้ในอนาคต

บทที่ 2

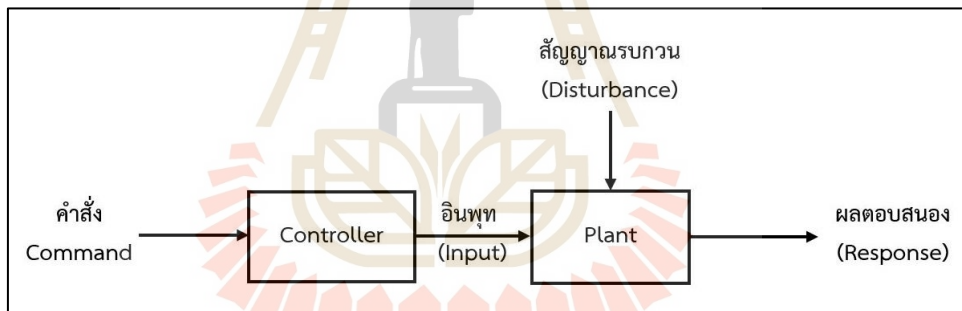
ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบควบคุม (Control system)

ระบบควบคุม คือ การจัดการองค์ประกอบต่าง ๆ ที่อยู่ในระบบให้มีการทำงานสัมพันธ์กัน เพื่อบังคับหรือปรับปรุงระบบให้ทำงานได้ตามความต้องการ โครงสร้างของระบบควบคุมแบ่งเป็น 2 ประเภท ดังนี้

2.1.1 ระบบควบคุมแบบเปิด (Open - loop control system)

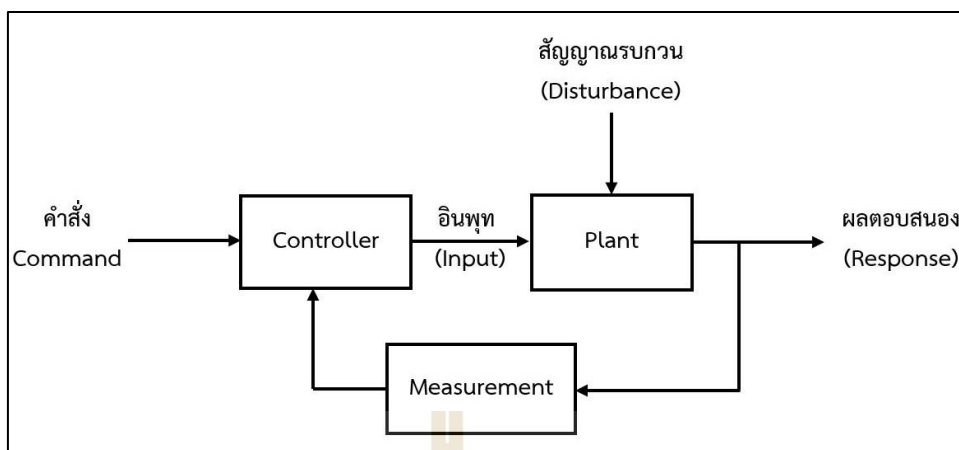
ระบบควบคุมแบบเปิดเป็นระบบที่ผลตอบสนอง (Output) ของระบบไม่มีผลต่อการควบคุมกระบวนการ (Process) ของระบบ แสดงในรูปของบล็อกไดอะแกรม ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบเปิด (Open loop control system)

2.1.2 ระบบควบคุมแบบปิด Closed-loop control system)

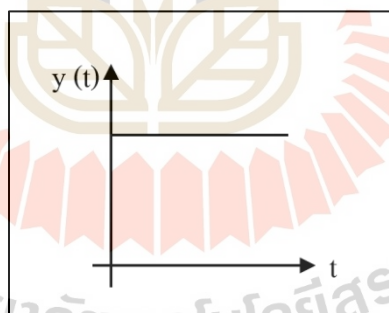
ระบบควบคุมแบบปิดเป็นระบบที่ผลตอบสนอง (Output) ของระบบมีผลต่อการควบคุมกระบวนการ (Process) ของระบบ กล่าวคือ Output ที่เกิดขึ้นจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับ Input แล้วค่าความผิดพลาด (Error) ของผลตอบสนองที่เกิดขึ้นถูกนำไปใช้ป้อนเข้าตัวควบคุมระบบ (Controller) เพื่อให้ระบบทำงานได้ผลตอบสนองตามความต้องการของผู้ใช้งาน แสดงในรูปของบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบปิด (Closed loop control system)

2.2 สัญญาณทดสอบ (Test input signal)

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้สัญญาณทดสอบ คือ สัญญาณแบบขั้นบันได (Step function signal) คือ สัญญาณที่เป็นค่าคงตัวค่าหนึ่งในช่วงเวลาหนึ่ง ดังรูปที่ 2.3

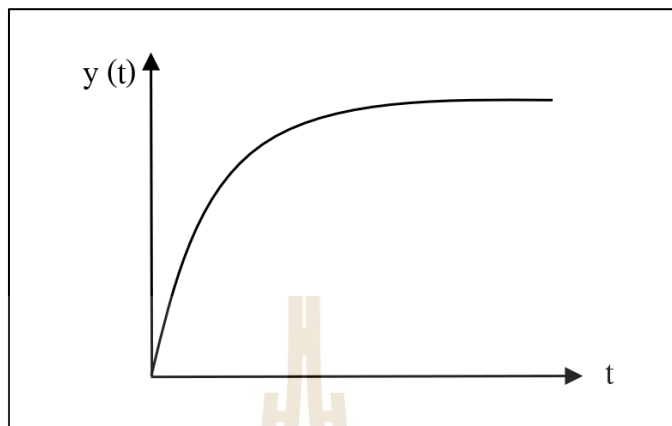


รูปที่ 2.3 สัญญาณขั้นบันได (Step function signal)

2.3 ผลตอบสนองของระบบ (System response)

ผลตอบสนองของระบบจะประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ผลตอบสนองชั่วคราวและผลตอบสนองในสถานะคงตัว โดยผลตอบสนองชั่วคราว (Transient response) จะเกิดจากลักษณะเฉพาะของระบบ ส่วนผลตอบสนองในสถานะคงตัว (Steady state response) เกิดจากอินพุต (Input) ที่เข้ามากระตุ้นระบบ นอกจากนี้ระบบยังถูกแบ่งออกเป็น ระบบอันดับ 1 (First order system), ระบบอันดับ 2 (Second order system) และระบบอันดับสูง (Higher order system)

2.3.1 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 1 (First order system)



รูปที่ 2.4 กราฟผลตอบสนองของระบบอันดับ 1

จากรูปที่ 2.4 กำหนดให้อินพุต (Input) เป็น Unit step input ผลตอบสนองชั่วคราว (Transient response) จะอยู่ในช่วง $0 - 4\tau$ เมื่อกำหนดให้ผลตอบสนองในสภาวะคงตัว (Steady state response) อยู่ที่ 98% หรือผลตอบสนองชั่วคราว (Transient response) จะอยู่ในช่วง $0 - 5\tau$ เมื่อกำหนดให้ผลตอบสนองในสภาวะคงตัว (Steady state response) อยู่ที่ 99% หลังจากผลตอบสนองในสภาวะชั่วคราวเกิดขึ้นแล้วก็จะเป็นการตอบสนองในสภาวะคงตัว (Steady state response) ระบบอันดับ 1 จะมี Transfer function ใน S-domain ดังนี้

$$H(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (2.1)$$

เมื่อ $H(s)$ คือ Transfer function
 K คือ อัตราขยาย
 τ คือ ค่าคงที่ของเวลา หน่วย วินาที

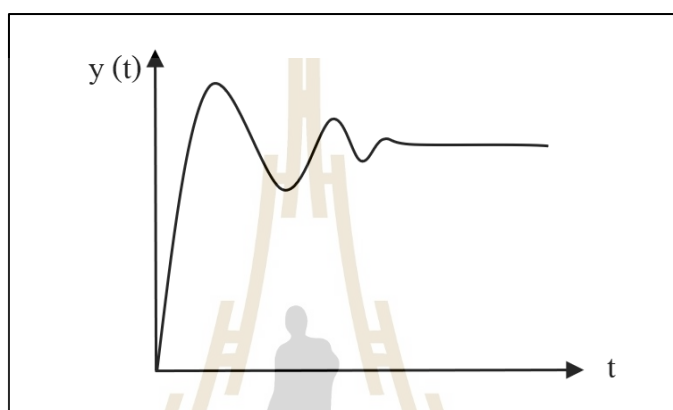
2.3.2 ผลตอบสนองของระบบอันดับ 2 (Second order system)

ระบบอันดับ 2 เกี่ยวข้องกับระบบที่มีการแกว่ง (Oscillation) หรือระบบที่มีการเก็บพลังงาน (Energy storage system) และมีการกระจายพลังงานออกจากระบบ (Dissipate energy)

ระบบอันดับ 2 แบ่งออกเป็น 3 กรณี (ไม่รวมการตอบสนองแบบสั่นไกวคงตัว (Undamped natural response)) ได้แก่

2.3.2.1 การตอบสนองแบบหน่วงต่ำกว่าวิกฤต (Underdamped response)

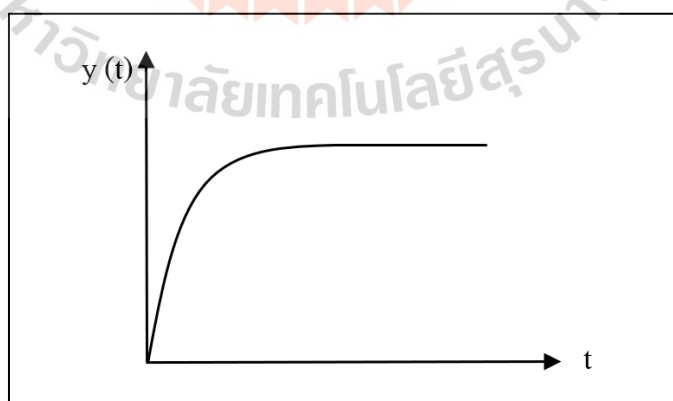
การตอบสนองแบบหน่วงต่ำกว่าวิกฤตมีอัตราส่วนความหน่วงมากกว่า 0 แต่น้อยกว่า 1 ($0 < \xi < 1$)



รูปที่ 2.5 กราฟการตอบสนองแบบหน่วงต่ำกว่าวิกฤต

2.3.2.2 การตอบสนองแบบหน่วงวิกฤต (Critically damped response)

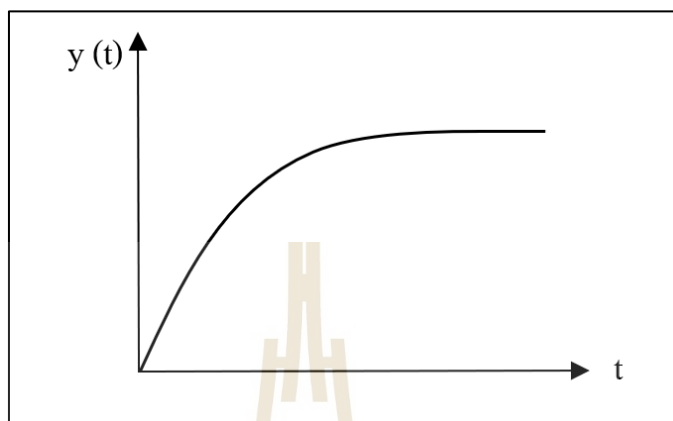
การตอบสนองแบบหน่วงวิกฤตมีค่าอัตราส่วนความหน่วงเท่ากับ 1 ($\xi = 1$)



รูปที่ 2.6 กราฟการตอบสนองแบบหน่วงวิกฤต

2.3.2.3 การตอบสนองแบบหน่วงเกิน (Over damped response)

การตอบสนองแบบหน่วงเกินมีอัตราส่วนความหน่วงมากกว่า 1 ($\xi > 1$)



รูปที่ 2.7 กราฟการตอบสนองแบบหน่วงเกิน

ระบบอันดับ 2 จะมี Transfer function ใน S-domain ดังนี้

$$H(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.2)$$

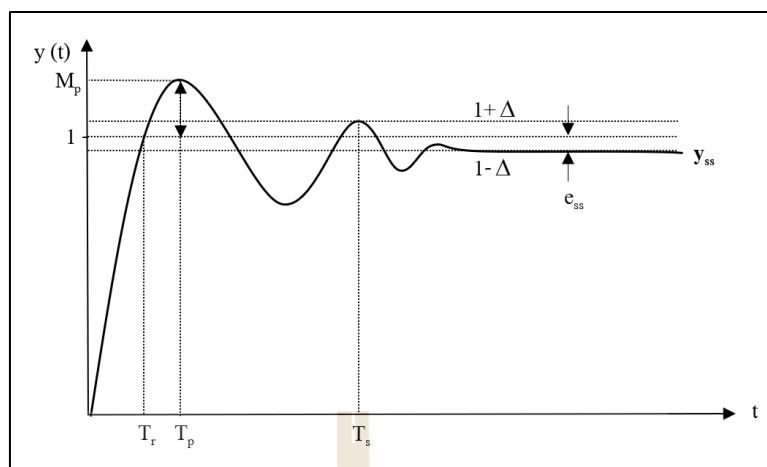
เมื่อ $H(s)$ คือ Transfer function

K คือ อัตราขยาย

ω_n คือ ความถี่ธรรมชาติ (rad/s)

ξ คือ อัตราส่วนความหน่วง

ผลตอบสนองชั่วคราว (Transient response) และผลตอบสนองในสภาวะคงตัว (Steady state response) ของระบบอันดับ 2 มีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.8



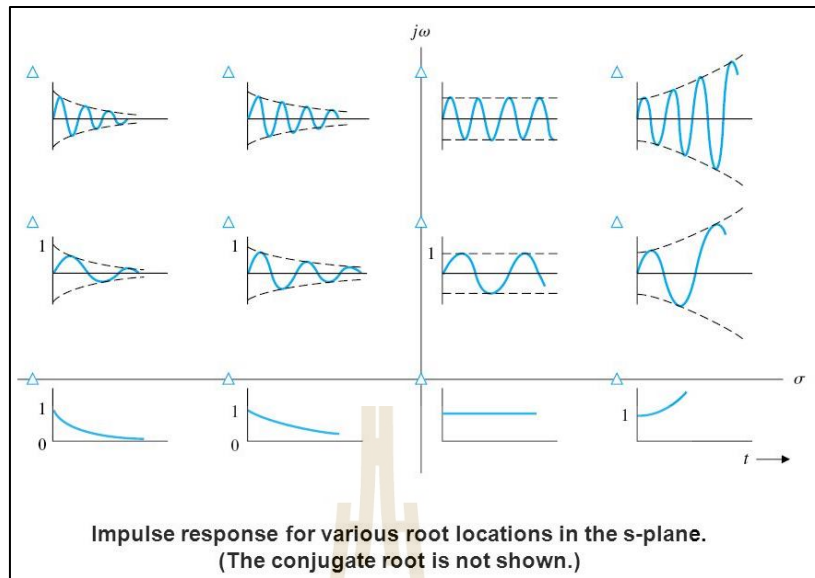
รูปที่ 2.8 กราฟแสดงผลตอบสนองและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบอันดับ 2

การกำหนดคุณลักษณะของการตอบสนองมีพารามิเตอร์ดังนี้

1. Rise time (t_r) ช่วงเวลาที่มีการตอบสนองได้ระดับจาก 0% ถึง 100% ของค่าสุดท้าย
2. Maximum overshoot (M_p) ค่าสูงสุดของการตอบสนองที่วัดจากค่าสุดท้าย
3. Settling time (t_s) ช่วงเวลาที่มีการตอบสนองเริ่มเข้าสู่ค่าสุดท้ายภายในช่วงที่กำหนด 2% หรือ 5%
4. Delay time (t_d) ช่วงเวลาที่มีการตอบสนองมีค่าครึ่งหนึ่งของค่าสุดท้าย
5. Peak time (t_p) ช่วงเวลาที่มีการตอบสนองมีค่าสูงสุด
6. Steady-state error (e_{ss}) ค่าผิดพลาดของการตอบสนองในสภาวะคงตัวเทียบกับค่าอ้างอิง

2.4 เสถียรภาพ (Stability)

เมื่อพิจารณาเสถียรภาพในแง่ของรากสมการ (Roots) หรือโพล (Poles) ระบบจะมีเสถียรภาพ (Stable) เมื่อมีโพลอยู่ทางด้านซ้ายมือของ S-plane ในทางตรงกันข้ามถ้ารากสมการอยู่ทางขวามือ ระบบจะไม่มีเสถียรภาพ (Unstable) แต่หากว่ารากของสมการอยู่บนแกนจินตภาพจะถือว่ามีเสถียรภาพวิกฤต (Critical or marginally stable)



รูปที่ 2.9 ลักษณะการตอบสนองโดยพิจารณาจากตำแหน่งของโพลบน S-plane

2.5 ความผิดพลาดในสถานะคงตัว (Steady state error)

ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัว (e_{ss}) คือ ความคลาดเคลื่อนจากค่าอ้างอิงเมื่อระบบเข้าสู่สถานะคงตัว

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1+G(s)} \quad (2.3)$$

สำหรับ Step input

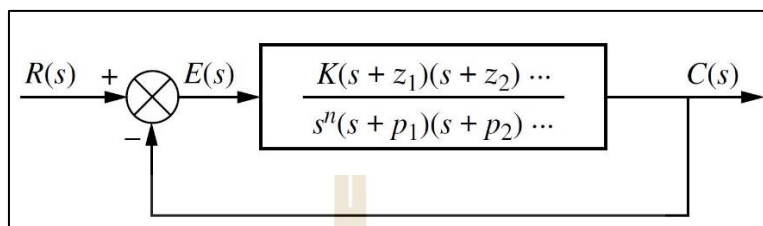
$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1+G(s)} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s(1/s)}{1+G(s)} = \frac{1}{1+\lim_{s \rightarrow 0} G(s)} = \frac{1}{1+K_p} \quad (2.4)$$

สำหรับ Ramp input

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1+G(s)} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s(1/s^2)}{1+G(s)} = \frac{1}{\lim_{s \rightarrow 0} s + \lim_{s \rightarrow 0} G(s)} = \frac{1}{K_v} \quad (2.5)$$

2.6 ชนิดของระบบ (System type)

พิจารณาชนิดของระบบจาก Open loop transfer function ของ Unity feedback ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ชนิดของระบบ หรือ Type ของระบบ คือ 0, 1, 2, ... เมื่อ $n = 0, 1, 2, \dots$



รูปที่ 2.10 แผนภาพ Unity feedback

Input	Steady-state error formula	Type 0		Type 1		Type 2	
		Static error constant	Error	Static error constant	Error	Static error constant	Error
Step, $u(t)$	$\frac{1}{1+K_p}$	$K_p = \text{Constant}$	$\frac{1}{1+K_p}$	$K_p = \infty$	0	$K_p = \infty$	0
Ramp, $tu(t)$	$\frac{1}{K_v}$	$K_v = 0$	∞	$K_v = \text{Constant}$	$\frac{1}{K_v}$	$K_v = \infty$	0
Parabola, $\frac{1}{2}t^2u(t)$	$\frac{1}{K_a}$	$K_a = 0$	∞	$K_a = 0$	∞	$K_a = \text{Constant}$	$\frac{1}{K_a}$

รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Input, Steady state error และ Type

2.7 หน้าที่ของตัวควบคุม

อุปกรณ์ควบคุมจะถูกออกแบบไว้เพื่อให้สร้างสัญญาณควบคุมไปควบคุมระบบ เมื่อมีสัญญาณผิดพลาด (Error signal) เกิดขึ้น เมื่อมีสัญญาณผิดพลาด (Error signal) ที่ไม่เป็นศูนย์ ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงที่คำสั่งหรือสัญญาณรบกวนก็ได้ หน้าที่ของระบบควบคุมคือพยายามควบคุมตัวแปรของระบบ (System variable) ให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ (Desired variable) ซึ่งอาจสรุปหน้าที่ของตัวควบคุมพอสังเขปได้ดังนี้ (วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, 2556)

- ลดค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัว (Minimize the steady state error)
- ลดค่าเวลาเข้าที่ (Minimize the settling time)

- เพื่อให้ผลตอบสนองในสถานะชั่วคราว (Transient response) มีลักษณะตามที่กำหนดไว้ เช่น ต้องการทำให้ค่าพุ่งเกินมีค่าน้อยที่สุด กำหนดค่าเวลาเข้าที่ กำหนดค่าอัตราส่วนการหน่วง (Damping ratio) และค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency)

2.8 ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID-controller)

2.8.1 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (P-controller)

ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (P-controller) สัญญาณควบคุมจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าสัญญาณความผิดพลาดที่เกิดจากผลต่างระหว่างค่าสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตของระบบที่ต้องการควบคุม ตัวควบคุมแบบสัดส่วนจะมีคุณสมบัติของระบบควบคุมดังนี้

- การเพิ่ม K_p ช่วยลดค่า Rise Time (t_r) ทำให้ระบบทำงานเร็วขึ้นในช่วงแรก
- การเพิ่ม K_p ช่วยลด Steady State Error
- เมื่อถึงจุดหนึ่งการเพิ่ม K_p จะเพิ่ม Overshoot (M_p) ทำให้ระบบแกว่งในช่วงเริ่มต้น

2.8.2 ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (I-controller)

ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (I-controller) จะขึ้นอยู่กับค่าในอดีตไม่เหมือนกับตัวควบคุมแบบสัดส่วนซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าปัจจุบัน ตัวควบคุมแบบอินทิกรัลใช้เพื่อต้องการลดค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัว ขณะเดียวกันเสถียรภาพของระบบก็จะลดน้อยลงด้วย การควบคุมแบบอินทิกรัลเป็นการเพิ่มอันดับให้กับระบบ ตัวควบคุมแบบอินทิกรัลจะมีคุณสมบัติของระบบควบคุมดังนี้

- การเพิ่ม K_i ช่วยลดค่าช่วยลด Steady State Error
- การเพิ่ม K_i ช่วยลดค่า Rise Time (t_r) ทำให้ระบบทำงานเร็วขึ้นเล็กน้อย
- เมื่อถึงจุดหนึ่งการเพิ่ม K_i จะเพิ่ม Overshoot (M_p) ทำให้ระบบแกว่งในช่วงเริ่มต้น

2.8.3 ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (D-controller)

ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (D-controller) คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาดจากกระบวนการนั้น ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์จะมีคุณสมบัติของระบบควบคุมดังนี้

- การเพิ่ม K_d จะลด Overshoot (M_p)
- การเพิ่ม K_d จะลดเวลาเข้าที่ (Settling time)

การใช้ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ร่วมกับตัวควบคุมแบบสัดส่วน เรียกว่า “PD-controller” ถ้าตัวควบคุมแบบสัดส่วนใช้ร่วมกับอินทิกรัลเรียกว่า “PI-controller” และถ้าใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับตัวควบคุมแบบอินทิกรัลและตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ จะเรียกว่า “PID-controller” โดยตัวควบคุมแบบอนุพันธ์จะช่วยเพิ่มค่าความหน่วงให้กับระบบที่ต้องการจะควบคุม ทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น ขณะเดียวกันจะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากตัว

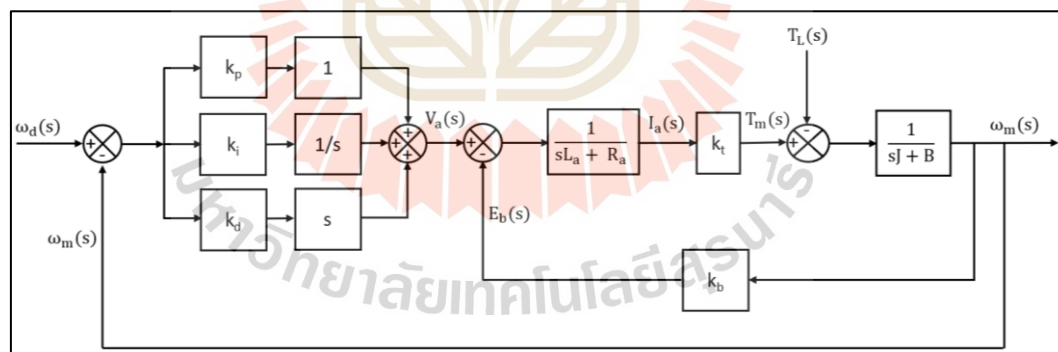
ควบคุมแบบอนุพันธ์เป็นสัญญาณที่เกิดจากการหาอนุพันธ์ของสัญญาณความผิดพลาด ดังนั้น ถ้าสัญญาณความผิดพลาดนั้นมีสัญญาณการรบกวนมาก สัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจะกระเพื่อมค่อนข้างมากเนื่องจากค่าความชันของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงแปลงค่อนข้างมาก ซึ่งจะทำให้ระบบควบคุมของเราไม่มีเสถียรภาพได้

สมการของตัวควบคุมแบบสัดส่วน ตัวควบคุมแบบอินทิกรัลและตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ ที่มีอินพุตเป็นสัญญาณความผิดพลาด แสดงได้ดังสมการที่ 2.6 และการแปลงลาปลาซสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.7

$$u(t) = K_p * e(t) + K_i * \int e(t) dt + K_d * \frac{d(e(t))}{dt} \quad (2.6)$$

$$U(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + s * K_d \right) * E(s) \quad (2.7)$$

บล็อกไดอะแกรมการควบคุมความเร็วรอบสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงปิดที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี แสดงได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมความเร็วรอบสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงปิดที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี

2.9 วิธีการปรับค่าพีไอดี (PID tuning method)

ในงานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับวิธีการปรับค่าพีไอดี โดยใช้ 2 วิธีการ ดังต่อไปนี้

1. Manual tuning method

โดยการทดลองปรับค่า K_p , K_i และ K_d แล้วสังเกตผลตอบสนองที่เกิดขึ้น ปรับไปเรื่อยๆ จนกว่าจะได้ผลตอบสนองตามต้องการ

- กำหนดให้ K_i และ K_d เป็นศูนย์ แล้วการปรับค่าเฉพาะ K_p ก่อน จนกว่าจะได้ผลตอบสนองใกล้ค่า Set point ที่ต้องการ

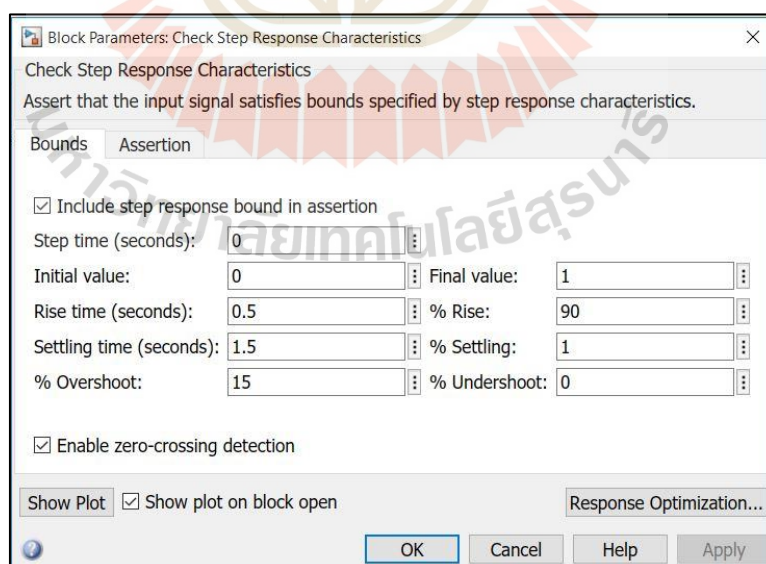
- เพิ่มค่า K_i ทีละน้อยจนกว่าจะได้ผลตอบสนองใกล้ค่า Set point ที่ต้องการ

- หากผลตอบสนองมีการขึ้น-ลง (Fluctuate) ค่อยๆ เพิ่มค่า K_d ทีละน้อยจนกว่าจะได้ผลตอบสนองใกล้ค่า Set point ที่ต้องการ

อย่างไรก็ตามวิธี Manual tuning method ดูเหมือนเป็นวิธีที่ง่าย แต่ต้องใช้เวลาและขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ออกแบบ

2. ใช้ Response optimization ด้วยโปรแกรม MATLAB

โดยเริ่มจากการกำหนดขอบเขตของผลตอบสนองที่ต้องการ ได้แก่ Step time, Initial value, Rise time, Settling time และ %Overshoot จากนั้นให้โปรแกรมช่วยคำนวณหาค่า K_p , K_i , K_d ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 หน้าต่าง Response optimization ด้วย MATLAB

2.10 มอเตอร์ไฟฟ้า

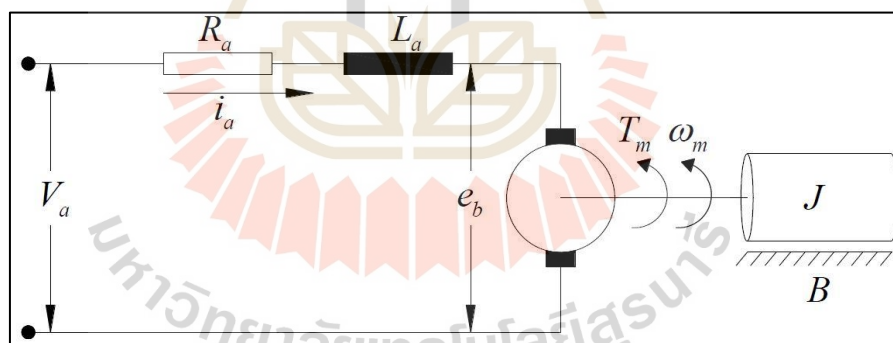
มอเตอร์ไฟฟ้าคืออุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล ตามพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ. ศ. 2554 ได้ให้นิยามความหมายของมอเตอร์ว่า คือ “กลอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแปลงพลังงานรูปอื่นให้เป็นพลังงานกล โดยทั่วไปมักจะหมายถึง กลอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล” มอเตอร์ไฟฟ้าแบ่งตามชนิดของการใช้กระแสไฟฟ้าได้ 2 ชนิด คือ

1. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating current Motor)
2. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current Motor)

เนื่องจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีข้อดีคือการควบคุมแรงบิดหรือความเร็วทำได้ง่ายกว่า มอเตอร์กระแสสลับอีกทั้งยังมีผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลง (Response) ได้รวดเร็ว ด้วยเหตุนี้งานวิจัยจึงเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมาใช้ในการทดลอง

2.10.1 สมการทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

วงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet DC motor) สามารถเขียนเป็นวงจรที่ประกอบไปด้วยโครงสร้างทางไฟฟ้าและโครงสร้างทางกล ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 โครงสร้างทางไฟฟ้าและโครงสร้างทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ซึ่งสามารถแยกโครงสร้างต่าง ๆ ได้ตามสัญลักษณ์ ดังต่อไปนี้

- V_a คือ Armature voltage มีหน่วย V
 R_a คือ Armature resistance มีหน่วย Ω
 L_a คือ Armature inductance มีหน่วย H
 i_a คือ Armature current มีหน่วย A
 ω_m คือ Rotation speed มีหน่วย rad/s

J	คือ Moment of inertia มีหน่วย kg.m^2
e_b	คือ Back electromotive force voltage มีหน่วย V
T_m	คือ Motor torque มีหน่วย N.m
K_b	คือ Back electromotive force coefficient มีหน่วย V.s/rad
K_t	คือ Torque coefficient มีหน่วย N.m/A
B	คือ Coefficient of viscous friction มีหน่วย N.m.s/rad
T_L	คือ External load disturbance มีหน่วย N.m

สมการทางไฟฟ้าและสมการทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แสดงได้
ดังสมการที่ 2.8-2.11

$$V_a(t) = R_a * i_a(t) + L_a * \frac{d(i_a(t))}{dt} + e_b(t) \quad (2.8)$$

$$e_b(t) = K_b * \omega_m(t) \quad (2.9)$$

$$T_m(t) = K_t * i_a(t) \quad (2.10)$$

$$J * \left(\frac{d(\omega_m(t))}{dt} \right) + B * \omega_m(t) + T_L(t) = T_m(t) \quad (2.11)$$

การแปลงลาปลาซ (Laplace transform) สมการที่ 2.8-2.11 สามารถแสดงได้
ดังสมการที่ 2.12-2.15 ตามลำดับ

$$V_a(s) = R_a * I_a(s) + s * L_a * I_a(s) + E_b(s) \quad (2.12)$$

$$E_b(s) = K_b * \omega_m(s) \quad (2.13)$$

$$T_m(s) = K_t * I_a(s) \quad (2.14)$$

$$s*J*\omega_m(s)+B*\omega_m(s)+T_L(s)=T_m(s) \quad (2.15)$$

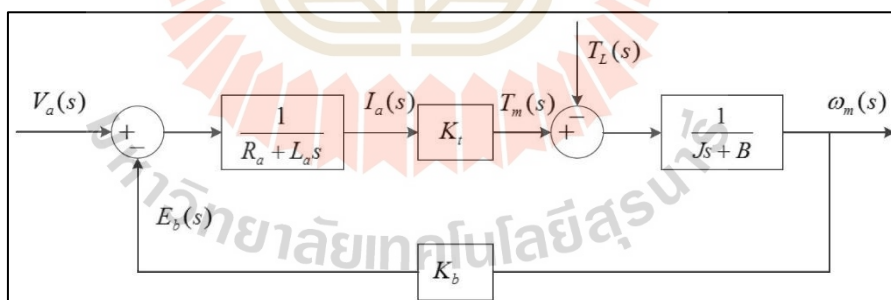
ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมและแรงดันไฟฟ้าอินพุท คือ

$$\frac{\omega_m(s)}{V_a(s)} = \frac{K_t}{(J*L_a)*s^2 + (J*R_a + B*L_a)*s + (B*R_a + K_b*K_t)} \quad (2.16)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบที่มีความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งเชิงมุมและแรงดันไฟฟ้าอินพุท คือ

$$\frac{\theta_m(s)}{V_a(s)} = \frac{K_t}{((J*L_a)*s^2 + (J*R_a + B*L_a)*s + (B*R_a + K_b*K_t))*s} \quad (2.17)$$

บล็อกไดอะแกรม (Block diagram) การควบคุมความเร็วรอบสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงเปิด แสดงได้ดังรูปที่ 2.15

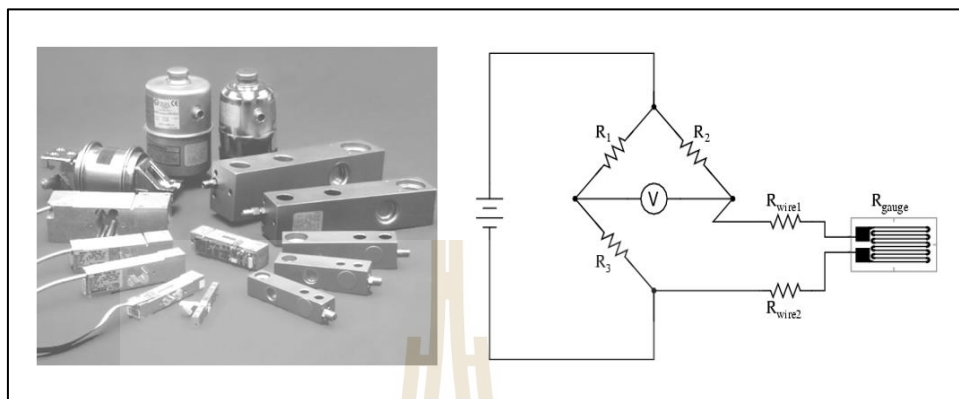


รูปที่ 2.15 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมความเร็วรอบสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงเปิด

2.11 เซ็นเซอร์วัดแรง

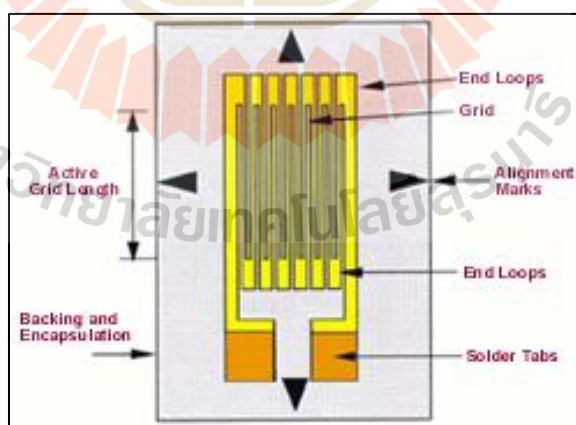
เซ็นเซอร์วัดแรง (Load cell) เป็นระบบเซนเซอร์ที่แปลงค่าน้ำหนักทางกลของสิ่งของ (กรัม, กิโลกรัม) ให้เป็นปริมาณทางไฟฟ้า (แรงดัน, V) แสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งประกอบด้วย Strain gauge (รูปที่ 2.16) เป็นส่วนตัวจับ ซึ่งจะคอยเปลี่ยนค่าความเครียดทางกลอันเนื่องมาจากน้ำหนักของวัตถุเป็นค่าความต้านทานไฟฟ้า เมื่อนำค่าความต้านทานที่ได้จาก Strain gauge มาต่อเข้ากับวงจร Deflection

Bridge ซึ่งต่อเข้ากับแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง (DC Voltage) ก็จะสามารถหาค่าเอาต์พุตของน้ำหนักวัตถุที่เป็นเปลี่ยนแปลงเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าได้ (ปียคณัย ภาชนะพรรณณ์)



รูปที่ 2.16 อุปกรณ์และระบบโวลต์เซลล์

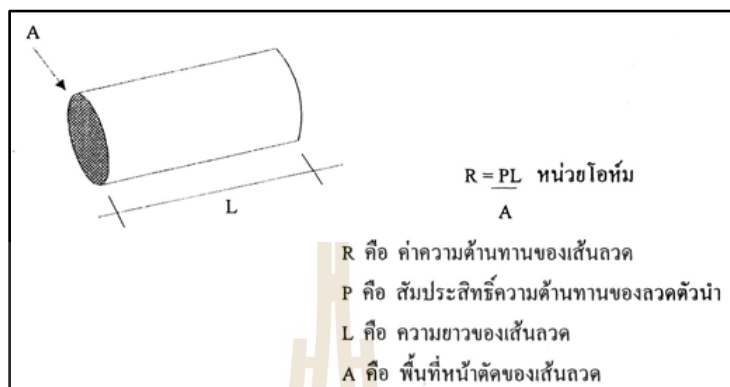
เซ็นเซอร์วัดความเครียด (Strain gauges) คือ อุปกรณ์ที่มีหลักการเปลี่ยนค่าความเครียด (Strain) ที่เปลี่ยนแปลงไปอันเนื่องมาจากน้ำหนักของวัตถุ ซึ่งเอาต์พุตที่ได้จาก Strain gauges คือ ค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (Ohm) ลักษณะของ Strain gauges แสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ลักษณะของ Strain gauge

หลักการทำงานของเซ็นเซอร์วัดความเครียด (Strain gauges) จะอาศัยการเปลี่ยนรูปของเส้นลวดอันเนื่องมาจากแรงที่มากระทำ ซึ่งการเปลี่ยนรูปได้นี้ จะเป็นสัดส่วนกับแรงที่มากระทำ

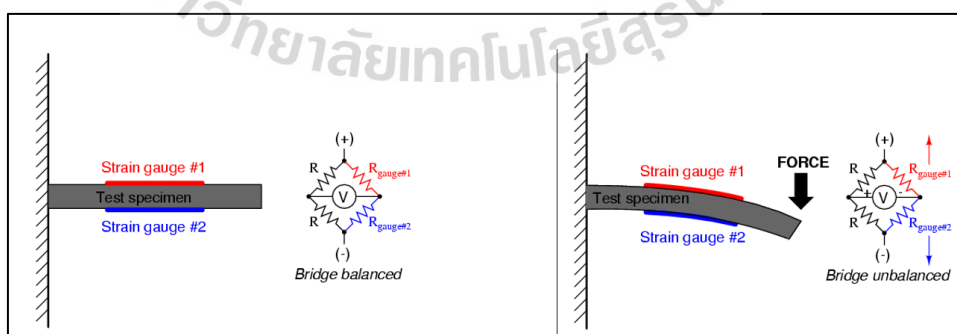
ซึ่งแรงที่มากระทำอาจทำให้ลวดยืดออกหรือหดเข้าหากัน รูปแบบของเส้นลวดแสดงในรูปที่ 2.18 โดยอาศัยความสัมพันธ์จากสมการความต้านทานของเส้นลวดดังนี้



รูปที่ 2.18 ลักษณะของเส้นลวดที่อยู่ใน Strain gauge

จากสมการในรูปที่ 2.18 พบว่าเมื่อเส้นลวดมีการเปลี่ยนแปลง ไม่ว่าจะเป็นผลให้เส้นลวดหดตัวหรือยืดออก ก็จะมีผลต่อค่าความต้านทานของลวดตัวนำ ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน Strain gauge ในโหนดเซลล์แสดงในรูปที่ 2.19

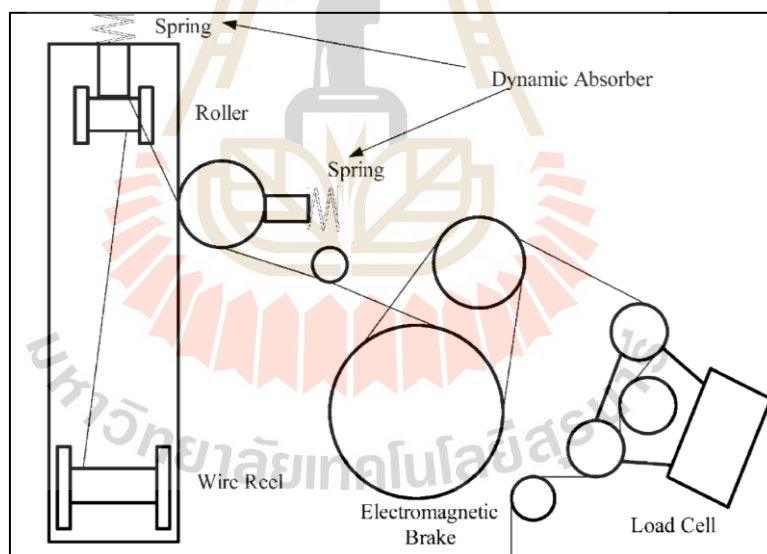
จากรูปที่เมื่อมีแรงกดลงทำให้เซ็นเซอร์วัดความเครียด (Strain gauges) ด้านบนจะถูกดึงให้ยืดตัวออกทำให้มีค่าความต้านทานไฟฟ้ามากขึ้น ส่วนเซ็นเซอร์วัดความเครียด (Strain gauges) ด้านล่างจะถูกบีบให้หดตัวทำให้มีค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลง



รูปที่ 2.19 การนำเซ็นเซอร์วัดความเครียด (Strain gauges) ไปประยุกต์ใช้ในโหนดเซลล์

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

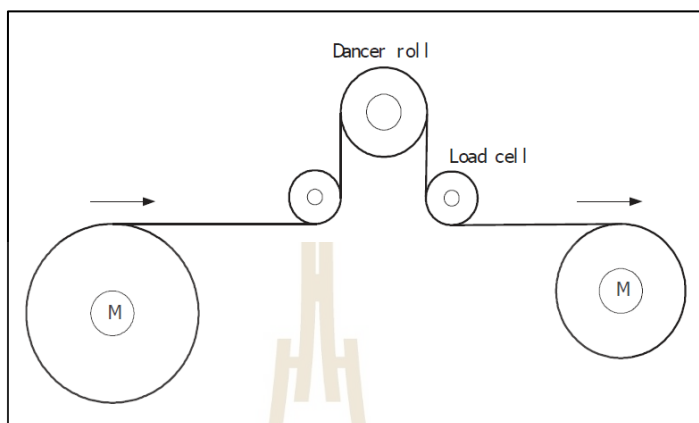
Mu-Tian และ Pin-Hsum Huang (2004) ได้นำเสนอระบบควบคุมความตึงของลวดแบบวงปิด (Closed-loop control) สำหรับเครื่อง Wire-EDM เพื่อปรับปรุงความแม่นยำของเครื่อง โดยจะวิเคราะห์และออกแบบ โมเดลแบบพลวัต (dynamic models) ของอุปกรณ์ควบคุมการป้อนลวดและระบบควบคุมแรงตึงด้วยระบบควบคุมวงปิด โดยใช้ตัวควบคุมพีไอ (PI controller) และตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ (One-step-ahead adaptive controller) ทั้งนี้เพื่อลดการสั่นของเส้นลวดที่เป็นสาเหตุของความไม่แม่นยำในการตัดชิ้นงานและเสริมด้วยอุปกรณ์ซับการสั่น (Absorber) นั่นคือสปริงที่บริเวณรอก ผลการทดลองไม่เพียงแต่แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นพร้อมกับการเสริมอุปกรณ์ซับการสั่นสามารถตอบสนองได้รวดเร็วขึ้นและมีความผิดพลาดในสภาวะคงตัวน้อยกว่าระบบควบคุมวงเปิด (Open-loop control) แต่ยังแสดงให้เห็นว่าความผิดพลาดของเส้นรอยตัดมีค่าลดลงประมาณ 50% และความเรียบตรงตามแนวตั้งของชิ้นงานก็ยิ่งดีขึ้นอีกด้วย แผนภาพกลไกดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 กลไกระบบควบคุมความตึงของลวดแบบวงปิด (Closed-loop control) สำหรับเครื่อง wire-EDM

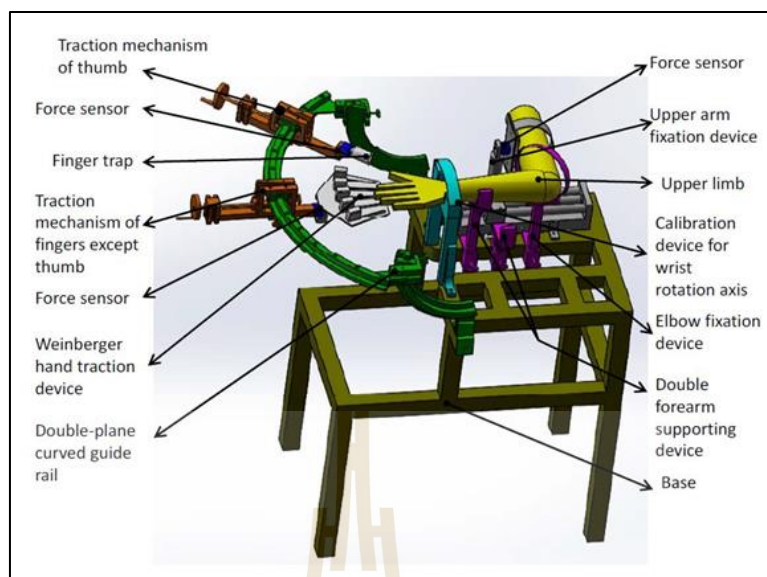
Baoji Ma และ Sun Dong (2010) ได้นำเสนอการหาแบบจำลองของระบบควบคุมแรงตึงในกระบวนการม้วนเส้นใยแก้วนำแสงเพื่อให้ได้ความแม่นยำที่สูงในการม้วนจึงมีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์แต่ละชิ้น ทั้งนี้ได้แก่การหาความตึงของใยแก้วนำแสง

เซ็นเซอร์ตรวจจับความตึงมอเตอร์ และอุปกรณ์จับแรงดึง (Dancer roll) แผนภาพของระบบควบคุมแรงดึงแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แผนภาพของระบบควบคุมแรงดึงในกระบวนการม้วนเส้นใยแก้วนำแสง

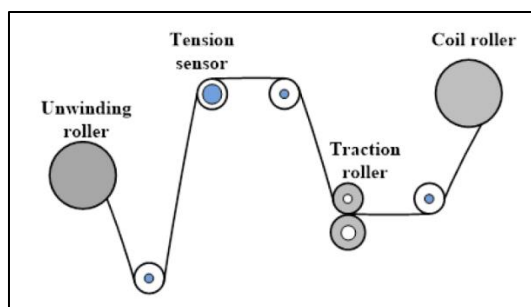
Zhengkang Xie et al. (2016) ได้วิจัยอุปกรณ์ช่วยจัดกระดูกแตกหักบริเวณปลายแขน (Fracture reduction device for distal radius) ผู้วิจัยระบุว่าอุปกรณ์ชนิดนี้เป็นอุปกรณ์ที่แปลกใหม่ มีบทบาทเข้ามาช่วยแพทย์ให้จัดกระดูก (Reduction) ผู้ป่วย มีส่วนประกอบ คือ ฐาน (Base), อุปกรณ์สอบเทียบแกนหมุนของข้อมือ (Calibration device for wrist rotation axis), ฐานวางปลายแขนคู่ (Double forearm supporting device), ตัวจับยึดข้อศอก (Elbow fixation device), ตัวจับยึดต้นแขน (Upper arm fixation device), รางปรับมุม 2 ระนาบ (Double-plane curved guide rail), กลไกดึงนิ้วหัวแม่มือ (Traction mechanism of thumb) และกลไกดึงนิ้วยกเว้นนิ้วหัวแม่มือ (Traction mechanism of fingers except thumb) จากผลการทดลองเบื้องต้นพบว่า แพทย์เพียงคนเดียวสามารถใช้เครื่องมือนี้ในการ จัดกระดูกที่แตกหักบริเวณปลายแขน (Distal radius fracture reduction) ของผู้ป่วยได้อย่างง่ายดาย ซึ่งปกติแล้วต้องใช้แพทย์และผู้ช่วยแพทย์ทำงานร่วมกันอย่างน้อย 2 คน นอกจากนี้ค่าพารามิเตอร์ ที่จำเป็นในการจัดกระดูก (Fracture reduction) เช่น ขนาดแรง มุม ยังสามารถวัดค่าได้ตลอดเวลาอีกด้วย นอกจากนี้แล้วยังเอื้อให้แพทย์ใช้งานเครื่อง C-arm X-ray ได้ในระหว่างที่วินิจฉัยและรักษาได้อย่างสะดวก ส่วนประกอบของอุปกรณ์ช่วยจัดกระดูกแตกหักบริเวณปลายแขน (Fracture reduction device for distal radius) แสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 กลไกอุปกรณ์ช่วยจัดกระดูกแตกหักบริเวณปลายแขน
(Fracture reduction device for distal radius)

Haixiang Huang et al. (2020) ได้นำเสนอการออกแบบและวิเคราะห์ระบบควบคุมแรงดึง ในกระบวนการม้วนฉนวนหุ้มแปลงไฟฟ้า เพื่อต้องการรักษาความตึงของขดลวดสม่ำเสมอ เนื่องจากมีผลต่อประสิทธิภาพของฉนวนของหม้อแปลง ดังนั้นในบทความนี้จึงมีการวิเคราะห์ ลักษณะไดนามิกของกระบวนการขดลวดฉนวนหุ้มแปลง ซึ่งระบบควบคุมความตึงของขดลวด ออกแบบมาเพื่อลดความตึงของแรงดึงที่เกิดจากการเปลี่ยนรัศมีแกนรูปวงรีในกระบวนการม้วน โดยใช้ตัวควบคุม Fuzzy PI controller ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองที่สร้างขึ้นช่วยลดอิทธิพล ของความตึงเครียดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในกระบวนการม้วนขดลวดฉนวนของหม้อแปลงรูปวงรี สามารถปรับตัวเองและป้องกันการรบกวนได้ดีและสามารถควบคุมแรงดึงของระบบได้ดีขึ้น

Fanwei Meng et al. (2020) ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุม Fractional Order PID (FOPID) ในกระบวนการม้วน (ดังแสดงในรูปที่ 2.23) เพื่อควบคุมความตึงของระบบให้คงที่ โดยการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์เพื่อชดเชยแรงดึงอันเนื่องมาจากสิ่งรบกวนภายนอกต่าง ๆ ในสภาพแวดล้อมอุตสาหกรรม สำหรับค่าตัวแปรของตัวควบคุม FOPID จะถูกปรับจูนค่า (Tuning) ด้วย Genetic algorithm (GA) with FMINCON non-linear optimization ด้วยโปรแกรม MATLAB ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุม FOPID มีลักษณะการควบคุมที่ดีขึ้นสามารถต้านการรบกวน ได้ดีและมีความแม่นยำ



รูปที่ 2.23 แผนภาพของระบบม้วน

โครงการไซส์ไทยแลนด์ (2552) ภายใต้ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติหรือเนคเทค สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ร่วมกับพันธมิตรต่าง ๆ ได้เผยแพร่ผลการสำรวจที่มาตรฐานสำหรับรูปร่างของคนไทยโดยสำรวจกลุ่มตัวอย่าง ทั้งชายและหญิงทั่วประเทศ จำนวน 13,442 คน หลายช่วงอายุกล่าวคือ 16-25 ปี, 26-35 ปี, 36-45 ปี, 46-59 ปี และ 60 ปีขึ้นไป ผลการสำรวจพบแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลการสำรวจรูปร่างของคนไทย

เพศ	น้ำหนัก (กก.)	ส่วนสูง (ซม.)	รอบอก		รอบเอว		รอบสะโพก	
			นิ้ว	ซม.	นิ้ว	ซม.	นิ้ว	ซม.
ชาย	68.83	169.46	39.10	99.20	33.50	84.79	37.40	95.0
หญิง	57.40	157.00	36.00	91.09	31.50	79.83	38.50	97.8

โรงพยาบาลเลิดสิน (2555) อธิบายหลักการถ่วงน้ำหนักไว้ 5 ข้อ ดังนี้

1. แนวการดึง (Line of pull) แพทย์จะเป็นผู้จัดการแนวการดึง โดยแนวของการดึงต้องผ่านตำแหน่งที่กระดูกหัก และต้องตรวจดูท่า (Position) ของผู้ป่วยให้อยู่ตามแนวการดึงอย่างสม่ำเสมอ
2. ลดแรงเสียดทาน (Prevent friction) โดยเชือกที่ใช้ดึงต้องไม่ตกรากรางรอก เคลื่อนที่ไปมาได้สะดวก ไม่มีปุ่มบนเชือก น้ำหนักที่ใช้ถ่วงไม่แตะกับขอบเตียงหรือคิพพื้น เพราะสิ่งเหล่านี้จะรบกวนแนวการดึง ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของการดึงลดลง
3. มีแรงต้านกับตุ้มน้ำหนัก (Counter traction) คือ อวัยวะของผู้ป่วยต้องมีแรงต้านกับน้ำหนักถ่วง หากไม่มีแรงต้านตรงข้ามกับน้ำหนักถ่วงแล้วอวัยวะของผู้ป่วยจะเคลื่อนไปตามแนวน้ำหนักถ่วง

4. ดึงถ่วงน้ำหนักตลอดเวลา (Continuous traction) หากมีการปรับน้ำหนักต้องวางหรือปลดน้ำหนักอย่างช้า ๆ และนุ่มนวล หากเปลี่ยนแปลงรวดเร็วจะเกิดการหดตัวของกล้ามเนื้อ ผู้ป่วยจะได้รับความเจ็บปวดอย่างรุนแรง

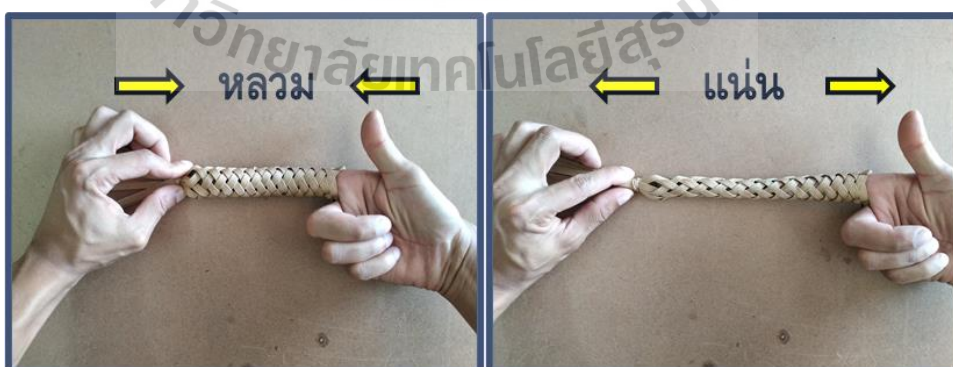
5. รักษาแนวแรงของลำตัวให้ถูกต้อง (Correct body alignment) ผู้ป่วยสามารถเคลื่อนไหวได้เท่าที่จำเป็น ตามแนวแรงของ Traction และตามความเห็นชอบของแพทย์

อุปกรณ์สวมลือคนิ้ว (Finger trap) เป็นอุปกรณ์สวมนิ้วสร้างขึ้นจากการถักขึ้นรูปของวัสดุที่เป็นเส้นลวดสแตนเลส เส้นพอลิเมอร์ หรือกระทั่งวัสดุจากธรรมชาติ เช่น ผักตบชวาและไผ่ลาน เป็นต้น มีลักษณะดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 อุปกรณ์สวมลือคนิ้ว (Finger trap)

ลักษณะของอุปกรณ์สวมลือคนิ้วเมื่อถูกแรงกดเข้าตามแนวแกนจะขยายตัวและเมื่อแรงดึงออกตามแนวแกนจะบีบตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 ลักษณะของอุปกรณ์สวมลือคนิ้ว (Finger trap) เมื่อถูกแรงกระทำตามแนวแกน

บทที่ 3

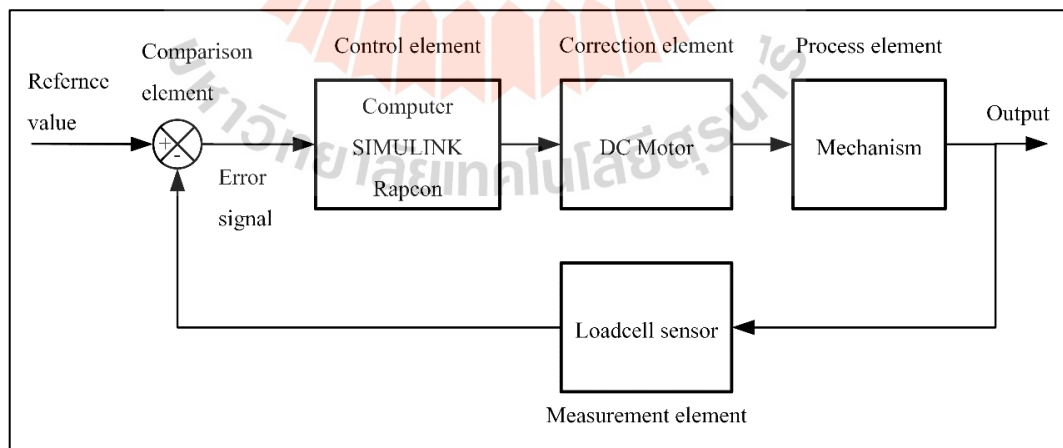
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

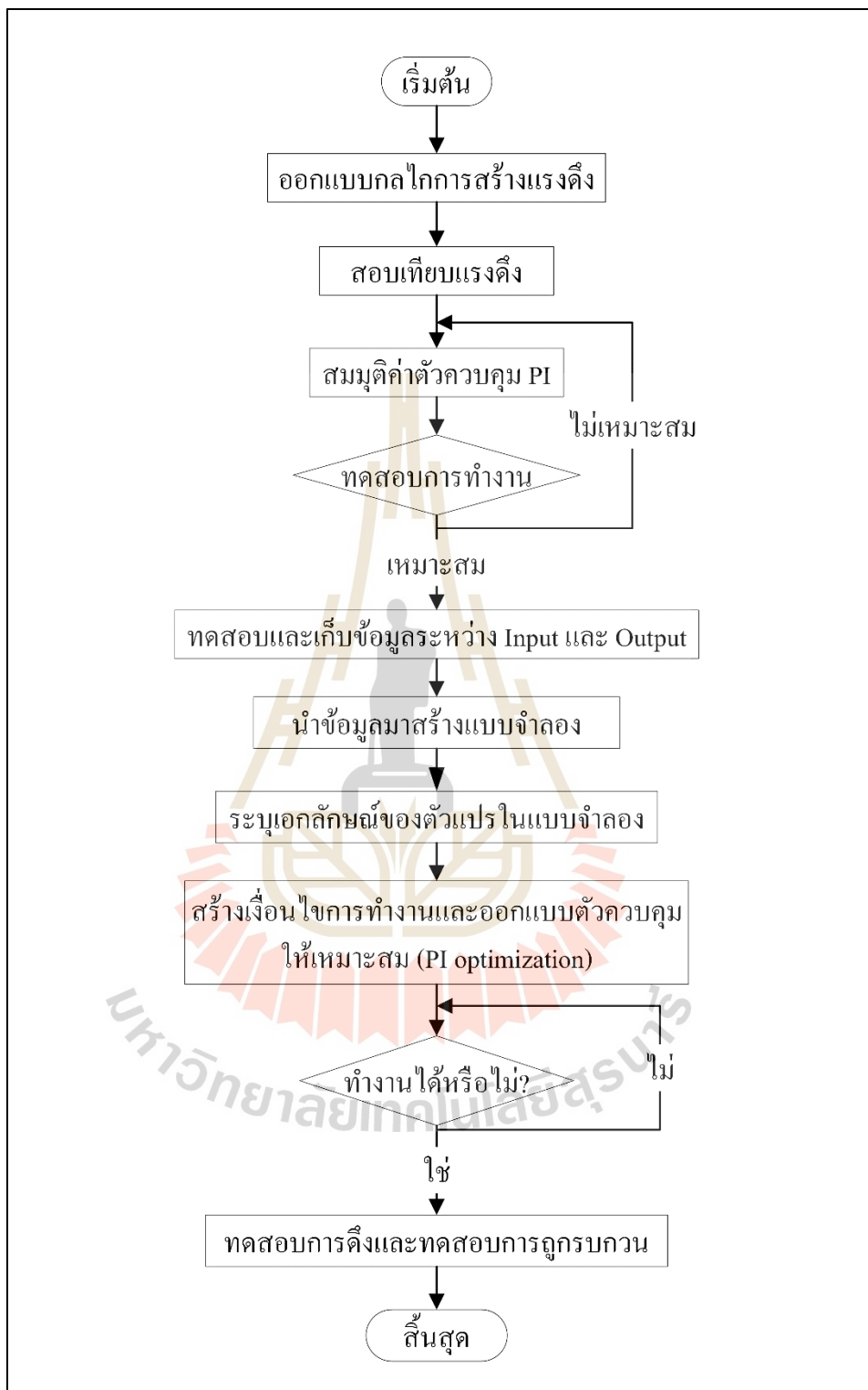
งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การควบคุมแรงดึงให้คงที่ในช่วงที่กำหนดตลอดการทำงาน โดยมีอุปกรณ์ที่อยู่ในระบบหลัก ๆ ดังนี้

1. บอร์ด RAPCON เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์สั่งงานผ่าน โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ทำหน้าที่เป็นชุดควบคุม (Controller)
2. มอเตอร์กระแสตรง (DC motor) 12 โวลต์ ความเร็วรอบ 10 รอบต่อนาที แบบล้อยกแทน เมื่อไม่จ่ายไฟ ประกอบเข้ากับ Lead screw ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้น (Actuator)
3. เซ็นเซอร์วัดแรง (Loadcell sensor) ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ตรวจรู้ (Sensor)
4. ระบบทางกล (Mechanism) ทำหน้าที่เป็นตัวกระบวนการ (Process) ประสานการทำงานทั้งระบบ

เมื่อรวมอุปกรณ์ต่าง ๆ มาเขียนในรูปแผนภาพบล็อกไดอะแกรม (Block diagram) แสดงการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ในระบบจะได้ดังรูปที่ 3.1 และขั้นตอนดำเนินงานวิจัยแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 แผนภาพบล็อกไดอะแกรม (Block diagram) แสดงการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ในระบบ



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

3.2 กลไกสร้างแรงดึง

กลไกสร้างแรงดึงแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 6 ส่วน ดังนี้

หมายเลข (1) คือ มอเตอร์กระแสตรง (DC motor) 12 โวลต์ ความเร็วรอบ 10 รอบต่อนาที แบบล้อยกแทนเมื่อไม่จ่ายไฟ ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้น (Actuator) ซึ่งประกอบเข้ากับ Lead screw หมายเลข (2)

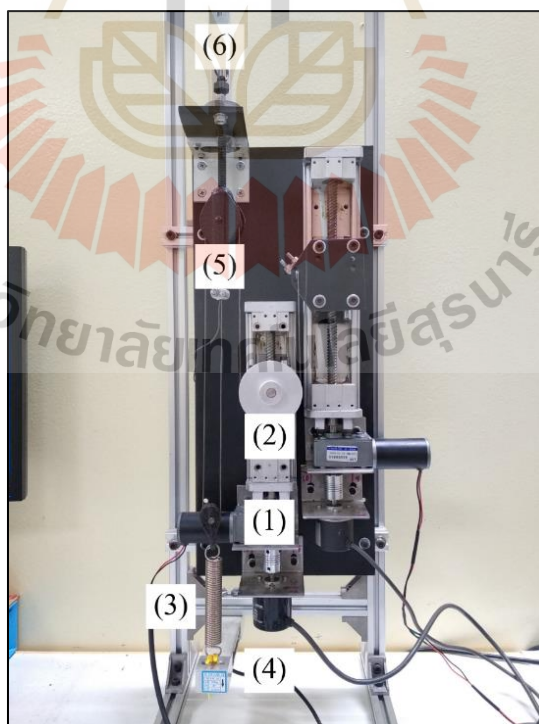
หมายเลข (2) คือ Lead screw ทำหน้าที่แปลงการเคลื่อนที่เชิงมุมจากมอเตอร์กระแสตรง ให้เป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้นเพื่อทำให้รอกเคลื่อนที่ในแนวตั้งแล้วส่งผลให้เกิดแรงดึงในเส้นลวด

หมายเลข (3) คือ สปริง (Spring) ทำหน้าที่ทำหน้าที่เป็นตัวขยาย (Gain) และแปลงการเคลื่อนที่แนวตั้งที่ส่งมาจากรอกให้เป็นแรงดึง ซึ่งแรงดึงนี้เชื่อมต่อกับรอกหมายเลข (5) และเซ็นเซอร์วัดแรง (Loadcell sensor) หมายเลข (4)

หมายเลข (4) คือ เซ็นเซอร์วัดแรง (Loadcell sensor) ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ตรวจรู้ (Sensor) วัดแรงดึงที่เกิดขึ้นที่หมายเลข (6)

หมายเลข (5) คือ ระบบรอก ทำหน้าที่ส่งผ่านแรงไปยังส่วนต่าง ๆ

หมายเลข (6) คือ สายรัดแขน ทำหน้าที่ดึงแขน โดยรับแรงมาจากระบบรอกหมายเลข (5)



รูปที่ 3.3 กลไกสร้างแรงดึง (Tension mechanism)

3.3 กล่องควบคุม

อุปกรณ์ไฟฟ้าภายในกล่องควบคุมแสดงในรูปที่ 3.4 มีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังนี้

หมายเลข (1) บอร์ด RAPCON

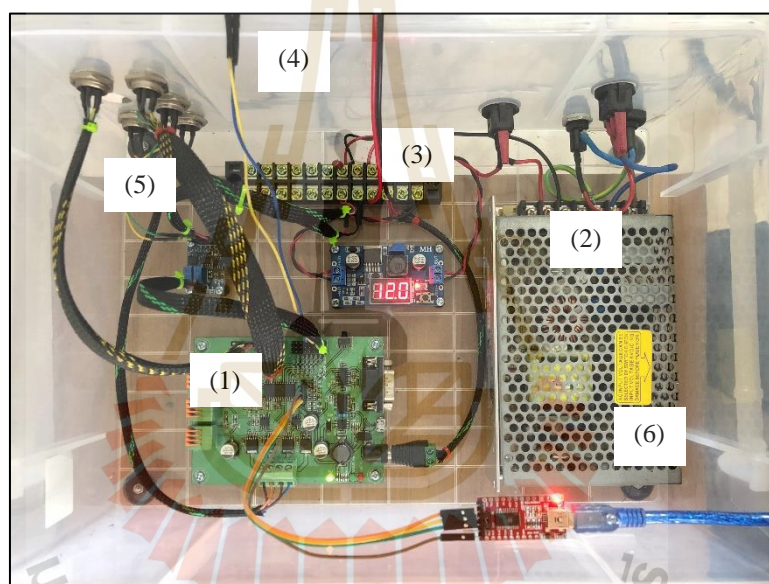
หมายเลข (2) แหล่งจ่ายไฟฟ้า (power supply)

หมายเลข (3) วงจรปรับลดแรงดันไฟฟ้า (step down)

หมายเลข (4) แผงต่อสายไฟ (terminal block)

หมายเลข (5) วงจรแปลงกระแสไฟฟ้า 4 - 20 mA เป็นแรงดันไฟฟ้า 0 - 5 V

หมายเลข (6) สาย USB เชื่อมต่อบอร์ด RAPCON เข้ากับคอมพิวเตอร์



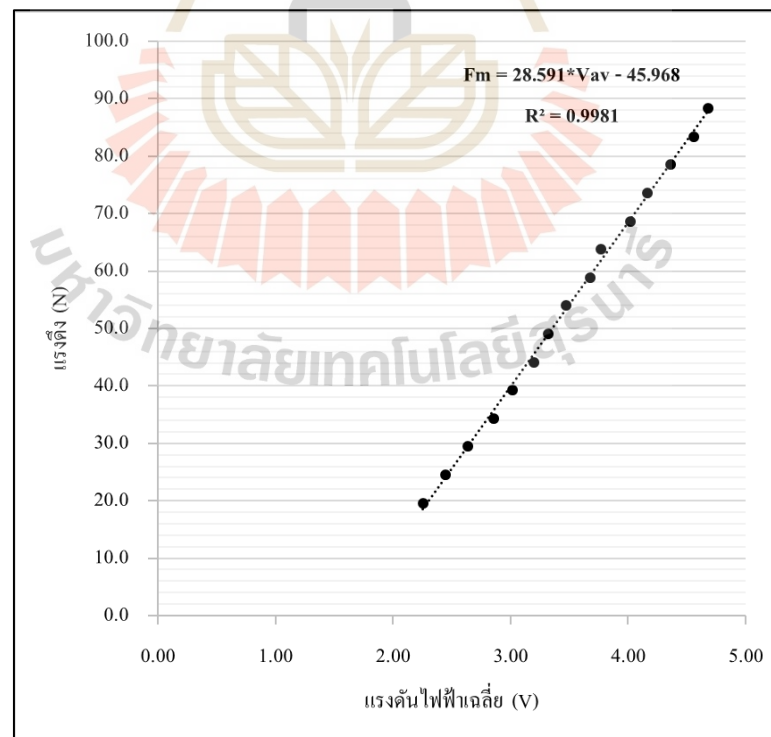
รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ไฟฟ้าภายในกล่องควบคุม

3.4 สอบเทียบแรงดึง

การสอบเทียบแรงดึงใช้เครื่องชั่งแขวนดิจิทัลชนิดแขวนซึ่งติดตั้งบริเวณจุดที่เชื่อมต่อกับสายรัดแขนดังแสดงในรูปที่ 3.4 เพื่อชั่งน้ำหนักในหน่วยกิโลกรัมแล้วแปลงเป็นแรงดึงในหน่วยนิวตัน จากนั้นวัดเทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นซึ่งอ่านได้จากเซ็นเซอร์วัดแรง (Loadcell sensor) แล้วนำมาหาความสัมพันธ์เชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 จุดที่ติดตั้งเครื่องชั่งดิจิตอลชนิดแขวน



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย

จากรูปที่ 3.5 ได้ความสัมพันธ์เชิงเส้นดังสมการที่ 3.1 ส่วนผลจากการเก็บข้อมูลระหว่างแรงดึงกับแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยในการสอบเทียบแรงดึงแสดงในตารางที่ 3.1

$$F_m = 28.591 * V_{av} - 45.968 \quad (3.1)$$

ตารางที่ 3.1 ผลจากการเก็บข้อมูลระหว่างแรงดึงกับแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย

น้ำหนักที่อ่านจาก เครื่องชั่ง (kg), W	แรงดันไฟฟ้า (V)			แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (V)	แรงดึง (N) = W*9.81
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
2.0	2.27	2.26	2.24	2.26	19.6
2.5	2.45	2.46	2.44	2.45	24.5
3.0	2.61	2.66	2.63	2.63	29.4
3.5	2.84	2.86	2.86	2.85	34.3
4.0	3.02	3.10	2.94	3.02	39.2
4.5	3.17	3.32	3.11	3.20	44.1
5.0	3.28	3.42	3.26	3.32	49.1
5.5	3.44	3.50	3.47	3.47	54.0
6.0	3.67	3.71	3.66	3.68	58.9
6.5	3.74	3.80	3.76	3.77	63.8
7.0	3.95	4.16	3.94	4.02	68.7
7.5	4.12	4.27	4.09	4.16	73.6
8.0	4.33	4.43	4.32	4.36	78.5
8.5	4.51	4.66	4.50	4.56	83.4
9.0	4.69	4.67	4.68	4.68	88.3

3.5 สมมุติค่าตัวควบคุมพีไอ (PI controller)

สมมุติค่าตัวควบคุมเพื่อให้ระบบทำงานได้ในตอนเริ่มต้น โดยตัวควบคุมที่สมมุติในตอนแรก คือ ตัวควบคุมสัดส่วน (P controller) พบว่ามีความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว (Steady state error) มีค่าคงที่ ซึ่งบ่งบอกได้ว่าระบบแรงดึงนี้เป็น Type 0

ลำดับถัดมาจึงเลือกใช้ตัวควบคุมสัดส่วนร่วมกับตัวควบคุมปริพันธ์ หรือที่เรียกว่าตัวควบคุมพีไอ (PI controller) เพื่อต้องการทำให้ระบบนี้เป็น Type 1 ซึ่งจะส่งผลให้ ความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว (Steady state error) เป็นศูนย์

เมื่อใช้ตัวควบคุมพีไอพบว่า ความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว (Steady state error) เป็นศูนย์จริง แต่ตัวควบคุมพีไอที่ไม่เหมาะสมก่อให้เกิดการพุ่งเกิน (Overshoot) มีค่าเยอะหรือไม่ก็ทำให้เวลาเข้าที่มีค่าที่ (Settling time) มีค่าเยอะ

โดยตัวควบคุมพีไอที่เลือกใช้ คือ P เท่ากับ 0.05 และ I เท่ากับ 0.002 เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้ในตอนเริ่มต้น หลังจากนั้นจะสร้างแบบจำลองระบบและออกแบบตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสม (PI optimization) ในขั้นตอนถัดไป

3.6 ทดสอบและเก็บข้อมูล

1. บอร์ด RAPCON platform ทำหน้าที่ส่งสัญญาณการทำงานไปที่มอเตอร์และรับสัญญาณจากโหลดเซลล์เซ็นเซอร์ ในขณะที่เดียวกันก็รับส่งสัญญาณไปแสดงผลที่โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ด้วย

2. โปรแกรมที่ใช้ คือ MATLAB/SIMULINK ใช้ในการเขียนคำสั่งการทำงานของโปรแกรมในรูปแบบ block diagram บนคอมพิวเตอร์และเขียนคำสั่งดังกล่าวลงบน RAPCON platform ซึ่งแผนภาพ block diagram ที่ใช้เก็บข้อมูลแสดงในภาพที่ 3.6

3. ใช้ sample time (step size) เท่ากับ 0.01

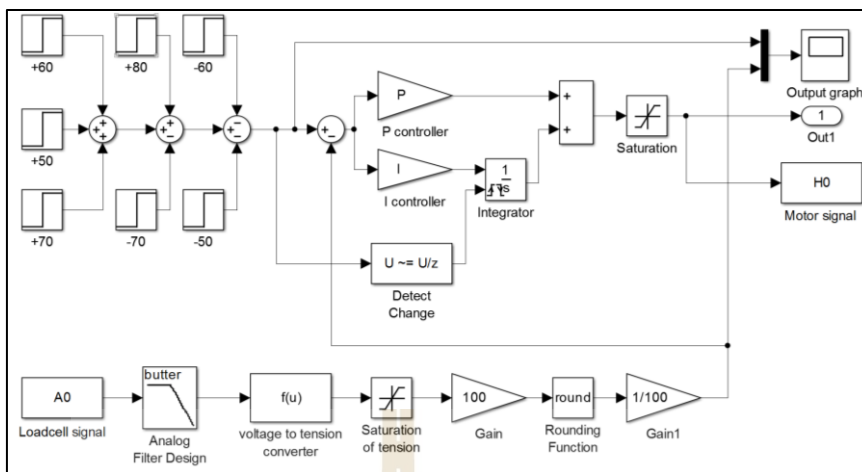
4. กำหนดค่าเริ่มต้น P controller เท่ากับ 0.05

5. กำหนดค่าเริ่มต้น I controller เท่ากับ 0.002

6. พลังงานแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากโหลดเซลล์เซ็นเซอร์เป็นแรงดึงใช้สมการที่ 3.1 คือ $28.591 * V - 45.968$ เมื่อ V คือ แรงดันไฟฟ้าที่ส่งมาจากโหลดเซลล์เซ็นเซอร์

7. เงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) ของแรงดึงอยู่ที่ 10 นิวตัน

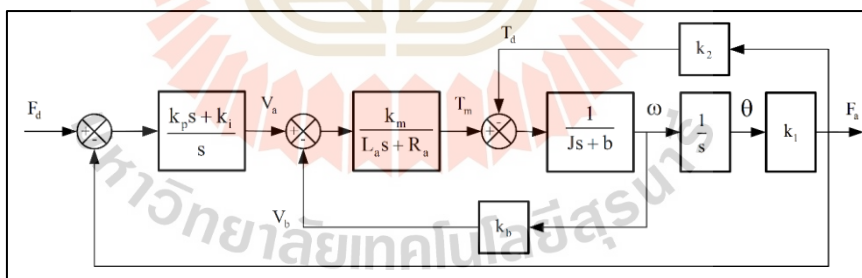
8. ใช้อินพุตแบบขั้นบันได (step input) ตั้งแต่ 50 ถึง 80 นิวตัน โดยเพิ่มขึ้นและลดลงขั้นละ 10 นิวตัน ในแต่ละขั้นจะเก็บข้อมูล 400 วินาที



รูปที่ 3.7 แผนภาพ Block diagram ที่ใช้เก็บข้อมูลใน MATLAB/SIMULINK

3.7 สร้างแบบจำลองระบบ

เนื่องจากระบบสร้างแรงดึงนี้ประกอบไปด้วย มอเตอร์กระแสตรง ทำหน้าที่เป็นต้นกำลัง ต่อเข้ากับ Leadscrew และส่งผ่านแรงดึง (F_m) ไปตามรอกและเส้นลวด แล้วแรงดึง (F_d) ยังย้อนกลับมาเป็นแรงบิดต้านการหมุนของมอเตอร์ต้นกำลัง เมื่อนำจึงได้ Block diagram ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.8 แบบจำลองระบบ

จากรูปที่ 3.8 เมื่อทำการชูป Block diagram แล้วจะได้สมการที่ 3.2

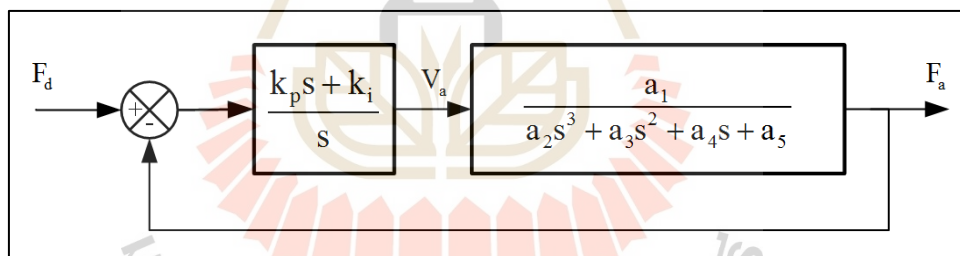
$$\frac{F_m(s)}{F_d(s)} = \frac{k_m k_1 k_p s + k_m k_1 k_i}{L_a J s^4 + (R_a J + L_a b_m) s^3 + (R_a b_m + L_a k_1 k_2) s^2 + (R_a k_1 k_2 + k_m k_1 k_b + k_m k_1 k_p) s + k_m k_1 k_i} \quad (3.2)$$

3.8 ระบุเอกลักษณ์ของตัวแปรในแบบจำลองระบบ

1. ใช้ System identification tool ในโปรแกรม MATLAB
2. ระบุค่าตัวแปรแบบวงปิดโดยใช้สมการที่ 3.2 ดังนั้นจึงมี 1 zeros และมี 4 poles
3. ผลการระบุค่าตัวแปรพบว่าสมการวงปิดที่ได้นั้นมีความถูกต้องเมื่อกับข้อมูลที่บันทึกไว้ (หัวข้อที่ 3.4.1) อยู่ 96.86% ดังแสดงในสมการที่ 3.3

$$\frac{0.145s + 0.004385}{s^4 + 0.8737s^3 + 0.9091s^2 + 0.1494s + 0.004385} \quad (3.3)$$

นำสมการที่ 3.3 มาแยกพจน์ของ PI controller ดังแผนภาพ Block diagram ในรูปที่ 3.8 ในขณะเดียวกันก็นำสมการที่ 3.3 มาทำ Simulation แล้วนำผลจากการ Simulation นั้นมาระบุค่าตัวแปรเพื่อหาค่า a_1, a_2, a_3, a_4 และ a_5 ในสมการที่ 3.4 โดยใช้ Parameter estimation ด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงจริง (F_m) ต่อแรงดันไฟฟ้า (V_a) ที่ไม่รวม PI controller เนื่องจากจะต้องออก PI controller ที่เหมาะสมในขั้นต่อไป



รูปที่ 3.9 แผนภาพ Block diagram ที่แยกพจน์ PI controller

$$\frac{F_a(s)}{V_a(s)} = \frac{a_1}{a_2 s^3 + a_3 s^2 + a_4 s + a_5} \quad (3.4)$$

ผลจากการระบุค่าตัวแปรในสมการที่ 3.4 แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ผลจากการระบุค่าตัวแปรในสมการที่ 3.4

สัญลักษณ์ตัวแปร	ค่า
$a_1 = k_m k_1 a_1$	2.6578
$a_2 = L_a J$	1
$a_3 = R_a J + L_a b_m$	0.7571
$a_4 = R_a b_m + L_a k_1 k_2$	0.8698
$a_5 = R_a k_1 k_2 + k_m k_1 k_b$	0.0086

3.9 ออกแบบตัวควบคุมพีไอ (PI controller)

เนื่องจากตัวควบคุมพีไอที่ใช้ในตอนเริ่มต้นได้มาจากการสมมุติ เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้ แต่ให้ผลที่ยังไม่เหมาะสมคือมีค่าพุ่งเกิน (Overshoot) ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการออกแบบตัวควบคุมใหม่ที่ให้ผลเหมาะสมกว่า โดยใช้ Response optimization ใน MATLAB โดย กำหนดค่าดังนี้

1. ขอบเขตของผลตอบสนองที่ต้องการ
 - 1) Rise time (seconds) = 15 ที่ 80%
 - 2) Settling time (seconds) = 20 ที่ 2%
 - 3) %Overshoot = 2
 - 4) %Undershoot = 1
2. ผลของการออกแบบตัวควบคุมพีไอ (PI optimization) ดังนี้
 - 1) $P = 0.1219$
 - 2) $I = 7.8097 \times 10^{-4}$

3.10 ทดสอบระบบควบคุม

หลังจากออกแบบตัวควบคุมพีไอ (PI optimization) เสร็จแล้วได้ทดสอบเบื้องต้นด้วยการทำ Simulation ในคอมพิวเตอร์ พบว่าให้ผลการตอบสนองตามเงื่อนไขที่กำหนด ในลำดับถัดมาจึงนำมาทดสอบบนอุปกรณ์จริง ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงในบทที่ 4 ซึ่งมีหัวข้อที่ทดสอบ ดังนี้

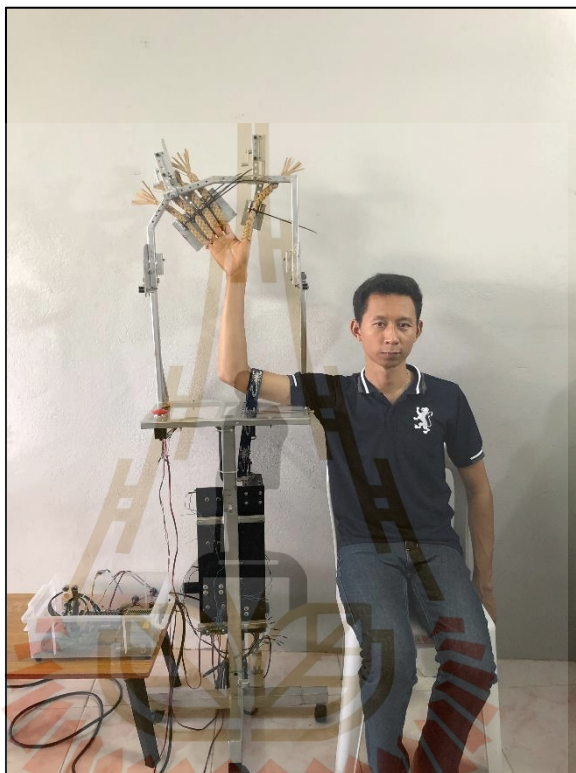
1. ทดสอบระบบควบคุมที่ไร้การรบกวน
2. ทดสอบระบบควบคุมที่มีการรบกวน
 - 1) ทดสอบระบบควบคุมแบบปรับตัวทันที
 - 2) ระบบควบคุมแบบปรับตัวเมื่อแรงดึงเกินขอบเขตที่กำหนด

3. ทดสอบระบบควบคุมโดยใช้การดึงข้อมือ

1) ระบบควบคุมแบบปรับตัวทันที

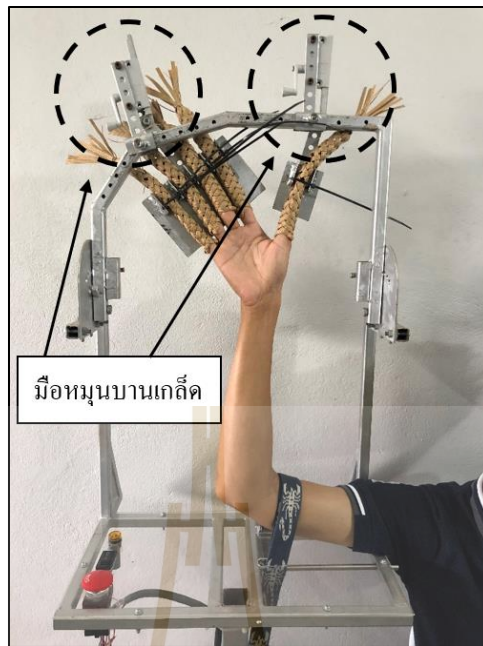
2) ระบบควบคุมแบบปรับตัวเมื่อแรงดึงเกินขอบเขตที่กำหนด

การทดสอบด้วยการดึงข้อมือแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การทดสอบด้วยการดึงข้อมือ

การรบกวนที่กล่าวถึงในหัวข้อ 3.9.2 จะใช้วิธีหมุนมือหมุนบานเกล็ดทั้ง 1 ตัว ทั้งการหมุนเพื่อทำให้แรงดึงในเส้นลวดเพิ่มขึ้นและหมุนในทิศทางตรงข้ามเพื่อให้แรงดึงลดลง (ดังแสดงในรูปที่ 3.5) ส่วนการรบกวนที่กล่าวถึงในหัวข้อ 3.9.3 จะใช้วิธีหมุนมือหมุนบานเกล็ดทั้ง 2 ตัวพร้อมกัน 1 รอบ ทั้งการหมุนเพื่อทำให้แรงดึงในเส้นลวดเพิ่มขึ้นและหมุนในทิศทางตรงข้ามเพื่อให้แรงดึงลดลง (ดังแสดงในรูปที่ 3.11)



รูปที่ 3.11 มือหุ่นบานเกล็ดที่ใช้ในการทดสอบการรบกวน



บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 บทนำ

เนื่องด้วยงานวิจัยมุ่งเน้นไปที่การสร้างระบบควบคุมแรงดึงที่สามารถปรับชดเชยแรงดึงได้ด้วยตัวเอง ฉะนั้นผลการวิจัยจะทดสอบการทำงานของระบบด้วยการพิจารณาว่าระบบนี้สามารถชดเชยแรงดึงได้ด้วยตัวเองหรือไม่ ซึ่งผลการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อหลัก ๆ ดังต่อไปนี้

1. ผลการทดสอบระบบควบคุมที่ไร้การรบกวน เป็นการทดสอบตัวควบคุมว่าสามารถควบคุมแรงดึงหลังจากที่ผ่านการออกแบบตัวควบคุมใหม่ (Controller optimization) ได้หรือไม่ โดยที่ยังไม่มีการรบกวนจากภายนอก

2. ผลการทดสอบระบบควบคุมที่มีการรบกวน โดยที่มีการรบกวนด้วยการขับรอกเพื่อเพิ่มหรือลดแรงดึงในเส้นลวด ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่

- ระบบควบคุมปรับตัวทันที
- ระบบควบคุมปรับตัวเมื่อแรงดึงเกินขอบเขตที่กำหนด

3. ผลการทดสอบระบบควบคุมด้วยการดึงข้อมือ โดยที่มีการรบกวนด้วยการขับรอกเพื่อเพิ่มหรือลดแรงดึงในเส้นลวด ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่

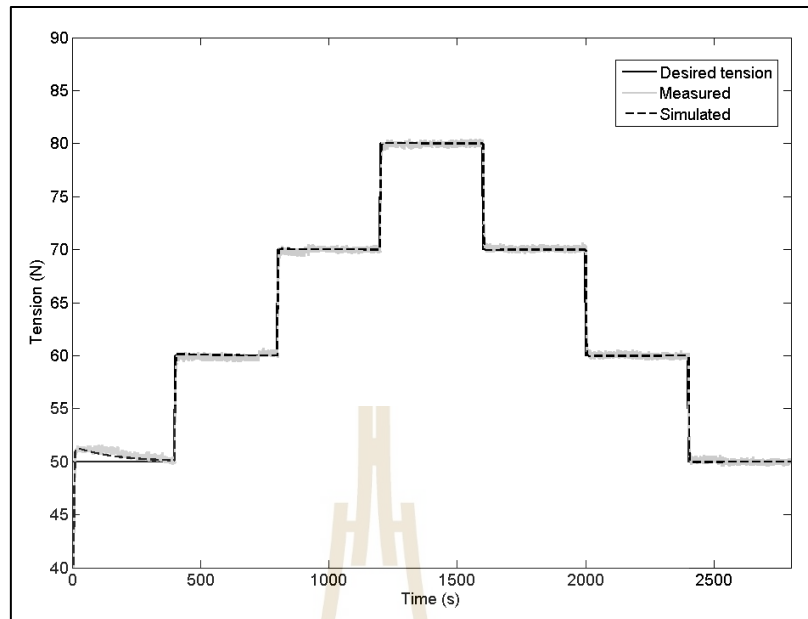
- ระบบควบคุมปรับตัวทันที
- ระบบควบคุมปรับตัวเมื่อแรงดึงเกินขอบเขตที่กำหนด

4.2 ทดสอบระบบควบคุมที่ไร้การรบกวน

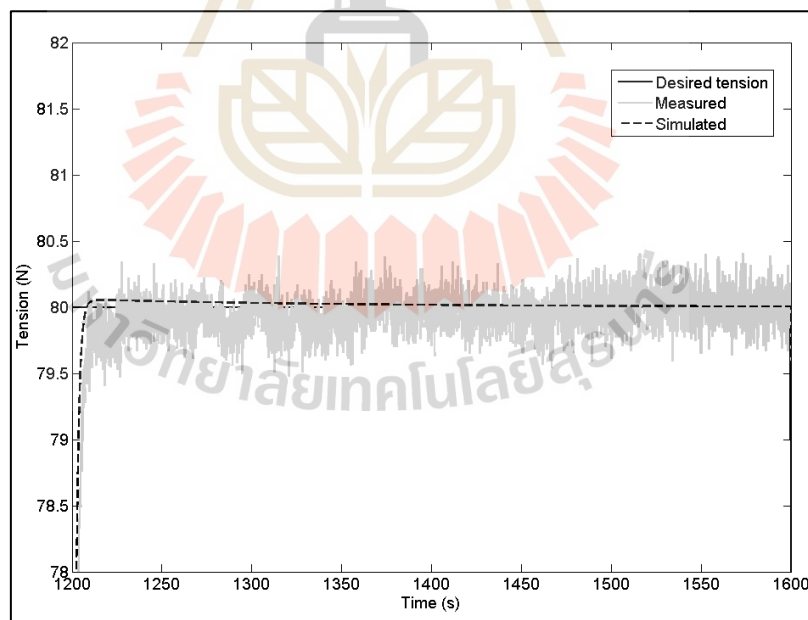
1. เงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) ประมาณ 10 นิวตัน

2. ใช้อินพุตแบบขั้นบันได (Step input) 50-80 นิวตัน เพิ่มขึ้นและลดลงช่วงละ 10 นิวตัน โดยในแต่ละช่วงจะทดสอบเป็นเวลา 400 วินาที

3. ผลการทดสอบพบว่าตัวควบคุมที่ผ่านการออกแบบใหม่ (Controller optimization) มีผลทำให้ค่า Overshoot ลดลงส่งผลให้การตอบสนองเข้าสู่ช่วง Steady state เร็วขึ้นทุกช่วงแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ผลตอบสนองหลังออกแบบตัวควบคุมใหม่ (Controller optimization)

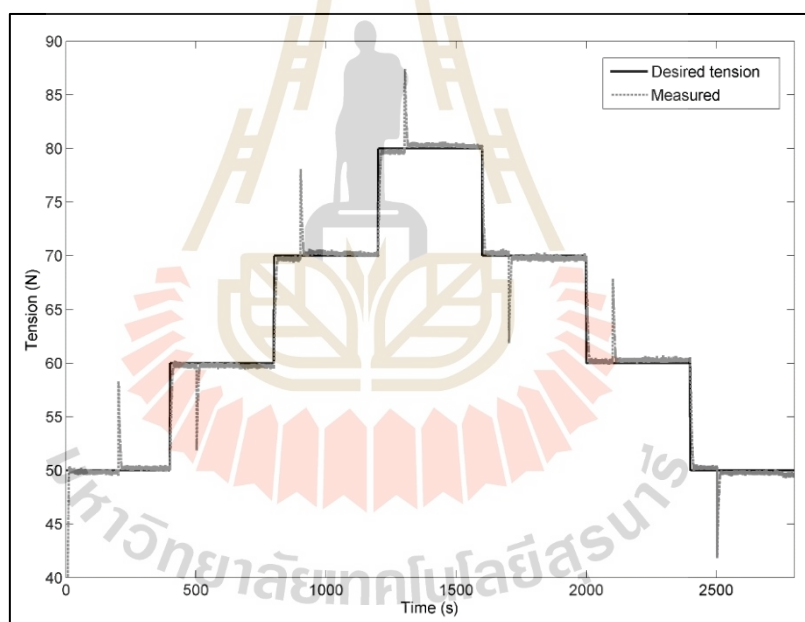


รูปที่ 4.2 ผลตอบสนองหลังออกแบบตัวควบคุมใหม่ (Controller optimization) ที่แรงดึง 80 นิวตัน

4.3 ทดสอบระบบควบคุมที่มีการรบกวน

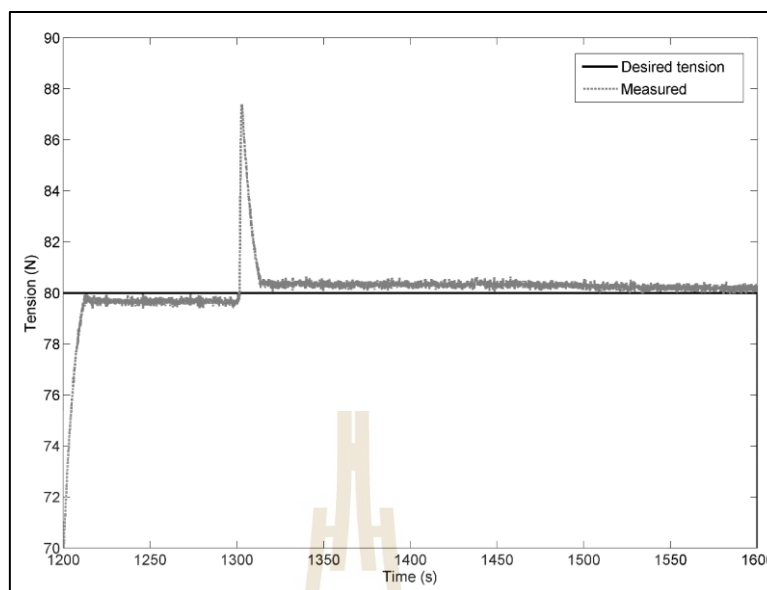
4.3.1 ระบบควบคุมแบบปรับตัวทันที

1. เงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) ประมาณ 10 นิวตัน
2. ใช้อินพุตแบบขั้นบันได (Step input) 50-80 นิวตัน เพิ่มขึ้นและลดลงช่วงละ 10 นิวตัน โดยในแต่ละช่วงจะทดสอบเป็นเวลา 400 วินาที
3. เมื่อผลการตอบสนองเข้าสู่ช่วงคงที่ (Steady state) แล้วจะมีการรบกวนด้วยการขยับรถ ซึ่งทำให้แรงดึงในเส้นลวดเพิ่มขึ้นและลดลงประมาณ 8 นิวตัน
4. ผลการทดสอบพบว่าระบบควบคุมสามารถปรับตัวให้กลับเข้ามาสู่ค่าอินพุตที่กำหนดไว้ได้ อีกทั้งยังไม่เกิดการพุ่งเกิน (Overshoot) ผลการตอบสนองแสดงในรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบปรับตัวทันที

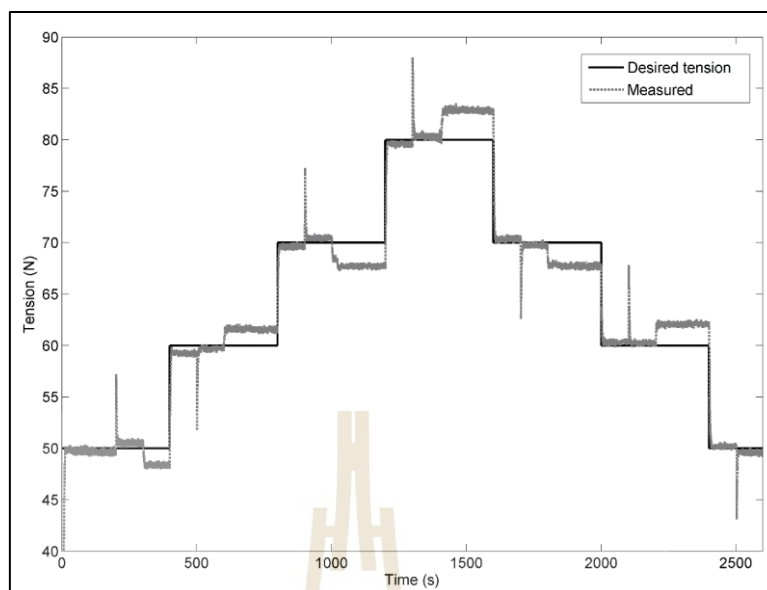
จากรูปที่ 4.4 แสดงสถานะที่แรงดึง 80 นิวตัน เมื่อแรงดึงมีค่าเข้าสู่ช่วงผลตอบสนองคงที่ (Steady state) ในวินาทีที่ 1,210 และถูกรบกวนในวินาทีที่ 1,300 พบว่า ระบบควบคุมสามารถปรับตัวให้กลับเข้ามาสู่ค่าอินพุต (Input) ที่กำหนดไว้ได้ อีกทั้งยังไม่เกิดการพุ่งเกิน (Overshoot)



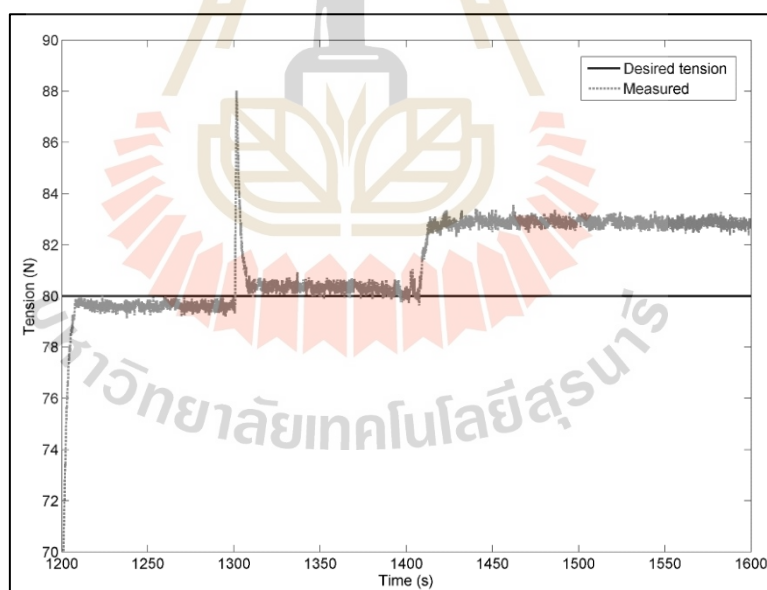
รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบปรับตัวทันทีที่แรงดึง 80 นิวตัน

4.3.2 ระบบควบคุมแบบปรับตัวเมื่อแรงดึงเกินขอบเขตที่กำหนด

1. เงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) ประมาณ 10 นิวตัน
2. ใช้อินพุตแบบขั้นบันได (Step input) 50-80 นิวตัน เพิ่มขึ้นและลดลงช่วงละ 10 นิวตัน โดยในแต่ละช่วงจะทดสอบเป็นเวลา 400 วินาที
3. กำหนดขอบเขตของผลตอบสนองให้มีความคลาดเคลื่อนได้ 10% ($\pm 5\%$) ของอินพุต ตัวควบคุม (Controller) จะชดเชยแรงดึงเมื่อผลตอบสนองมีค่าคลาดเคลื่อนเกินขอบเขตที่กำหนด
4. เมื่อผลการตอบสนองเข้าสู่ช่วงคงที่ (Steady state) แล้วจะมีการรบกวนด้วยการขยับรอก ซึ่งทำให้แรงดึงในเส้นลวดเพิ่มขึ้นและลดลงประมาณ 8 นิวตัน
5. ผลการทดสอบพบว่าระบบควบคุมสามารถปรับตัวให้กลับเข้ามาสู่ค่าอินพุตที่กำหนดไว้ได้ อีกทั้งยังไม่เกิดการพุ่งเกิน (Overshoot) ผลการตอบสนองแสดงในรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6
6. หลังการรบกวนในครั้งแรกและผลตอบสนองเข้าสู่ค่าอินพุตที่กำหนดไว้แล้ว ได้รับความถี่การรบกวนครั้งต่อไปไม่เกินความคลาดเคลื่อน 10% ($\pm 5\%$) ของอินพุต พบว่า ตัวควบคุม (Controller) จะไม่ชดเชยแรงดึง



รูปที่ 4.5 ผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบปรับตัวเมื่อแรงดึงเกินขอบเขตที่กำหนด



รูปที่ 4.6 ผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบปรับตัวเมื่อแรงดึงเกินขอบเขตที่กำหนดที่แรงดึง 80 นิวตัน

จากรูปที่ 4.6 แสดงสถานะที่แรงดึง 80 นิวตัน เมื่อแรงดึงมีค่าเข้าสู่ช่วงผลตอบสนองคงที่ (Steady state) ในวินาทีที่ 1,210 และถูกรบกวนในวินาทีที่ 1,300 หลังจากกลับ

เข้าสู่ช่วงผลตอบสนองคงที่ (Steady state) ได้มีการรบกวนตั้งแต่วันที่ที่ 1,400 เป็นต้นไป แต่เนื่องด้วยผลตอบสนองมีค่าไม่เกินความคลาดเคลื่อน 10% ($\pm 5\%$) ของอินพุต ดังนั้นตัวควบคุม (Controller) จะไม่ชดเชยแรงดึง

4.4 ทดสอบระบบควบคุมโดยใช้การดึงข้อมือ

1. เริ่มต้นด้วยการให้ผู้ใช้งานเป็นผู้ปรับตั้งแรงดึงแบบ Manual ด้วยการกดสวิทช์ ขึ้น-ลง เพื่อให้ได้ค่าแรงดึงตามต้องการในการทดสอบนี้ใช้แรงดึง 50, 60, 70 และ 80 นิวตัน ทั้งนี้ประกอบด้วยเงื่อนไข (1) ระบบควบคุมแบบปรับตัวทันทีและ (2) ระบบควบคุมแบบปรับตัวเมื่อแรงดึงเกินขอบเขตที่กำหนด

2. เมื่อปรับ Manual จนได้แรงดึงใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการแล้วก็สลับไปใช้เงื่อนไข โดยที่ตัวควบคุม (Controller) เป็นตัวรักษาค่าแรงดึงตลอดการทำงาน

3. เมื่อผลการตอบสนองเข้าสู่ช่วงคงที่ (Steady state) แล้วจะมีการรบกวนด้วยการขยับรอกซึ่งทำให้แรงดึงในเส้นลวดเพิ่มขึ้นและลดลงประมาณ 5-8 นิวตัน

4.4.1 ระบบควบคุมแบบปรับตัวทันที

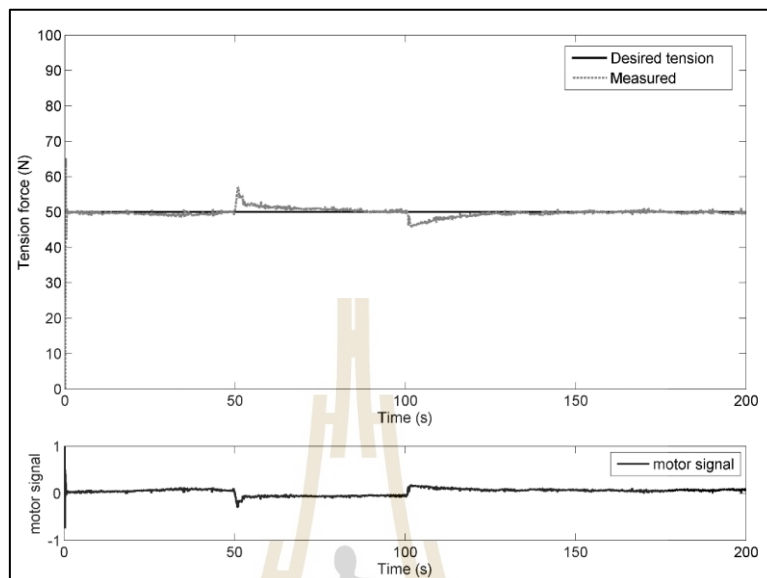
จากรูปที่ 4.7 ในส่วนของกราฟแรงดึง (Tension force) เมื่อแรงดึงเข้าสู่ช่วงคงที่ (Steady state) ได้ถูกรบกวนในวันที่ที่ 50 ด้วยการขยับรอกเพื่อเพิ่มแรงดึงในเส้นลวด หลังจากถูกรบกวนแล้วตัวควบคุม (Controller) สามารถปรับแรงดึงให้เข้าสู่ค่าที่กำหนด (Setpoint) ได้ภายในเวลา 10 วินาที

เมื่อแรงดึงเข้าสู่ช่วงคงที่ (Steady state) ได้ถูกรบกวนอีกครั้งในวันที่ที่ 100 ด้วยการขยับรอกเพื่อลดแรงดึงในเส้นลวด หลังจากถูกรบกวนแล้วตัวควบคุม (Controller) สามารถปรับแรงดึงให้เข้าสู่ค่าที่กำหนด (Setpoint) ได้ภายในเวลา 10 วินาที

จากรูปที่ 4.7 ในส่วนของกราฟสัญญาณของมอเตอร์ (Motor signal) จะเห็นได้ว่ามอเตอร์มีการทำงานตลอดเวลา ทั้งในช่วงที่ไม่มีการรบกวนและช่วงที่มีการรบกวน เพื่อปรับตัวเองให้เข้าสู่ค่าที่กำหนด (Setpoint) แม้ในช่วงที่ไม่มีการรบกวนมอเตอร์ก็ยังทำงานตลอดเวลาสังเกตได้จากกราฟสัญญาณมอเตอร์ปรับตัวเพิ่มขึ้นและลดลงเล็กน้อยใกล้เคียงค่าศูนย์แต่ไม่หยุดนิ่งโดยมอเตอร์จะทำงานมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ที่เกิดขึ้นในขณะนั้น

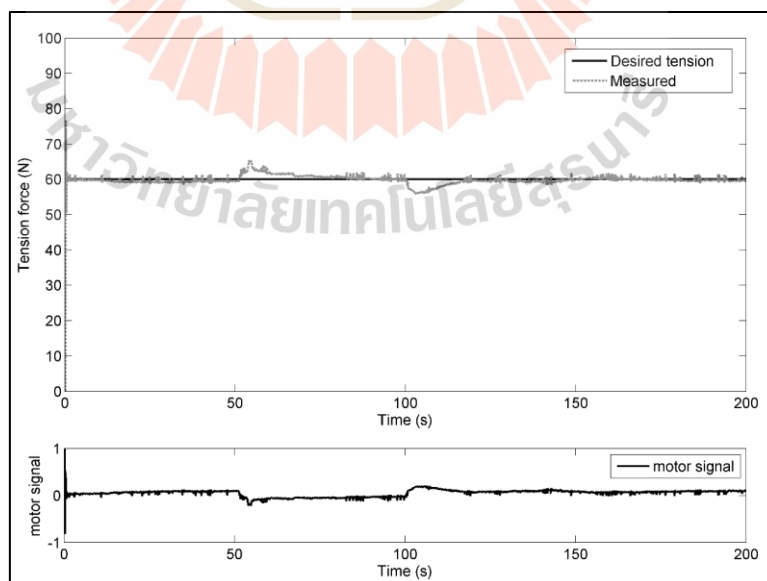
ทั้งนี้ผลการตอบสนองเป็นไปในทิศทางเดียวกันทุกช่วงของแรงดึง ได้แก่ 50, 60, 70 และ 80 นิวตัน ดังแสดงในรูปที่ 4.7-4.10

4.4.1.1 แรงดึง 50 นิวตัน



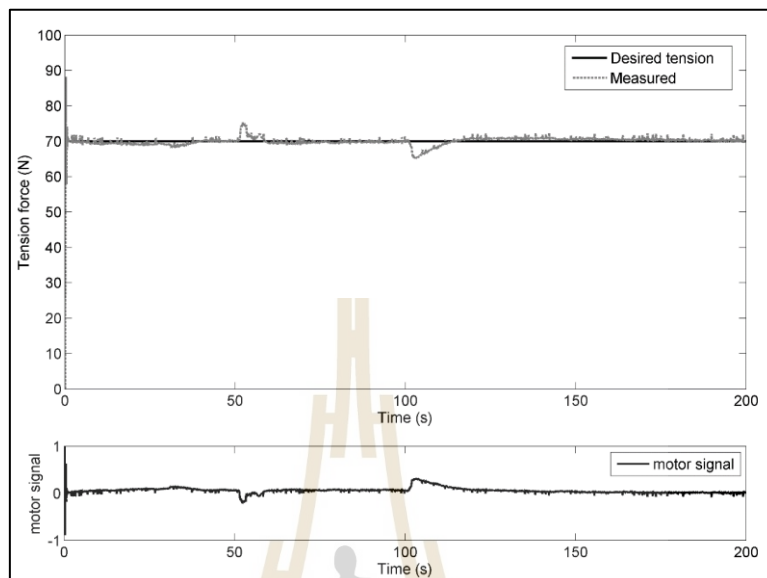
รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบดึงข้อมือด้วยแรง 50 นิวตัน ของระบบควบคุมแบบปรับตัวทันที

4.4.1.2 แรงดึง 60 นิวตัน



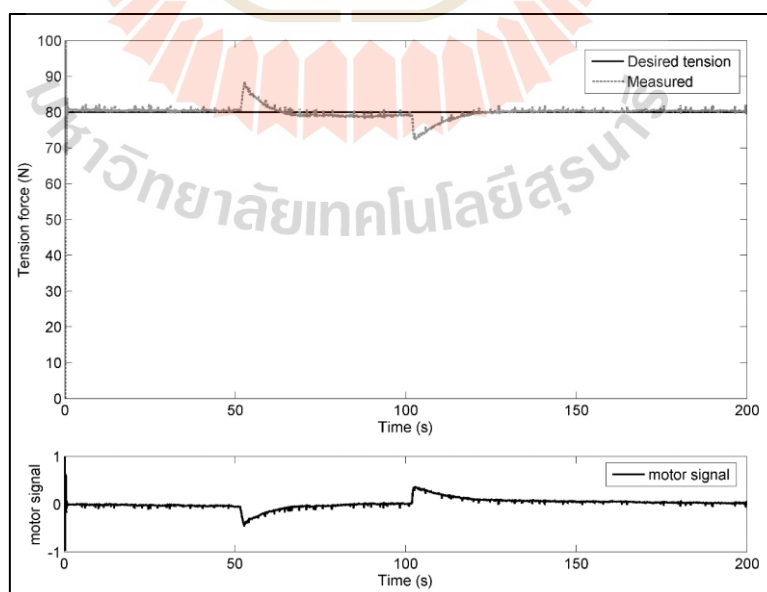
รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบดึงข้อมือด้วยแรง 60 นิวตัน ของระบบควบคุมแบบปรับตัวทันที

4.4.1.3 แรงดึง 70 นิวตัน



รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบดึงข้อมือด้วยแรง 70 นิวตัน ของระบบควบคุมแบบปรับตัวทันที

4.4.1.4 แรงดึง 80 นิวตัน



รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบดึงข้อมือด้วยแรง 80 นิวตัน ของระบบควบคุมแบบปรับตัวทันที

4.4.2 ระบบควบคุมแบบปรับตัวเมื่อแรงดึงเกินขอบเขตที่กำหนด

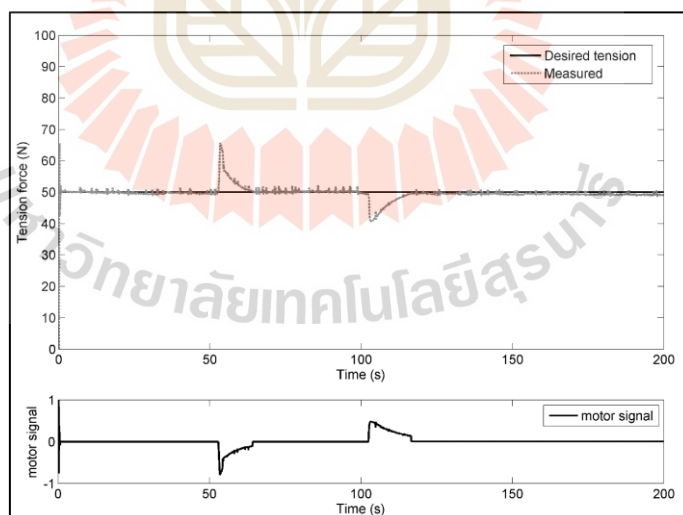
จากรูปที่ 4.11 ในส่วนของกราฟแรงดึง (Tension force) เมื่อแรงดึงเข้าสู่ช่วงคงที่ (Steady state) ได้ถูกรบกวนในวินาทีที่ 50 ด้วยการขยับรอกเพื่อเพิ่มแรงดึงในเส้นลวด หลังจากถูกรบกวนแล้วตัวควบคุม (Controller) สามารถปรับแรงดึงให้เข้าสู่ค่าที่กำหนด (Setpoint) ได้ภายในเวลา 10 วินาที

เมื่อแรงดึงเข้าสู่ช่วงคงที่ (Steady state) ได้ถูกรบกวนอีกครั้งในวินาทีที่ 100 ด้วยการขยับรอกเพื่อลดแรงดึงในเส้นลวด หลังจากถูกรบกวนแล้วตัวควบคุม (Controller) สามารถปรับแรงดึงให้เข้าสู่ค่าที่กำหนด (Setpoint) ได้ภายในเวลา 10 วินาที

จากรูปที่ 4.11 ในส่วนของกราฟสัญญาณของมอเตอร์ (Motor signal) จะเห็นได้ว่า มอเตอร์มีการทำงานเฉพาะช่วงที่แรงดึงเกินขอบเขตที่กำหนดเท่านั้น เพื่อปรับตัวเองให้เข้าสู่ค่าที่กำหนด (Setpoint) ถ้าหากแรงดึงไม่เกินขอบเขตที่กำหนดมอเตอร์ก็จะหยุดนิ่ง สังเกตได้จากกราฟสัญญาณของมอเตอร์ที่มีค่าเป็นศูนย์

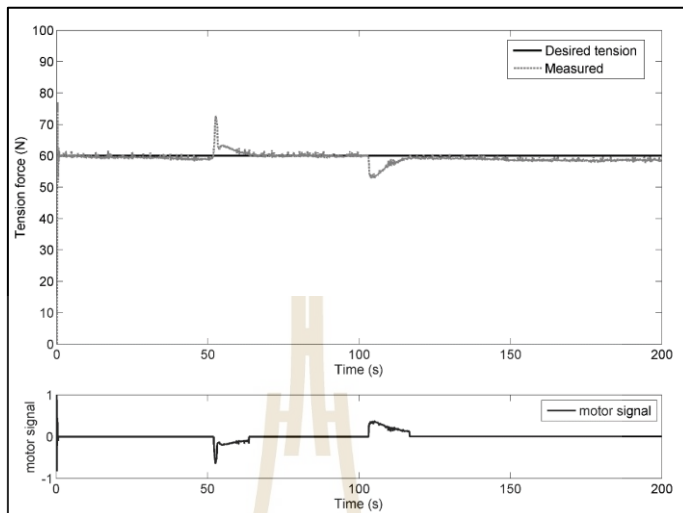
ทั้งนี้ผลการตอบสนองเป็นไปในทิศทางเดียวกันทุกช่วงของแรงดึง ได้แก่ 50, 60, 70 และ 80 นิวตัน ดังแสดงในรูปที่ 4.11 - 4.14

4.4.2.1 แรงดึง 50 นิวตัน



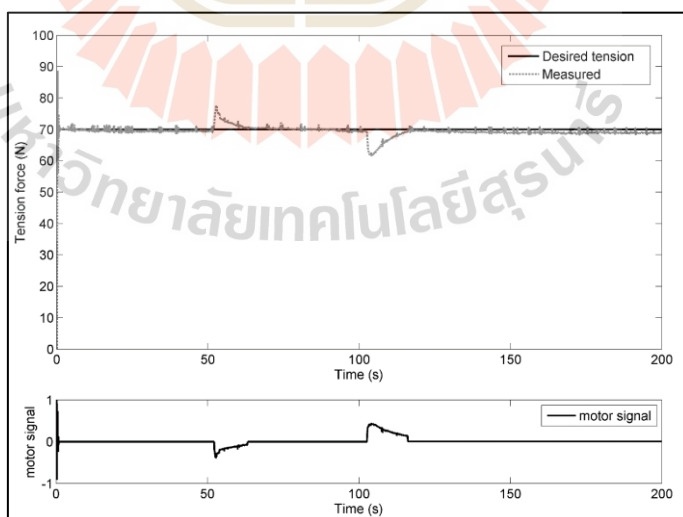
รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบดึงข้อมือนิ้วด้วยแรง 50 นิวตัน ของระบบควบคุมแบบปรับตัวเมื่อแรงดึงเกินขอบเขตที่กำหนด

4.4.2.2 แรงดึง 60 นิวตัน



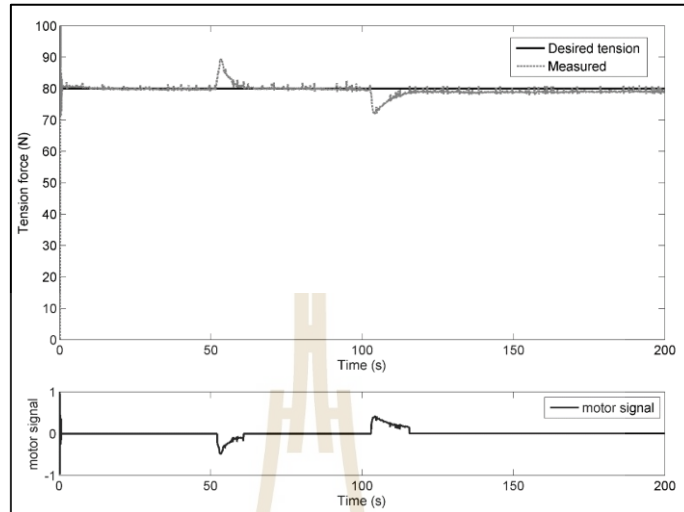
รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบดึงข้อมือด้วยแรง 60 นิวตัน ของระบบควบคุมแบบปรับตัว เมื่อแรงดึงเกินขอบเขตที่กำหนด

4.4.2.3 แรงดึง 70 นิวตัน



รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบดึงข้อมือด้วยแรง 70 นิวตัน ของระบบควบคุมแบบปรับตัว เมื่อแรงดึงเกินขอบเขตที่กำหนด

4.4.2.4 แรงดึง 80 นิวตัน



รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบดึงข้อมือด้วยแรง 80 นิวตัน ของระบบควบคุมแบบปรับตัว
เมื่อแรงดึงเกินขอบเขตที่กำหนด

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. อุปกรณ์ควบคุมแรงดึงสามารถทำงานได้ในช่วงแรงดึงที่กำหนด คือ 50-80 N อีกทั้งยังสามารถปรับตัวได้อัตโนมัติ เมื่อมีการรบกวนที่ทำให้แรงดึงในระบบเปลี่ยนไป
2. ผลตอบสนองจากตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการสุ่มค่าเทียบกับตัวควบคุมพีไอตัวใหม่ (PI optimization) พบว่า ทำให้อุปกรณ์สร้างแรงดึงมีผลการทำงานที่ดีขึ้น สังเกตได้จากมีการพุ่งเกิน (Overshoot) ที่ลดลงเมื่อเทียบจากการใช้ตัวควบคุมพีไอที่ได้จากการสมมุติ
3. การสร้างเงื่อนไขการทำงานแบบระบบควบคุมปรับตัวเมื่อแรงดึงเกินขอบเขตที่กำหนดทำให้มอเตอร์ไม่ต้องปรับตัวตลอดเวลา ต่างจากเงื่อนไขการทำงานแบบระบบควบคุมปรับตัวทันที

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้คอมพิวเตอร์, บอร์ด RAPCON และโปรแกรม MATLAB Simulink ในการสั่งงาน แต่เนื่องด้วยบอร์ด RAPCON จำเป็นต้องอาศัยการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์อยู่ ซึ่งเป็นข้อที่ต้องพิจารณา หากต้องการนำไปใช้งานจริงควรใช้บอร์ดที่สามารถบันทึกคำสั่งและทำงานได้โดยไม่ต้องอาศัยคอมพิวเตอร์ จะทำให้การใช้งานสะดวกมากขึ้น
2. อุปกรณ์ที่ใช้ดึงเส้นลวด คือ Lead screw ซึ่งเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง จึงทำให้มีระยะการเคลื่อนที่จำกัด เพราะหากต้องการให้มีระยะเคลื่อนที่มากก็จะต้องใช้ Lead screw ที่มีความยาวมากตามไปด้วย ส่งผลต่อการนำไปใช้งานได้ไม่ถนัดสะดวก จึงเสนอให้ใช้อุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบากว่า Lead screw

รายการอ้างอิง

- ประพันธ์ ภาที วรัญญ และสินชัย ชินวรรัตน์. (2550). แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมแบบวงปิด. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21, ชลบุรี, 17-19 ตุลาคม 2550.
- ปิยดน้อย ภาชนะพรรณ. การตรวจจับน้ำหนักโดยใช้โหลดเซลล์ (Load Cell). สืบค้นจาก <http://www.ecpe.nu.ac.th>.
- วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. (2556). การควบคุมระบบพลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อำนวยการ มีทรัพย์ และ อรุณช ประดับทอง. (2556). สืบค้นจาก <https://administer.pi.ac.th>
- โรงพยาบาลเลิดสิน. (2555). การพยาบาลผู้ป่วยที่ได้รับการดึงถ่วงน้ำหนัก. การพยาบาลออร์โธปิดิกส์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บริษัท สหมิตรพรินต์ติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง จำกัด. สืบค้นจาก <http://www.lerdsin.go.th>.
- โรงพยาบาลเลิดสิน. (2559). การดูแลและป้องกันการหักซ้ำในผู้ป่วยโรคกระดูกพรุน. วารสารกรมการแพทย์. ฉบับที่ 5. กันยายน-ตุลาคม 2559. สืบค้นจาก <http://www.dms.moph.go.th>.
- Baoji Ma and Sun Dong. (2010). The modeling of tension control system in optical fiber automatic winding. **2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering**, Wuhan, pp. 2231-2234.
- F. Meng, S. Liu and K. Liu. (2020). Design of an Optimal Fractional Order PID for Constant Tension Control System. **IEEE Access**, vol. 8, pp. 58933-58939, 2020.
- H. Huang, J. Xu, K. Sun, L. Deng and C. Huang. (2020). Design and Analysis of Tension Control System for Transformer Insulation Layer Winding. **IEEE Access**, vol. 8, pp. 95068-95081, 2020.
- Yan, M.-T., & Huang, P.-H. (2004). Accuracy improvement of wire-EDM by real-time wire tension control. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 44(7), 807-814.
- Zhengkang Xie, Bing Liang, Xingsong Wang and Mengqian Tian. (2016). Design of fracture reduction device for distal radius. 2016 23rd International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP).



ภาคผนวก ก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Prasoetkarn, N., Numanoy, N., Saengsri, S., & Srisertpol, J. (2020). Identification and Control of Counter-traction Mechanism to Finger Traps for Fracture Reduction. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.



Identification and Control of Counter-traction Mechanism to Finger Traps for Fracture Reduction

N Prasoetkarn¹, N Numanoy¹, S Saengsri¹ and J Srisertpol¹

¹ School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

E-mail: jiraphon@sut.ac.th

Abstract. Finger traps are a valuable tool that can be maintained the traction. The devices stretch the thumb and other four fingers separately in order to achieve better reduction effect. These are applied individually to the fingers and the limb is suspended, with gravity providing counter-traction to disimpact the fracture by traction. However, personal gravity can't be used to maintain the appropriate tension. This paper proposed an experimental study on the tension of counter-traction mechanism to finger traps for fracture reduction. This mechanism is particularly useful to help for the patients. Transfer function estimation from experimental data can improve the overall identification performance and the parameter. The feedback control system design for compensating tension that loses from disturbance tension consisted of the controller as PI controller and actuator as DC motor with counter-traction mechanism. Experimental results were demonstrated the efficiency of the proposed system to maintain the appropriate tension.

1. Introduction

Recent decades, surgical approaches such as open reduction and internal fixation have been increasing use. Complications such as tendon afflictions and further surgery can arise from surgical intervention. Therefore, closed reduction and cast immobilization remains an important treatment option in a majority of cases. A very commonly used method of closed reduction is manual traction. An assistant provides counter-traction while the operator provides traction and manipulates the bone fragments into position. Even though it has been the most commonly used method for at least the better part of a century, the evidence of its effectiveness is ambiguous [1]. Another method is mechanical reduction by finger-trap traction [2] which dispenses with the need for an assistant as the forearm is suspended by finger-traps in the radial fingers. The traction mechanism stretches the thumb and other four fingers separately in order to achieve better reduction effect [3]. Counter-traction is provided by weights suspended on the arm near the elbow joint with gravity as shown in Figure 1. This restores the longitudinal axis without further actions, and the operator can then apply manual dorsal pressure to the fragments, if necessary, to restore the volar tilt of the wrist [4]. Closed reduction by finger-trap traction seems to offer better correction of radial shortening. However, the optimal weight to relate with tension of closed reduction remains to be determined.

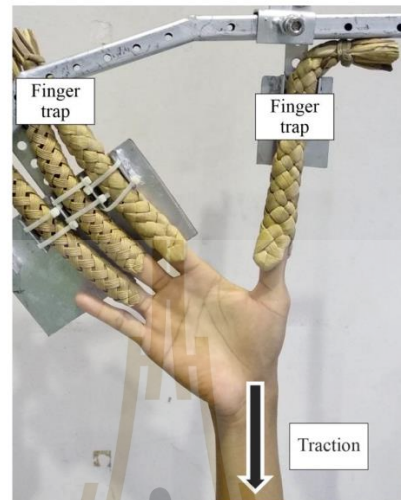


Figure 1. Finger-trap traction

This paper proposed an experimental study on the tension of counter-traction mechanism to finger traps for fracture reduction. This mechanism is particularly useful if there is no assistant available. Simplistic transfer function, to improve the overall identification performance, the parameters and mechanism were first estimated using a DC motor signal. The PI controller with the DC motor control has been design based on the concept of feedback control system for compensating tension load that loses from disturbance tension.

2. System modelling

The objective is to model the interaction between the counter-traction mechanisms with tensions of DC motor control. Although the counter-traction mechanism that controls the positions and torques of mechanism in follow the tensions generated by controller. In general, the drive system contains two major parts. The first one is the electronic control system, actuator, controller, and load cell. The second one is the mechanical system such as the motor, lead screw, spring, and tension connector, etc. The control system with feedback is a closed-loop system as shown in Figure 2.

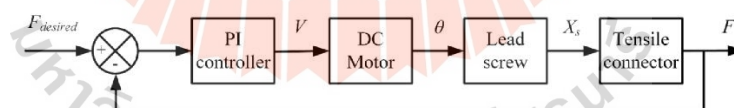


Figure 2. The diagram of counter-traction mechanism

2.1. Counter-traction mechanism

The motor models have been proposed for system identification and controller design [5]. The motor torque is transmitted to the lead screw with tension connector that has a damping coefficient of rotary motion (B) and angular displacement (θ)

$$T = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} + T_L \quad (1)$$

where J is the total inertia of coupling, motor shaft, tension connector and lead screw.

The torque, which is used to move the tension connector, is generated by applying input voltage (V) to the amplifier which has a torque constant (K_t), such as

$$V = L \frac{di}{dt} + iR + K_e \frac{d\theta}{dt} \quad (2)$$

$$T = K_t i \quad (3)$$

The current (i) is fed to control the DC motor, where L , R and K_e are inductance, resistance, and back electromotive force constant of DC motor, respectively. The tension load (F) from wire tension at nut of lead screw is transmitted as the axial load torque (T_L) as

$$T_L = F \otimes r \quad (4)$$

Where \otimes denote the cross product operation is perpendicular. The total axial displacement of the tension connector is contributed by the axial movement of the lead screw reflected at the nut (X_s) and the angular displacement (θ) of the lead screw translated as the axial displacement [6].

$$F = K_s X_s = K_s r \theta \quad (5)$$

where K_s is tension gain of spring, and the transmission ratio is $r = p/2\pi$ with pitch length (p).

Taking Laplace transform of equations (1) through (5), the transfer function between the tension load (F) and input voltage (V) can be expressed as

$$\frac{F}{V} = \frac{rK_t K_s}{JLs^3 + (BL + JR)s^2 + (r^2LK_s + BR + K_t K_e)s + r^2RK_s} \quad (6)$$

The mathematical model in equation (6) is the theoretical analysis of dynamic phenomena of the counter-traction mechanism. The parameters of the model aren't an unknown and uncertain values.

2.2. System identification

Methods of system identification, parameter estimation and optimization applied to problems of modelling and control. The counter-traction mechanism is the closed-loop control process [5]. The mathematical model can be estimated from experimental data. In this, the most popular method for curve-fitting is described. Collection data base on time domain, the desired tension was constant at 3 N, an initial condition. The input signal was generated the desired reference a force between 50 to 80 N and each of the step was changed 10 N with 400 seconds.

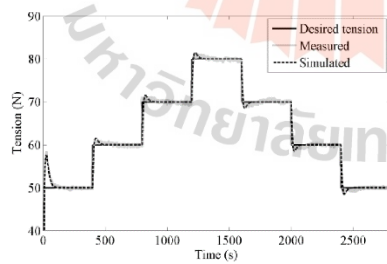


Figure 3. The performance of identification and measurement

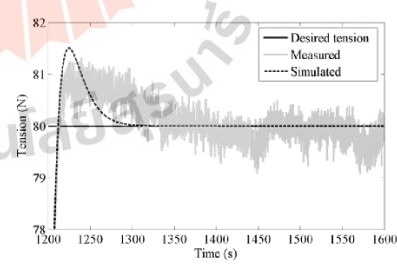


Figure 4. Comparative convergence of the response at 80 N

Thus, the approximated parameters from identifications as shown in table 1, and rearrangement are given by

$$\frac{F}{V} = \frac{b_0}{s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0} \quad (7)$$

Table 1. Parameters of counter-traction mechanism

Symbols	Values
$b_0 = rK_rK_s/JL$	2.6
$a_0 = (BL+JR)/JL$	4.4e-3
$a_1 = (r^2LK_s+BR+K_rK_s)/JL$	9.6e-1
$a_2 = r^2RK_s/JL$	9.7e-1

The responses that behaviors of the system identification to simulate (solid line), measurement (gray line), and desired tension (dashed line) were shown in figures 3 and 4. In the extended scale in a point of tension at 80 N, the behavior transients of the convergence comparisons can be expressed the response as shown in figure 4. The phenomenal response reveals the rise time of 8 seconds, the settling time of 9 seconds (steady state of 2%) and the overshoot of 1.5%.

3. Experimental and simulation results

In this section, to test effectiveness of the proposed control method, simulations and experiments were carried out on the counter-traction mechanism on tensions of DC motor for position control with PI controller as shown in figure 5. To realize the proposed digital control system using a digital signal processor (DSP), the DSP-board manufactured by Maneesoon Group Company Limited (MNS) was utilized. Control algorithms were programmed in the MATLAB and Simulink environment and were then compiled and loaded to the DSP-board. The sampling frequency was 1 kHz. At each sample time, four successive 12-bit A/D conversions of each signal were taken. Moreover, there were interface circuits for command and data communication between the computer and the development module. In addition, the corresponding tension load was measured via load cell sensor. The input range of each channel was from 0 to 5 volts.

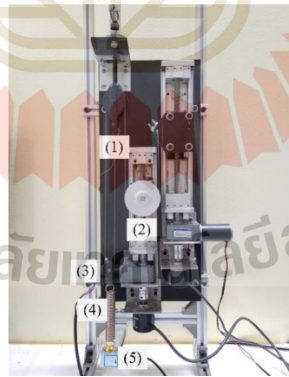


Figure 5. The counter-traction mechanism, (1) tension connector, (2) lead screw, (3) DC motor, (4) spring, and (5) load cell sensor

3.1. Performance of desired input tracking

In the response optimization of PI controller, the maximum overshoots by 2% in the step response. The rise time and settling time are less than 15 (80%) and 20 (2%) seconds. The controller parameters are optimized to be $P = 0.1219$ and $I = 7.8097e-04$.

For comparison purpose, a display the response impulsive reference using input tracking based on optimal controller, shown in figures 6 and 7. These results strongly suggest the optimal controller that were capable reducible the effect of the overshoot and steady-state error.

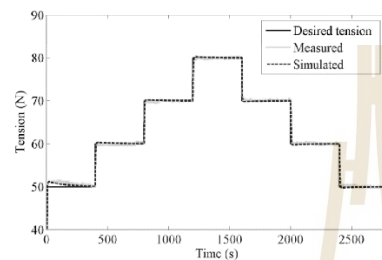


Figure 6. The tracking performance of optimal PI controller

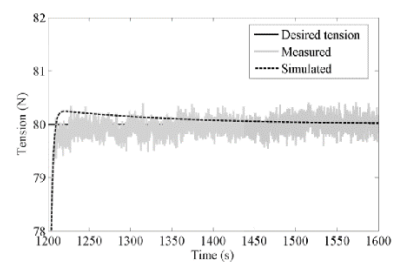


Figure 7. Comparative convergence of the response at 80 N with optimal PI controller

3.2. Robust disturbance

In the final test, the experimental result with a disturbance response was studied with the response effect to the dynamics of the system when there is a change of the external force interference. Applying traction to fracture reduction requires constant tension. For disturbance testing, changing the position of tension connector upward or downward one step will change the tension increase or decrease with magnitude of 8 N. There are two types of controller's working conditions.

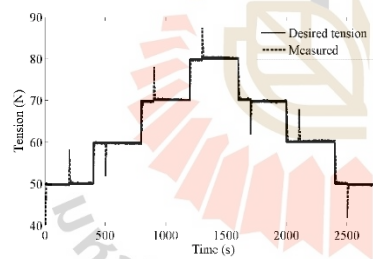


Figure 8. The responding of immediate self-adjustment

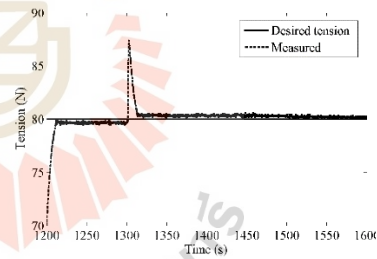


Figure 9. The transient response of immediate self-adjustment at 80 N

3.2.1 Immediate self-adjustment. The disturbance of response is a function with a peak amplitude from the set point. This is considered the robust external interference that occurred. When the system was disturbed, the output tension changed from desired tension that controller could be adjusted tension by itself. Figures 8 and 9 show the response of the optimal PI controller with the disturbance. At steady state 80 N, the system was disturbed by increasing 8 N at time of 1300 sec. The maximum tension is 88 N. After that the system can be recovered to steady state with the settling time of 10

seconds (2%). The controllers are suddenly robust to external disturbance, but the response occurred the overshoot more than 10%

3.2.2 *Conditional self-adjustment.* The actual application, the disturbances from the tension can be predicted the boundary. So, the system was disturbed with 8 N, then an increase or decrease disturbance occurred the boundary at $\pm 5\%$ of the references. The controllers are suddenly robust to external disturbance over $\pm 5\%$ of the references and aren't adjusted the tension under boundary as shown in figures 10 and 11, respectively. The controllers are suddenly robust to external disturbance in the boundary conditions.

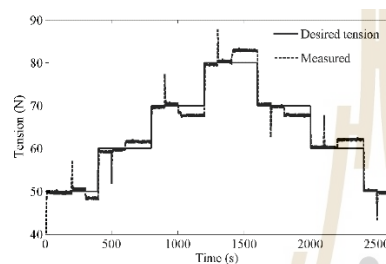


Figure 10. The responding of conditional self-adjustment

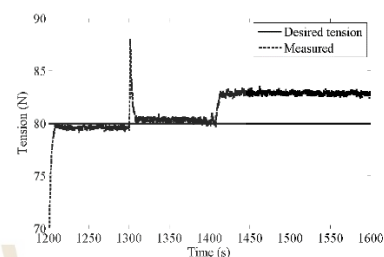


Figure 11. The transient response of conditional self-adjustment

4. Conclusions

The analytical and experimental results of counter-traction mechanism demonstrate the effectiveness of identification and control of wire tension in a closed loop system. In the beginning, prescribed the PI controller for the system are applied to maintain position with relative the tension load. Transfer function of estimation explained, the phenomenon between tension and controller was designed by using an optimal PI controller. The results of a comparative study between an immediate and conditional self-adjustment for the counter-traction mechanism were discussed in terms of transient responses and steady state responses. The feedback system can be maintained the tension with compensation that loses from disturbance in specific range of 50-80 N.

5. References

- [1] Charnley J 1961 *The closed treatment of common fractures* (New York: John Charnley) p 128
- [2] Holkenborg J, Napel S -J T and Kolkman K 2013 *Annals of Emergency Medicine* **62** 4 S66
- [3] Del Pinal F 2011 *American Society for Surgery of the Hand* **36** 10 1694
- [4] Xie Z, Liang B, Wang X and Tian M 2016 *Proc. 23rd Int. Conf. on Mechatronics and Machine vision in Practice (Nanjing)* (New Jersey: IEEE)
- [5] Khajontraidet C, Srisertpol J and Prattanarak C 2013 *Advanced Science Letter* **19** 8 2139
- [6] Lin C Y and Lee C H 2017 *Applied science* **7** 8 776

Acknowledgments

The authors are greatly indebted to Suranaree University of Technology (SUT) and the Maneesoon Group Company Limited (MNS), for their generous support and their valuable comments.

ประวัติผู้เขียน

นายณัฐวุฒิ ประเสริฐการ เกิดเมื่อวันที่ 2 มิถุนายน พ.ศ. 2536 ณ จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนจักราชวิทยา อำเภอจักราช จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2554 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาเทคโนโลยีchnerณ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2558 หลังจากสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ผู้เขียนได้เข้ารับการศึกษาระดับปริญญาโทในสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2559 ในระหว่างที่ศึกษาอยู่ได้มีโอกาสเป็นผู้สอนรายวิชาเขียนแบบวิศวกรรม 1 เป็นระยะเวลา 3 ปี และมีผลงานนำเสนองานวิจัยในระดับนานาชาติจำนวน 1 เรื่อง คือ “Identification and Control of Counter-traction Mechanism to Finger Traps for Fracture Reduction”



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี