

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบระบบควบคุมแทนหมุนเครื่องถ่ายภาพตัดขวาง
CONTROL SYSTEM DESIGN FOR CT-SCANNER GANTRY



นายอดิศักดิ์ แข็งสาริกิจ
MR. ADISAK KHANGSARIGID

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2540

ISBN 974-621-740-2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฉบับนี้.....ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เลขทะเบียน.....28911.....ห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วัน, เดือน, ปี 1 พ.ย. 2540

CONTROL SYSTEM DESIGN FOR CT-SCANNER GANTRY



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE
MASTER OF ENGINEERING (ELECTRICAL ENGINEERING)
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1997

ISBN 974-621-740-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบระบบควบคุมแทนหมุนเครื่อง ถ่ายภาพตัดขวาง
นักศึกษา	นายอดิศักดิ์ แข็งสาริกิจ
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ศ.ดร. ไพรัช รัชชยพงษ์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร. สุธี ผู้เจริญชนะชัย
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.	2540

บทคัดย่อ

เครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวาง (Computerized Tomography: CT) เป็นเครื่องมือแพทย์ชนิดหนึ่งที่สามารถแสดงภาพรายละเอียดภายในวัตถุต่างๆ หรือสิ่งมีชีวิตได้ โดยอาศัยข้อมูลจากชุดรับรังสีเอ็กซเรย์รับปริมาณรังสีจากการลดทอนของวัตถุที่มุมต่าง ๆ โดยรอบ เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวเข้าขบวนการสร้างภาพตัดขวางต่อไป เครื่องมือแพทย์ชนิดนี้จะประกอบด้วยระบบเอกซเรย์ และระบบแทนหมุน ซึ่งระบบแทนหมุนจะทำหน้าที่หมุนระบบเอกซเรย์ไปโดยรอบวัตถุที่ต้องการถ่ายภาพตัดขวางด้วยความเร็วคงที่ จากเหตุผลดังกล่าวทำให้ต้องมีระบบควบคุมจึงจะทำให้ได้ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างภาพมีความถูกต้องมากขึ้น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เนื้อหาส่วนใหญ่จะนำเสนอการออกแบบระบบควบคุม และการออกแบบระบบควบคุมแทนหมุนที่ได้พัฒนาและแก้ไขมาจากปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระบบเดิม โดยในส่วนของระบบแทนหมุนได้คำนวณหาขนาดที่เหมาะสมตั้งแต่มอเตอร์ วงจรขับ ชุดส่งกำลัง ระบบป้องกันภัยและโครงเหล็กจับยึดอุปกรณ์ ในส่วนของการออกแบบระบบควบคุมจะกล่าวถึงการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแทนหมุนที่มีการนำเอาฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นของแรงเสียดทานเข้ามาวิเคราะห์ด้วย และการออกแบบระบบควบคุมแบบปรับค่าพารามิเตอร์ ซึ่งระบบควบคุมที่ได้ออกแบบจะมีการชดเชยฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นของแรงเสียดทานที่มีผลต่อความเร็วโดยตรง ทั้งนี้ก็เพื่อให้การควบคุมทั้งตำแหน่งและความเร็วเป็นไปอย่างถูกต้อง ซึ่งจะส่งผลให้ได้ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างภาพตัดขวางมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

Thesis Title	CONTROL SYSTEM DESIGN FOR CT-SCANNER GANTRY
Name	Mr. Adisak Khangsarigid
Thesis Advisor	Prof. Dr. Pairash Thajchapong
Thesis Co-Advisor	Dr. Suthee Phoocharuenchanachai
Level of study	Master of Engineering (Electrical Engineering)
Department	Computer Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Year	2540

ABSTRACT

Computerized Tomography is medical machine that can display internal bodies of patient in two dimensional. The basic elements of displaying the aspect are use projection data from detector unit for reconstruction process is image picture of cross sectional bodies. The majority of this medical machine consist of an X-ray system and a gantry control system.

In this thesis, we present CT-scanner gantry system design and control system design for gantry which is developed from the previous system. The gantry system consists of motor, driver, transmission set and safety system. To development, Control system design will introduce identification of gantry and design of control system of gantry, which have anlyed nonlinear function of friction. The objective of this thesis is the accurate position control and velocity control.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับสำเร็จลุล่วงได้ ก็เพราะได้รับความกรุณาจาก ศ.ดร. ไพรัช รัชชพงษ์ และ ดร. สุธี ผู้เจริญชนะชัย ผู้ซึ่งคอยดูแลให้คำแนะนำในการทำวิจัยแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด ขอกราบขอบพระคุณไว้เป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ คุณคงศักดิ์ ตติยานุกุล ผู้จัดการ บ. คงศักดิ์เอ็กซ์เรย์และอุตสาหกรรม ที่เอื้อเพื่ออุปกรณในการทำวิจัย ตลอดจนถึงคำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้ทำวิจัยขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยจนทำให้เกิดวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขึ้น ขอขอบคุณทุก ๆ คนในครอบครัว เจ้าหน้าที่สำนักวิจัยและบริการคอมพิวเตอร์ เพื่อนพี่และน้อง ๆ ทุกคนในโครงการคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวางอวัยวะ ที่คอยช่วยเหลือทั้งร่างกายและแรงใจจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้เป็นอย่างดี

อดิศักดิ์ แฉิงสาริกิจ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
คำอธิบายคำย่อและสัญลักษณ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.....	XI
บทที่	
1. บทนำ.....	1
ที่มาของงานวิจัยเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวาง.....	1
หลักการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวาง.....	2
การพัฒนาเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวางในประเทศไทย.....	3
เนื้อหาของงานวิจัย.....	4
2. ปัญหาและแนวทางการพัฒนาระบบ	
บทนำ.....	7
โครงสร้างระบบควบคุมในระบบเดิม.....	7
สรุปแนวทางการพัฒนาระบบ.....	12
3. การออกแบบโครงหลักจับยึดอุปกรณ์ถ่ายภาพตัดขวาง	
บทนำ.....	13
โครงหลักจับยึดอุปกรณ์.....	13
ส่วนขับเคลื่อนและชุดส่งกำลัง.....	15
ระบบป้องกันภัย.....	18
การติดตั้งเอนโคเดอร์กับแกนทรี.....	20
ชุดควบคุม.....	20
สรุป.....	21

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4. ทฤษฎีระบบควบคุมเบื้องต้น	
บทนำ.....	22
การออกแบบระบบควบคุม.....	22
การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	23
การออกแบบระบบควบคุมแบบปรับค่าพารามิเตอร์ได้.....	27
สรุป.....	30
5. การหาสมการสมมูลย์ของระบบแทนหมุน	
บทนำ.....	31
หลักการและเหตุผล.....	31
คุณลักษณะของแรงเสียดทาน.....	32
การกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	33
วิธีการประมาณแบบจำลองโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุด.....	36
สรุป.....	38
6. การออกแบบระบบควบคุม	
บทนำ.....	39
การออกแบบระบบควบคุม.....	39
สรุป.....	45
7. การทดลองและผลการทดลอง	
บทนำ.....	46
ผลการทดลองหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแทนหมุน	
การทดลองใช้สัญญาณอินพุตเท่ากับ $\sin(0.25t)$	47
การทดลองใช้สัญญาณอินพุตเท่ากับ $\sin(0.25t) + \sin(0.5t) + \sin(t)$	50
ผลการทดลองการออกแบบระบบควบคุม.....	53
ผลการทดลองระบบควบคุมทำงานร่วมกับระบบอิเล็กทรอนิกส์.....	56
สรุป.....	58

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
8. สรุปและแนวทางในการพัฒนาต่อไป	
บทนำ.....	60
สรุปผลการทดลองการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแท่นหมุน.....	60
สรุปผลการทดลองการออกแบบระบบควบคุมแท่นหมุน	60
แนวทางการพัฒนาระบบ	61
บรรณานุกรม	62
ภาคผนวก.....	64
ภาคผนวก ก โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง.....	65
ภาคผนวก ข บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	72
ประวัติผู้เขียน	83



สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

1. แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองหาแบบจำลองที่สัญญาณต่าง ๆ 53



สารบัญภาพ

	หน้า
1. แสดงเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวาง.....	1
2. แสดงการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวาง.....	2
3. เครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวางรุ่นแรก.....	3
4. เครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวางรุ่นสอง.....	4
5. แสดงระบบควบคุมการหมุนของโครงเหล็กจับยึดอุปกรณ์.....	7
6. แสดงรูปร่างและลักษณะของแกนทรีในระบบเดิม.....	8
7. แสดงระบบขับเคลื่อนการหมุนของแกนทรี.....	9
8. แสดงแผงวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์.....	9
9. แสดงมอเตอร์ และระบบส่งกำลัง.....	10
10. แสดงสัญญาณเอาพุตของเอนโคเดอร์แบบ 2-3 ช่องสัญญาณ.....	10
11. แสดงการติดตั้งเอนโคเดอร์.....	11
12. แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมการหมุนของโครงเหล็กจับยึดอุปกรณ์.....	11
13. แสดงภาพแกนทรีที่ได้จากการออกแบบ.....	15
14. แสดงดีซีเซอร์โวมอเตอร์ที่ใช้งานจริง.....	16
15. แสดงบล็อกไดอะแกรมของเพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์.....	16
16. แสดงแผงวงจรเพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์.....	17
17. แสดงโครงสร้างภายในของคอนเวอร์เตอร์.....	17
18. แสดงลักษณะการติดตั้งสวิทช์ป้องกันภัย.....	19
19. แสดงส่วนการติดตั้งเอนโคเดอร์กับแกนทรี.....	20
20. แสดงระบบควบคุมแบบวงรอบปิด.....	22
21. แสดงบล็อกไดอะแกรมการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	24
22. แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบปรับค่าพารามิเตอร์.....	29
23. แสดงส่วนของการส่งกำลังด้วยมอเตอร์ผ่านสายพาน.....	31
24. แสดงคุณลักษณะและพฤติกรรมการทำงานของแรงเสียดทาน.....	32
25. แสดงระบบแทนหมุนเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวาง.....	33

สารบัญญภาพ (ต่อ)

หน้า

26. แสดงบล็อกไดอะแกรมขบวนการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแท่นหมุน.....	36
27. แสดงส่วนประกอบของระบบแท่นหมุนที่มีแรงเสียดทานเข้ามารบกวน	39
28. แสดงฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบแท่นหมุนที่มีแรงเสียดทานเข้ามารบกวน.....	40
29. แสดงชุดชุดเซยระบบแท่นหมุน.....	41
30. แสดงระบบควบคุมที่ใช้ในเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวาง	45
31. แสดงบล็อกไดอะแกรมขั้นตอนการทดลองหาแบบจำลอง	47
32. แสดงสัญญาณอินพุต $\sin(0.25t)$	47
33. เปรียบเทียบผลตอบสนองตำแหน่งของระบบแท่นหมุนกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่สัญญาณอินพุต $\sin(0.25t)$	48
34. เปรียบเทียบผลตอบสนองความเร็วของระบบแท่นหมุนกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่สัญญาณอินพุต $\sin(0.25t)$	48
35. แสดงค่าผิดพลาดตำแหน่งของระบบแท่นหมุนกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่สัญญาณอินพุต $\sin(0.25t)$	49
36. แสดงค่าผิดพลาดความเร็วของระบบแท่นหมุนกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่สัญญาณอินพุต $\sin(0.25t)$	49
37. แสดงสัญญาณ $\sin(0.25t) + \sin(0.5t) + \sin(t)$	50
38. เปรียบเทียบผลตอบสนองตำแหน่งของระบบแท่นหมุนกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่สัญญาณ $\sin(0.25t) + \sin(0.5t) + \sin(t)$	51
39. เปรียบเทียบผลตอบสนองความเร็วของระบบแท่นหมุนกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่สัญญาณ $\sin(0.25t) + \sin(0.5t) + \sin(t)$	51
40. แสดงค่าผิดพลาดตำแหน่งของระบบแท่นหมุนกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ สัญญาณ $\sin(0.25t) + \sin(0.5t) + \sin(t)$	52
41. แสดงค่าผิดพลาดความเร็วของระบบแท่นหมุนกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ สัญญาณ $\sin(0.25t) + \sin(0.5t) + \sin(t)$	52
42. เปรียบเทียบผลตอบสนองตำแหน่งของระบบควบคุมกับเส้นทางที่กำหนด	53
43. เปรียบเทียบผลตอบสนองความเร็วของระบบควบคุมกับเส้นทางที่กำหนด.....	54

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
44. แสดงค่าผิดพลาดตำแหน่งของระบบควบคุมกับเส้นทางที่กำหนด	54
45. แสดงค่าผิดพลาดความเร็วของระบบควบคุมกับเส้นทางที่กำหนด	55
46. เปรียบเทียบผลตอบสนองตำแหน่งของระบบควบคุมแบบ PD กับเส้นทางที่กำหนด	55
47. เปรียบเทียบผลตอบสนองความเร็วของระบบควบคุมแบบ PD กับเส้นทางที่กำหนด	56
48. แสดงระบบควบคุมทำงานร่วมกับระบบอิเล็กทรอนิกส์	57
49. แสดงภาพตัดขวางของศีรษะมนุษย์ที่เสียชีวิตแล้ว	58



ความหมายของคำย่อและสัญลักษณ์ที่ใช้ในการอ้างอิง

CT	Computerized Tomography
DAC	Digital to Analog Converter
rpm	revolutions per minute
MHz	Mega - Hertz
ms	Milli - second
mm	Millimetre
T	Sampling Time
PD	Propotional-derivat.ve
PI	Propotional-integral
PID	Propotional-integra-derivative



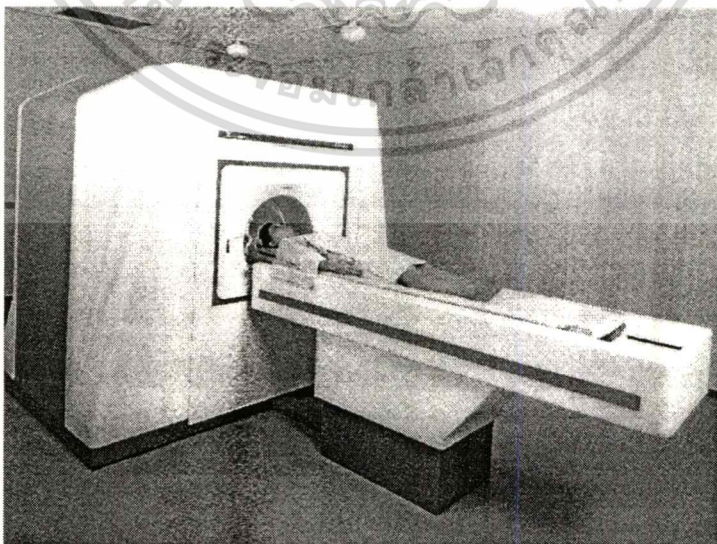
บทที่ 1

บทนำ

ที่มาของงานวิจัยเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวาง

ปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ได้เข้ามามีบทบาทในทางการแพทย์อย่างมาก ทำให้มีการนำเอาเทคโนโลยีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ทางการแพทย์ ส่งผลให้อุปกรณ์ทางการแพทย์มีคุณภาพสูง และมีความถูกต้องมากขึ้นจนสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวาง (Computerized Tomography: CT) ซึ่งเป็นเครื่องมือแพทย์ชนิดหนึ่งที่สามารถแสดงภาพรายละเอียดภายในวัตถุหรือสิ่งมีชีวิตได้ และยังเป็นเครื่องมือที่ช่วยให้แพทย์ทำการวินิจฉัยโรคได้ถูกต้อง และแม่นยำมากขึ้นกว่าการสังเกตจากภายนอก จากหลักการทำงานดังกล่าวทำให้เครื่องมือแพทย์ชนิดนี้ได้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในวงการแพทย์แผนปัจจุบัน

ภาพที่ 1



เครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

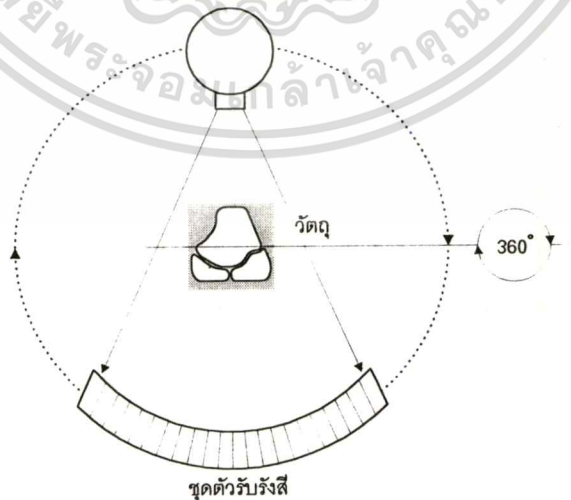
ในบางครั้งเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวางได้เข้ามาเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับชีวิตมนุษย์ ในการตรวจสอบความผิดปกติภายในร่างกายของมนุษย์ เนื่องจากเกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของชีวิตมนุษย์ ทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวางมีราคาแพง และต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้สูญเสียเงินตราออกนอกประเทศอย่างมากในการสั่งซื้อเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวาง เพราะฉะนั้นค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวางหนึ่งเครื่องไม่ว่าจะเป็นค่าติดตั้ง ค่าแนะนำเครื่อง และค่าดูแลรักษาเครื่อง ด้วยสาเหตุดังกล่าวทำให้ถึงความจำเป็นในการพัฒนาบุคลากรให้มีความรู้ความสามารถในการพัฒนาอุปกรณ์ทางการแพทย์ เพื่อลดการสูญเสียเงินตราให้กับต่างประเทศ

หลักการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวาง

การคิดค้นการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวางจุดประสงค์หลักก็คือ ต้องการถ่ายภาพตัดขวางออกมาเป็นชิ้นบาง ๆ เพื่อดูรายละเอียดภายในวัตถุที่ต้องการถ่าย ซึ่งการทำงานจะทำการฉายรังสีเอกซ์ผ่านไปยังวัตถุที่ต้องการถ่ายภาพตัดขวาง โดยรังสีเอกซ์จะทะลุวัตถุมาทางด้านตรงข้ามซึ่งความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ทะลุผ่านออกมาจะถูกตรวจรับโดยตัวรับรังสีเอกซ์ที่อยู่ด้านตรงข้ามกับแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ ตัวรับรังสีเอกซ์จะทำการแปลงค่าความเข้มของรังสีเอกซ์

ภาพที่ 2

หลอดรังสีเอกซ์



แสดงการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวาง

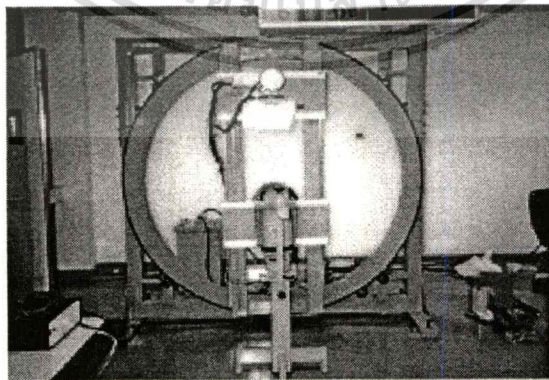
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เป็นค่าที่สามารถนำไปประมวลผลโดยคอมพิวเตอร์ได้ต่อไป ชุดของข้อมูลที่ได้รับนี้ เรียกว่า ข้อมูลโปรเจคชัน (Projection Data) โดยในหลักการการสร้างภาพตัดขวางนั้นจะต้องมีข้อมูลโปรเจคชันที่มีระยะห่างในการเก็บเท่ากันและจะต้องเพียงพอต่อการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ เพราะฉะนั้นการนำข้อมูลโปรเจคชันมาสร้างภาพตัดขวางให้ได้นั้น จะต้องทำการหมุนหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์กับตัวรับรังสีเอกซ์ไปครบรอบวัตถุ (360 องศา)

การพัฒนาเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวางอวัยวะในประเทศไทย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังโดยสำนักวิจัยและบริการคอมพิวเตอร์ ได้เริ่มทำการศึกษาวิจัยและพัฒนาเครื่องต้นแบบคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวางอวัยวะมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2525 โดยในขั้นแรกนั้นได้ทำการศึกษาถึงคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการสร้างภาพตัดขวางและทำการจำลองภาพตัดขวางของสมอง เพื่อค้นหาและทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมการสร้างภาพตัดขวางโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์เมนเฟรมเป็นตัวช่วยคำนวณ หลังจากนั้นได้ทำการเปลี่ยนคอมพิวเตอร์ที่ใช้คำนวณสร้างภาพตัดขวางจากเครื่องเมนเฟรมมาเป็นเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์เพื่อให้การวิจัยและพัฒนาทำได้สะดวกขึ้นและได้สังเกตเห็นว่าถ้าสามารถนำเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์มาใช้เป็นเครื่องคำนวณสร้างภาพตัดขวางจะทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวางมีราคาถูกลงได้มาก การทดลองสร้างภาพตัดขวางโดยใช้เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์เป็นตัว

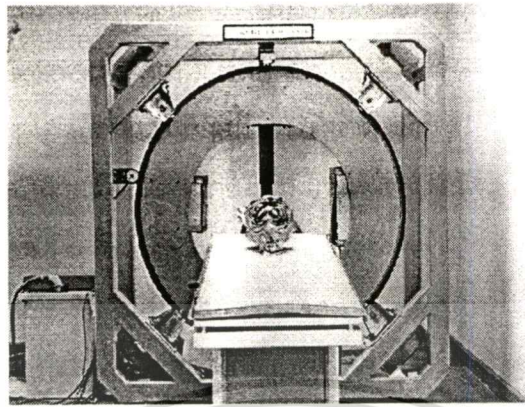
ภาพที่ 3



เครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวางรุ่นแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4



เครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวางรุ่นสอง

คำนวณได้ประสบความสำเร็จเป็นที่น่าพอใจ สามารถสร้างภาพตัดขวางทั้งจากการจำลองและจากการทดลองกับข้อมูลวัตถุจริงได้ จากนั้นได้ทำการสร้างเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวาง ประกอบด้วย โครงเหล็กจับยึดอุปกรณ์ถ่ายภาพตัดขวาง หรือที่เรียกว่าแกนทรี(Gantry) หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ และชุดรับรังสีเอกซ์ โดยที่โครงเหล็กจับยึดอุปกรณ์ถูกออกแบบให้สามารถหมุนได้ครบรอบ 360 องศา แต่ทว่ายังมีข้อเสียที่ใช้เวลาในถ่ายมาก เนื่องจากระบบขับเคลื่อนนั้นใช้มอเตอร์ และเฟืองทดเป็นชุดส่งกำลังโดยผ่านโซ่ขับเคลื่อนให้โครงเหล็กจับยึดอุปกรณ์เกิดการเคลื่อนที่ ซึ่งการขับเคลื่อนดังกล่าวส่งผลให้มีความเร็วในการเคลื่อนที่ช้า ดังในรูปที่ 3 และต่อมาได้ทำการออกแบบโครงเหล็กจับยึดอุปกรณ์ขึ้นมาใหม่ให้สามารถขับเคลื่อนให้มีความเร็วมากกว่าเดิม และสามารถควบคุมได้ทั้งตำแหน่งและความเร็ว ดังในรูปที่ 4 ซึ่งจะได้อธิบายรายละเอียดในบทต่อไป

เนื้อหาของงานวิจัย

เนื้อหาของงานวิจัยในเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวางสามารถแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อ คือการประมวลผลข้อมูลโพเจกชันเพื่อปรับปรุงภาพตัดขวางรังสีเอกซ์[6] และการออกแบบระบบควบคุมแทนหมุนเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวาง สำหรับเนื้อหาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะกล่าวถึงการออกแบบระบบควบคุมแทนหมุนเครื่องถ่ายภาพตัดขวาง ที่ได้ทำการวิจัยในลักษณะของเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวาง ซึ่งมีการทำงานเป็นแบบหมุน/หมุน โดยมีโครงเหล็กจับยึดอุปกรณ์ถ่ายภาพตัดขวางซึ่งจะมีส่วนที่เคลื่อนที่ ที่เรียกว่าระบบแทนหมุนที่ได้ทำการออกแบบขึ้นมาใหม่ให้มีความเร็วมากขึ้นโดยการใช้สายพานเป็นชุดส่งกำลัง แต่เนื่องจากในระบบแทนหมุนมีการติดตั้งอุปกรณ์ถ่ายภาพตัดขวาง (มีน้ำหนักมาก) ทำให้ระบบแทนหมุนเกิดความไม่เสถียรขึ้นในขณะที่มีการเคลื่อนที่ ทำให้ช่วงในการถ่ายภาพตัดขวางมีข้อมูลที่ผิดพลาดเกิดขึ้น โดยในวิทยานิพนธ์จะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่เกี่ยวกับระบบควบคุมทั้งในระบบเดิมและที่พัฒนาขึ้น รวมทั้งการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแทนหมุนและการออกแบบระบบควบคุมแทนหมุนเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวาง ส่วนในการทดลองจะแสดงให้เห็นถึงปัญหาที่เกิดขึ้น และสุดท้ายของเนื้อหาจะเสนอแนวทางการพัฒนาระบบให้ดียิ่งขึ้น

รายละเอียดโดยย่อของเนื้อหาในบทต่าง ๆ ของวิทยานิพนธ์ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ

จะกล่าวถึงความเป็นมา และหลักการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวาง รวมถึงการพัฒนาเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวางที่พัฒนาขึ้นโดยสำนักวิจัยและบริการคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทที่ 2 ปัญหาและแนวทางการพัฒนาระบบ

กล่าวถึงโครงสร้างและการทำงานของอุปกรณ์ในระบบควบคุมแทนหมุนในระบบเดิม นับตั้งแต่โครงเหล็กจับยึดอุปกรณ์ มอเตอร์ วงจรขับ ตัวตรวจจับตำแหน่ง และชุดควบคุม ในส่วนท้ายจะนำเสนอแนวทางการพัฒนาอุปกรณ์ต่าง ๆ

บทที่ 3 การออกแบบโครงเหล็กจับยึดอุปกรณ์ถ่ายภาพตัดขวาง

กล่าวถึงการพัฒนาโครงเหล็กจับยึดอุปกรณ์ถ่ายภาพตัดขวางและอุปกรณ์ในระบบควบคุมที่ได้พัฒนามาจากระบบเดิม และระบบป้องกันภัย

บทที่ 4 ทฤษฎีระบบควบคุมเบื้องต้น

กล่าวถึงลักษณะของระบบควบคุม ขั้นตอนการออกแบบระบบควบคุม การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากระบบจริงและทฤษฎีที่นำไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมแทนหมุนเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวาง

บทที่ 5 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบแทนหมุน

กล่าวถึงปัญหาที่เกิดขึ้นหลังจากที่ติดตั้งอุปกรณ์ถ่ายภาพตัดขวางลงบนระบบแทนหมุน ที่ทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของระบบในขณะที่มีการเคลื่อนที่ และนำเสนอการหาแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์ระบบแทนหมุนที่มีการวิเคราะห์ฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่แสดงพฤติกรรมออกมาในระบบแทนหมุน

บทที่ 6 การออกแบบระบบควบคุมแทนหมุน

จะกล่าวถึงการออกแบบระบบควบคุมแทนหมุนที่สามารถควบคุมได้ทั้งตำแหน่งและความเร็วและยังชดเชยส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้ระบบแทนหมุนมีความเสถียรภาพมากขึ้นในขณะที่มีการเคลื่อนที่

บทที่ 7 ผลการทดลอง

กล่าวถึงผลการทดลองจากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การออกแบบระบบควบคุมแทนหมุน และรวมไปถึงการใช้งานร่วมกับระบบเอกซเรย์

บทที่ 8 สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลองจากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบระบบควบคุมแทนหมุน ในส่วนท้ายจะนำเสนอแนวทางในการพัฒนาระบบควบคุมในขั้นต่อไป

ภาคผนวกท้ายเล่มจะกล่าวถึงโปรแกรมที่ใช้ในการทดลองต่าง ๆ รวมทั้งแสดงผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

บทที่ 2

ปัญหาและแนวทางการพัฒนาระบบ

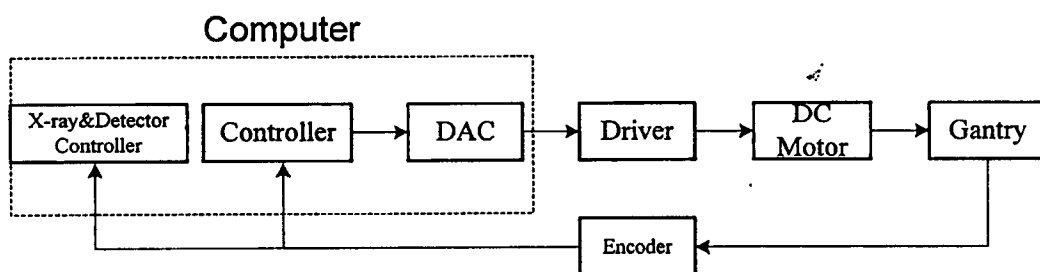
บทนำ

จากเหตุผลที่ต้องทำการหมุนแหล่งกำเนิดรังสี และชุดรับรังสีไปพร้อมกันนั้นทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวางจำเป็นต้องมีโครงเหล็กขนาดใหญ่ที่ใช้ในการยึดอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เพราะฉะนั้นบทนี้จะกล่าวถึงปัญหาที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบควบคุมที่ใช้ในระบบเดิม ซึ่งเนื้อหาส่วนใหญ่จะครอบคลุมถึงอุปกรณ์ต่าง ๆ นับตั้งแต่โครงเหล็กจับยึดอุปกรณ์มอเตอร์ วงจรขับ เอนโคดเดอร์ และระบบควบคุมการหมุนของโครงเหล็กจับยึดอุปกรณ์ ในส่วนท้ายจะกล่าวถึงแนวทางในการพัฒนาระบบควบคุมของเครื่องถ่ายภาพตัดขวางให้มีคุณภาพดียิ่งขึ้น

โครงสร้างระบบควบคุมในระบบเดิม

จากหลักการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวางการสร้างภาพตัดขวางข้อมูลโปรเจกชันที่นำมาสร้างภาพจะต้องมีรายละเอียดภายในโดยรอบตัววัตถุ และมีระยะห่างในการ

ภาพที่ 5



แสดงระบบควบคุมการหมุนของโครงเหล็กจับยึดอุปกรณ์

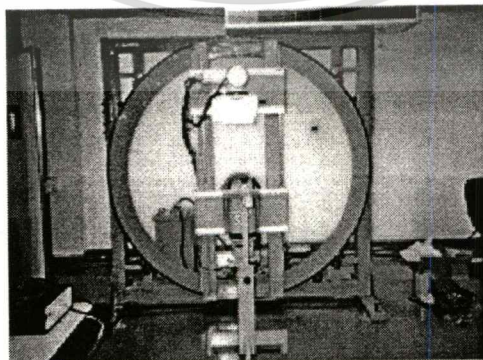
เก็บข้อมูลที่เท่ากัน เหตุผลก็เพื่อให้ง่ายต่อการประมวลผลเป็นภาพตัดขวาง เพราะฉะนั้นจากหลักการทำงานดังกล่าวจึงทำให้เครื่องมือชนิดนี้จำเป็นต้องมีระบบควบคุมการหมุนตลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ และตัวรับรังสีเอกซ์ให้เคลื่อนที่ไปพร้อม ๆ กัน พิจารณาในภาพที่ 5 แสดงระบบควบคุมแบบวงรอบปิดของเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวางในระบบเดิม โดยใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ทำหน้าที่เป็นชุดควบคุมคอยส่งสัญญาณควบคุมไปยังวงจรรับ เพื่อขยายสัญญาณควบคุมให้กำลังแรงขึ้น จากนั้นส่งสัญญาณให้มอเตอร์หมุน และส่งกำลังไปยังเฟืองทด และโซ่เพื่อให้แกนที่หมุนในส่วนของสัญญาณป้อนกลับไปยังชุดควบคุมจะใช้เอนโคเดอร์เป็นตัวตรวจสอบตำแหน่งของการหมุน จากชุดป้อนกลับนี้เมื่อชุดควบคุมรับสัญญาณนี้แล้วจะทำการประมวลผลเป็นสัญญาณควบคุมออกมาจนกว่าจะถึงตำแหน่งที่ต้องการ พิจารณาภาพที่ 5 แสดงอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมประกอบด้วย

1. โครงเหล็กจับยึดอุปกรณ์ (Gantry)
2. ส่วนขับเคลื่อนและชุดส่งกำลัง
3. ส่วนตรวจจับตำแหน่งของแกนที่และการติดตั้ง
4. ชุดควบคุม

1. โครงเหล็กจับยึดอุปกรณ์หรือแกนที่

โครงเหล็กขนาดใหญ่ที่ใช้จับยึดอุปกรณ์ตลอดกำเนิดรังสีเอกซ์และตัวรับรังสีเอกซ์ที่เรียกว่าแกนที่ถูกรอกออกเป็นวงกลม ซึ่งตั้งอยู่บนฐานที่หมุนได้รอบ 360 องศา ลักษณะโดยทั่วไปของแกนที่จะเป็นส่วนที่ทำให้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ และตัวรับรังสีเอกซ์หมุนไปพร้อมกัน

ภาพที่ 6



แสดงรูปร่างและลักษณะของแกนที่ในระบบเดิม

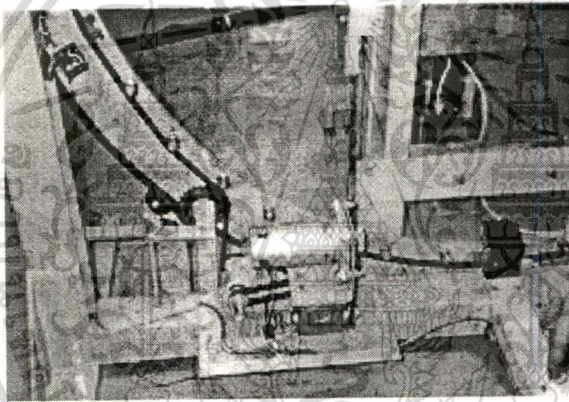
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งอุปกรณ์ทั้งสองจะถูกติดตั้งอยู่บนวงล้อเหล็กของแกนที่ติดตั้งในภาพที่ 6 รูปร่างและลักษณะของแกนที่รี ซึ่งได้ถูกออกแบบไว้ให้มีลักษณะทางกายภาพคือมีเส้นผ่าศูนย์กลางวงนอก 201 เซนติเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางวงใน 170.5 เซนติเมตรดังแสดงในภาพที่ 6

2. ส่วนขับเคลื่อนและชุดส่งกำลัง

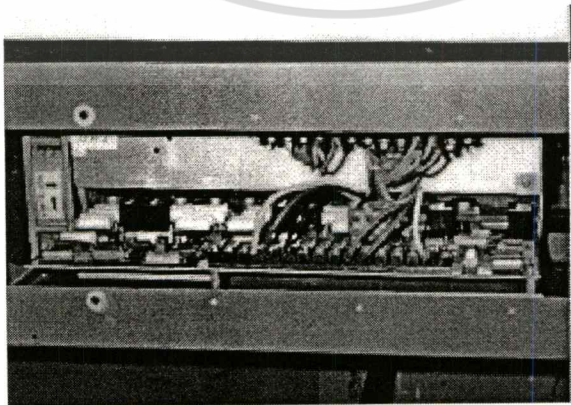
การขับเคลื่อนการหมุนของแกนที่รีใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 24 โวลท์ ส่งกำลังผ่านเฟืองทดที่มีอัตราทด 1 : 50 และโซ่ โดยที่มอเตอร์ถูกควบคุมด้วยวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ที่สามารถส่งสัญญาณให้มอเตอร์หมุนได้ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา และตามเข็มนาฬิกา

ภาพที่ 7



แสดงระบบขับเคลื่อนการหมุนของแกนที่รี

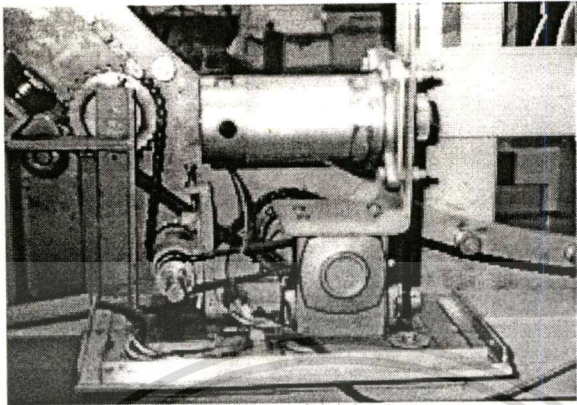
ภาพที่ 8



แสดงแผงวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 9

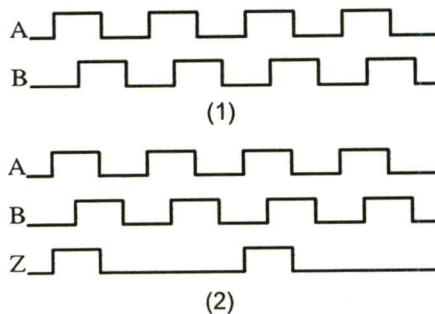


แสดงมอเตอร์ และระบบส่งกำลัง

3. ส่วนตรวจจับตำแหน่งของแกนทรีและการติดตั้ง

ส่วนตรวจจับตำแหน่ง หรือที่เรียกว่า เอนโคเดอร์ (Encoder) ทำหน้าที่สร้างพัลส์ขึ้นมา 2 พัลส์ที่มีความต่างเฟสกัน 90 องศา ซึ่งพัลส์นี้สามารถที่จะนำไปหาค่าตำแหน่งและความเร็วของแกนเอนโคเดอร์ได้ โดยการทำงานสามารถอธิบายได้ด้วยโครงสร้างภายในของเอนโคเดอร์ ซึ่งประกอบด้วยตัวกำเนิดแสง จานหมุน (Rotary disk) จานที่อยู่กับที่ (Stationary Disk) และตัวรับแสง โดยที่จานหมุนจะทำเป็นช่องโดยรอบ เพื่อให้แสงผ่านไปตกกระทบที่ตัวรับแสง ออกมาเป็นสัญญาณเอาพุท ซึ่งสัญญาณนี้จะมีสัญญาณอยู่ 2 หรือ 3 ช่องสัญญาณขึ้นอยู่กับชนิดของเอนโคเดอร์ ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปจะมีสัญญาณเอาพุทอยู่ 2 ช่องสัญญาณ มีความต่างเฟสกัน 90 องศา (out of phase 90) หรือที่เรียกกันว่า ควอดราเจอร์ (Quadrature) เหมาะสำหรับการรับรู้ทิศทาง การหมุนของเอนโคเดอร์

ภาพที่ 10

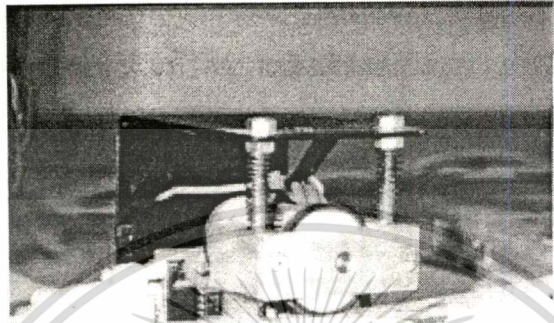


แสดงสัญญาณเอาพุทของเอนโคเดอร์แบบ 2-3 ช่องสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการติดตั้งเอนโคเดอร์จะต้องติดตั้งให้วงล้อของเอนโคเดอร์สัมผัสกับวงล้อเหล็กของแกนทรีโดยไม่มีการหล่นไหลเกิดขึ้นดังแสดงในภาพที่ 11

ภาพที่ 11

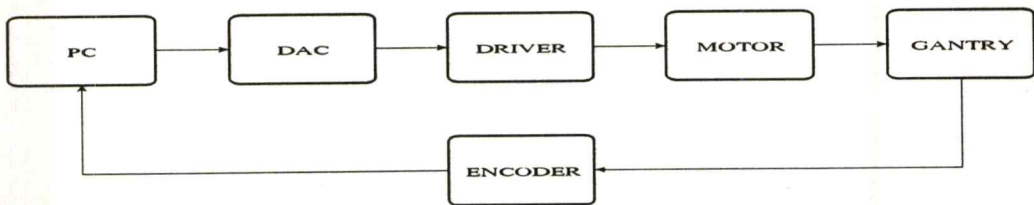


แสดงการติดตั้งเอนโคเดอร์

4. ชุดควบคุม

ชุดควบคุมการหมุนของแกนทรีจะกระทำโดยใช้ไมโครคอมพิวเตอร์เป็นชุดควบคุม ซึ่งได้ออกแบบให้มีการทำงานเป็นแบบวงรอบปิดลักษณะของชุดควบคุมเป็นแบบ ON-OFF Control คือสั่งให้มอเตอร์หมุนไปจนกว่าถึงตำแหน่งที่ครบรอบจึงจะสั่งให้หยุดการทำงาน และสั่งให้มอเตอร์หมุนกลับทันที จากการทำงานของชุดควบคุมจะพบข้อบกพร่องคือชุดควบคุมไม่สามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ในขณะที่ขยับรังสี จากข้อเสียดังกล่าวจะทำให้ตัวรับรังสีเอกซ์เก็บข้อมูลที่ผิดพลาดส่งผลให้ภาพตัดขวางมีความผิดพลาดได้เนื่องจากความเร็วแต่ละช่วงในขณะที่ทำการถ่ายภาพตัดขวางมีความเร็วไม่สม่ำเสมอ

ภาพที่ 12



แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมการหมุนของโครงเหล็กจับยึดอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปแนวทางการพัฒนาระบบ

จากที่กล่าวมาข้างต้น จะพบว่าในชุดการควบคุมการหมุนของวงล้อเหล็กนั้น ไม่สามารถควบคุมความเร็วได้ เนื่องจากจากระบบควบคุมเป็นแบบ ON-OFF Control ซึ่งลักษณะของชุดควบคุมมีลักษณะการทำงาน 2 ส่วนคือสั่งให้หมุนได้ทั้งสองทิศทาง และสั่งให้มอเตอร์หยุด แต่ทว่าการส่งกำลังของแกนที่ถูส่งกำลังจากมอเตอร์ผ่านเฟืองทดและโซ่ ซึ่งทำให้ไม่สามารถหมุนด้วยความเร็วสูงได้ทั้งนี้ก็เพราะว่าการขับเคลื่อนด้วยโซ่ มีข้อจำกัดคือเสียงดังและถ้าหมุนด้วยความเร็วสูง ๆ อาจทำให้โซ่ขาดเกิดความเสียหายได้ จากเหตุผลดังกล่าวส่งผลให้การฉายรังสีใช้เวลามากเท่ากับเวลาในการหมุนครบรอบ ซึ่งการฉายรังสีที่ใช้เวลามากนั้น ถ้าวัตถุที่ต้องการถ่ายเป็นสิ่งมีชีวิตอาจจะเกิดอันตรายได้ ดังนั้นแนวทางการพัฒนาระบบให้มีความเร็วในการหมุนของแกนที่รีให้มีความเร็วมากขึ้นและสามารถกำหนดกำหนดความเร็วในการหมุนได้

ปัญหา	แนวทางแก้ไข
1. ระบบควบคุมไม่สามารถควบคุมความเร็วได้ เนื่องจากเป็นระบบควบคุมแบบ ON - OFF Control	1. ออกแบบระบบควบคุมที่สามารถควบคุมได้ทั้งตำแหน่งและความเร็ว และชดเชยส่วนที่ไม่เสถียรภาพของแกนที่รี
2. ชุดส่งกำลังไม่สามารถตอบสนองที่ความเร็วสูง ๆ ได้	2. ออกแบบชุดส่งกำลังให้ตอบสนองที่ความเร็วสูง ๆ โดยใช้สายพานแทนโซ่และเฟืองทด
3. มอเตอร์มีความเร็วรอบต่ำ	3. ใช้มอเตอร์ที่มีความเร็วรอบสูง ๆ ที่สามารถหมุนหนึ่งรอบภายใน 3-15 วินาที
4. โครงเหล็กจับยึดอุปกรณ์มีความบอบบางมาก ไม่สามารถทนแรงเหวี่ยงขณะหมุนด้วยความเร็วสูงได้ (อาจจะเกิดอันตรายขึ้นได้)	4. ออกแบบโครงเหล็กจับยึดอุปกรณ์ที่สามารถทนต่อแรงเหวี่ยงจากการหมุนด้วยความเร็วสูง ๆ ได้
5. มีพื้นที่ไม่เพียงพอในการติดตั้งอุปกรณ์ถ่ายภาพตัดขวาง และไม่สามารถถ่ายภาพตัดขวางกับวัตถุที่มีขนาดใหญ่ได้	5. ออกแบบให้มีพื้นที่เพียงพอในการติดตั้งอุปกรณ์ถ่ายภาพตัดขวาง และอุปกรณ์ในระบบควบคุมได้ และสามารถถ่ายภาพตัดขวางกับวัตถุที่มีขนาดใหญ่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบโครงเหล็กจับยึดอุปกรณ์ถ่ายภาพตัดขวาง

บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอการพัฒนาอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวาง ซึ่งส่วนใหญ่จะพัฒนามาจากเพื่อแก้ไขข้อด้อยของอุปกรณ์ในระบบควบคุมของเครื่องถ่ายภาพตัดขวางเดิม ที่ไม่สามารถหมุนวงล้อเหล็กด้วยความเร็วสูง ๆ ได้ การพัฒนาส่วนใหญ่จะเน้นในเรื่องของอุปกรณ์ในระบบควบคุมให้มีความเร็วที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ และออกแบบโครงเหล็กจับยึดอุปกรณ์ให้สามารถติดตั้งอุปกรณ์ถ่ายภาพตัดขวางได้สะดวกมากยิ่งขึ้น

โครงเหล็กจับยึดอุปกรณ์

โครงเหล็กจับยึดอุปกรณ์ถ่ายภาพตัดขวางหรือที่เรียกว่าแกนทรี(Gantry) ถูกสร้างเป็นแบบเหล็กวงกลมที่ตั้งอยู่บนฐานที่หมุนได้รอบทั้ง 360 องศา มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางวงนอก 150 เซนติเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางวงในขนาด 90 เซนติเมตร ระบบการขับเคลื่อนโดยใช้สายพานแบบหน้ากว้าง 1 เซนติเมตร ร่วมกับมอเตอร์แบบกระแสตรง (DC Motor) ส่งกำลังให้แกนทรี การกำหนดตำแหน่งและความเร็วในการหมุนของแกนทรีจะควบคุมโดยใช้ไมโครคอมพิวเตอร์

เหตุที่ต้องออกแบบและจัดสร้างแกนทรีชิ้นใหม่ เนื่องมาจากแกนทรีแบบเก่าซึ่งขับเคลื่อนโดยใช้โซ่ มีปัญหาเรื่องการเคลื่อนที่ช้าและมีเสียงค่อนข้างดัง ดังนั้นในการออกแบบในเชิงอุตสาหกรรมจึงต้องแก้ไขปัญหาระบบดังกล่าวไปเป็นระบบขับเคลื่อนที่ใช้สายพานในการส่งกำลังเพื่อเพิ่มความเร็วในการขับเคลื่อนให้สูงขึ้น

- คุณลักษณะทั่วไปของแกนทรีก่อนการออกแบบและสร้างต้นแบบ

1. ลักษณะเป็นวงกลมเหล็กชิ้นเดียวเพื่อติดตั้งหลอดรับรังสีเอกซ์กับตัวรับรังสีเอกซ์

2. ในการหมุนจะต้องหมุนรอบได้ทั้ง 360 องศา
3. สามารถควบคุมตำแหน่งและความเร็วการหมุนได้ด้วยไมโครคอมพิวเตอร์
4. ขับเคลื่อนการหมุนด้วยดีซีเซอร์โวมอเตอร์ หรือเอซีเซอร์โวมอเตอร์ได้
5. สามารถรับน้ำหนักของหลอดรับรังสีเอกซ์กับตัวรับรังสีเอกซ์
6. เวลาในการหมุน 1 รอบประมาณ 3-15 วินาที
7. มีระบบรักษาความปลอดภัยในขณะที่มีการเคลื่อนที่
8. เคลื่อนย้ายได้สะดวก และติดตั้งได้ง่าย

- การออกแบบส่วนประกอบต่างๆของแกนทรี

การออกแบบส่วนประกอบต่างๆของแกนทรีมีลักษณะการออกแบบสร้างตามขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดขนาดต่างๆของแกนทรี เช่น แกนเหล็กวงกลมสำหรับยึดหลอดรังสีเอกซ์และตัวรับรังสีเอกซ์ โครงสร้างฐานสำหรับติดตั้งระบบการขับเคลื่อน
2. คำนวณน้ำหนักโดยประมาณของส่วนประกอบต่างๆ เมื่อทราบขนาดต่างๆ ตามขั้นตอนที่ 1 แล้ว ทำการร่างแบบของแกนทรีจากนั้นนำแบบที่ร่างไปคำนวณน้ำหนักโดยประมาณเพื่อคำนวณหาขนาดของมอเตอร์และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

1. กำหนดขนาดและส่วนประกอบของแกนทรี

แกนทรีมีขนาดและส่วนประกอบดังนี้

1. วงล้อเหล็กเป็นรูปวงกลมที่สามารถหมุนด้วยความเร็ว 3-15 วินาทีต่อ 360 องศา มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางวงนอกเท่ากับ 150 เซนติเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางวงในเท่ากับ 90 เซนติเมตร ความหนา 1.8 เซนติเมตร
2. โครงสร้างฐานสำหรับติดตั้งวงล้อเหล็กดังกล่าว ซึ่งมีลูกปืนที่สามารถรับน้ำหนักประมาณ 180 กิโลกรัม สำหรับรองรับการหมุนของวงล้อเหล็กกลม

- คำนวณน้ำหนักของส่วนต่าง

คำนวณน้ำหนักของแผ่นวงกลม และส่วนอื่นๆโดยใช้เหล็กเป็นวัสดุ

- ส่วนของแกนเหล็กวงกลม คำนวณน้ำหนักได้ดังนี้

น้ำหนักของวงล้อเหล็ก = พื้นที่วงกลม * หนา * ความหนาแน่น

$$= \pi r^2 * \text{ความหนา} * \text{ความหนาแน่น}$$

$$= \pi * (\text{รัศมีวงนอก}^2 - \text{รัศมีวงใน}^2) * \text{ความหนา} * \text{ความหนาแน่น}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \pi * (75^2 - 45^2) * 1.8 * 7.5$$

$$= 152681.403 \text{ กรัม}$$

น้ำหนักแกนเหล็กวงกลม = 152.68 กิโลกรัม

(ความหนาแน่นเหล็กเท่ากับ 7.5 กรัมต่อเซนติเมตร)

น้ำหนักรวมของวงล้อเหล็กหลังจากติดตั้งอุปกรณ์ถ่ายภาพตัดขวางและอื่น ๆ ประมาณเท่ากับ 180 กิโลกรัม

จากกฎของการเคลื่อนที่

$$\text{แรง} = \text{มวล} * \text{ความเร่ง}$$

เนื่องจากมีชุดรองรับน้ำหนัก(ลูกปืน 4 ชุด)และผลของมวลอุปกรณ์ถ่ายภาพตัดขวางที่วางอยู่ในทิศทางตรงกันข้ามทำให้ได้ว่า

$$\text{แรง} = \text{ผลต่างของมวลทั้งสอง} * \text{รัศมี} * \text{ความเร่ง}$$

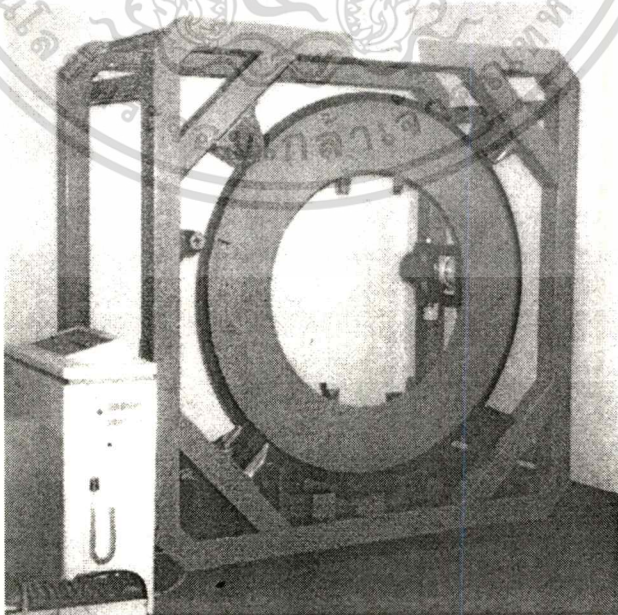
$$= 8 * 1.5 * 9.81$$

$$= 117.72 \text{ นิวตันเมตร}$$

เพราะฉะนั้นแรงที่มอเตอร์ได้รับจะเท่ากับ แรงที่คำนวณได้หารด้วยกำลังสองของอัตราทดของชุดส่งกำลัง

$$= 7.58 \text{ นิวตันเมตร}$$

ภาพที่ 13



แสดงภาพแกนที่รีที่ได้จากการออกแบบ

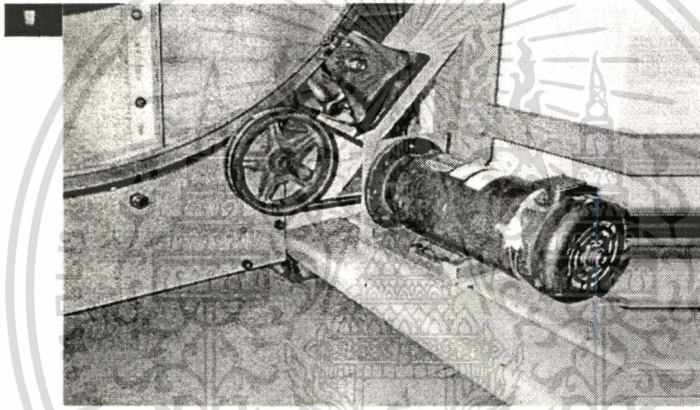
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนขับเคลื่อนและชุดส่งกำลัง

- มอเตอร์

มอเตอร์ที่ใช้ในขับเคลื่อนการหมุนแกนทรีใช้มอเตอร์กระแสตรง 180 โวลท์ 30 แอมแปร์ มีความเร็วเท่ากับ 1750 รอบต่อนาที และมีขนาด 2 แรงม้า (1492 นิวตันต่อวินาทีและคำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์เท่ากับ 8.41 นิวตันเมตร) จากหาแรงทั้งหมดบนวงล้อเหล็กจะพบว่ามอเตอร์ที่นำมาใช้สามารถมีแรงบิดเพียงพอต่อการขับเคลื่อนวงล้อและยังสามารถตอบสนองความเร็วในการหมุนแกนทรีตั้งแต่ 3-15 วินาทีต่อรอบได้

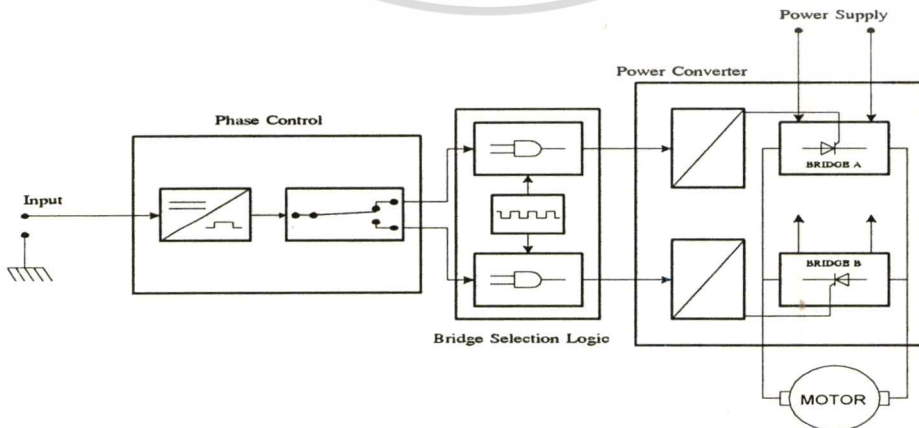
ภาพที่ 14



แสดงดีซีมอเตอร์ที่ใช้งานจริง

- วงจรขับ

ภาพที่ 15

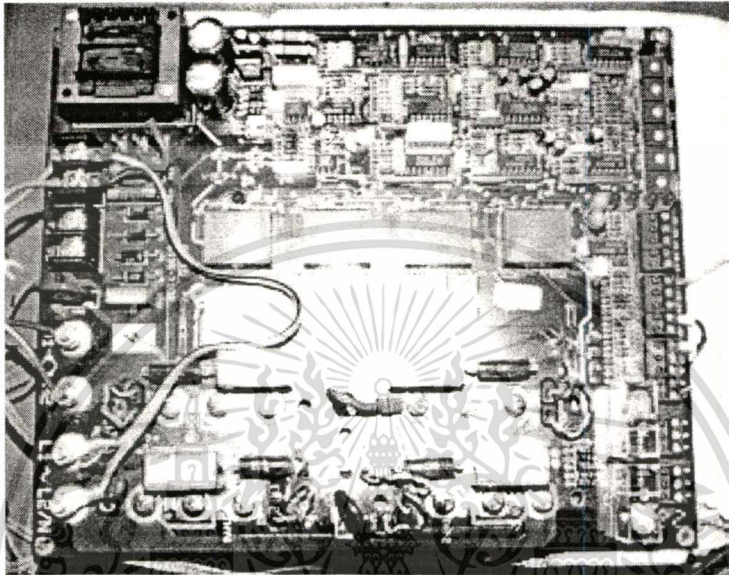


บล็อกไดอะแกรมของเฟาเวอร์แอมพลิไฟเออร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรขับ หรือเพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์ทำหน้าที่ขยายสัญญาณจากชุดควบคุมและส่งสัญญาณที่ขยายแล้วไปให้กับมอเตอร์ดังจะมีรายละเอียดดังนี้

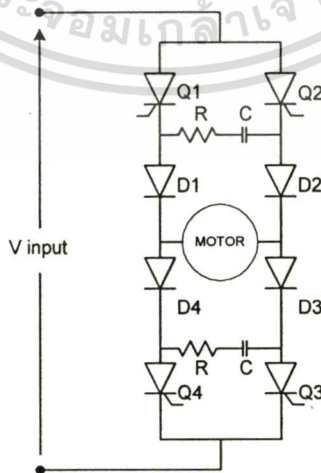
ภาพที่ 16



แสดงแผงวงจรเพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์

- เพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์ จะประกอบด้วยอุปกรณ์ไทรสเตอร์ 4 ชุดต่อกันแบบ

ภาพที่ 17



แสดงโครงสร้างภายในของ Converter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริจดังแสดงในภาพที่ 17 โดยจะสลับกันทำงานคือ Q1 กับ Q3 นำกระแส ทำให้มอเตอร์นำกระแส และหมุนไปในทิศทางหนึ่ง แต่ถ้า Q2 กับ Q4 นำกระแส ทำให้มอเตอร์นำกระแส และหมุนไปในทิศทางตรงกันข้าม ในแต่ละชุดที่นำกระแสจะมีโครงข่าย RC ต่ออยู่ เพื่อป้องกัน dv/dt และแรงดันที่เปลี่ยนแปลงชั่วขณะกระแสที่ไหลผ่านมอเตอร์จะถูกควบคุมมิให้มีความมากเกินไป โดยใช้แรงดันอามเพอร์มีการป้อนกลับมาผ่านวงจรความต้านทานสูง ซึ่งประกอบด้วยวงจรโครงข่ายความต้านทาน กับวงจรขยายแรงดันบัฟเฟอร์

- แหล่งจ่ายแรงดัน ในวงจรเพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์ส่วนใหญ่จะถูกส่งมาจากหม้อแปลงที่มีแรงดันทางปฐมภูมิ 200 โวลต์ และมีแรงดันทางด้านทุติยภูมิ 2 ชุด คือ 100-0-100 โวลต์ และ 20-0-20 โวลต์ ที่แรงดันเท่ากับ 100 โวลต์นี้ไว้สำหรับเป็นสัญญาณควบคุมจากการกระตุ้นให้กับอุปกรณ์ไทรสเตอร์ และที่แรงดันเท่ากับ 20 โวลต์ จะถูกนำไปผ่านวงจรรอง (Regulator) ให้ได้แรงดันเท่ากับ 15 โวลต์ เพื่อเป็นแหล่งจ่ายแรงดันให้กับวงจรลอจิกต่าง ๆ

- วงจรควบคุมเฟส แรงดันเอาพุตที่ได้จากอุปกรณ์ไทรสเตอร์จะถูกควบคุมโดยวงจรควบคุมเฟสที่แรงดัน 2 ชุดจะถูกนำมาเปรียบเทียบกันเพื่อหาความต่างเฟส เพื่อที่จะสลับการทำงานเป็นไปอย่างถูกต้องและสัมพันธ์กับเฟส

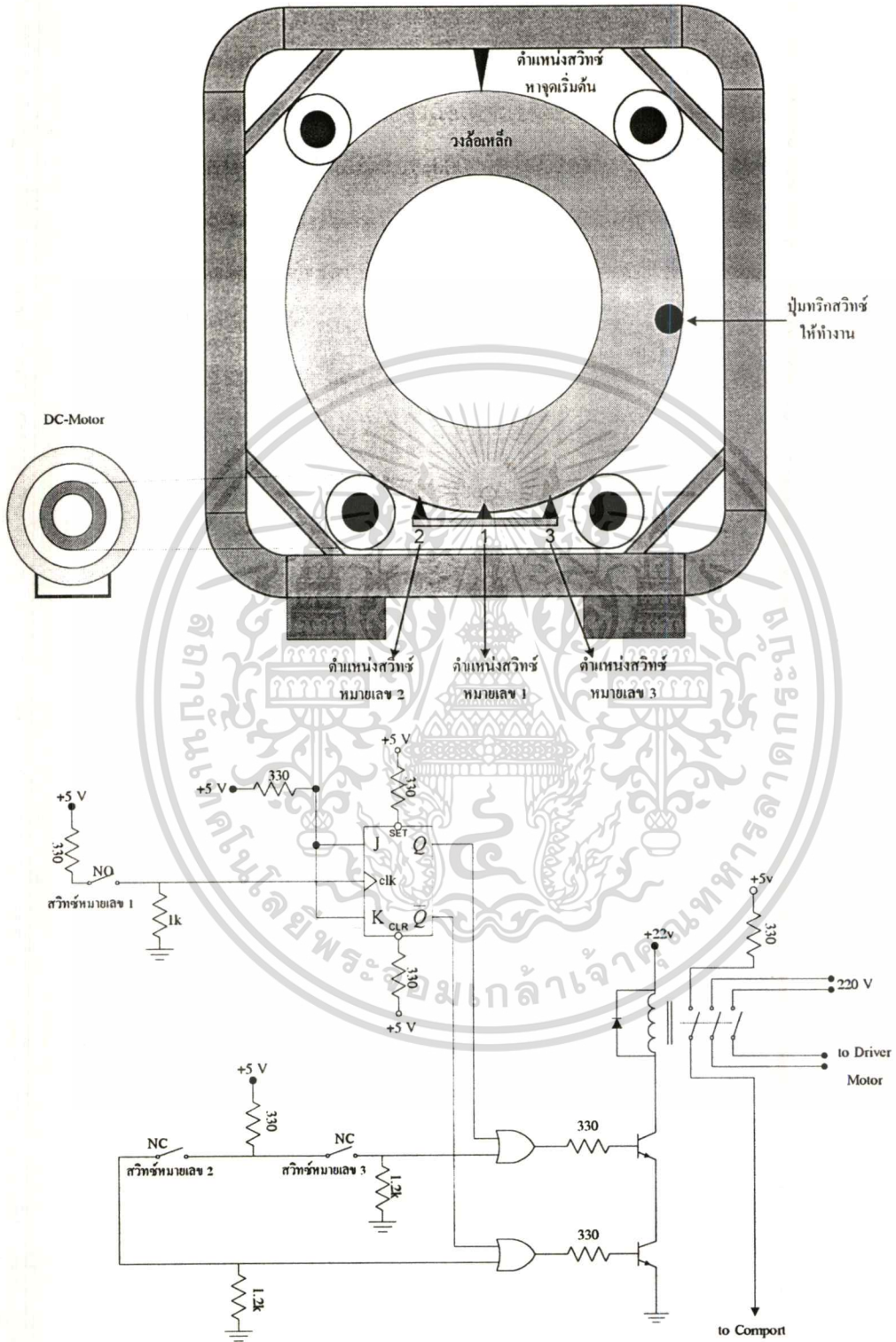
- วงจรลอจิกที่ใช้เลือกการทำงานของบริจคองเวอร์เตอร์ในการทำงานของอุปกรณ์ไทรสเตอร์แบบ 4 ควอดแดรนต์ที่ไทรสเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งทำงานนั้นจะถูกเลือกโดยวงจรควบคุมความเร็วที่ขึ้นอยู่กับสัญญาณผิดพลาดของความเร็ว ซึ่งจะมีผลต่อทิศทางการไหลของกระแสที่ไหลผ่านมอเตอร์ สำหรับการตรวจสอบสัญญาณเออร์เรอร์ (Error Signal) ของความเร็วสถานะอยู่ 2 สถานะคือ ค่าสูงสุดที่เป็นบวกและลบ

ระบบป้องกันภัย

ระบบป้องกันภัย (Protection System) ถูกออกแบบให้ทำหน้าที่หยุดการทำงานของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีตัดแหล่งจ่ายไฟของวงจรขับเคลื่อนรีเลย์ เมื่อแกนที่รีหมุนเกิน 2 รอบ ซึ่งอาจจะเกิดจากคอมพิวเตอรืในส่วนของวงจรควบคุมเกิดการดำเนินงานที่ผิดพลาด หรือความไม่สมบูรณ์ของฮาร์ดแวร์ การทำงานของวงจรมีจะอาศัยคุณสมบัติของ JK-FlipFlop ในส่วนของการให้เอาพุตสลับกัน (Toggle) เมื่อมีสัญญาณนาฬิกาเข้ามาที่ทริก(สวิตช์ในตำแหน่งที่ 1) โดยที่เอาพุตของ JK-FlipFlop ทั้ง Q และ \bar{Q} จะถูกนำมาต่อเข้ากับสวิตช์ที่ทำงานในทิศทางเดียว (สวิตช์ในตำแหน่งที่ 2 และ 3) ที่ OR Gate จากนั้นเอาพุตของ OR Gate จะเป็นสัญญาณในการสั่งงานให้กับรีเลย์ ตัดแหล่งจ่ายไฟของวงจรขับเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 18



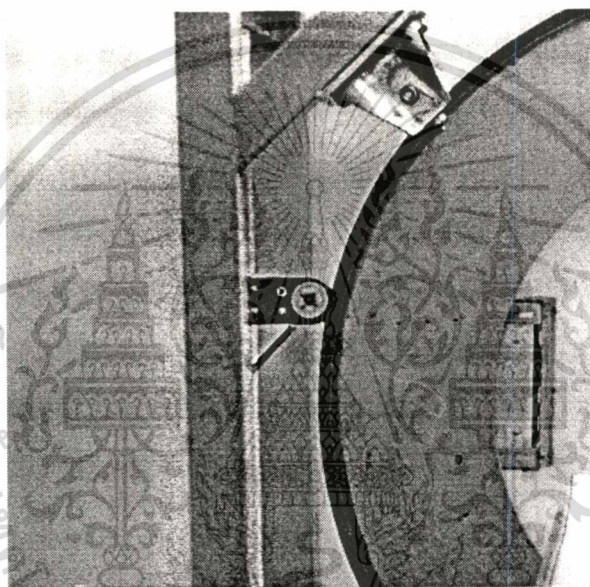
แสดงลักษณะการติดตั้งระบบป้องกันภัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น. ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การติดตั้งเอนโคเดอร์กับแกนทรี

หลักการทำงานส่วนใหญ่จะเหมือนกับในระบบเดิมในส่วนตรวจจับตำแหน่ง สำหรับการติดตั้งเอนโคเดอร์ก็เช่นกัน จะต้องติดตั้งหัววงล้อของเอนโคเดอร์สัมผัสกับวงล้อเหล็กของแกนทรี โดยไม่มีการหลื่นไหลดังแสดงในภาพที่ 18 ซึ่งเอนโคเดอร์ที่ใช้มีความละเอียด 500 พัลส์ต่อรอบ

ภาพที่ 19



แสดงส่วนการติดตั้งเอนโคเดอร์กับแกนทรี

ชุดควบคุม

ในการออกแบบระบบควบคุมให้ทำงานเป็นไปตามที่ต้องการนั้นขึ้นอยู่กับกรเลือกชนิดของชุดควบคุมให้เหมาะสมกับระบบที่จะควบคุม ซึ่งชุดควบคุมที่ใช้ในเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวางได้ถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นแบบวงรอบปิดทำหน้าที่ควบคุมการหมุนของแกนทรีให้ครบรอบตามเวลาที่กำหนดด้วยความเร็วคงที่ และยังสามารถควบคุมได้ทั้งตำแหน่ง (Position Control) และความเร็ว (Velocity Control) สำหรับการออกแบบ และการหาค่าพารามิเตอร์จะกล่าวไว้ในภายหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุป

แก๊งค์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวางที่พัฒนาขึ้นมาสามารถหมุนได้ 1 รอบ ภายในเวลา 3 - 15 วินาที สามารถยอมรับได้ในระดับของเครื่องต้นแบบคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวาง เหตุผลในการออกแบบแก๊งค์ในลักษณะนี้เพื่อแก้ปัญหาการหมุนช้าของแก๊งค์ในระบบเดิม และมีพื้นที่เพียงพอในการติดตั้งอุปกรณ์ถ่ายภาพตัดขวาง จากการพัฒนากระบวนการหมุน ให้มีความเร็วมากขึ้นนั้นส่งผลให้วัตถุที่ทำการฉายรังสีได้รับรังสีน้อยลงทำให้ไม่เป็นอันตรายมากเท่าที่ควร และยังเป็นการยืดอายุการใช้งานของหลอดรังสีเอกซ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ทฤษฎีระบบควบคุมเบื้องต้น

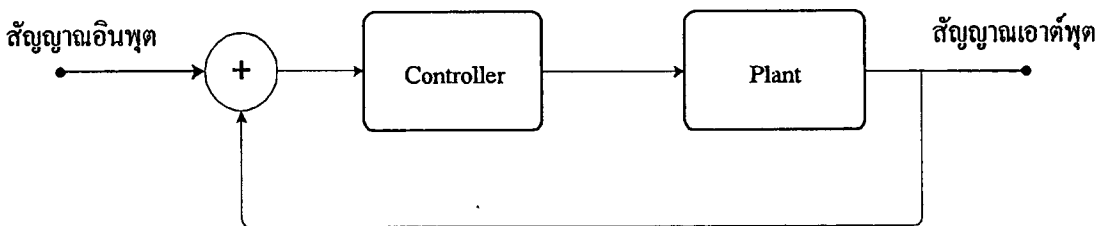
บทนำ

สำหรับการออกแบบระบบควบคุมที่จะนำมาใช้ในการควบคุมระบบแทนหมุนของเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวาง โดยลักษณะระบบควบคุมจะเป็นแบบวงรอบปิด (Closed loop) ที่มีหลักการทำงานพื้นฐานคือสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ได้อย่างอัตโนมัติ เพื่อนำให้ระบบที่จะควบคุมทำงานเป็นไปตามที่ต้องการ สำหรับเนื้อหาการออกแบบระบบควบคุมจะนำเสนอการหาค่าพารามิเตอร์ของชุดควบคุมโดยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีตรวจสอบเสถียรภาพแบบลียาปูนอฟ (Lyapunov) ในการออกแบบระบบควบคุมแบบปรับค่าตัวเองได้ ซึ่งทฤษฎีดังกล่าวมาจะเป็นเครื่องมือที่จะช่วยให้การออกแบบระบบควบคุมทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ

การออกแบบระบบควบคุม

ในระบบควบคุมประกอบด้วยชุดควบคุม (Controller) และระบบที่จะควบคุม (Plant) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือการควบคุมแบบวงรอบเปิด (Open loop) และการควบคุมแบบวงรอบปิด (Closed loop) สำหรับระบบควบคุมแบบวงรอบเปิดจะไม่ขอกล่าวถึง สำหรับการงาน

ภาพที่ 20



แสดงระบบการควบคุมแบบวงรอบปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของระบบควบคุมแบบวงรอบปิดดังแสดงในภาพที่ 20 มีหลักการทำงานคือเอาสัญญาณเอาต์พุตของระบบที่จะควบคุมมาป้อนกลับที่อินพุตของชุดควบคุม เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุต หรือค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ จากนั้นค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบหรือสัญญาณผิดพลาดจะถูกนำไปประมวลผลภายในชุดควบคุมและส่งสัญญาณไปควบคุมการทำงานของระบบที่จะควบคุมให้ทำงานเป็นไปตามต้องการ ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ของชุดควบคุมจะต้องเป็นค่าที่เหมาะสมจึงจะส่งผลให้การทำงานของระบบมีประสิทธิภาพ

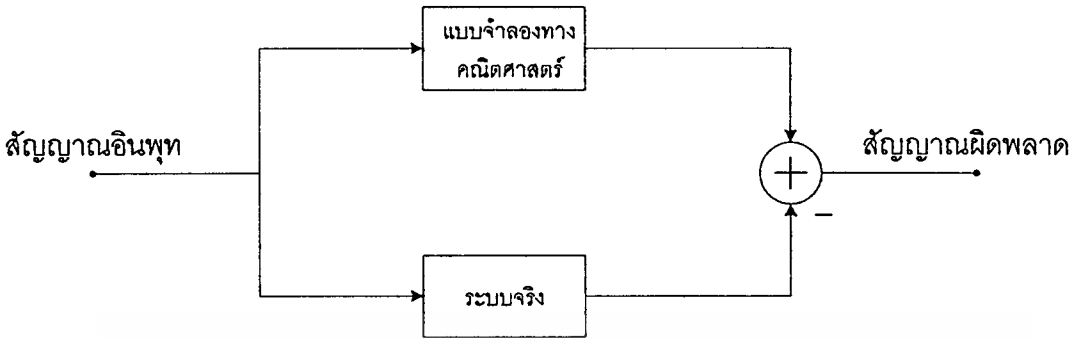
สำหรับการออกแบบระบบควบคุมให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพนั้น นอกจากจะขึ้นอยู่กับ การเลือกชนิดของชุดควบคุมแล้ว ยังขึ้นอยู่กับ การปรับค่าพารามิเตอร์ในชุดควบคุมให้เหมาะสมกับระบบที่จะควบคุม เพราะฉะนั้นการปรับค่าพารามิเตอร์ในชุดควบคุม บางครั้งอาจจะต้องใช้เวลาในการปรับค่า และทดลองกับระบบจริง ในทางปฏิบัติแล้วอาจจะทำให้เกิดการเสียหายขึ้นได้ ด้วยสาเหตุนี้จึงได้มีแนวคิดที่จะทำให้ระบบควบคุมถูกปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ให้มีความเหมาะสม รวดเร็ว และประหยัด แต่ในขบวนการดังกล่าวมักเกี่ยวข้องกับวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ยุ่งยากซับซ้อน ทั้งนี้ก็เพราะการออกแบบต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของจริงมาใช้ในการออกแบบ สำหรับในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่จะควบคุม และการออกแบบระบบควบคุมแบบปรับค่าพารามิเตอร์ได้

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (System Identification) สามารถหาได้หลายวิธีอย่างเช่นวิธีการคำนวณโดยอาศัยกฎทางฟิสิกส์ แต่จะกระทำได้ยากมากเพราะว่าจะต้องทราบความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของระบบที่จะหา ซึ่งไม่สามารถนำมาเป็นกฎที่ตายตัวได้ขึ้นอยู่กับระบบที่ต้องการหา ฉะนั้นการหาแบบจำลองที่สามารถจะกระทำได้โดยง่ายคือวิธีการทดลอง โดยใช้วิธีที่เรียกว่า System Identification Technique ดังในภาพที่ 21

โดยทั่วไปการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบนี้จะต้องป้อนสัญญาณอินพุตให้กับระบบจริงแล้วเก็บผลตอบสนองทางด้านเอาพุตของระบบ แล้วนำข้อมูลทางด้านอินพุตและเอาพุตมาทำการหาแบบจำลองด้วยวิธีที่เรียกว่าการประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยที่สุด

ภาพที่ 21



แสดงบล็อกไดอะแกรมการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

โดยกำหนดให้ $G(z, \xi)$ แทนระบบจริง และให้ $G(z)$ แทนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความสัมพันธ์กับอินพุตและทำให้เอาพุตใกล้เคียงกับระบบจริงมากที่สุด กำหนดให้

$$G(z) = \frac{b_0 + b_1 Z^{-1} + b_2 Z^{-2} + \dots + b_n Z^{-n}}{1 + a_1 Z^{-1} + a_2 Z^{-2} + \dots + a_n Z^{-n}} \tag{4.1}$$

สัมประสิทธิ์ a_1, a_2, \dots, a_n และ $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ คือพารามิเตอร์ของระบบจริง ในการหาค่าประมาณนั้นโดยมีเงื่อนไขว่าค่าผิดพลาด หรือผลต่างระหว่างเอาพุตของระบบจริงกับเอาพุตของแบบจำลอง(อินพุตเดียวกัน) ที่มีค่าผลรวมกำลังสองน้อยสุด ซึ่งจะส่งผลให้ผลตอบสนองของทั้งคู่มีความใกล้เคียงกัน จากสมการที่ 4.1 $G(z) = \frac{\tilde{y}(z)}{U(z)}$ กำหนดให้

$$\tilde{y}(k) = -a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) - \dots - a_n y(k-n) + b_0 u(k) + b_1 u(k-1) + \dots + b_n u(k-n) \tag{4.2}$$

ดังนั้นค่าผิดพลาด $e(k)$ ระหว่างเอาพุตจากระบบจริงกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เท่ากับ

$$e(k) = y(k) - \tilde{y}(k) = y(k) + a_1 y(k-1) + a_2 y(k-2) + \dots + a_n y(k-n) - b_0 u(k) - b_1 u(k-1) - \dots - b_n u(k-n) \tag{4.3}$$

เพราะฉะนั้นจะได้ว่า

$$y(k) = -a_1y(k-1) - a_2y(k-2) - \dots - a_ny(k-n) + b_0u(k) + b_1u(k-1) + \dots + b_nu(k-n) + e(k) \quad (4.4)$$

จากสมการที่ 4.4 สามารถจัดรูปเป็นเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} Y(n) \\ Y(n+1) \\ \vdots \\ Y(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y(n-1) & Y(n-2) & \dots & Y(0) & u(n) & u(n-1) & \dots & u(0) \\ Y(n) & Y(n-1) & \dots & Y(1) & u(n+1) & u(n) & \dots & u(1) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ Y(N-1) & Y(N-2) & \dots & Y(N-n) & u(N) & u(N-1) & \dots & u(N-n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -a_1 \\ -a_2 \\ \vdots \\ -a_n \\ b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e(n) \\ e(n+1) \\ \vdots \\ e(N) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

โดยที่

N : จำนวนข้อมูลทั้งหมด

$e(N)$: ค่าผลต่างระหว่างเอาพุทของระบบที่จะควบคุมกับเอาพุทของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

กำหนดให้

$$Y(N) = \begin{bmatrix} Y(n) \\ Y(n+1) \\ \vdots \\ Y(N) \end{bmatrix}, \quad e(N) = \begin{bmatrix} e(n) \\ e(n+1) \\ \vdots \\ e(N) \end{bmatrix}, \quad X(N) = \begin{bmatrix} -a_1 \\ -a_2 \\ \vdots \\ -a_n \\ b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}$$

และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C(N) = \begin{bmatrix} Y(n-1) & Y(n-2) & \dots & Y(0) & u(n) & u(n-1) & \dots & u(0) \\ Y(n) & Y(n-1) & \dots & Y(1) & u(n+1) & u(n) & \dots & u(1) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ Y(N-1) & Y(N-2) & \dots & Y(N-n) & u(N) & u(N-1) & \dots & u(N-n) \end{bmatrix}$$

สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$Y(N) = C(N)X(N) + E(N) \quad (4.6)$$

จากเงื่อนไขของผลต่างกำลังสองน้อยสุด

$$J_N = \frac{1}{2} \sum_{k=n}^N E^2(k) = \frac{1}{2} E(k)^T E(k) \quad (4.7)$$

แทนค่าสมการที่ 4.3 ลงในสมการที่ 4.4 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} J_N &= \frac{1}{2} [Y(N) - C(N)X(N)]^T [Y(N) - C(N)X(N)] \\ &= \frac{1}{2} [X^T(N)C^T(N)Y(N) - Y^T(N)Y(N) \\ &\quad + X(N)C^T(N)C(N)X(N) - Y(N)C(N)X(N)] \end{aligned} \quad (4.8)$$

จากนั้นหาค่าของ $X(N)$ ที่ทำให้ J_N มีค่าน้อยสุดทำได้โดยการดิฟเฟอเรนเชียล

$$\begin{aligned} \frac{\partial J_N}{\partial x(N)} &= 0 \\ C^T(N)C(N)X(N) - C^T(N)Y(N) &= 0 \end{aligned}$$

ดังนั้นเมตริกซ์ $X(N)$ จะเท่ากับ

$$X(N) = (C^T(N)C(N))^{-1}C(N)Y(N) \quad (4.9)$$

ที่ทำให้ค่าผลต่างกำลังสองน้อยสุด และเป็นค่าที่ออปติมัลที่ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รู้เข้าหา ระบบจริงมากที่สุด แต่จะสังเกตเห็นว่าในสมการที่ 4.6 มีการอินเวอร์สเมตริกซ์ที่ $(C^T(N)C(N))^{-1}$ ซึ่ง ตามกฎของอินเวอร์สเมตริกซ์นั้นเมตริกซ์ $C(N)$ จะต้องเป็นนิออนซิงกูลาร์เมตริกซ์เท่านั้น นั้นหมายความว่า การป้อนสัญญาณอินพุตจะต้องไม่เป็นสัญญาณที่คงที่คือจะต้องให้สัญญาณอินพุตที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาและทำให้ระบบแทนหมุนเกิดการตอบสนองในส่วนที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นมากที่สุด จึงจะทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความคล้ายกับระบบจริงมาก

การออกแบบระบบควบคุมแบบปรับค่าพารามิเตอร์ได้

ในระบบควบคุมส่วนใหญ่จะประกอบด้วยระบบที่จะควบคุม (Plant) และชุดควบคุม (Controller) โดยการทำงานจะมีส่วนป้อนสัญญาณกลับจากทางด้านเอาพุตส่งมายังอินพุต เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ (Set point) จากนั้นจะทำให้ได้สัญญาณผิดพลาด (Error Signal) และถูกส่งเข้าสู่ ขบวนการจัดการด้วยชุดควบคุม เพื่อประมวลผลเป็นสัญญาณควบคุมที่จะส่งไปควบคุมให้กับระบบที่จะควบคุมทำงาน แต่สำหรับเป้าหมายก็คือให้สัญญาณผิดพลาดมีค่าลดลงเท่ากับศูนย์หรือน้อยที่สุด นั้นหมายความว่าค่าพารามิเตอร์ของชุดควบคุมที่กำหนดให้มีความเหมาะสมกับระบบที่จะควบคุม

สำหรับระบบควบคุมแบบปรับค่าพารามิเตอร์ได้นั้นโดยหลักการพื้นฐานคือปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับระบบที่จะควบคุมได้อย่างอัตโนมัติ เพื่อนำระบบดังกล่าวทำงานเป็นไปตามต้องการ โดยไม่สนใจการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบที่จะควบคุม ในส่วนของการออกแบบระบบควบคุมแบบปรับค่าพารามิเตอร์ได้จะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ

1. หาแบบทางคณิตศาสตร์ของระบบจริง
2. กำหนดสัญญาณควบคุม
3. กำหนดโครงสร้างและเลือกค่าอัตราขยายของระบบควบคุม

สำหรับตัวอย่างการออกแบบระบบควบคุมแบบปรับค่าพารามิเตอร์ จะกำหนดให้ระบบที่จะควบคุม มีฟังก์ชันถ่ายโอนเท่ากับ

$$m\ddot{x} + h = u \quad (4.10)$$

โดยที่

x คือตำแหน่ง (Position)

u คือสัญญาณควบคุม

h คือสัญญาณรบกวนต่าง ๆ เช่นแรงเสียดทาน เป็นต้น (disturbance from Friction)

จากนั้นกำหนดสัญญาณควบคุมที่สามารถชดเชยการทำงานให้กับระบบจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสัญญาณควบคุม จะสังเกตเห็นว่าพารามิเตอร์ k_0 และ k_1 เป็นตัวแปรที่มีบทบาทสำคัญในการที่จะส่งผลให้สัญญาณผิดพลาดเข้าสู่ศูนย์

$$u = \hat{m}(\ddot{x}_d - k_0 e - k_1 \dot{e}) + \hat{h} \quad (4.11)$$

โดยที่

\ddot{x}_d คือค่าความเร่งของเส้นทางที่กำหนดไว้ (Desired Acceleration or Trajectory Generation)

\hat{m}, \hat{h} คือตัวแปรที่ได้จากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจริง

กำหนดให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจริงเท่ากับ

$$\hat{m}\ddot{x} + \hat{h} = y\hat{p} \quad (4.12)$$

จากสมการที่ 4.11 แทนสัญญาณควบคุมลงในสมการที่ 4.10

$$m\ddot{x} + h = \hat{m}(\ddot{x}_d - k_0 e - k_1 \dot{e}) + \hat{h} \quad (4.13)$$

จากนั้นนำ $\pm \hat{m}\ddot{x}$ ลงในสมการที่ 4.13

จะทำให้ได้สมการที่ 4.14 และสามารถจัดรูปได้ว่า

$$\hat{m}(\ddot{e} + k_1 \dot{e} + k_0 e) = \tilde{m}\ddot{x} + \tilde{h} \quad (4.14)$$

โดยที่

$$\tilde{m} = \hat{m} - m, \quad \tilde{h} = \hat{h} - h, \quad \tilde{p} = \hat{p} - p$$

จากสมการที่ 4.14 จัดรูปใหม่ได้ว่า

$$\begin{aligned}\ddot{e} + k_1 \dot{e} + k_0 e &= \hat{m}^{-1} y \tilde{p} \\ &= \Phi \tilde{p}\end{aligned}\quad (4.15)$$

สมการที่ 4.15 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการสถานะได้ว่า

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (4.16)$$

โดยที่

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -k_0 & -k_1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix}$$

จากนั้นนำค่าในสมการที่ 4.16 มาประมวลผลทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบของลี้ลาพูนอฟ

$$= x^T P x + \tilde{p}^T \Gamma \tilde{p} \quad (4.17)$$

โดยที่ P หาได้จาก

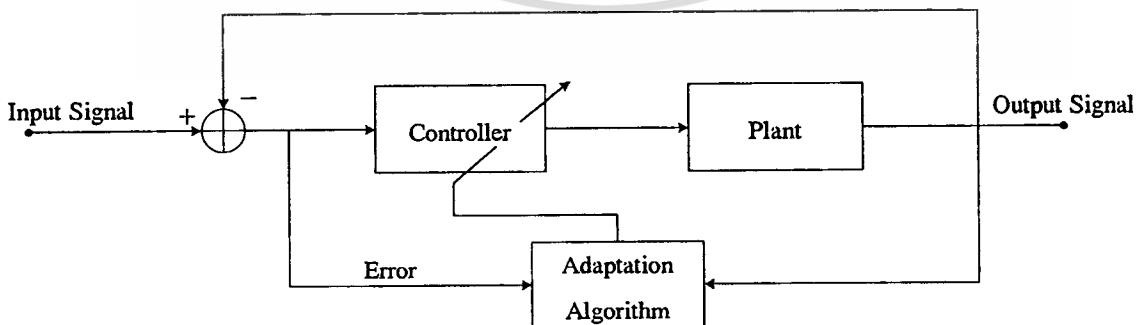
$$A^T P + P A + Q = 0 \quad (4.18)$$

$$\dot{V} = -x^T Q x + 2\tilde{p}^T [\Phi^T B^T P x + \Gamma \dot{\tilde{p}}] \quad (4.19)$$

จะได้ว่าเมตริกซ์ $\dot{\tilde{p}}$ ได้เท่ากับ

$$\dot{\tilde{p}} = -\Gamma^{-1} \Phi^T B^T P x \quad (4.20)$$

ภาพที่ 22



แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบปรับค่าพารามิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสมการที่ 4.20 ถูกเรียกว่า Adaptation Algorithm ซึ่งเป็นขบวนการทางคณิตศาสตร์ที่จะนำไปสู่การปรับค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมได้อย่างอัตโนมัติ ดังในภาพที่ 22 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบปรับค่าพารามิเตอร์ได้

สรุป

การออกแบบระบบควบคุมให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ นั่นคือทำให้ระบบที่จะควบคุมทำงานเป็นไปตามที่ต้องการ ซึ่งส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับการเลือกชนิดของชุดควบคุม และการปรับค่าพารามิเตอร์ภายในชุดควบคุมให้เหมาะสมกับระบบที่จะควบคุม โดยขบวนการดังกล่าวจะต้องอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องเข้ามาช่วยในการออกแบบ ดังนั้นขั้นตอนการออกแบบระบบควบคุมให้มีประสิทธิภาพ ก่อนอื่นจะต้องทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถแทนการทำงานของระบบจริงได้ทุกฟังก์ชัน การหาแบบจำลองของระบบที่เป็นเชิงเส้นสามารถคำนวณหาได้โดยใช้วิธีการประมาณแบบกำลังน้อยสุด จากนั้นนำแบบจำลองที่ได้เข้าสู่ขบวนการทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเพื่อให้ได้ชุดควบคุมที่สามารถชดเชยการทำงานของระบบจริงให้เป็นไปตามที่ต้องการ

บทที่ 5

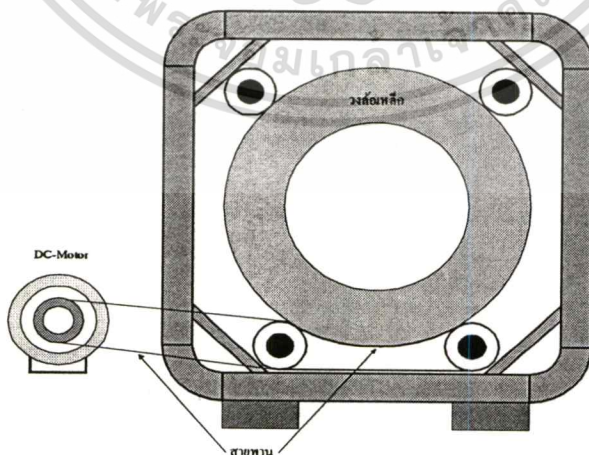
การหาสมการสมมูลของระบบแท่นหมุน

บทนำ

แกนที่หรือระบบแท่นหมุนเครื่องถ่ายภาพตัดขวางนั้นประกอบด้วยวงล้อเหล็กที่ตั้งอยู่บนสายพาน ซึ่งมีโครงสร้างระบบส่งกำลังแบบอ้อม (Indirect Drive) ด้วยมอเตอร์ผ่านสายพาน ส่งผลให้การใช้แบบจำลองเชิงเส้น (Linear Model) ธรรมดาไม่เพียงพอที่จะแทนระบบพลวัต (Dynamics) ของระบบแท่นหมุนทั้งหมดได้ ในบทนี้จะนำเสนอการใช้แบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Model) สำหรับการประมาณระบบพลวัตของแรงเสียดทานที่เกิดในระบบส่งกำลังและนำมาใช้หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบรวมด้วยวิธีประมาณแบบกำลังสองน้อยที่สุด (Least square Estimation) ส่งผลให้การออกแบบระบบควบคุม (Controller) ทำได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น

หลักการและเหตุผล

ภาพที่ 23



แสดงส่วนของการส่งกำลังด้วยมอเตอร์ผ่านสายพาน

ระบบแท่นหมุนเครื่องถ่ายภาพตัดขวาง ประกอบด้วยวงล้อเหล็กตั้งอยู่บนสายพานถูกส่ง

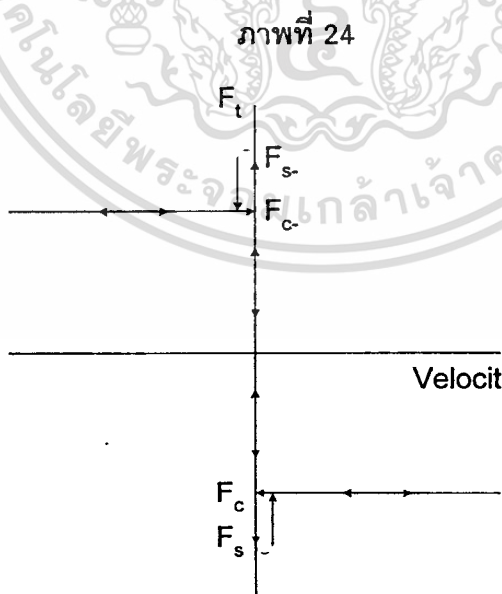
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังด้วยมอเตอร์ผ่านสายพานดังในภาพที่ 23 ซึ่งวงล้อเหล็กมีการติดตั้งอุปกรณ์ถ่ายภาพตัดขวาง ทำให้มีน้ำหนักมากส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานที่จุดส่งกำลังต่าง ๆ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นทำให้ยากต่อการควบคุมการเคลื่อนที่ของวงล้อเหล็กนั้นการออกแบบระบบควบคุมให้มีประสิทธิภาพจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบค่าพารามิเตอร์ของระบบแทนหมุนเครื่องถ่ายภาพตัดขวางไม่ว่าจะเป็นพารามิเตอร์ในรูปแบบของฟังก์ชันเป็นเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้น

การหาค่าพารามิเตอร์ของระบบแทนหมุนจะกระทำในแบบรูปเปิด (Open loop) ซึ่งขั้นตอนแรกจะกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สมมูลกับระบบแทนหมุน และเลือกสัญญาณอินพุตที่จะป้อนให้กับระบบแทนหมุนที่ทำให้ระบบแทนหมุนเกิดการผลตอบสนอง (Excitation) ให้ที่มีความสัมพันธ์กับสัญญาณอินพุตอย่างเพียงพอสำหรับการประมาณระบบ จากนั้นทำการเก็บข้อมูลทางด้านอินพุต และเอาพุต เพื่อนำไปหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้วิธีการประมาณแบบกำลังสองน้อยที่สุด

คุณลักษณะของแรงเสียดทาน

โดยทั่วไปโครงสร้างระบบพลวัตที่มีการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่ จะมีแรงเสียดทานเกิดขึ้น ณ จุดที่มีการส่งกำลังกันระหว่างผิวของวัตถุทั้งสองที่สัมผัสกัน จากการวิเคราะห์จะพบว่าระบบ



แสดงคุณลักษณะและพฤติกรรมการทำงานของแรงเสียดทาน

F_s : Static friction

F_c : Coulomb friction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักศึกษาชั้นปริญญาโทเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

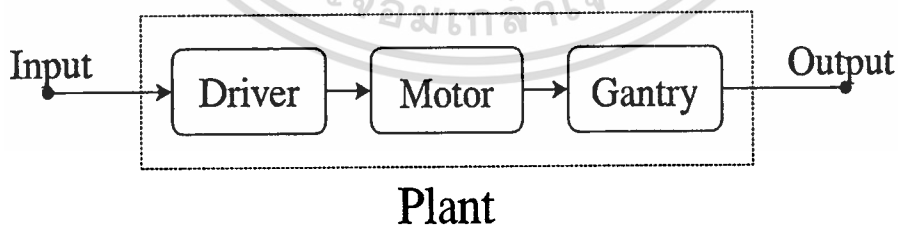
แท่นหมุนมีแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นตั้งแต่การส่งกำลังจากมอเตอร์ พูลเลย์ และสายพานให้วงล้อเหล็กเคลื่อนที่ ซึ่งแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นกับระบบแท่นหมุนประกอบด้วย แรงเสียดทานแบบคูลอมป์ (Coulomb Friction) สแตติก (Static Friction) และวิสคอส (Viscous Friction) โดยที่แรงเสียดทานแต่ละแบบจะมีพฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้นแสดงออกมาต่างกันในภาพที่ 24 ซึ่งแรงเสียดทานแบบสแตติกจะเกิดขึ้นขณะที่วัตถุไม่มีการเคลื่อนที่และพยายามจะเคลื่อนที่ แต่ถ้าวัตถุเกิดการเคลื่อนที่แรงเสียดทานแบบสแตติกจะเท่ากับศูนย์และจะเกิดแรงเสียดทานแบบคูลอมป์หรือที่เรียกว่าแรงเสียดทานแบบแห้ง (Dry Friction) ซึ่งเกิดขึ้นจากแรงระหว่างผิวของวัตถุสัมผัสกัน และแรงเสียดทานแบบวิสคอสเกิดขึ้นขณะที่วัตถุเคลื่อนที่โดยจะแปรผันโดยตรงกับความเร็วของวัตถุ ซึ่งแรงเสียดทานที่กล่าวมาส่งผลให้ความเร็วของวงล้อเหล็กไม่คงที่และไม่เป็นไปตามที่ต้องการ

การกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Modelling)

- ลักษณะทางกายภาพ (Physical Model)

ในการพิจารณาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแท่นหมุนที่ประกอบด้วย วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ และวงล้อเหล็ก ดังแสดงในภาพที่ 25 ซึ่งวงล้อเหล็กมีโครงสร้างเป็นแบบเชิงกลและมีการเคลื่อนที่ที่สามารถกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ โดยใช้กฎการเคลื่อนที่ของนิวตันในสมการที่ 5.1

ภาพที่ 25



แสดงระบบแท่นหมุนเครื่องถ่วงตัดขวาง

$$m\ddot{x} + d\dot{x} = nu + u + f \quad (5.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ x คือตำแหน่งของวงล้อเหล็ก

คือโมเมนต์ความเฉื่อย

d คืออัตราการหน่วง (Damping ratio)

u คือสัญญาณอินพุต

f คือแรงเสียดทานรวมของระบบแทนหมุน

n คือค่าดีฟเฟอร์เรนซ์เฮยลเกนในชุดวงจรถับมือเตอร์ [4]

จากลักษณะของแรงเสียดทานในภาพที่ 24 ที่กล่าวไว้ข้างต้น เราสามารถกำหนดแบบจำลองแบบไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับแรงเสียดทานรวมของระบบ ได้ดังนี้

$$f = [fc_+ \cdot \eta + fc_- \cdot (1-\eta)] \cdot (1-\xi) + [fs_+ \cdot \mu + fs_- \cdot (1-\mu)] \cdot \xi \quad (5.2)$$

โดยมีเงื่อนไขการเกิดแรงเสียดทานต่าง ๆ ดังนี้

$$\eta = 1 (\dot{x} \geq 0); \quad \xi = 1 (\dot{x} = 0); \quad \mu = 1 (u \geq 0)$$

$$\eta = 0 (\dot{x} < 0); \quad \xi = 0 (\dot{x} \neq 0); \quad \mu = 0 (u < 0)$$

- การหาสมการสมมูลด้วยวิธีดิสครีตไตเซชัน (Discretization)

ถึงแม้ระบบแทนหมุนที่ประกอบด้วยฟังก์ชันที่เป็นเชิงเส้นและที่ไม่เป็นเชิงเส้น (เช่นในรูปของตัวแปร η ที่ขึ้นกับทิศทางของความเร็ว) แต่ด้วยวิธีการ Discretization ที่เหมาะสมสามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบได้ด้วยวิธีที่ใช้กับระบบเชิงเส้นได้ ดังเช่นวิธีประมาณแบบกำลังสองน้อยสุด (Least square Method)

เนื่องจากแรงเสียดทานแบบสแตติก สามารถหาค่าได้โดยง่ายในการทดลอง โดยการป้อนแรงดันเข้าที่อินพุตของวงจรถับมือเตอร์ จากนั้นทำการปรับแรงดันโดยเริ่มจากศูนย์แล้วค่อยเพิ่ม ๆ ไป จนกว่าวงล้อเหล็กจะเคลื่อนที่ ซึ่งค่าแรงดันดังกล่าวที่ทำให้วงล้อเหล็กเริ่มเคลื่อนที่ที่สามารถประมาณได้กับแรงเสียดทานแบบสแตติกได้ แต่เนื่องจากแรงเสียดทานแบบสแตติกมีทั้งผลต่อการเคลื่อนที่ทั้งที่ความเร็วเป็นบวกและลบ นั้นหมายความว่าแรงเสียดทานแบบนี้มีค่าที่ความเร็วเป็นบวกค่าหนึ่งและความเร็วเป็นลบอีกค่าหนึ่ง ฉะนั้นในการทดลองจะต้องปรับแรงดันไปทั้งทางบวกและลบตามลำดับ จึงจะทำให้ได้ค่า fs_+ และ fs_- จากนั้นจะขอตัดตัวแปร fs_+ และ fs_- ในสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่ 5.2 ออกก่อน เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์แรงเสียดทานแบบคูลอมป์ต่อไป พิจารณาในภาพที่ 24 เราสามารถประมาณให้ค่าแรงเสียดทานแบบคูลอมป์มีค่าคงที่ในช่วงการสุมตัวอย่างที่ติดกัน นั้นหมายความว่า $f(k) = f(k-1)$ ในทุกลำดับการสุม k ภายใต้สมมติฐานนี้ ผลการ Discretization ของระบบพลวัตตามสมการ (5.1) และ (5.2) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 x(k) = & (1+e^{-dT/m})x(k-1) - (e^{-dT/m})x(k-2) \\
 & + \frac{d(n(1-\delta)+T) + m(\delta-1)}{d^2}u(k-1) \\
 & + \frac{d(n(\delta-1) - T\delta) + m(1-\delta)}{d^2}u(k-2) \\
 & + \frac{Td(1-\delta)}{d^2}fc_+ \cdot \eta \\
 & + \frac{Td(1-\delta)}{d^2}fc_- \cdot (1-\eta)
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

T = เวลาสุมตัวอย่าง (Sampling Time)

จากสมการที่ 5.3 กำหนดให้

$$\begin{aligned}
 \delta &= e^{-dT/m} \\
 \alpha &= \frac{d(n(1-\delta)+T) + m(\delta-1)}{d^2} \\
 \beta &= \frac{d(n(\delta-1) - T\delta) + m(1-\delta)}{d^2} \\
 \tau_1 &= \frac{Td(1-\delta)}{d^2} \cdot fc_+ \\
 \tau_2 &= \frac{Td(1-\delta)}{d^2} \cdot fc_-
 \end{aligned}$$

จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 x(k) = & (1+\delta)x(k-1) - \delta x(k-2) \\
 & + \alpha u(k-1) + \beta u(k-2) \\
 & + \tau_1 \cdot \eta + \tau_2 \cdot (1-\eta)
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

จากสมการที่ 5.4 สามารถจัดสมการใหม่ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

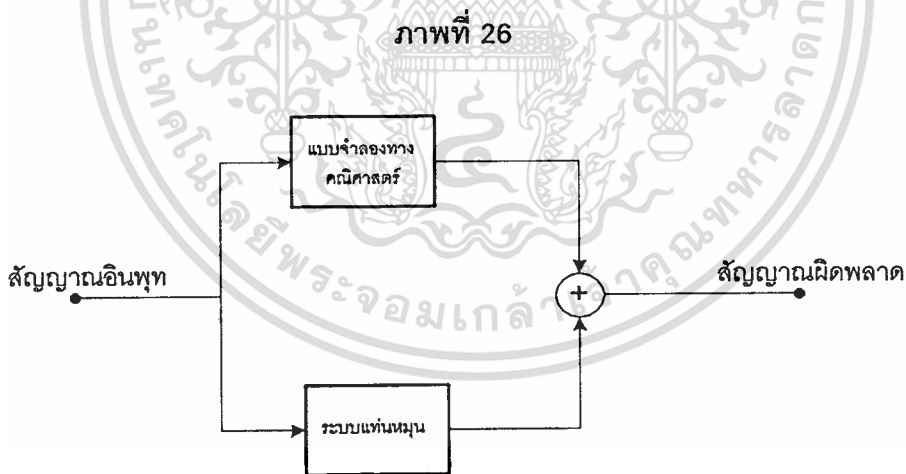
$$\begin{aligned}
 z(k) = & \delta[x(k-1) - x(k-2)] \\
 & + \alpha u(k-1) + \beta u(k-2) \\
 & + \tau_1 \cdot \eta + \tau_2 \cdot (1-\eta)
 \end{aligned}
 \tag{5.5}$$

โดยที่

$$z(k) = x(k) - x(k-1) \tag{5.6}$$

สำหรับการหาค่า $\delta, \alpha, \beta, \tau_1$ และ τ_2 ทำได้โดยการทดลองป้อนสัญญาณอินพุตที่ทำให้ระบบแทนหมุนเกิดการตอบสนองมากที่สุด จากนั้นทำการเก็บผลตอบสนองต่อเวลาของระบบ (Time Response) และสัญญาณอินพุต มาทำการหาแบบจำลองโดยใช้วิธีการประมาณแบบกำลังสองน้อยที่สุดซึ่งจะอธิบายในหัวข้อต่อไป

วิธีการประมาณแบบจำลองโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square estimation)



แสดงบล็อกไดอะแกรมขบวนการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแทนหมุน

พิจารณาภาพที่ 26 แสดงขั้นตอนการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแทนหมุน โดยใช้วิธีการประมาณแบบกำลังสองน้อยที่สุด จากที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 จะใช้สมการที่ 5.5 กับ 5.6 มาใช้ในการคำนวณและสามารถนำมาเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{pmatrix} Z(2) \\ Z(3) \\ \vdots \\ \vdots \\ Z(N) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z(1) & u(1) & u(0) & \eta & 1-\eta \\ Z(2) & u(2) & u(1) & \eta & 1-\eta \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z(N) & u(N-1) & u(N-2) & \eta & 1-\eta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta \\ \alpha \\ \gamma \\ \tau_1 \\ \tau_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e(2) \\ e(3) \\ \vdots \\ \vdots \\ e(N) \end{pmatrix} \quad (5.7)$$

โดยที่

N : จำนวนข้อมูลทั้งหมด

$e(N)$: ค่าผลต่างระหว่างเอาพุตของระบบที่จะควบคุมกับเอาพุตของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

กำหนดให้

$$Y(N) = \begin{pmatrix} Z(2) \\ Z(3) \\ \vdots \\ \vdots \\ Z(N) \end{pmatrix}, \quad e(N) = \begin{pmatrix} e(2) \\ e(3) \\ \vdots \\ \vdots \\ e(N) \end{pmatrix}, \quad X(N) = \begin{pmatrix} \delta \\ \alpha \\ \gamma \\ \tau_1 \\ \tau_2 \end{pmatrix}$$

และ

$$C(N) = \begin{pmatrix} Z(1) & u(1) & u(0) & \eta & 1-\eta \\ Z(2) & u(2) & u(1) & \eta & 1-\eta \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z(N) & u(N-1) & u(N-2) & \eta & 1-\eta \end{pmatrix}$$

ดังนั้น $X(N)$ จะเท่ากับ

$$X(N) = (C^T(N)C(N))^{-1}C(N)Y(N) \quad (5.8)$$

จากเมตริกซ์ $X(N)$ จะทำให้ได้ค่าตัวแปร $\delta, \alpha, \beta, \tau_1$ และ τ_2 ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะสามารถนำมาหาค่าของ d, f และ n ได้ดังนี้

$$m = \frac{\alpha d^2 - d(1 - n\delta + T)}{\delta - 1}$$

$$d = \frac{(1 + T - T\delta - n)}{(\alpha + \beta)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n = \frac{T(\alpha + \beta) + (\alpha \delta + \beta) \cdot \ln \delta}{(\alpha + \beta)(\delta - 1)^2 \cdot \ln \delta}$$

$$fc_+ = \frac{\tau_1 \cdot d^2}{Td(1 - \delta)}$$

$$fc_- = \frac{\tau_2 \cdot d^2}{Td(1 - \delta)}$$

สรุป

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแท่นหมุนที่ประกอบด้วยฟังก์ชันที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นของแรงเสียดทาน สามารถประมาณแบบจำลองได้โดยใช้วิธีการประมาณแบบกำลังสองน้อยสุด ซึ่งวิธีนี้สามารถหาแบบจำลองที่มีการทำงานคล้ายกับระบบแท่นหมุนได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับทางเลือกสัญญาณอินพุตที่ใช้ในการทดลองและทำให้ระบบแท่นหมุนตอบสนองหรือทำงานในส่วนที่เป็นเชิงเส้น และไม่เป็นเชิงเส้นเพียงพอสำหรับการประมาณ จึงจะส่งผลให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถแทนระบบแท่นหมุนของเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวางได้ และนำไปออกแบบระบบควบคุมที่สามารถชดเชยการทำงานของระบบแท่นหมุนได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

บทที่ 6

การออกแบบระบบควบคุม

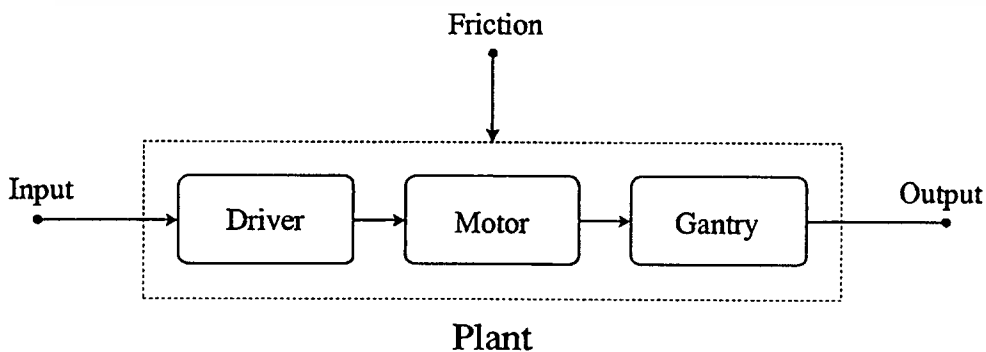
บทนำ

จากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแท่นหมุนในบทที่แล้วประกอบด้วย ฟังก์ชันที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นของแรงเสียดทาน จะถูกนำเข้าสู่ขบวนการทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบควบคุม สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบระบบควบคุมแบบปรับค่าพารามิเตอร์อัตโนมัติ และสามารถชดเชยฟังก์ชันที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมีประสิทธิภาพ

การออกแบบระบบควบคุมแบบปรับค่าพารามิเตอร์

จากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแท่นหมุนในบทที่ผ่านมาในขั้นตอนต่างๆ ได้มีการวิเคราะห์ฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นของแรงเสียดทานเข้ามาด้วย เหตุผลที่ต้องนำเอาส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้นของแรงเสียดทานเข้ามาวิเคราะห์ด้วยนั้นทั้งนี้ก็เพราะว่าแรงเสียดทานมีผลโดยตรง

ภาพที่ 27



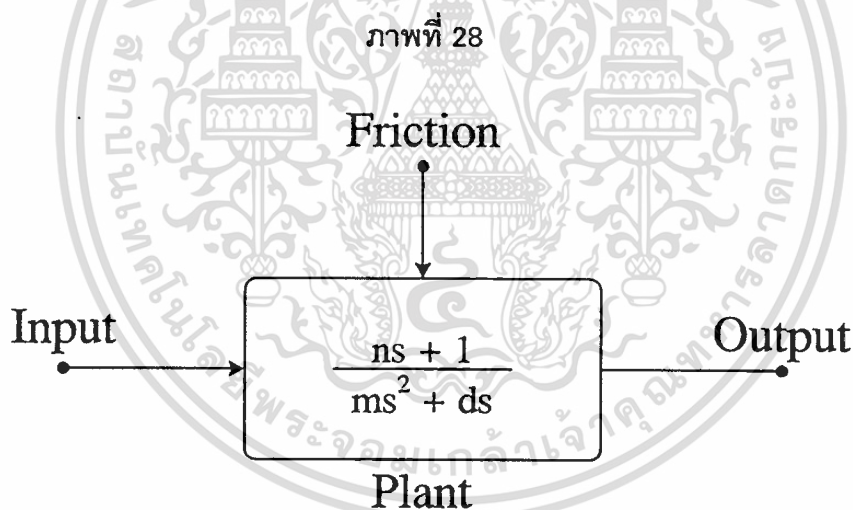
แสดงส่วนประกอบของระบบแท่นหมุนที่มีแรงเสียดทานเข้ามารบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับความเร็ว และเนื่องจากเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวางเป็นเครื่องมือแพทย์ที่ต้องอาศัยความเร็วที่คงที่ในขณะที่ทำการถ่ายภาพตัดขวางของวัตถุ เพื่อป้องกันความผิดพลาดของข้อมูลที่จะนำมาสร้างภาพตัดขวาง ในส่วนของการออกแบบระบบควบคุมจะต้องคำนึงถึงส่วนที่จะชดเชยส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้นของแรงเสียดทานด้วย ฉะนั้นการออกแบบระบบควบคุมให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพนั้นจะต้องนำเอาส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้นเข้ามาใช้ในการออกแบบ นั่นหมายความว่าชุดควบคุมที่ได้จากการออกแบบจะต้องมีการชดเชยส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้นของแรงเสียดทานได้อย่างเพียงพอ จากการกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแท่นหมุนในหัวข้อเรื่องการกำหนดแบบจำลองในบทที่ 5 เท่ากับ

$$m\ddot{x} + d\dot{x} = n\dot{u} + u + f \quad (6.1)$$

จากสมการที่ 6.1 สามารถเขียนให้อยู่รูปของฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังแสดงในภาพที่ 28



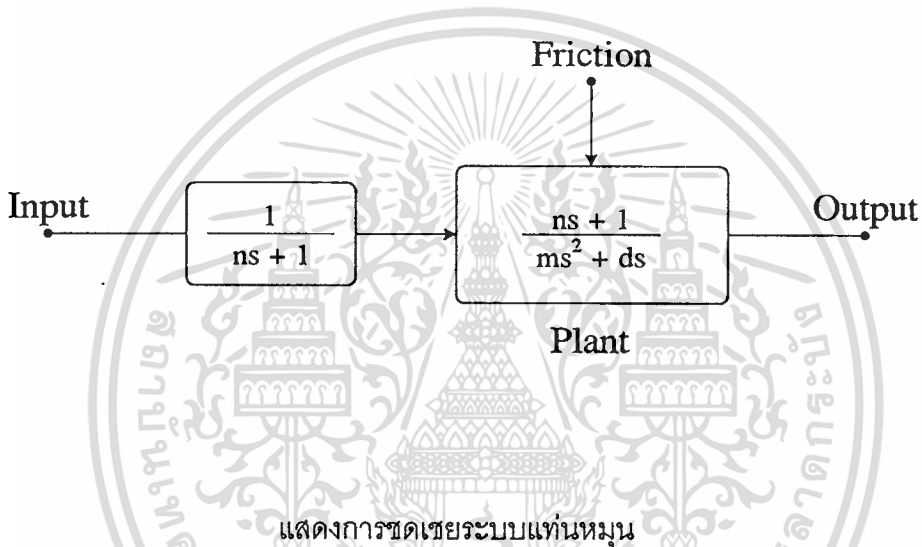
แสดงฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบแท่นหมุนที่มีแรงเสียดทานเข้ามาบวกวน

พิจารณาในภาพที่ 28 จะสังเกตเห็นว่าฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวที่นำมาใช้ในการออกแบบระบบควบคุมแบบปรับค่าพารามิเตอร์นั้น พบว่าค่าอัตราการขยายของวงจรถับมอเตอร์ (m) จะทำให้ขั้นตอนการออกแบบระบบควบคุมมีความยุ่งยากและซับซ้อนมากขึ้น เพราะฉะนั้นเพื่อลดปัญหาความยุ่งยากต่าง ๆ ในการออกแบบจึงมีแนวความคิดที่จะลดตัวแปร (m) นั้นออกไป โดยการออกแบบชุดชดเชย(Compensate) อัตราการขยายของวงจรถับมอเตอร์ ทั้งนี้ก็เพราะว่าอัตราการขยายของวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จรรยาบรรณเป็นอัตราขยายแบบสแตติก(ไม่มีการเปลี่ยนแปลง) ส่วนการออกแบบชุดชดเชย จะกระทำได้ง่ายโดยการออกแบบวงจรรอง (Filter) ที่มีโพลเป็นส่วนกลับของซีโร่ ซึ่งเท่ากับ $-1/n$ หรืออีกนัยหนึ่งคือเปลี่ยนลักษณะการทำงานจากซีโร่เป็นการทำงานแบบโพลดังแสดงไว้ในภาพที่ 29 แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถชดเชยได้เกือบทั้งหมด เพราะว่าอัตราขยายดังกล่าวไม่ค่อยมีผล ต่อความเร็วในช่วงที่ Steady State หรือในช่วงที่มีการถ่ายภาพตัดขวาง อีกทั้งยังสามารถที่จะชดเชยได้ทางซอฟต์แวร์เนื่องจากมีความเป็นเชิงเส้นของตัวแปรทำให้ลดความสนใจลงได้

ภาพที่ 29



หลังจากทำการชดเชยอัตราขยายของวงจรรับมือเตรียมเรียบร้อยแล้วสามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนใหม่ดังนี้

$$m\ddot{x} + d\dot{x} = u + f \quad (6.2)$$

จากสมการที่ 6.2 จะเห็นว่าจากการลดตัวแปรลงทำให้ง่ายต่อการออกแบบระบบควบคุม ฉะนั้นการออกแบบจะดำเนินตามขั้นตอนในหัวข้อเรื่องการออกแบบระบบควบคุมที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 คือ

1. หาแบบทางคณิตศาสตร์ของระบบแทนหมุน
2. กำหนดสัญญาณควบคุม
3. กำหนดโครงสร้างและเลือกค่าอัตราขยายของระบบควบคุม

สำหรับการออกแบบระบบควบคุมแบบปรับค่าพารามิเตอร์ ระบบแทนหมุนมีฟังก์ชันถ่ายโอนหลังจากการใส่ชุดชดเชยเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m\ddot{x} + d\dot{x} = u + f \quad (6.3)$$

โดยที่

m คือมวล

d คืออัตราการหน่วง

f คือแรงเสียดทาน

x คือตำแหน่ง (Position)

u คือสัญญาณควบคุม

กำหนดสัญญาณควบคุมที่สามารถชดเชยการทำงานให้กับระบบแทนหมุนให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

$$u = \hat{m}(\ddot{x}_d + k_0 e + k_1 \dot{e}) + \hat{d}\dot{x}_d - \hat{f} \quad (6.4)$$

จากสมการที่ 6.4 เสถียรภาพขึ้นอยู่กับค่า k_0 และ k_1 ของสัญญาณควบคุม โดยในขั้นตอนนี้ได้ทำการแยกระบบควบคุมออกเป็น 2 ส่วนคือชุดควบคุมแบบปรับค่าพารามิเตอร์ และชุดควบคุมแบบค่าพารามิเตอร์คงที่ ซึ่ง k_0 และ k_1 เป็นค่าพารามิเตอร์ของชุดควบคุมแบบคงที่ และเป็นตัวแปรที่จะส่งผลให้สัญญาณผิดพลาดเข้าสู่ศูนย์

กำหนดให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแทนหมุนเท่ากับ

$$\hat{m}\ddot{x} + \hat{d}\dot{x} - \hat{f} = y\hat{p} \quad (6.5)$$

โดยที่

$$\hat{p} = \begin{bmatrix} \hat{m} \\ \hat{d} \\ \hat{f} \end{bmatrix}, \quad y = [\ddot{x} \quad \dot{x} \quad -1] \quad (6.6)$$

แทนสมการที่ 6.4 ลงในสมการที่ 6.3

$$m\ddot{x} + d\dot{x} = \hat{m}(\ddot{x}_d + k_0 e + k_1 \dot{e}) + \hat{d}\dot{x}_d + f - \hat{f} \quad (6.7)$$

จากนั้นนำ $\pm(\hat{m}\ddot{x} + \hat{d}\dot{x})$ ลงในสมการที่ 6.7 จะได้สมการที่ 6.8 และสามารถจัดรูปได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\hat{m}(\ddot{e} + k_1\dot{e} + k_0e) + \hat{d}\dot{e} = \tilde{m}\ddot{x} + \tilde{d}\dot{x} - \tilde{f} \quad (6.8)$$

โดยที่

$$\tilde{m} = \hat{m} - m, \quad \tilde{d} = \hat{d} - d, \quad \tilde{f} = \hat{f} - f, \quad \tilde{p} = \hat{p} - p$$

จากสมการที่ 6.8 สามารถจัดรูปใหม่ได้ว่า

$$\begin{aligned} \ddot{e} + (k_1 + \hat{d})\dot{e} + k_0e &= \tilde{m}^{-1}y\tilde{p} \\ &= \Phi\tilde{p} \end{aligned} \quad (6.9)$$

จากสมการที่ 6.9 ในเทอมของ \tilde{m}^{-1} ไม่เท่ากับศูนย์ตลอดทุกองศาของการหมุนเนื่องจากหลอดกำเนิดรังสีและชุดรับรังสีมีน้ำหนักไม่เท่ากันและถูกติดตั้งในทิศทางตรงกันข้าม จากนั้นนำเอาสมการที่ 6.9 เขียนให้อยู่ในรูปของสมการสถานะ (state equation) ได้ว่า

$$\dot{x} = Ax + B\Phi\tilde{p} \quad (6.10)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_0 & -(k_1 + \hat{d}) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \hat{m} \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix}$$

สำหรับการหาค่า k_0 และ k_1 ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ของระบบควบคุมแบบคงที่ ฉะนั้นในการหาค่าจะใช้วิธีการของการออกแบบระบบควบคุมแบบออปติมัล[9] โดยกำหนดให้เมตริกซ์ Q และ R เท่ากับ

$$Q = \begin{bmatrix} 0.01 & 0 \\ 0 & 1e-9 \end{bmatrix}, \quad R = 1$$

ผลเฉลยจากการแก้สมการโดยใช้วิธี[9] ค่า k_0 , k_1 และเมตริกซ์ P เท่ากับ

$$k_0 = 0.1, \quad k_1 = 0.002 \quad \text{และ} \quad P = \begin{bmatrix} 0.3037 & 0.0045 \\ 0.0045 & 0.0001 \end{bmatrix}$$

จากนั้นนำค่าในสมการที่ 6.10 มาประมวลผลทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบของฟังก์ชันลียาปูนอฟ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของชุดควบคุมแบบปรับค่าได้
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V = x^T P x + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \tilde{p} \quad (6.11)$$

จากนั้นหาสมการผลต่างในสมการที่ 6.11 เทียบกับเวลา

$$\begin{aligned} \dot{V} &= x^T A^T P x + u^T B^T P x + x^T P A x + x^T P B \Phi + 2P^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} \\ &= x^T A^T P x + x^T P A x + 2P^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} + 2P^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} \\ &= x^T (A^T P + P A) x + 2\tilde{p}^T \Phi^T B^T P x + 2P^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} \end{aligned}$$

$$\therefore \dot{V} = -x^T Q x + 2\tilde{p}^T [\Phi^T B^T P x + \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}}] \quad (6.12)$$

จะได้ว่า ถ้าให้เมตริกซ์ \tilde{p} ได้เท่ากับ

$$\dot{\tilde{p}} = -\Gamma \Phi^T B^T P x \quad (6.13)$$

ส่งผลให้

$$\dot{V} = -x^T Q x$$

นั่นคือ สามารถทำให้ระบบเข้าสู่เสถียรภาพได้ตามต้องการ
กำหนดให้

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \gamma_0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_1 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_2 \end{bmatrix}$$

เพราะฉะนั้นจะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{m}} \\ \dot{\tilde{d}} \\ \dot{\tilde{f}} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \gamma_0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_1 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \dot{x} \\ -1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\tilde{m}} \begin{bmatrix} 0.3037 & 0.0045 \\ 0.0045 & 0.0001 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

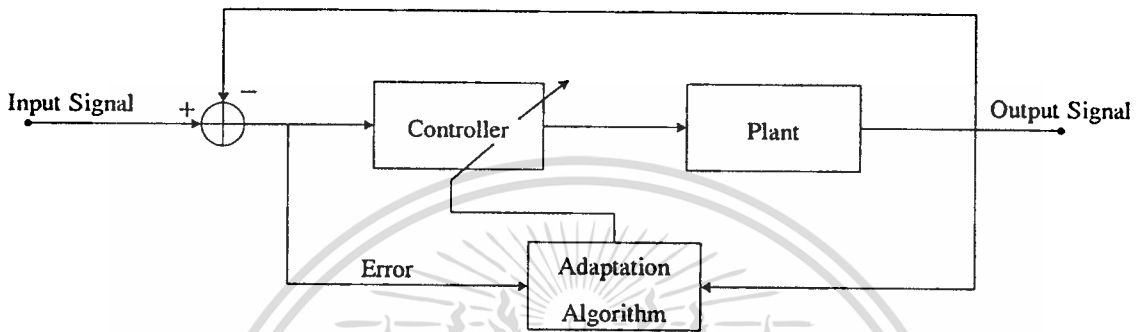
จากสมการที่ 6.14 แทน adaptation gain เท่ากับ

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{m}} &= -\gamma_0 \ddot{x} (0.0045e + 0.0001\dot{e}) \\ \dot{\tilde{d}} &= -\gamma_1 \dot{x} (0.0045e + 0.0001\dot{e}) \\ \dot{\tilde{f}}_p &= -\gamma_2 (0.0045e + 0.0001\dot{e}) \cdot \eta \\ \dot{\tilde{f}}_n &= -\gamma_2 (0.0045e + 0.0001\dot{e}) \cdot (1 - \eta) \end{aligned} \quad (6.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 6,15 ค่า γ_0 , γ_1 และ γ_2 เป็นเสมือนปรับความเร็วให้ระบบควบคุมลู่เข้าสู่ศูนย์เร็วขึ้น ในการทดลองเลือกใช้ 0.00015, 0.00001 และ 0.025 ซึ่งจะนำไปสู่การปรับค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมได้อย่างอัตโนมัติ ดังในภาพที่ 30 แสดงระบบควบคุมแบบปรับค่าพารามิเตอร์ได้

ภาพที่ 30



แสดงระบบควบคุมที่ใช้ในเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวาง

สรุป

การออกแบบระบบควบคุมแบบปรับค่าพารามิเตอร์ให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ หมายความว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมได้ทั้งตำแหน่งและความเร็วได้ แต่เนื่องจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ได้ติดตั้งลงบนแกนที่มีน้ำหนักมากและในแต่ละจุดมีค่าไม่เท่ากัน ทำให้ช่วงของการหมุนมีแรงเสียดทานไม่เท่ากัน ฉะนั้นขั้นตอนการออกแบบระบบควบคุมในแบบนี้จะต้องสามารถชดเชยความเร็วที่ถูกรบกวนลงได้ จากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแทนหมุนที่มีฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นของแรงเสียดทานเข้ามาเกี่ยวข้องนั้น การออกแบบจะมีการชดเชยส่วนที่เป็นฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นของแรงเสียดทานได้โดยการใช้ทฤษฎีลีอาพูนอฟ

บทที่ 7

การทดลองและผลการทดลอง

บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบระบบควบคุมแท่นหมุนเครื่องถ่ายภาพตัดขวาง โดยในส่วนของกรหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะแสดงให้เห็นถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทั้งแบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น ในขณะที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ถ่ายภาพตัดขวางและไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ และในส่วนของทดลองการออกแบบระบบควบคุมแท่นหมุน มีขั้นตอนการออกแบบคือนำค่าพารามิเตอร์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มาใช้ในการออกแบบ จากนั้นทำการทดสอบอัลกอริทึมในคอมพิวเตอร์ และนำผลตอบสนองที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลตอบสนองจากการใช้งานจริง

ผลการทดลองหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแท่นหมุน

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีลำดับขั้นตอนการทดลองคือเลือกสัญญาณอินพุตที่สามารถกระตุ้นให้ระบบแท่นหมุนตอบสนองส่วนที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นออกมาให้มากที่สุด เพื่อที่จะได้ข้อมูลที่ใช้เพื่อทำการหาสมการสมมุติของระบบ เพราะฉะนั้นการเลือกสัญญาณอินพุตจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ซึ่งในการทดลองเลือกใช้สัญญาณอินพุตดังนี้

1. $\sin(0.25t)$
2. $\sin(0.25t) + \sin(0.5t) + \sin(t)$

ขั้นตอนต่อไปคือป้อนสัญญาณดังกล่าวเข้าไปที่ระบบแท่นหมุนและทำการเก็บผลตอบสนองของระบบแท่นหมุนจากการใช้สัญญาณอินพุตต่าง ๆ (ช่วงเวลาในการเก็บที่เวลาเดียวกันและช่วงเวลาในการสุ่มคงที่) จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยใช้ขบวนการทางคณิต

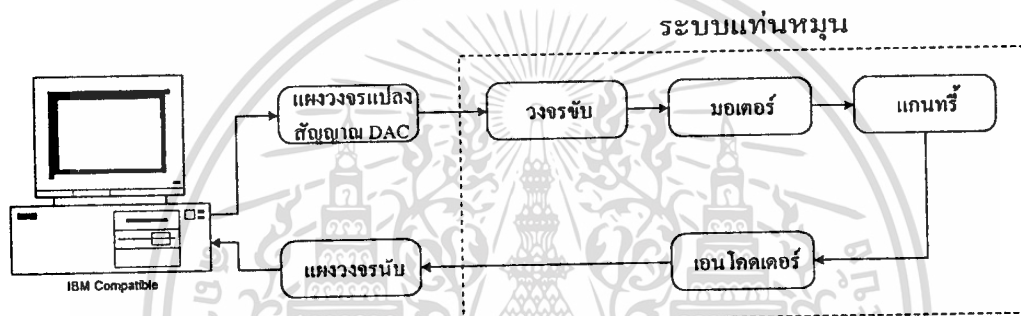
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศาสตร์ที่เรียกว่าการประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยสุดดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว

- อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. คอมพิวเตอร์
2. แผงวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล
3. แผงวงจรรับสัญญาณจากแอนโคเดอร์
4. ระบบแท่นหมุน
5. โปรแกรมที่ใช้ทดลอง (ดูในรายละเอียดภาคผนวก ก)

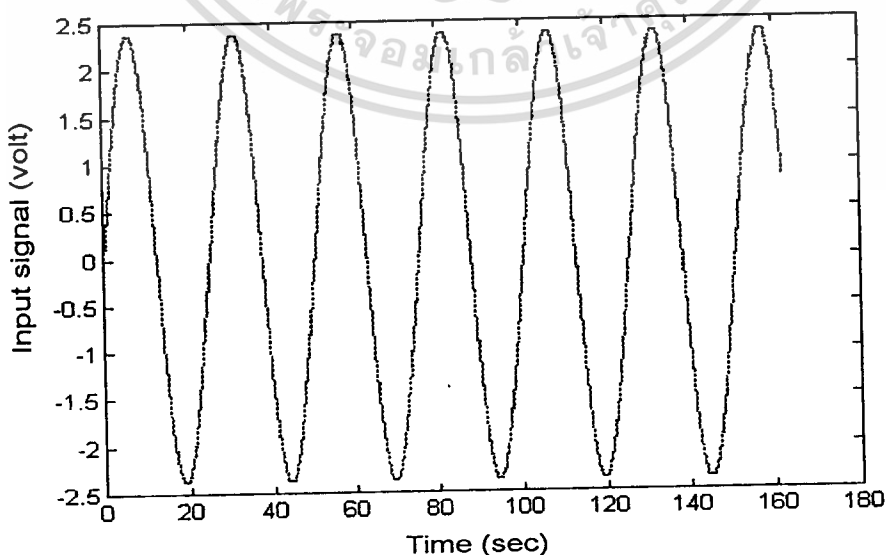
ภาพที่ 31



แสดงบล็อกไดอะแกรมขั้นตอนการทดลองหาแบบจำลอง

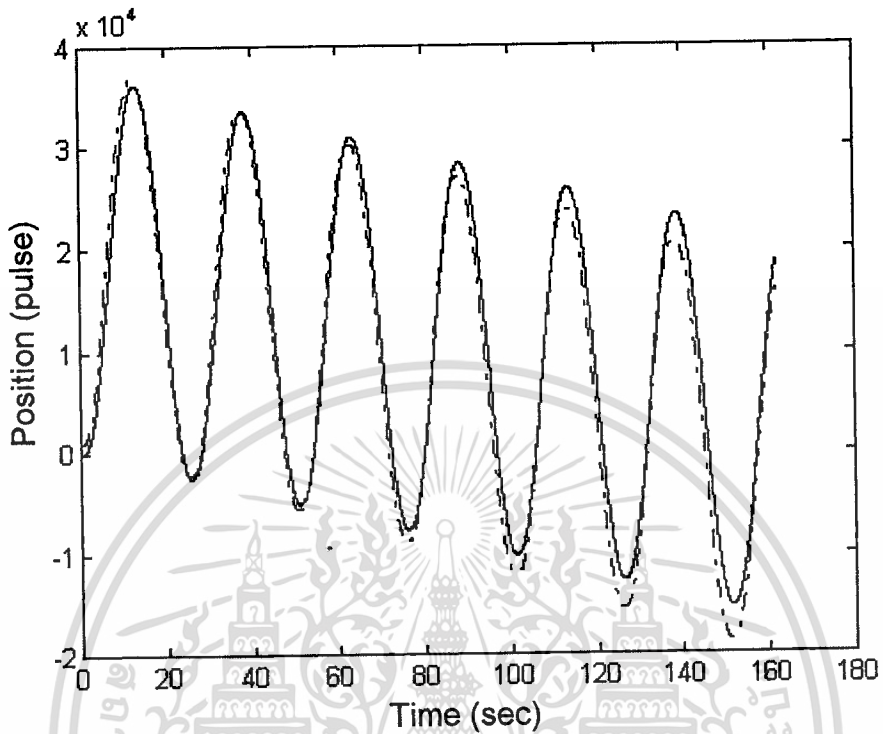
การทดลองใช้สัญญาณอินพุตเท่ากับ $\sin(0.25t)$

ภาพที่ 32



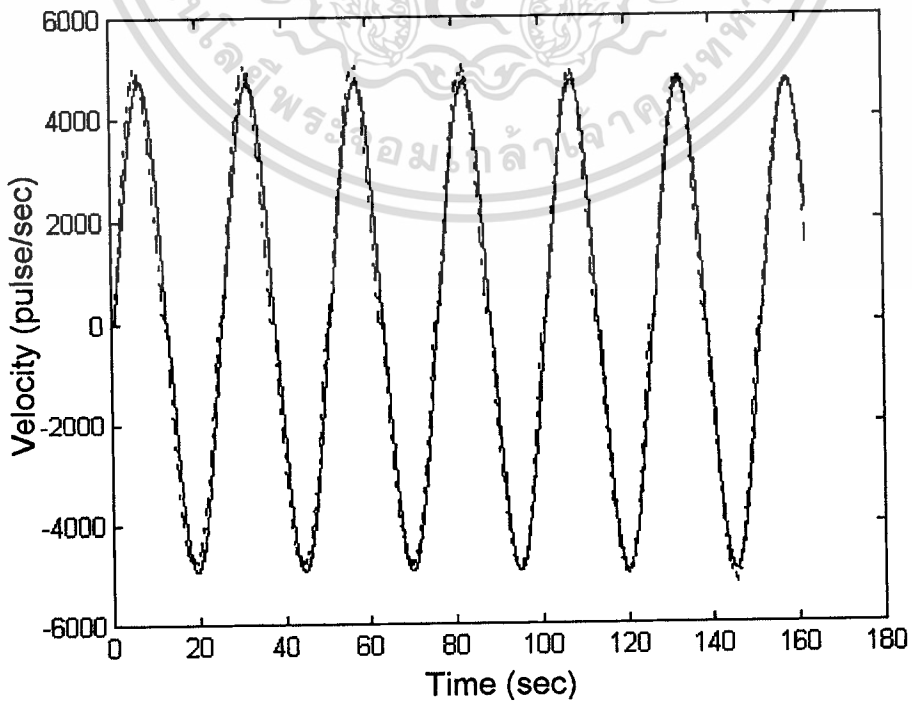
แสดงสัญญาณอินพุต $\sin(0.25t)$

ภาพที่ 33



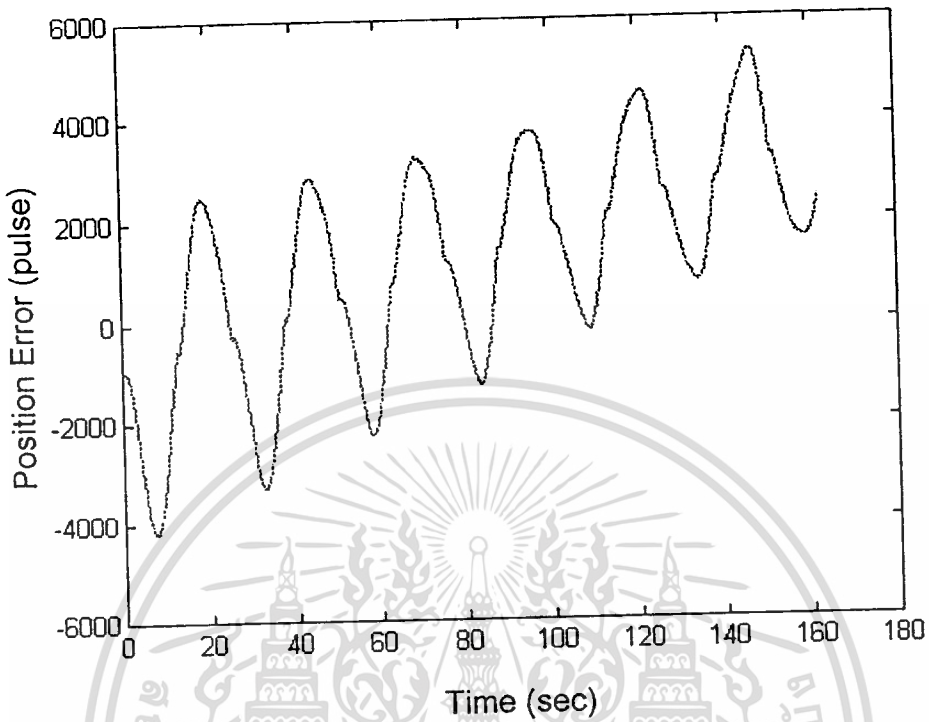
เปรียบเทียบผลตอบสนองตำแหน่งของระบบแทนหมุน(สีแดง)กับแบบจำลอง(สีเขียว)

ภาพที่ 34



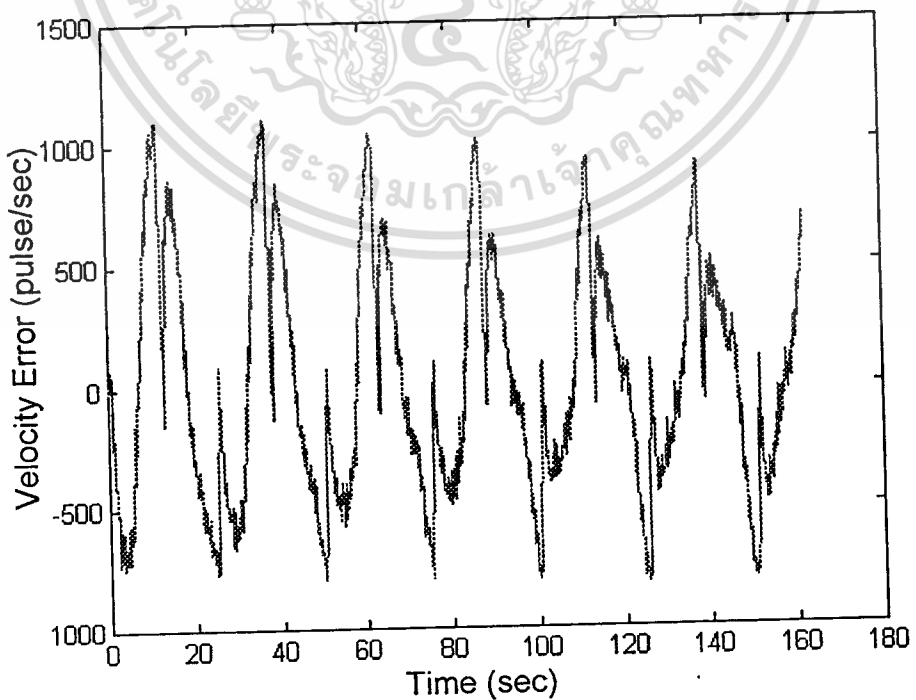
เอกสารนี้เป็นเปรียบเทียบผลตอบสนองความเร็วของระบบแทนหมุน(สีแดง)กับแบบจำลอง(สีเขียว)
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 35



แสดงค่าผิดพลาดของตำแหน่งระบบแทนหมุ่นกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ภาพที่ 36



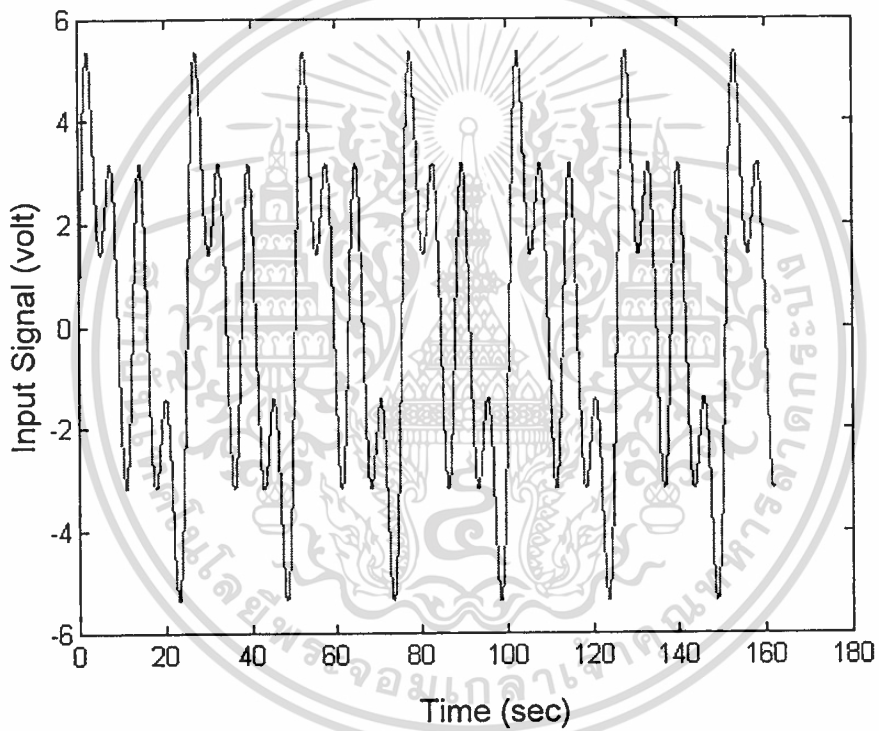
แสดงค่าผิดพลาดความเร็วของระบบแทนหมุ่นกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองใช้สัญญาณอินพุตเท่ากับ $\sin(0.25t) + \sin(0.5t) + \sin(t)$

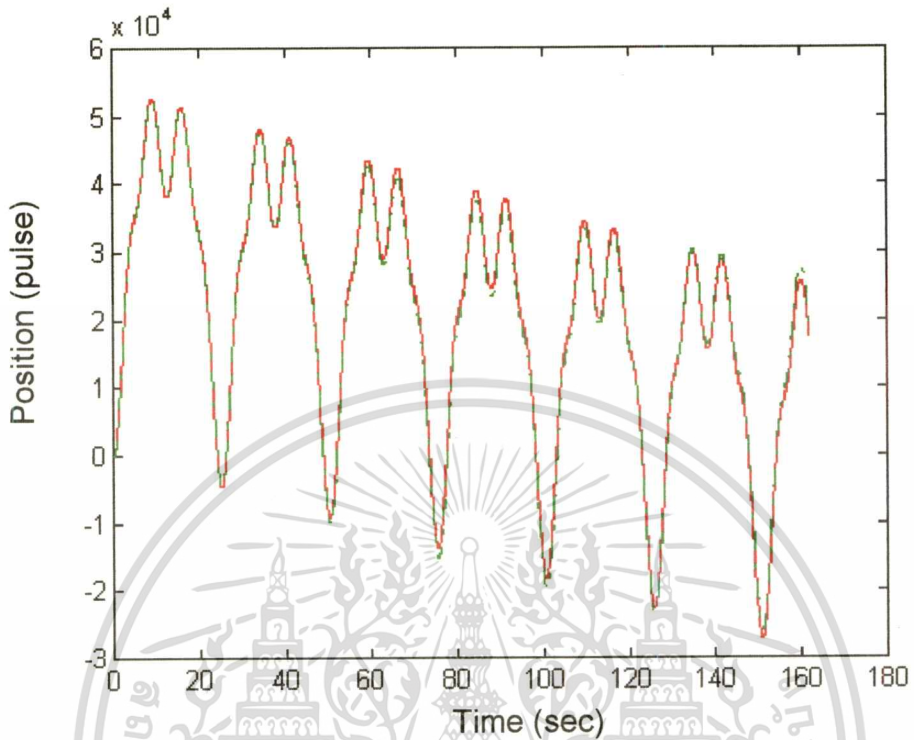
ภาพที่ 37



แสดงสัญญาณ $\sin(0.25t) + \sin(0.5t) + \sin(t)$

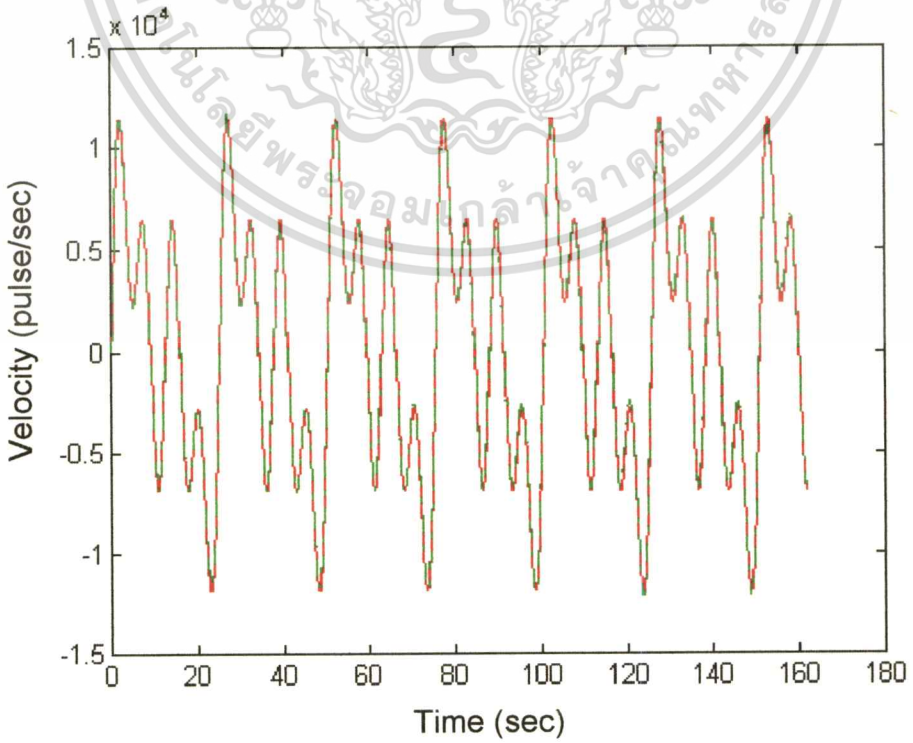
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 38



เปรียบเทียบผลตอบสนองตำแหน่งของระบบแทนหมุน(สีแดง)กับแบบจำลอง(สีเขียว)

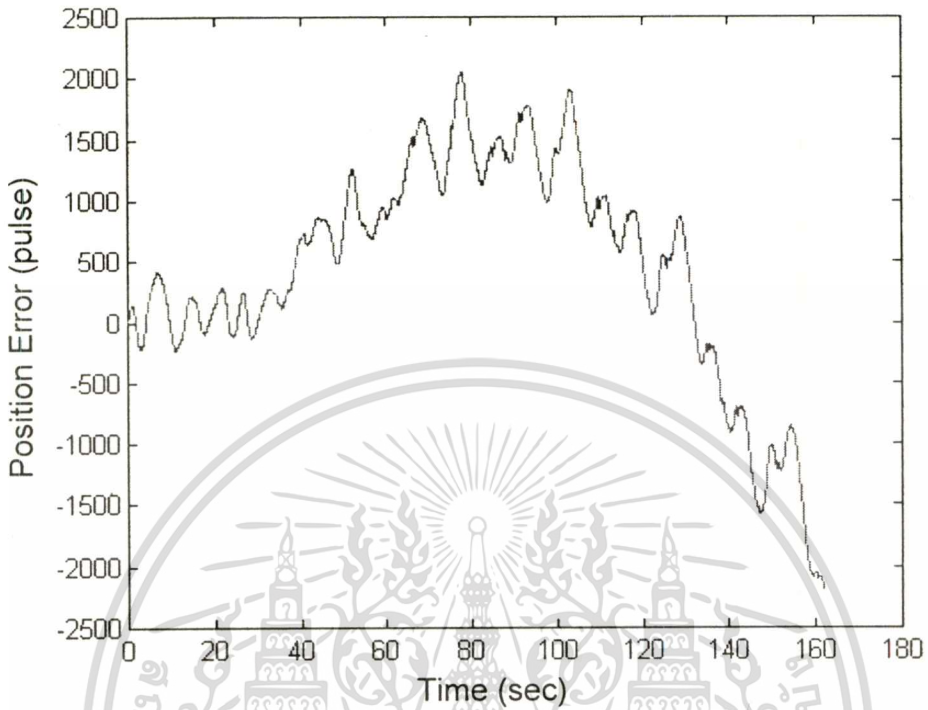
ภาพที่ 39



เปรียบเทียบผลตอบสนองความเร็วของระบบแทนหมุน(สีแดง)กับแบบจำลอง(สีเขียว)

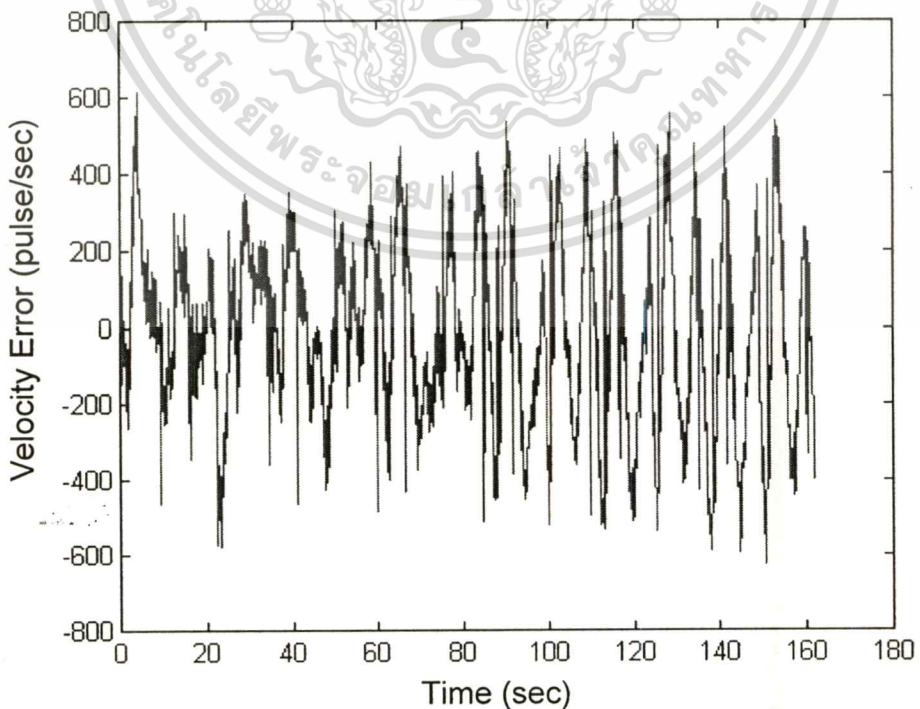
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ใต้เห็นไปเซอริจะใช้นานการค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 40



แสดงค่าผิดพลาดตำแหน่งของระบบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ภาพที่ 41



แสดงค่าผิดพลาดความเร็วของระบบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1

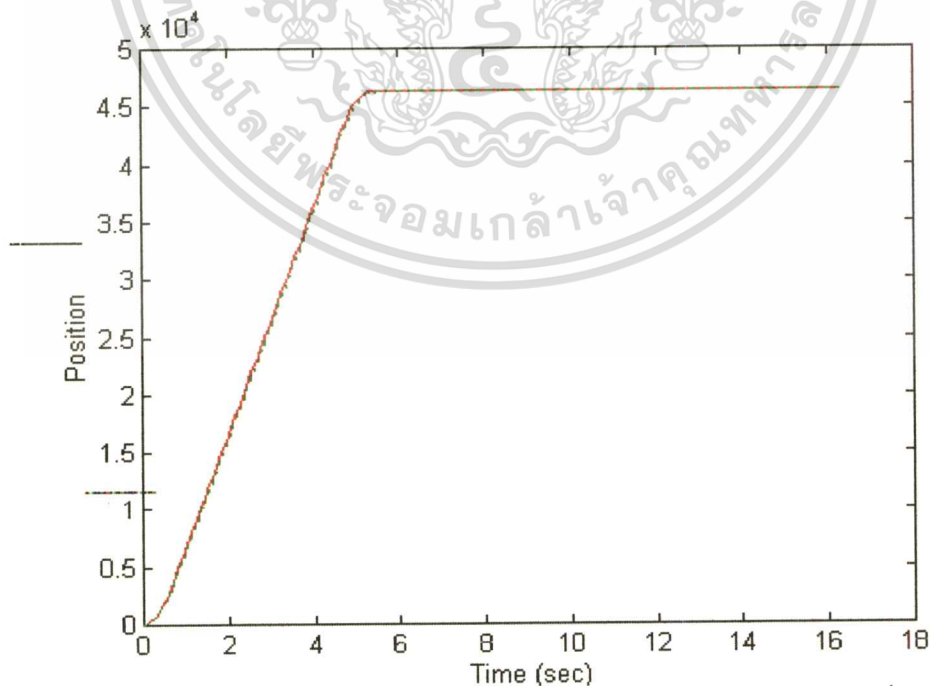
สัญญาณอินพุต	m	d	n	fcp	fcn
1 ความถี่	327e-6	448e-6	0.219	-0.2169	0.1153
3 ความถี่	45.2e-6	429e-6	0.176	-0.3487	0.1894

แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองที่สัญญาณอินพุตต่าง ๆ

ผลการทดลองระบบควบคุม

จากขั้นตอนการออกแบบและหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบควบคุมที่กล่าวไว้ในบทที่ 6 และได้ทำการจำลองการทำงานของระบบควบคุมแบบ PD (หรือชุดควบคุมแบบคงที่ในระบบควบคุมแบบปรับค่าพารามิเตอร์) ในคอมพิวเตอร์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดมาใช้ในการทดลองในระบบควบคุมแท่นหมุน จากนั้นได้ทดลองระบบควบคุมแบบ PD กับระบบแท่นหมุน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการควบคุมตำแหน่งและความเร็วของระบบควบคุมทั้งสอง โดยอุปกรณ์ส่วนใหญ่ที่ใช้จะคล้ายกับการทดลองหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ภาพที่ 42



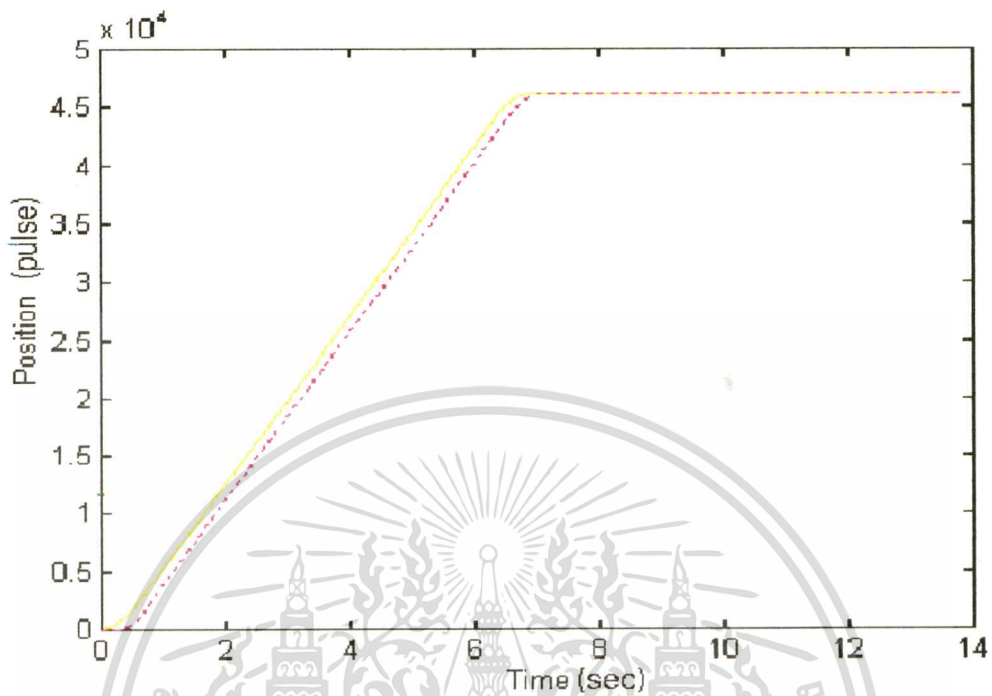
แสดงจำลองผลตอบสนองตำแหน่งของระบบควบคุมแบบ PD กับเส้นทางที่กำหนด

- เส้นทึบแทนเส้นทางที่กำหนด (สีส้ม) - เส้นประแทนระบบควบคุมแบบ PD (สีเขียว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

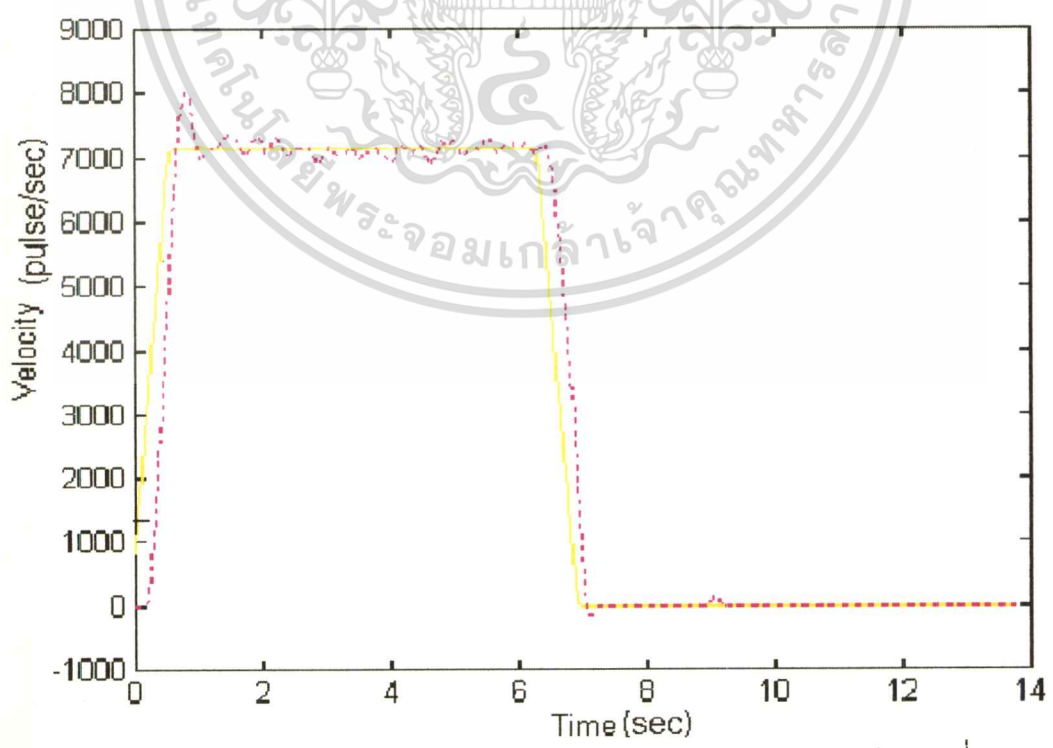
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 43



แสดงผลตอบสนองตำแหน่งของระบบควบคุมแบบปรับค่าพารามิเตอร์กับเส้นทางที่กำหนด
 - เส้นทึบแทนเส้นทางที่กำหนด (สีเหลือง) - เส้นประแทนระบบแทนหมุน (สีม่วง)

ภาพที่ 44

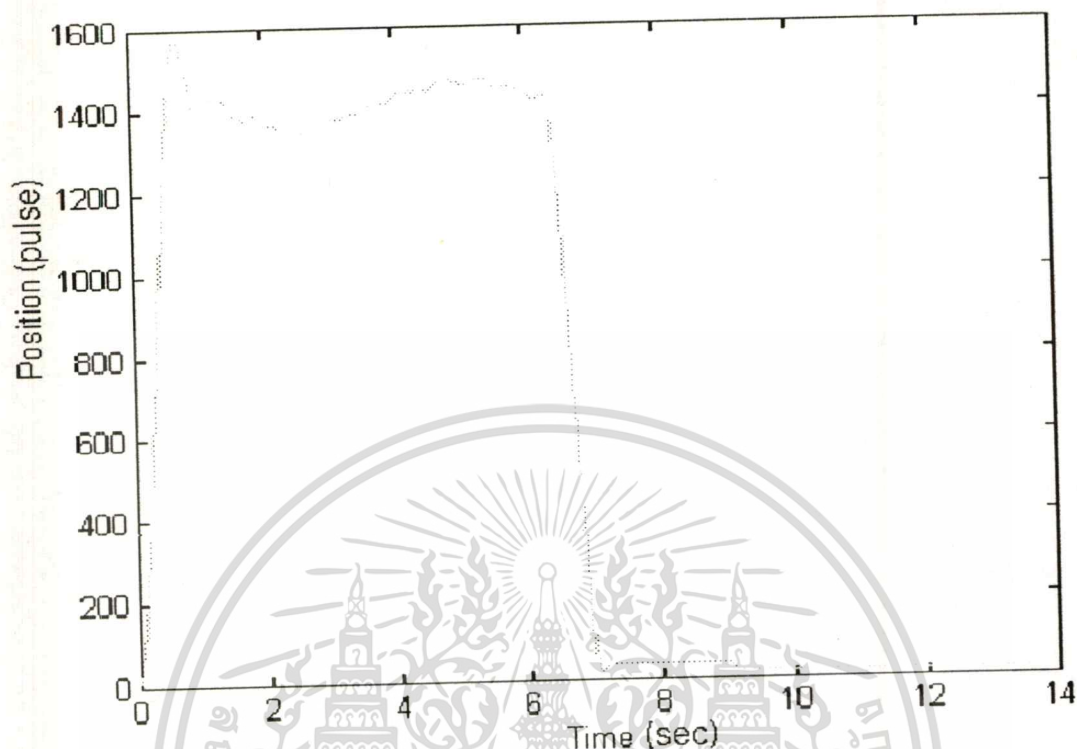


แสดงผลตอบสนองความเร็วของระบบควบคุมแบบปรับค่าพารามิเตอร์กับเส้นทางที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเส้นทึบแทนเส้นทางที่กำหนด (สีเหลือง) ศึกษาคำ - เส้นประแทนระบบแทนหมุน (สีม่วง) การค้า

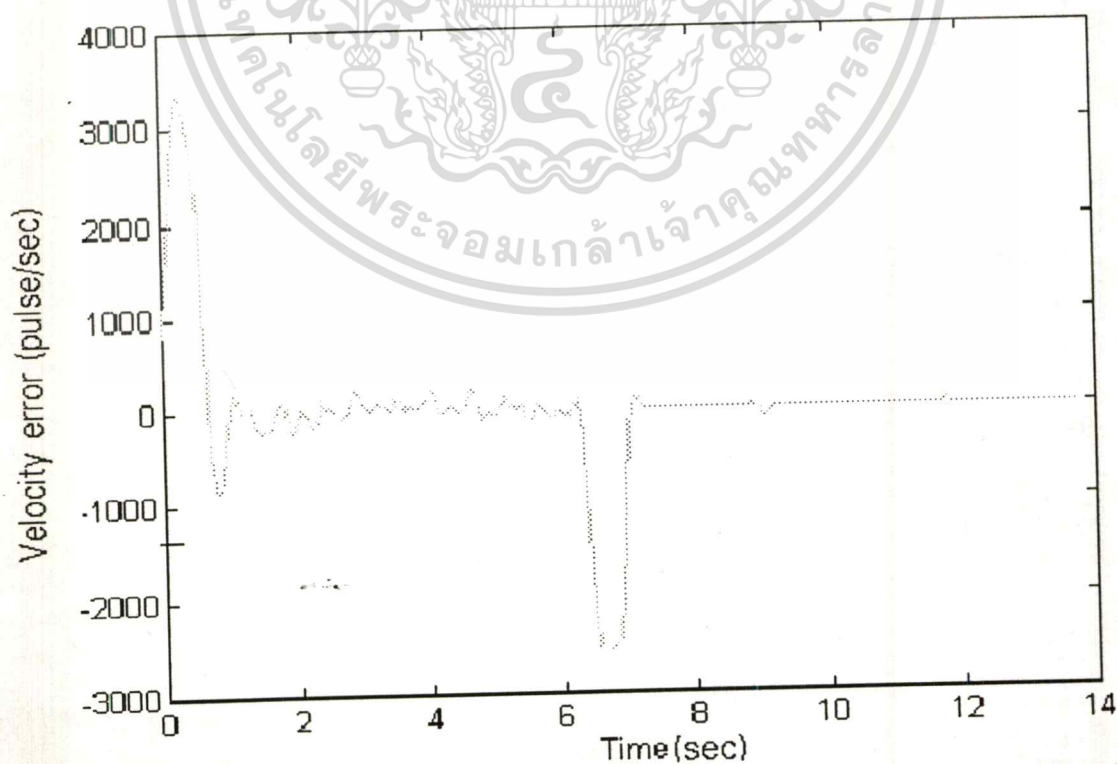
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 45



แสดงค่าผิดพลาดตำแหน่งระหว่างเส้นทางเดินที่กำหนดกับระบบควบคุมแบบปรับค่าพารามิเตอร์

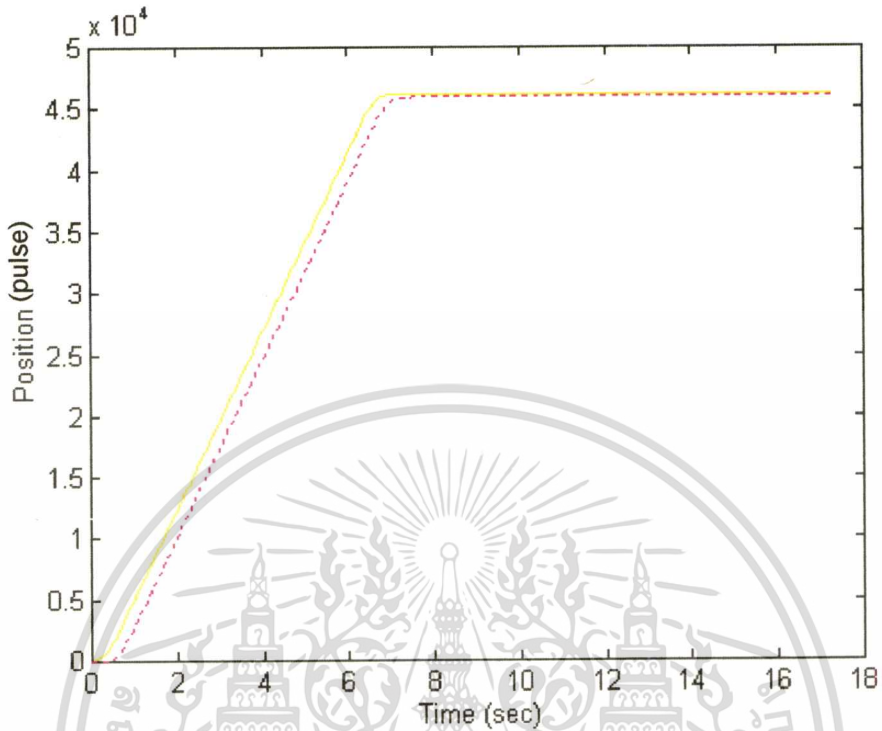
ภาพที่ 46



แสดงค่าผิดพลาดความเร็วระหว่างเส้นทางเดินที่กำหนดกับระบบควบคุมแบบปรับค่าพารามิเตอร์
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

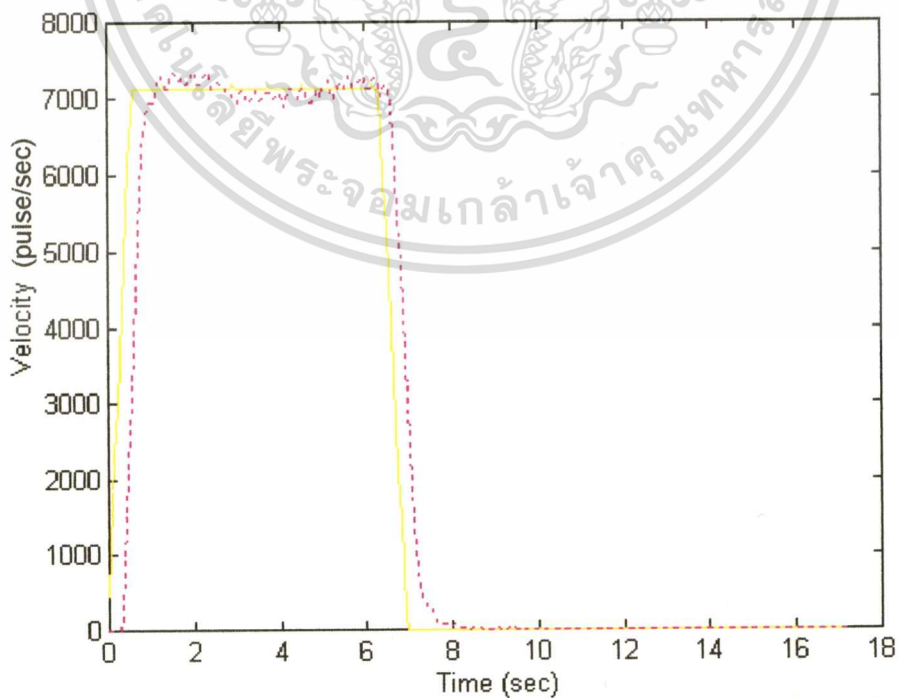
ภาพที่ 47



แสดงผลตอบสนองตำแหน่งของระบบควบคุมตำแหน่งแบบ PD กับเส้นทางที่กำหนด

- เส้นทึบแทนเส้นทางที่กำหนด (สีเหลือง) - เส้นประแทนระบบตำแหน่ง (สีม่วง)

ภาพที่ 48



แสดงผลตอบสนองความเร็วของระบบควบคุมตำแหน่งแบบ PD กับเส้นทางที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเส้นทึบแทนเส้นทางที่กำหนด (สีเหลือง) ปรึกษาที่เส้นประแทนระบบตำแหน่ง (สีม่วง) การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

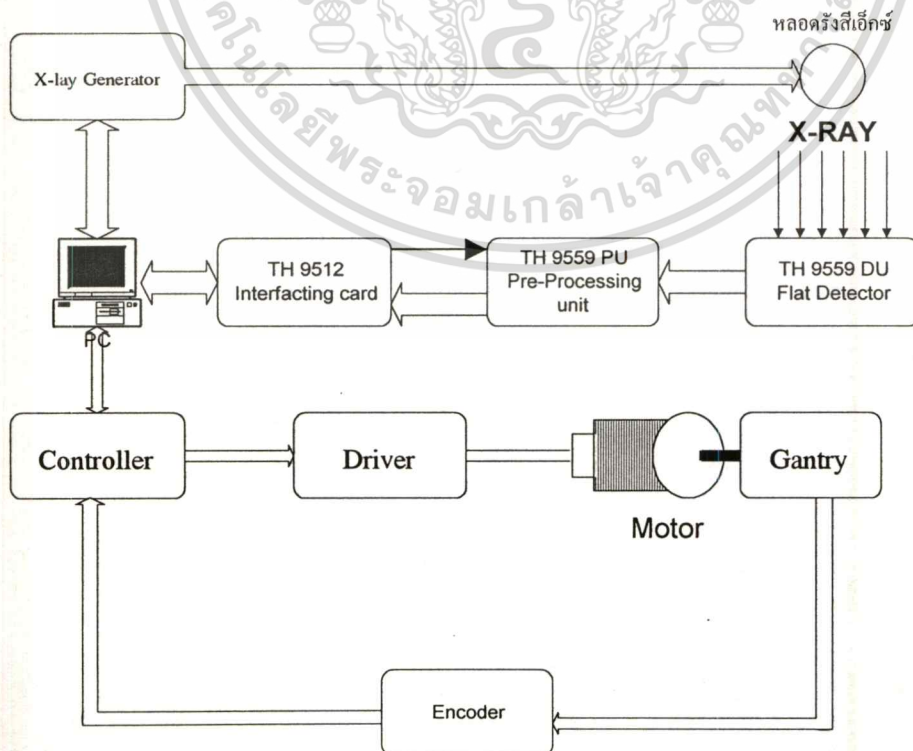
ผลการทดลองระบบควบคุมทำงานร่วมกับระบบเอ็กซ์เรย์

จากการออกแบบระบบควบคุมแทนหมุนที่ส่งผลให้การหมุนของวงล้อเหล็กเป็นไปตามที่ ต้องการ ซึ่งนั่นหมายความว่าระบบควบคุมที่ได้ทำการออกแบบสามารถควบคุมได้ทั้งตำแหน่งและ ความเร็วได้ จากนั้นได้ทำการนำเอาระบบควบคุมและระบบเอ็กซ์เรย์มาทำงานร่วมกัน โดยคุณ ลักษณะของการทำงานร่วมกันดังนี้

1. ระบบควบคุมสามารถควบคุมตำแหน่งของการหมุนได้
2. ระบบควบคุมสามารถควบคุมการหมุนของวงล้อเหล็กได้ภายในเวลาน้อยสุด 6 วินาที ต่อ 1 รอบ
3. ระบบแทนหมุนสามารถหมุนได้ด้วยความเร็วคงที่
4. การเก็บข้อมูลของระบบเอ็กซ์เรย์สามารถเก็บข้อมูลได้ 360 โปเรเจคชั่น

จากนั้นได้ทำการทดลองการเก็บข้อมูลของระบบเอ็กซ์เรย์ในขณะที่มีการควบคุมการหมุน ของวงล้อเหล็กที่ได้ทำการติดตั้งระบบเอ็กซ์เรย์ไว้ในระบบแทนหมุนเรียบร้อยแล้ว โดยได้ทำการ ถ่ายภาพตัดขวางของศรีระฆังมนุษย์ที่เสียชีวิตแล้ว ทำขึ้นเพื่อทดสอบการเก็บข้อมูล และนำข้อมูลที่ ได้มาทำการสร้างภาพตัดขวางต่อไป

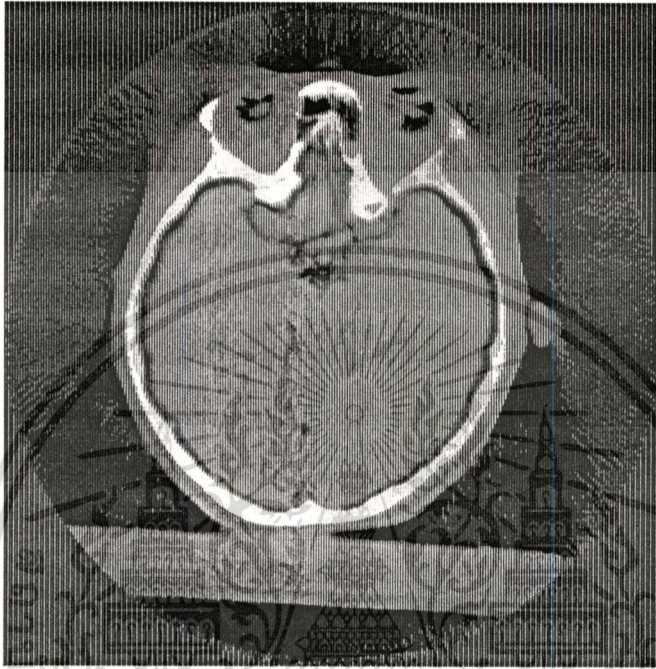
ภาพที่ 49



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงระบบควบคุมทำงานร่วมกับระบบเอ็กซ์เรย์

ภาพที่ 50



แสดงภาพตัดขวางของศรีษะมนุษย์ที่เสียชีวิตแล้ว

สรุป

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นของแรงเสียดทานสามารถประมาณแบบจำลองได้โดยใช้วิธีการประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยสุดได้ ซึ่งจากการทดลองจะพบว่าระบบพลวัตที่มีการเคลื่อนที่ที่สามารถประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการวิเคราะห์ทั้งแบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นได้และสามารถจำลองการทำงานได้คล้ายกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการวิเคราะห์เฉพาะส่วนที่เป็นเชิงเส้นอย่างเดียว แต่กระนั้นก็ขึ้นอยู่กับการเลือกสัญญาณอินพุตที่ทำให้ระบบแทนหมุนตอบสนองออกมาเพียงพอสำหรับการประมาณและจากการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากการใช้สัญญาณอินพุตที่มีลักษณะเป็นไซน์ 1 ความถี่และ 3 ความถี่จะพบว่าผลตอบสนองจากการใช้สัญญาณอินพุต 3 ความถี่มีความใกล้เคียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับระบบแทนหมุนมากกว่าใช้สัญญาณอินพุตที่ความถี่เดียว โดยเปรียบเทียบได้จากค่าผิดพลาด ซึ่งเป็นไปตามกฎของ Persistent Excitation[11][18]

หลังจากที่ได้ทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแทนหมุนเรียบร้อยแล้ว จากนั้นได้นำเอาผลของแบบจำลองมาใช้ในการออกแบบระบบควบคุมที่สามารถชดเชยส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้นของแรงเสียดทานที่มีผลต่อความเร็ว จากการหาค่าพารามิเตอร์ของชุดควบคุมแบบ PD แล้วนำพารามิเตอร์ดังกล่าวมาใช้ในชุดควบคุมแบบปรับค่าพารามิเตอร์นั้น จากผลการทดลองการควบคุมตำแหน่งและความเร็วของระบบควบคุมแบบ PD กับแบบปรับค่าพารามิเตอร์ได้นั้น จะสังเกตเห็นว่าการควบคุมตำแหน่งผลการทดลองสามารถควบคุมได้ แต่ในส่วนของความเร็วจะเห็นระบบควบคุมแบบ PD มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าระบบควบคุมแบบปรับค่าพารามิเตอร์ที่สามารถชดเชยส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้นของแรงเสียดทานแบบคูลอมป์ได้ แต่ทว่าในช่วงเริ่มต้นของการหมุนระบบควบคุมแบบนี้ต้องการเอาชนะผลของแรงเสียดทานแบบสแตติกจนทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นในช่วงเริ่มต้น และหลังจากนั้นก็ยังสามารถชดเชยให้ความเร็วมีความใกล้เคียงกับความเร็วที่กำหนดไว้ได้

บทที่ 8

สรุปและแนวทางในการพัฒนาต่อไป

บทนำ

สำหรับในบทนี้จะเป็นการสรุปและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแท่นหมุนเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวางและการออกแบบระบบควบคุมที่ได้นำเสนอไป รวมทั้งนำเสนอแนวทางการพัฒนาระบบเพื่อให้ได้ผลที่ได้จากการควบคุมดียิ่งขึ้น

สรุปผลการทดลองการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแท่นหมุน

จากการทดลองหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะพบว่าค่าพารามิเตอร์ของระบบแท่นหมุนเช่นค่ามวล, ค่าอัตราความหน่วง, และค่าแรงเสียดทานต่าง ๆ มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในขณะที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ถ่ายภาพตัดขวาง ซึ่งทำให้สังเกตได้ว่าขณะที่มีการเคลื่อนที่ของวงล้อเหล็กของระบบแท่นหมุน ค่าพารามิเตอร์ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ กันจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เกิดขึ้นทำให้แบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นไม่สามารถแทนระบบพลวัต (dynamics) ที่มีการเคลื่อนที่อย่างระบบแท่นหมุนได้ทั้งหมด ฉะนั้นระบบแท่นหมุนสามารถแทนได้ด้วยระบบแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นประกอบอยู่ด้วยกัน โดยในการหาค่าแบบจำลองดังกล่าวสามารถใช้วิธีการวิเคราะห์ที่เป็นเชิงเส้นได้โดยใช้วิธีการประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยสุดได้ ซึ่งผลที่ออกมาเป็นที่น่าพอใจสังเกตได้จากค่าผิดพลาดต่าง ๆ

สรุปผลการทดลองการออกแบบระบบควบคุมแท่นหมุน

การออกแบบระบบควบคุมแท่นหมุน ซึ่งได้ออกแบบเป็นแบบปรับค่าตัวเองได้ ซึ่งขั้นตอนการออกแบบจะนำเอาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแท่นหมุนที่ได้มาใช้ในการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้การกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่าทฤษฎีตรวจสอบเสถียรภาพของลึอาปูนอฟ ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ได้จากควบคุมเป็นที่น่าพอใจอย่างยิ่ง ทั้งนี้เนื่องมาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแทนหมุนที่ประกอบด้วยฟังก์ชันที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นสามารถแทนการทำงานของระบบแทนหมุนได้เกือบทั้งหมด ทำให้การออกแบบระบบควบคุมที่ได้มีการชดเชยส่วนที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นได้ ซึ่งส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ได้เป็นที่น่าพอใจ

แนวทางการพัฒนาระบบ

ในการพัฒนาคุณภาพและประสิทธิภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวางนั้น ส่วนควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบแทนหมุนก็มีส่วนสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่ากระบวนการในการสร้างภาพ ฉะนั้นแนวทางการพัฒนาระบบในส่วนที่มีการเคลื่อนที่มีดังนี้

1. ระบบแทนหมุน ควรออกแบบให้มีผลกระทบจากการติดตั้งอุปกรณ์ถ่ายภาพตัดขวางน้อยที่สุดซึ่งหมายความว่าควรต้องนำหนักให้ระบบแทนหมุนมีความสมดุลมากที่สุดในขณะที่มีการเคลื่อนที่หรือที่เรียกว่า การทำให้ไหลสมดุล (Load Balancing) ทั้งนี้ก็เพื่อที่จะลดความยุ่งยากในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ และยังเป็นการสะดวกในการออกแบบระบบควบคุมอีกด้วย

2. ระบบส่งกำลัง ควรออกแบบให้มีจุดที่ส่งกำลังต่าง ๆ ของระบบแทนหมุนให้น้อยที่สุด และส่วนที่มีการส่งกำลังผ่านสายพานนั้นควรมีอุปกรณ์ที่ช่วยปรับความตึงของสายพานได้ โดยปราศจากการสั่นไหว (slip) ระหว่างสายพานกับพูลเลย์ หรือวงล้อเหล็ก หรือควรออกแบบการส่งกำลังจากมอเตอร์ไปยังวงล้อเหล็กโดยตรง โดยใช้สายพานเพียง

3. ตัวตรวจจับตำแหน่ง ควรศึกษาเพื่อหาความเหมาะสมของความละเอียด (Resolution) ของตัวตรวจจับตำแหน่ง เพื่อลดปัญหาการเลื่อนล้ำของตำแหน่งที่ทำให้การอ่านข้อมูลจากชุดรับรังสีเกิดการผิดพลาดจากการอ่านค่าของตัวตรวจจับตำแหน่ง และเนื่องจากตัวตรวจจับตำแหน่งกับชุดอ่านค่าตำแหน่งจากตัวตรวจจับตำแหน่งอยู่ไกล ควรจะมีอุปกรณ์รับ-ส่งระหว่างอุปกรณ์ดังกล่าวเพื่อลดปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นได้

4. มอเตอร์ ควรศึกษาเพื่อหาความเร็วของมอเตอร์ที่สามารถส่งกำลังให้ระบบแทนหมุนหมุนครบรอบ 360 องศาโดยใช้เวลาน้อยที่สุด (จะต้องสัมพันธ์กับเวลาที่ชุดรับรังสีทำงานและเก็บข้อมูล)

บรรณานุกรม

- [1] Lennart Ljung, "System Identification :Theory for the User",Prentice Hall, Inc.. Englewood Cliffs, New Jersey 07632
- [2] Rolf Johansson, "System Modeling and Identification",Prentice-Hall, International Editions
- [3] ศ.ดร.ไพรัช ธัชยพงษ์, ดร.ยุทธพงษ์ รังสรรค์เสวี, ดร.สุธี ผู้เจริญชนะชัย, อัครินทร์ คุณกิตติ และ สมชาย เกียรติอารีกุล, "รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ การพัฒนาต้นแบบคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวางอวัยวะ (ระยะที่ 2)",สำนักวิจัยและบริการคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,พ.ศ. 2537
- [4] วิพันธ์ ปรีชาพานิช, "การวิเคราะห์ระบบควบคุมเวลาดีสครีต", คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,2537
- [5] วิพันธ์ ปรีชาพานิช,"การวิเคราะห์ระบบแนวใหม่", คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,2532
- [6] สมชาย เกียรติอารีกุล , "การประมวลผลข้อมูลโพรงเจตน์เพื่อการปรับปรุงภาพตัดขวางรังสีเอกซ์ " , วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาบัณฑิต ,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ,ปีการศึกษา 2538
- [7] อัครินทร์ คุณกิตติ , "การพัฒนาและสร้างอุปกรณ์ถ่ายภาพตัดขวาง" ,วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาบัณฑิต ,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ,ปีการศึกษา 2537
- [8] กวิน แหยมมัน, "การสร้างภาพตัดขวางโดยใช้หลอดขยายความสว่างของภาพรังสีเอกซ์ " ,วิทยา นิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตร์ มหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย ,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ,ปีการศึกษา 2531
- [9] อติศักดิ์ แข็งสาริกิจ, ดร.สุธี ผู้เจริญชนะชัย, ดร.ยุทธพงษ์ รังสรรค์เสวี, ศ.ดร.ไพรัช ธัชยพงษ์, "การ ออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งครดต้องถ่ายภาพตัดขวาง", การประชุมทางวิชาการวิศวกรรม ไฟฟ้า ครั้งที่ 17, ภาควิชา.วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนคร เหนดอ ,พ.ศ. 2537 ,หน้า 436-440
- [10] Katsuhiko Ogata,"Discrete-Time Control Systems",Prentice Hall,1987
- [11] K.J.Astrom ,B.Wittenmark , "Computer Controlled Systems",Prentice Hall,1984
- [12] Mark W.Spong, Vidyasagar, "Robot Dynamics and Control" ,John Wiley & Sons,1989

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] อติศักดิ์ แข็งสาริกิจ, ดร.สิทธิ ผู้เจริญชนะชัย, ศ.ดร.ไพรัช รัชชยพงษ์, “การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบแขนงหุ่นยนต์คอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวาง”, การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 18, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ,พ.ศ. 2538
- [14] Kumpati S. Narendra, Anuradha M. Annaswamy, “Stable Adaptive Systems”,Prentice-Hall,1989
- [15] Bahram Shahian, Michael Hassul, “Control System Design Using Matlab”,Prentice-Hall,1993
- [16] Bernard Friedland,“Advanced Control System Design”,Prentice-Hall,1996
- [17] Brian Armstrany-Helouvry,“Control of Machines with Friction”,Kluwer Academic Publishers,1991
- [18] Lennart Ljung, Torkel Glad,“Modeling of Dynamic Systems”,PTR Prentice-Hall,1994
- [19] David L. Smith,“Introduction to Dynamic Systems Modelling for Design” ,Prentice-Hall,1994
- [20] Ferdinand P.Beer, E. Russell Johnston, Jr.,“Vector Mechanics for Engineers”, Mcgraw-Hill
- [21] C. Nelson Dorny, “Unstanding Dynamic Systems : Approaches to Modeling, Analysis, and Design”,Prentice-Hall,1993



ภาคผนวก ก

ภาคผนวก
- โปรแกรมที่ใช้ในการทดลองหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ภาคผนวก ข

- งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

ภาคผนวก ก

โปรแกรมที่ใช้ในการทดลองหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

คุณสมบัติของโปรแกรม

1. สามารถกำเนิดสัญญาณต่าง ๆ ได้ (ยืดหยุ่นกับแผงวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก)
2. สามารถอ่านค่าตำแหน่งจากแผงวงจรนับค่าตำแหน่งจากเอนโคเดอร์
3. มีช่วงระยะเวลาในการส่งข้อมูลให้แผงวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกคงที่
4. มีช่วงระยะเวลาการอ่านค่าตำแหน่งที่คาบเวลาเดียวกับในข้อที่ 3

```

/***** Ident01.c *****/
#include <alloc.h>
#include <math.h>
#include <dos.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <ctype.h>
#include <process.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <7340drv.c.h>

#define  AXIS_CMD   (axis * 2 + LM6280_CMD)
#define  AXIS_DATA (axis * 2 + LM6280_DATA)
#define  Factor    M_PI/180.0
#define  Amplit    50.0
#define  Tscale    0.25
#define  FORWAR    1
#define  REVERS    0

```

```
void interrupt (*oldvec)(void);
```

```
void waitbusy(int axis) ,motor_off(int axis);
```

```
void interrupt tickr(void) ,init_filters(int axis);
```

```
void install(void),mloc(void) ,init(int axis),get_time(void);
```

```
void far wrcmd(int axis,char code),far wrbyte(int axis,char byte);
```

```
void far wrword(int axis,unsigned word),far wr2words(int axis,long word);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void far wrcmd(int axis,char code),far wrbyte(int axis,char byte);
void far wrword(int axis,unsigned word),far wr2words(int axis,long word);
void trajectory_contr(int axis,unsigned tr_cw,long acce,long vel,long pos);
unsigned int degree_rev(long position);
int far rdstatus(int axis),check_interrupt(void);
int startmotion(int axis,long vel,long acce,int stangle,int endangle);
char far rdbyte(int axis);
unsigned far rdword(int axis);
long far rd2words(int axis);

```

```
struct time *timep;
```

```
FILE *f;
```

```
long far *var,*var1;
```

```
long far *var2,*var3;
```

```
int far *var4,*var5;
```

```
unsigned int b=0;
```

```
int vlue;
```

```
void main(int argc,char **argv)
```

```
{
```

```
int st;
```

```
long pos=46000L,vel=74000L,acce=100;
```

```
char ch1[25],ch2[25],ch3[25];
```

```
FILE *fbuf,*fbuf0;
```

```
mloc();
```

```
if(argc!=2)
```

```
{
```

```
clrscr();
```

```
printf("\nUSAGE :ident <filename>\n");
```

```
getch();
```

```
clrscr();
```

```
exit(0);
```

```
}
```

```
strcpy(ch1,argv[1]);
```

```
strcpy(ch2,argv[1]);
```

```
strcpy(ch3,argv[1]);
```

```
strcat(ch1,"0");
```

```
strcat(ch2,"1");
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

strcat(ch3,"2");
f = fopen(ch1,"wb");
fbuf = fopen(ch2,"wb");
fbuf0 = fopen(ch3,"wb");
if(((f==NULL)||(fbuf==NULL)||(fbuf0==NULL)))
{
clrscr(); printf("\nCannot open file\n");
getch(); exit(0);
}
init(3);
printf("%x" _rdstatus(3));
init_filters(3);
trajectory_contr(3,0x2a,acce,vel,pos);
getch();
install();
vluе = 0x80;
printf("Select Signal for experiment\n");
printf("0 ==> 1 Frequency\n");
printf("1 ==> 3 Frequency\n");
printf("====> ");
scanf("%d",&st);
for(;;)
{
if(kbhit()) break;
/*****/
if(st==1)
vluе = Amplit*sin(0.054*b*Tscale) + Amplit*sin(0.108*b*Tscale) +
Amplit*sin(0.216*b*Tscale);
if(st==0)
vluе = Amplit*sin(0.054*b*Tscale);
if (vluе > 0xff ) vluе = 0xff;
if (vluе < -127 ) vluе = -127;
}
outportb(0x2a2,0x80);
setvect(0x1c,oldvec);
fwrite(var5,sizeof(int),b,fbuf0);
fwrite(var3,sizeof(long),b,fbuf);
fwrite(var1,sizeof(long),b,f);
printf("\nDisable interrupt %d\n",b);
frees(var1);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

farfree(var3);
farfree(var4);
fcloseall();
}

void install()
{
oldvec = getvect(0x1c);
setvect(0x1c,tickr);
}

void interrupt tickr()
{
wrcmd(3,RDDP);
*(var+b) = rd2words(3);
wrcmd(3,RDRP);
*(var2+b) = rd2words(3);
outportb(0x2a2 , (unsigned char)~(v1ue+0x80));
*(var4+b) = v1ue;
b++;
}

void mlloc()
{
var = var1 = (long far *) farmalloc(64*1024L);
var2 = var3 = (long far *) farmalloc(64*1024L);
var4 = var5 = (int far *) farmalloc(64*1024L);
if(((var==NULL)||(var2==NULL)||(var4==NULL)))
{
printf("\n\nCan't memory\n");
getch(); exit(1);
}
}

void motor_off(int axis)
{
trajectory_contr(axis,0x52a,0,0,0);
}

void init_filters(int axis)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
wrcmd(axis,LFIL);
wrword(axis,0x000f);
wrword(axis,10);
wrword(axis,1);
wrword(axis,100);
wrword(axis,1);
wrcmd(axis,UDF);
}

```

```

void trajectory_contr(int axis,unsigned tr_cw,long acce,long vel,long pos)

```

```

{
wrcmd(axis,LTRJ);
wrword(axis,tr_cw);
wr2words(axis,acce);
wr2words(axis,vel);
wr2words(axis,pos);
wrcmd(axis,STT);
}

```

```

void get_time()

```

```

{
gettime(timep);
printf("\n%u : %u : %u\n",timep->ti_hour,timep->ti_min,timep->ti_sec);
}

```

```

unsigned int degree_rev(long position)

```

```

{
return((unsigned int)position/130.5);
}

```

```

void init(int axis)

```

```

{
wrcmd(axis,MRESET);
wrcmd(axis,PORT12);
wrcmd(axis,DFH);
wrcmd(axis,LPES);
wrword(axis,0x7fff);
wrcmd(axis,MSKJ);
wrword(axis,0);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

outportb(CP0,0x00);
outportb(CP1,0xf0);
outportb(OUTPUT0,0);
outportb(OUTPUT1,0xf0);
}

```

```

void waitbusy(int axis)
{
while(inportb(Axis_CMD) & BUSYBIT)
continue;
}

```

```

void far wrcmd(int axis, char code)
{
waitbusy(axis);
outportb(Axis_CMD,code);
}

```

```

void far wrbyte(int axis, char byte)
{
outportb(Axis_DATA,byte);
}

```

```

void far wrword(int axis, unsigned word)
{
waitbusy(axis);
wrbyte(axis, (word & WUPPER) >> 8);
wrbyte(axis, word & WLOWER);
}

```

```

void far wr2words(int axis, long words)
{
wrword(axis, (unsigned)((words & 4294901760L) >> 16));
wrword(axis, (unsigned)(words & 65535L));
}

```

```

int far rdstatus(int axis)
{
return(inportb(Axis_CMD));
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

1. “การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแทนหมุนเครื่องถ่ายภาพตัดขวาง” ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 18 วันที่ 22-24 พฤศจิกายน 2538 ณ.โรงแรมพัทยาจอมเทียน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
2. “การออกแบบระบบควบคุมแทนหมุนเครื่องถ่ายภาพตัดขวาง” ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 17 วันที่ 1-2 ธันวาคม 2537 ณ.คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแท่นหมุนเครื่องถ่ายภาพตัดขวาง Modelling and Identification of CT-scanner Gantry

อดิศักดิ์ แซ่สารวิกิจ* ดร. สุธี ผู้เจริญชนะชัย** ดร. ไพรัช ธีชัยพงษ์***

บทคัดย่อ

ระบบแท่นหมุนเครื่องถ่ายภาพตัดขวางนั้นประกอบด้วยวงล้อเหล็กที่ตั้งอยู่บนสายพาน ซึ่งมีโครงสร้างระบบส่งกำลังแบบอ้อม (Indirect Drive) ด้วยมอเตอร์ผ่านสายพาน ส่งผลให้การใช้แบบจำลองเชิงเส้น (Linear Model) ธรรมดาไม่เพียงพอที่จะแทนระบบพลวัต (Dynamics) ของระบบแท่นหมุนทั้งหมดได้ บทความนี้นำเสนอการใช้แบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Model) สำหรับการประมาณระบบพลวัตของแรงเสียดทานที่เกิดในระบบส่งกำลังและนำมาใช้หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบรวมด้วยวิธีประมาณแบบกำลังสองน้อยที่สุด (Least square Estimation) ผลที่ได้คือการทำนายผลตอบสนองของระบบแท่นหมุนต่อสัญญาณคำสั่ง (Command Signal) แบบต่าง ๆ มีความแม่นยำยิ่งยวดกว่าการใช้แบบจำลองของแรงเสียดทาน ส่งผลให้การออกแบบระบบควบคุม (Controller) ทำได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น

mathematical model of the gantry. With appropriate discretization, least square estimation of friction parameters is made possible. As a consequence, significant accuracy improvement over methods without considering friction effect can be obtained.

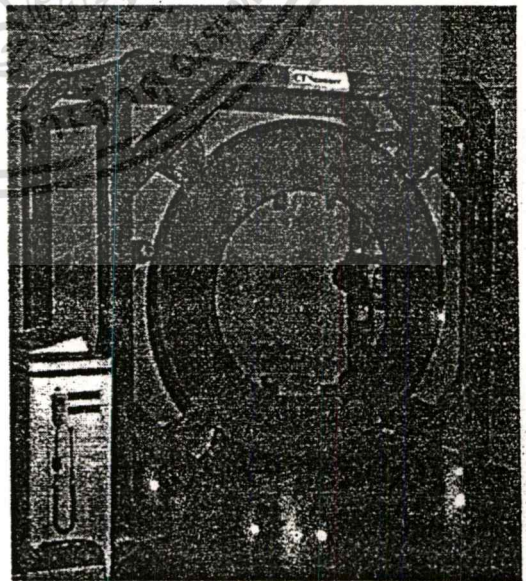
บทนำ

1. หลักการและเหตุผล

ระบบแท่นหมุนเครื่องถ่ายภาพตัดขวาง ประกอบด้วยวงล้อเหล็กตั้งอยู่บนสายพานถูกส่งกำลังด้วยมอเตอร์ผ่านสายพาน ดังในรูปที่ 2 ซึ่งวงล้อเหล็กมีการติดตั้งอุปกรณ์ถ่ายภาพตัดขวางทำให้มีน้ำหนักมากส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานที่จุดส่งกำลังต่าง ๆ ซึ่งแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นทำให้ยากต่อการควบคุมการเคลื่อนที่ของวงล้อเหล็ก ฉะนั้นการออกแบบระบบควบคุมให้มีประสิทธิภาพจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบค่าพารามิเตอร์ของระบบแท่นหมุน

Abstract.

A positioning Gantry has developed for performing X-ray computerized tomography. The gantry is of rotating type, and driven by DC motor through a belt. Precise identification for the gantry motion is difficult to achieve via conventional methods, which are based on linear model only. In this paper, we employ a nonlinear model representing mechanical friction to derive more accurate

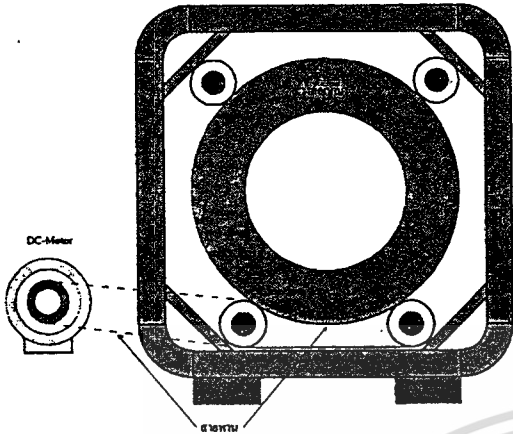


รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบของแท่นหมุน

* นักศึกษาปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
** นักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
*** อธิการบดีสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

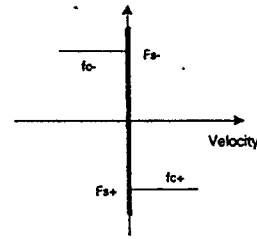
จะเกิดแรงเสียดทานแบบคูลอมป์ ซึ่งเกิดขึ้นจากแรงระหว่างผิวของวัตถุสัมผัสกัน และแรงเสียดทานแบบวิสคอส



รูปที่ 2 แสดงส่วนของการส่งกำลังด้วยมอเตอร์ผ่านสายพาน การหาค่าพารามิเตอร์ของระบบแทนหมุนจะกระทำในแบบวงรอบเปิด (Open loop) ซึ่งขั้นตอนแรกจะกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สมมูลกับระบบแทนหมุน และเลือกสัญญาณอินพุตที่จะป้อนให้กับระบบแทนหมุนที่ทำให้ระบบแทนหมุนเกิดการผลตอบสนอง (Exitation) ให้ที่มีความสัมพันธ์กับสัญญาณอินพุตอย่างเพียงพอสำหรับการประมาณระบบ จากนั้นทำการเก็บข้อมูลทางด้านอินพุตและเอาต์พุต เพื่อนำไปหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้วิธีการประมาณแบบกำลังสองน้อยที่สุด

2. คุณลักษณะของแรงเสียดทาน

โดยทั่วไปโครงสร้างระบบพลวัตที่มีการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่ จะมีแรงเสียดทานเกิดขึ้น ณ จุดที่มีการส่งกำลังกันระหว่างผิวของวัตถุทั้งสองที่สัมผัสกัน จากการวิเคราะห์จะพบว่าระบบแทนหมุนมีแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นตั้งแต่การส่งกำลังจากมอเตอร์ พูลเลย์ และสายพานให้วงล้อเหล็กเคลื่อนที่ ซึ่งแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นกับระบบแทนหมุนประกอบด้วยแรงเสียดทานแบบคูลอมป์ (Coulomb Friction) แบบสถิต (Static Friction) และแบบวิสคอส (Viscous Friction) โดยที่แรงเสียดทานแต่ละแบบจะมีพฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้นแสดงออกมาต่างกันดังในรูปที่ 3 ซึ่งแรงเสียดทานแบบสถิตจะเกิดขึ้นขณะที่วัตถุไม่มีการเคลื่อนที่และพยายามจะเคลื่อนที่ แต่ถ้าวัตถุเกิดการเคลื่อนที่แรงเสียดทานแบบสถิตจะเท่ากับศูนย์และ



รูปที่ 3 แสดงคุณลักษณะของแรงเสียดทาน

F_s : Static friction

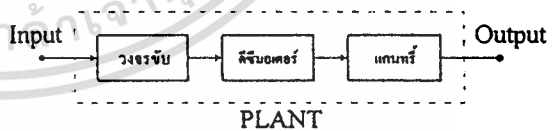
f_c : Coulomb friction

เกิดขึ้นขณะที่วัตถุเคลื่อนที่โดยจะแปรผันโดยตรงกับความเร็วของวัตถุ ซึ่งแรงเสียดทานที่กล่าวมาส่งผลให้ความเร็วของวงล้อเหล็กไม่เป็นไปตามที่ต้องการ สำหรับในบทความนี้จะนำเสนอการหาค่าแรงเสียดทานแบบคูลอมป์และแบบสถิต

3. การกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Modelling)

3.1 ลักษณะทางกายภาพ (Physical Model)

ในการหาแบบจำลองของระบบแทนหมุนที่ประกอบด้วยวงจรรีบ ดีซีมอเตอร์ และวงล้อเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งเป็นระบบที่มีการเคลื่อนที่ที่สามารถกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ในสมการที่ 1



รูปที่ 4 แสดงระบบแทนหมุนเครื่องดำทัดข้าว

$$m\ddot{x} + d\dot{x} = nu + u + f \tag{1}$$

โดยที่ x คือตำแหน่งของวงล้อเหล็ก

m คือมวลของวงล้อเหล็ก

d คืออัตราการหน่วง (Damping ratio)

u คือสัญญาณอินพุต
 f คือแรงเสียดทานรวมของระบบแท่นหมุน
 n คือค่าพิเพอร์เรนทึชเยลเกนในชุดวงจรรีบ

มอเตอร์ [4]

จากลักษณะของแรงเสียดทานที่กล่าวไว้ข้างต้น เราสามารถกำหนดแบบจำลองแบบไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับแรงเสียดทานรวมของระบบ ได้ดังนี้

$$f = [fc_+ \cdot \eta + fc_- \cdot (1 - \eta)] \cdot (1 - \xi) + [fs_+ \cdot \mu + fs_- \cdot (1 - \mu)] \cdot \xi \quad (2)$$

โดยที่

$$\eta = 1 \quad (\dot{x} \geq 0) \quad \xi = 1 \quad (\dot{x} = 0) \quad \mu = 1 \quad (u \geq 0)$$

$$\eta = 0 \quad (\dot{x} \leq 0) \quad \xi = 0 \quad (\dot{x} \neq 0) \quad \mu = 0 \quad (u < 0)$$

3.2 การหาค่าสมการสมมูลด้วยวิธีดิครีตไทม์

ในหัวข้อนี้ เราจะแสดงให้เห็นว่า แม้ระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (เช่นในรูปของตัวแปร η ที่ขึ้นกับทิศทางของความเร็ว) แต่ด้วยวิธีการ Discretization ที่เหมาะสม เรายังคงสามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบด้วยวิธีที่ใช้กับระบบเชิงเส้นได้ เช่นวิธีประมาณแบบกำลังสองน้อยที่สุด (Least square Method)

เนื่องจากแรงเสียดทานแบบสถิต สามารถหาค่าได้โดยง่ายทางการทดลอง จึงขอตัดตัวแปร fs_+ และ fs_- ในสมการที่ 2 ออกก่อน (แต่จะนำเสนอภายในหัวข้อผลการทดลอง) นอกจากนี้จากรูปที่ 3 เราสามารถประมาณให้ค่าแรงเสียดทานแบบคูลอมบ์มีค่าคงที่ในช่วงการสุ่มตัวอย่างที่ติดกัน นั่นคือ $f(k) = f(k-1)$ ในทุกลำดับการสุ่ม k ภายใต้สมมติฐานนี้ ผลการ Discretization ของระบบพลวัตตามสมการ (1) และ (2) จะได้ว่า

$$x(k) = (1 + e^{-dT/m})x(k-1) - (e^{-dT/m})x(k-2) + \frac{d(n(1-\delta) + T) + m(\delta-1)}{d^2} u(k-1) + \frac{d(n(\delta-1) - T\delta) + m(1-\delta)}{d^2} u(k-2) + \frac{Td(1-\delta)}{d^2} fc_+ \cdot \eta$$

$$+ \frac{Td(1-\delta)}{d^2} fc_- \cdot (1-\eta) \quad (3)$$

T = เวลาสุ่มตัวอย่าง (Sampling Time)

จากสมการที่ 3 กำหนดให้

$$\delta = e^{-dT/m}$$

$$\alpha = \frac{d(n(1-\delta) + T) + m(\delta-1)}{d^2}$$

$$\beta = \frac{d(n(\delta-1) - T\delta) + m(1-\delta)}{d^2}$$

$$\tau_1 = \frac{Td(1-\delta)}{d^2} \cdot fc_+$$

$$\tau_2 = \frac{Td(1-\delta)}{d^2} \cdot fc_-$$

จะได้ว่า

$$x(k) = (1 + \delta)x(k-1) - \delta x(k-2) + \alpha u(k-1) + \beta u(k-2) + \tau_1 \cdot \eta + \tau_2 \cdot (1-\eta) \quad (4)$$

จากสมการที่ 4 สามารถจัดสมการใหม่ได้ดังนี้

$$z(k) = \delta[x(k-1) - x(k-2)] + \alpha u(k-1) + \beta u(k-2) + \tau_1 \cdot \eta + \tau_2 \cdot (1-\eta) \quad (5)$$

โดยที่

$$z(k) = x(k) - x(k-1) \quad (6)$$

สำหรับการหาค่า $\delta, \alpha, \beta, \tau_1$ และ τ_2 ทำได้โดยการป้อนแรงดันที่ทำให้ระบบแท่นหมุน จากนั้นนำผลตอบสนองต่อเวลาของระบบ (Time Response) และสัญญาณอินพุตที่เก็บได้ นำมาเข้าสมการที่ 5 กับ 6 และใช้วิธีการประมาณแบบกำลังสองน้อยที่สุด จะได้ค่าตัวแปร $\delta, \alpha, \beta, \tau_1$ และ τ_2 ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะสามารถนำมาหาค่าของ m, d, u, f และ n ได้ดังนี้

$$m = \frac{\alpha d^2 - d(1 - n\delta + T)}{\delta - 1}$$

$$d = \frac{(1 + T - T\delta - n)}{(\alpha + \beta)}$$

$$n = \frac{T(\alpha + \beta) + (\alpha\delta + \beta) \cdot \ln \delta}{(\alpha + \beta)(\delta - 1)^2 \cdot \ln \delta}$$

$$fc_+ = \frac{\tau_1 \cdot d^2}{Td(1 - \delta)}$$

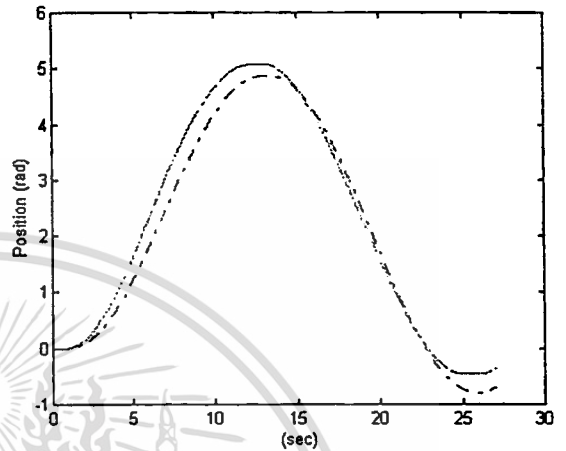
$$fc_- = \frac{\tau_2 \cdot d^2}{Td(1 - \delta)}$$

4. ผลการทดลอง

การทดลองหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแท่นหมุน โดยใช้วิธีการประมาณค่ากำลังสองน้อยที่สุด ซึ่งพารามิเตอร์ที่ได้จะมีความสมมูลกับระบบแท่นหมุนได้นั้น ขึ้นอยู่กับการเลือกสัญญาณอินพุตที่ทำให้ระบบแท่นหมุนเกิดผลตอบสนองมากที่สุด สำหรับการทดลองใช้สัญญาณอินพุตเท่ากับ $\sin(t)$ ผลตอบสนองแสดงในรูปที่ 5 - 8 และตารางที่ 1 เป็นการเปรียบเทียบผลตอบสนองจากระบบแท่นหมุนกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และค่าผิดพลาด (error) จากการทดลองใช้ความถี่เดียว จะพบว่าผลตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ยังไม่เข้าใกล้กับระบบแท่นหมุน ดังนั้นจึงเลือกใช้สัญญาณอินพุตเท่ากับ $\sin(0.5t) + \sin(0.25t) + \sin(t)$ โดยผลตอบสนองมีความใกล้เคียงกับระบบแท่นหมุนมากกว่าใช้สัญญาณอินพุตที่ความถี่เดียว โดยเปรียบเทียบได้จากค่าผิดพลาดซึ่งเป็นไปตามกฎของ Persistent Excitation [5] และรูปที่ 9 เปรียบเทียบผลตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จาก [6] กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดลองและหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีที่นำเสนอในบทความนี้ในระบบวงรอบปิด (closed loop) โดยใช้ระบบควบคุมแบบ PID จะพบว่าผลตอบสนองที่ได้ดีกว่าผลตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ [6]

สำหรับการหาค่าแรงเสียดทานแบบสถิตจะกระทำโดยการป้อนแรงดันเข้าที่อินพุตของวงจรรับ โดยแรงดันที่ป้อนเข้าจะเริ่มจากศูนย์โวลต์แล้วค่อย ๆ เพิ่มไปจนกว่าวงล้อเหล็กเริ่มมีการเคลื่อนที่ ซึ่งค่าแรงดันดังกล่าวที่ทำให้วงล้อเหล็กเริ่ม

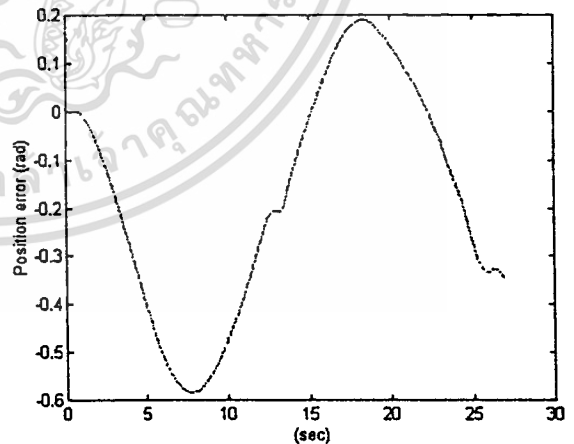
เคลื่อนที่สามารถประมาณได้กับแรงเสียดทานแบบสถิตได้ เนื่องจากแรงเสียดทานแบบสถิตมีผลต่อการเคลื่อนที่ทั้งที่ความเร็วเป็นบวกและลบ ฉะนั้นในการทดลองจะต้องปรับแรงดันไปทั้งทางด้านบวก และลบตามลำดับ



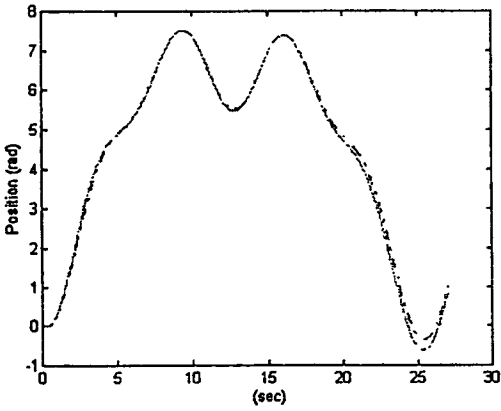
เส้นทึบ : ผลตอบสนองของระบบแท่นหมุน

เส้นประ : ผลตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

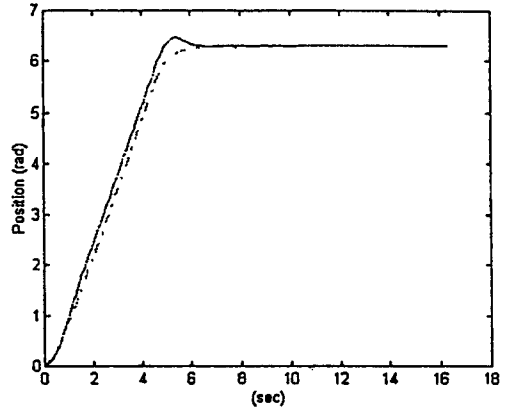
รูปที่ 5 เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบแท่นหมุนกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยสัญญาณอินพุต $\sin(t)$



รูปที่ 6 แสดงค่าผิดพลาดของระบบแท่นหมุนกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สัญญาณอินพุตเท่ากับ $\sin(t)$



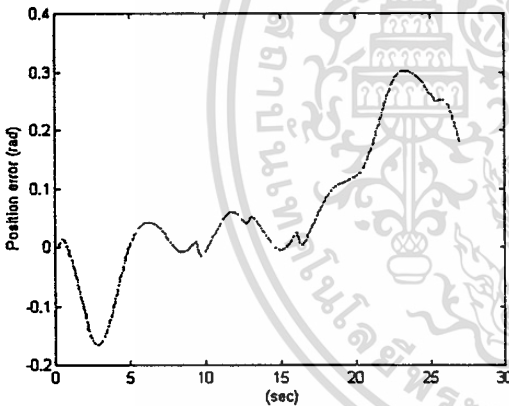
เส้นทึบ : ผลตอบสนองของระบบแทนหมุน
เส้นประ : ผลตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
รูปที่ 7 เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบแทนหมุนกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยสัญญาณอินพุต $\sin(t) + \sin(0.5t) + \sin(0.25t)$



รูปที่ 9 แสดงผลตอบสนองการจำลองการทำงานแบบวงรอบปิด (closed loop) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในวิธีที่นำเสนอในบทความนี้ (เส้นประ) กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์[6](เส้นทึบ)

5. สรุป

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นของแรงเสียดทานสามารถประมาณแบบจำลองได้โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด ซึ่งวิธีนี้สามารถหาแบบจำลองที่มีการทำงานคล้ายกับระบบแทนหมุนได้ ขึ้นอยู่กับ การเลือกสัญญาณอินพุตที่ทำให้ระบบแทนหมุนตอบสนอง ส่วนที่เป็นเชิงเส้น และไม่เป็นเชิงเส้นเพียงพอสำหรับการประมาณ ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ส่งผลให้การออกแบบระบบควบคุมมีความถูกต้องและประสิทธิภาพมากกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [6] ที่ไม่ได้ใช้แบบจำลองความเสียดทานในการวิเคราะห์



รูปที่ 8 แสดงค่าผิดพลาดของระบบแทนหมุนกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สัญญาณอินพุตเท่ากับ $\sin(t) + \sin(0.5t) + \sin(0.25t)$

สัญญาณอินพุต	m	d	n	fc_+	fc_-	$ e^2 dt$
$\sin(0.25t)$	3.08e-4	4.4e-4	0.161	-0.2416	0.009	44.05
$\sin(0.25t)+\sin(0.5t)+\sin(t)$	10.0e-5	4.1e-4	0.121	-0.298	0.218	9.426

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ที่สัญญาณอินพุตต่าง ๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Weiping Lim and Xu Cheng ,Adaptive High - precision Control of Positioning Tables - Theory and Experiments , IEEE Transactions on Control systems Technology, Vol. 2 NO. 3 ,September 1994
- [2] Gene F. Franklin ,J.David Powell and Michael L. Workman, Digital Cotrol of Dynamic Systems. Addison-Wesley Public Company , Inc., 1990
- [3] วิพันธ์ ปรีชาพานิช ,การวิเคราะห์ระบบแนวใหม่, ตำราชูวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2533
- [4] Control Techniques ,Instruction Manual 4Q2 DC MOTOR CONTROLLER
- [5] Richard H. Middleton and Graham C. Goodwin , Digital Control and Estimation ,Prentice- HallInternational, Inc., pp.364 ,1990
- [6] อติศักดิ์ แข็งสารกิจ ,ดร.สุธี ผู้เจริญนะชัย ,ดร.ยุทธพงษ์ รังสรรคเสรี และศ.ดร.ไพรัช อึ้งยงษ์, การออกแบบระบบควบคุมแท่นหมุนเครื่องถ่ายภาพ ตัดขวาง,ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17 ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ ,1-2 ธันวาคม 2537

การออกแบบระบบควบคุมแท่นหมุนเครื่องถ่ายภาพตัดขวาง

Control System Design for CT-scanner Gantry

อดิศักดิ์ แร้งสาริกิจ* ดร.สุธี ผู้เจริญนะชัย** ดร.ยุทธพงษ์ วัชรศรีเสวี*** ศ.ดร.ไพรัช ธัชยพงษ์****

* นักศึกษาระดับปริญญาโท สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจ.ล.)

** นักวิจัย ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (เนคเทค)

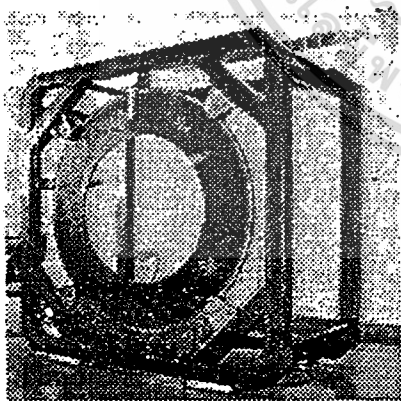
*** อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจ.ล. **** อธิการบดี สจ.ล.

บทคัดย่อ. ในบทความนี้จะนำเสนอการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการควบคุมแนวใหม่ (Modern Control Theory) ในการออกแบบระบบควบคุมแท่นหมุน (Rotating Gantry) สำหรับเครื่องถ่ายภาพตัดขวาง (CT-scanner) ขั้นตอนการออกแบบประกอบด้วย การจำลองระบบแท่นหมุนด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สามารถนำไปหาค่าพารามิเตอร์ได้โดยการทดลองอย่างง่าย และการนำแบบจำลองที่ได้ไปใช้ออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller) ค่าเกณฑ์ไอดีหาด้วยวิธีการควบคุมแบบที่ดีที่สุด (Optimal Control) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมที่ได้มีประสิทธิภาพในการควบคุมตำแหน่งเชิงมุมของแท่นหมุนในระดับที่น่าพอใจ

Abstract. This paper presents an application of modern control theory to control system design for CT-scanner gantry. The gantry is of rotating type, and driven by a DC motor through a belt conveyor. A simple mathematical model for the gantry system is proposed. Parameters of the model are simply identified by experiment. PID Controller Design is accomplished by using Optimal Control Approach. Simulation and Experiment are performed to show satisfactory results.

1. บทนำ

ระบบแท่นหมุน (Rotating Gantry System) ในเครื่องคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวางอวัยวะ (CT-scanner) นั้นจะประกอบด้วยวงล้อเหล็กขนาดใหญ่ ตั้งอยู่บนสายพาน ตามรูปที่ 1 วงล้อมีขนาดเส้นผ่า

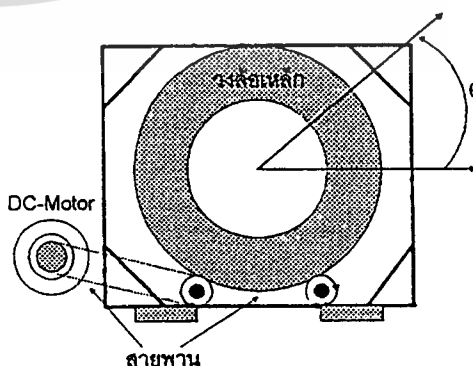


รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบของแกนที่

ศูนย์กลางวงนอก 150 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางวงใน 90 เซนติเมตร หนา 1.8 เซนติเมตร เพื่อให้มีพื้นที่ และความแข็งแรงเพียงพอสำหรับยึดอุปกรณ์ถ่ายภาพตัดขวาง เช่น หลอดรังสีเอกซ์.

ตัวรับรังสี เป็นต้น ระบบขับเคลื่อนแท่นหมุนถูกออกแบบให้ส่งกำลังด้วยมอเตอร์แบบดีซี (DC Motor) ผ่านสายพานไปหมุนวงล้อตามรูปที่ 2 ส่วน θ คือ ตำแหน่งเชิงมุมของวงล้อเหล็กซึ่งจะอ่านได้จากเอนโคดเดอร์ (Encoder)

ในการควบคุมการหมุนของวงล้อให้เป็นไปตามที่ต้องการ จำเป็นต้องใช้ระบบที่สามารถควบคุมตำแหน่งเชิงมุมและความเร็วของวงล้อ ให้สอดคล้องกับคำสั่งเส้นทาง (Trajectory Command) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2 แสดงส่วนของการส่งกำลังด้วยมอเตอร์ผ่านสายพาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบนั้นแบ่งออกได้เป็นสองขั้นตอนหลัก ขั้นตอนแรกคือการกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ที่สมมูลกับระบบแท่นหมุนซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป ส่วนขั้นตอนที่สองซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อที่ 3 คือการนำแบบจำลองที่ได้มาใช้แทนระบบจริงในการการออกแบบตัวควบคุม (Controller)

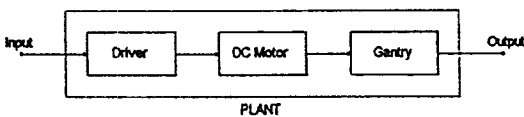
ในหัวข้อที่ 4 จะเป็นการทดสอบการทำงานจริงของตัวควบคุมกับทั้งแบบจำลองและระบบจริงเพื่อเปรียบเทียบผล

2. การวิเคราะห์และประมาณค่าระบบ

เนื่องจากวงล้อเหล็กดังแสดงในรูปที่ 2 มีน้ำหนักมาก และขนาดใหญ่ ควบคุมการหมุนของวงล้อได้ยาก จึงจำเป็นต้องใช้ตัวควบคุม (Controller) เข้าช่วย ในทางทฤษฎีการหาตัวควบคุมที่เหมาะสมนั้นจะทำโดยการเลือกและลองใช้ตัวควบคุมกับระบบจริง แล้วปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจนกว่าจะได้ผลตอบสนองของระบบที่ต้องการ แต่ในทางปฏิบัติวิธีนี้อาจจะทำให้เกิดความเสียหายแก่ระบบจริงในช่วงการปรับได้ เพื่อลดความเสี่ยงดังกล่าว บทความนี้จะนำเสนอวิธีการจำลอง (Simulation) โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) แทนระบบแท่นหมุนในการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมให้ได้ผลที่ต้องการก่อน จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้ไปทดสอบกับระบบแท่นหมุนจริง ซึ่งวิธีให้การจำลองนี้จะต้องทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สมมูลกับระบบแท่นหมุนก่อน จึงจะสามารถออกแบบตัวควบคุมในขั้นตอนต่อไปได้

ในการหาแบบจำลองของระบบแท่นหมุน จะเป็นการประมาณด้วยฟังก์ชันถ่ายโอน ทำได้โดยการต่อวงจร R-C ฟิลเตอร์อนุกรมกับอินพุทของวงจรมอเตอร์ ทั้งนี้ก็เพื่อให้สามารถประมาณระบบแท่นหมุนได้ด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนที่เป็นอันดับต่ำ ทำให้ง่ายต่อการออกแบบตัวควบคุม

ระบบแท่นหมุนซึ่งประกอบไปด้วยวงจรมอเตอร์ (Driver) มอเตอร์แบบดีซี (DC Motor) และแท่นหมุน (Rotating Gantry) นั้น จะพิจารณาให้เป็นระบบที่มีอินพุทคือ แรงดัน (V) และเอาต์พุทคือ ตำแหน่งเชิงมุม (θ) ของแท่นหมุน ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยแผนภาพดังรูป



รูปที่ 3 แสดงแผนภาพของระบบแท่นหมุน

และจะประมาณด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนในรูปของ

$$\frac{\Theta(s)}{V(s)} = \frac{\alpha}{s(s + \beta)} \tag{2.1}$$

โดยที่ α และ β เป็นค่าคงที่

การหาค่าของ α และ β นั้นทำได้โดยการป้อนแรงดันแบบสเต็ป (Step Input) โดยให้ค่าในช่วงทำงาน (Operating Range) ของระบบจริง จากนั้นนำผลตอบสนองต่อเวลา (Time Response) ของความเร็วเชิงมุม ($\dot{\theta}(t)$ หรือ $\omega(t)$) มาพลอตกราฟหาค่า β ได้จากสมการ

$$\beta = \frac{-\ln(1 - k)}{T_k} \tag{2.2}$$

โดยที่ T_k คือเวลาที่ความเร็วเชิงมุมมีค่าเป็น k เท่าของค่าความเร็วเชิงมุมที่สถานะคงตัว (Steady State) ส่วนค่า α นั้นหาได้จากความสัมพันธ์ [3]

$$\omega_{ss} = \frac{\alpha V_0}{\beta} \tag{2.3}$$

โดยที่ ω_{ss} คือค่าความเร็วเชิงมุมที่สถานะคงตัว (Steady State) และ V_0 คือค่าแอมพลิจูดของแรงดันแบบสเต็ปที่ให้กับวงจรมอเตอร์ จากการทดลองสามารถหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ได้ดังนี้คือ

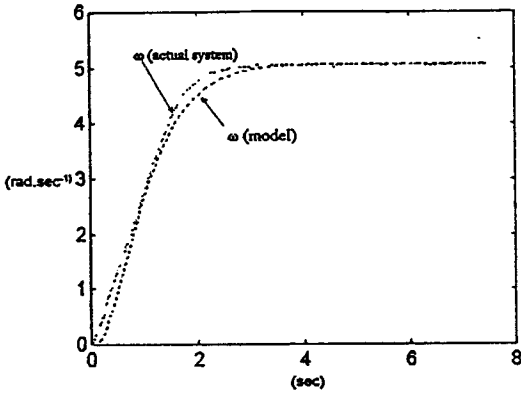
- $k = 0.5$
- $\omega_{ss} = 5.05$
- $T_k = 0.892$
- $V_0 = 5.0$
- $\beta = 0.77$
- $\alpha = 0.777$

จึงได้ว่า

ดังนั้นจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ต้องการ คือ

$$\frac{\Theta(s)}{V(s)} = \frac{0.77}{s(s + 0.777)} \tag{2.4}$$

ซึ่งผลตอบสนองต่อเวลา (Time Response) ของฟังก์ชันถ่ายโอนและระบบแท่นหมุนแสดงไว้ในรูปที่ 4 โดย $\omega(\text{actual system})$ คือความเร็วเชิงมุมของระบบจริง ส่วน $\omega(\text{model})$ คือความเร็วเชิงมุมของฟังก์ชันถ่ายโอน (2.4) จะเห็นว่ามีความใกล้เคียงเพียงพอที่จะนำไปออกแบบตัวควบคุมในขั้นต่อไป



รูปที่ 4 เปรียบผลตอบสนองของขงทั้งขัั้นถ่ายโอนและระบบแทนหมุ่น

และกำหนดสเตรของผลต่ง (Error State) ด้วย

$x_e(t) = x_d(t) - x(t)$ นั้นคือ

$$x_e = \begin{bmatrix} \theta_e \\ \dot{\theta}_e \\ \ddot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_d - \theta \\ \dot{\theta}_d - \dot{\theta} \\ \ddot{\theta}_d - \ddot{\theta} \end{bmatrix}$$

ขัั้นต่อไป พิจารณาสมการสเตร (3.1) ในรูปของสเตรของผลต่ง จะได้ว่า

$$\dot{x}_e(t) = Ax_e(t) - Bu(t) + d(t) \quad (3.2)$$

โดยที่

$$d(t) = \dot{x}_d(t) - Ax_d(t)$$

จากค่าของ A ที่ถูกกำหนดขั้งต้น เราจะได้ว่า

$$d(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \beta\ddot{\theta}_d + \ddot{\theta}_d \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

จากสมการ (3.3) จะสามารถวิเคราะห์ได้ว่า ถ้าเส้นทางของตำแหน่งเป้าหมายหรือ $\theta_d(t)$ นั้นเป็นแบบสเตรปี (Step Command) แล้ว $d(t) = 0$ หรือถ้าเป็นแบบเปลี่ยนแปลงช้า (Slow Varying) อย่างเพียงพอที่จะส่งผลให้ $d(t) \approx 0$ ด้วย ดังนั้นในกรณีเหล่านี้จะได้ว่า

$$\dot{x}_e(t) = Ax_e(t) - Bu(t) \quad (3.4)$$

จากสมการ (3.4) เรากำหนดโครงสร้างของตัวควบคุมให้เป็น

$$u(t) = Kx_e(t) \quad (3.5)$$

โดยที่เมตริกซ์ K จะเป็นผลเฉลย (Solution) ของปัญหา Optimal Control [2] สำหรับเงื่อนไข

$$\min_{u(t)} \int_0^{\infty} (x_e^T Q x_e + u^T R u) dt \quad (3.6)$$

โดยที่ Q, R เป็นเมตริกซ์ชนิด Positive Definite

ก่อนอื่นขอให้สังเกตว่าถ้าปัญหา Optimal Control นี้มีผล

เฉลย K แล้ว ด้วย K นี้จะส่งผลให้ x_e ลู่เข้าสู่ศูนย์ นั่นคือค่าแห่ง θ จะลู่เข้าสู่ θ_d ตามวัตถุประสงค์ เมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างของระบบจะสามารถวิเคราะห์ได้ว่าระบบเป็นแบบ Controllable

3. การออกแบบตัวควบคุม

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมชนิดพีไอดี (PID Controller) จากทั้งขัั้นถ่ายโอนที่ได้ใน (2.4) เพื่อใช้ควบคุมตำแหน่งเชิงมุม (θ) ของแท่นหมุนให้เป็นไปตามต้องการ

ก่อนอื่นทำ Inverse Laplace Transformation ของสมการ (2.4) จะได้สมการอนุพันธ์

$$\ddot{\theta}(t) + \beta\dot{\theta}(t) = \alpha v(t)$$

ทำให้ได้ว่า

$$\ddot{\theta}(t) + \beta\dot{\theta}(t) = \alpha v(t)$$

ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการสเตร (State-space Equation) ได้ดังนี้

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (3.1)$$

โดยที่

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\beta \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \alpha \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix}$$

และ $u(t) = \dot{v}(t)$ สำหรับตัวแปร t นั้นคือเวลา ซึ่งจะละไว้ในบางสมการเพื่อความง่าย

เพื่อให้การควบคุมได้ตามวัตถุประสงค์ เรากำหนดสเตรของค่าแห่งที่เป็นเป้าหมาย (Desired State) ด้วย

$$x_d = \begin{bmatrix} \theta_d \\ \dot{\theta}_d \\ \ddot{\theta}_d \end{bmatrix}$$

[2] ซึ่งเป็นเงื่อนไขเพียงพอสำหรับการมีอยู่ของ K ที่เราต้องการ สำหรับค่า K นั้นหาได้จากสูตร

$$K = R^{-1}B^T P \tag{3.7}$$

โดยที่เมทริกซ์ P นั้นหาจากการแก้สมการริคคาตี (Riccati Equation)

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \tag{3.8}$$

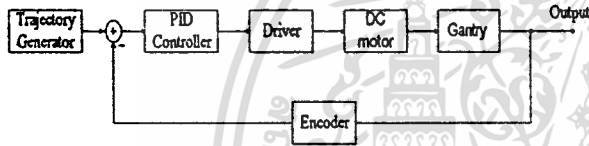
ซึ่ง K ที่ได้จะอยู่ในรูป

$$K = [K_I \quad K_P \quad K_D]$$

นั่นคือ

$$v(t) = K_I \int_0^t x_e d\tau + K_P x_e + K_D \dot{x}_e \tag{3.9}$$

ซึ่งอยู่ในรูปแบบที่โอดี ดังแสดงในรูปที่ 5

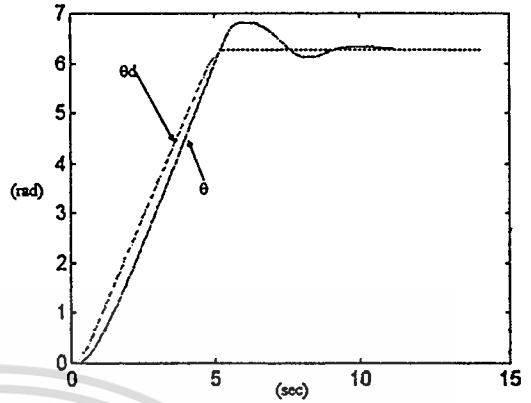


รูปที่ 5 แสดงระบบควบคุมแบบรูปปิดของระบบแท่นหมุน

4. ผลการทดลอง

ในการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุม โดยวิธีการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในเมทริกซ์ Q และ R ที่ทำให้ผลตอบสนองของระบบอยู่ในช่วง underdamp และ overdamp ในรูปที่ 6 และ 7 แสดงผลตอบสนองของระบบจากการจำลองการทำงาน และทดลองกับระบบจริง θ_d คือ ตำแหน่งเชิงมุมจาก Trajectory

θ_m คือ ตำแหน่งเชิงมุมที่ได้จากการจำลอง และ θ คือ ตำแหน่งเชิงมุมที่ได้จากระบบจริง



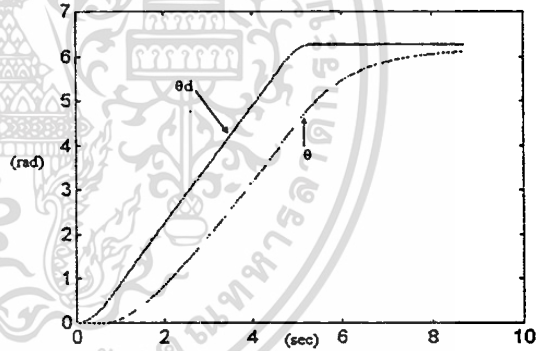
(ข)

รูปที่ 6 แสดงผลตอบสนองของระบบในช่วง underdamp

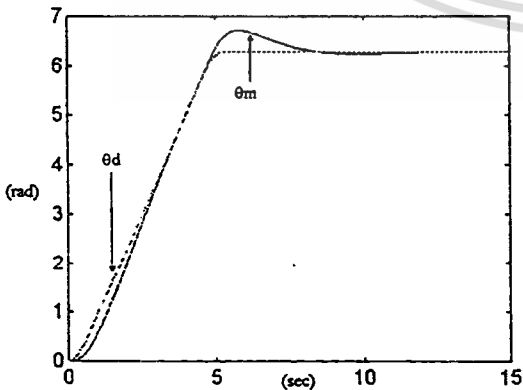
ที่ $Q = \text{diag}[8 \ 100 \ 5], R = 1$

(ก) ผลตอบสนองจากการจำลองการทำงาน

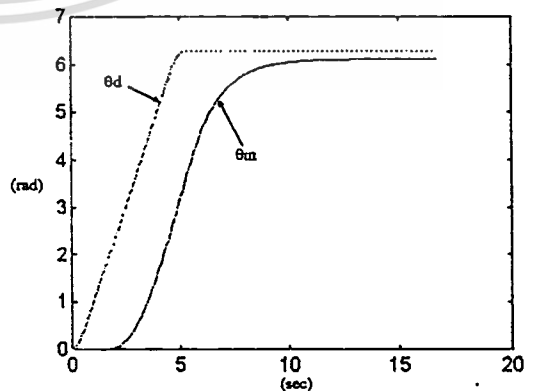
(ข) ผลตอบสนองจากการทดลอง



(ก)



(ง)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 7 แสดงผลตอบสนองของระบบในช่วง overdamp

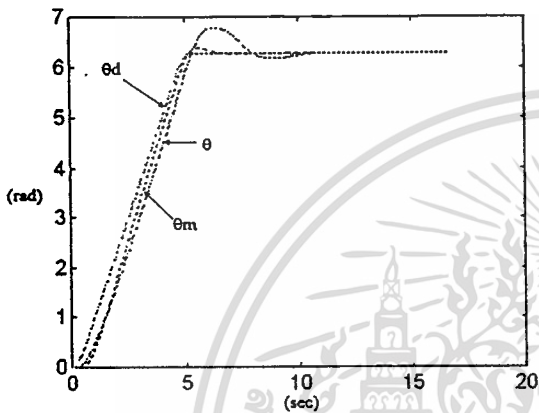
$$Q = \text{diag}[0.01 \ 80 \ 5], R = 10$$

(ก) ผลตอบสนองจากการจำลองการทำงาน

(ข) ผลตอบสนองจากการทดลอง

สำหรับการใช้งานในระบบแท่นหมุนกำหนดให้

$Q = \text{diag}[1 \ 80 \ 5]$ และ $R = 1$ ซึ่งผลตอบสนองจะแสดงไว้ในรูปที่ 8



รูปที่ 8 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ใช้งานจริง กับการจำลอง การทำงาน

5. สรุปและวิจารณ์

ระบบที่มีการทำงานคล้ายคลึงกับระบบแท่นหมุนที่นำมาเป็นปัญหาตัวอย่างนี้ มีอยู่ทั่วไปโดยเฉพาะในงานเชิงกลที่มีการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ ดังนั้นวิธีการประมาณระบบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) และการออกแบบตัวควบคุม (Controller) ที่นำเสนอข้างต้นจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการควบคุมตำแหน่งในระบบเหล่านี้ได้โดยง่าย ตัวควบคุมที่ได้จะเป็นแบบพีไอดี ซึ่งสามารถทำขึ้นได้ด้วยต้นทุนต่ำ ข้อดีอีกข้อหนึ่งคือ ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม (ในที่นี้ ก็คือค่าเกนพีไอดี) ที่ได้จะเป็นค่าที่ดีที่สุด สำหรับเงื่อนไขแบบลิเนียร์ควอดราติก (Linear Quadratic Criterion) ใน (3.6) ที่ผู้ออกแบบสามารถกำหนดเองได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณคงศักดิ์ ตติยานุกุล จาก บ.ลงศักดิ์เอ็กซ์พอร์ตการแพทย์อุตสาหกรรม จำกัด ที่ให้อุปกรณ์ระบบแท่นหมุนที่ใช้ในการทดลอง และ คุณสมชาย เกรียงอารีกุล ที่ช่วยให้คำแนะนำทางเทคนิคเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] ศ.ดร.ไพรัช รัชพงษ์ และคณะ รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ การพัฒนาต้นแบบคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพทัศนังวามอวียวะ (ระยะที่2) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ พ.ศ.2537
- [2] Katsuhiko Okata, *Modern Control Engineering*. Prentice-hall International, Inc., 1970.
- [3] Stanislaw H. Zak and Eric E. Blouin, Ripple - Free Deatbeat Control, *IEEE Control System Magazine*, Vol. 13 , no. 4 August 1993.

ประวัติผู้เขียน

นายอดิศักดิ์ แซ่สารกิจ เกิดวันที่ 27 ธันวาคม 2513 ที่จังหวัดนครสวรรค์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาเทคโนโลยีโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2536 ประสบการณ์การทำงานผู้ช่วยนักวิจัยในโครงการวิจัยและพัฒนาต้นแบบคอมพิวเตอร์ถ่ายภาพตัดขวางอวัยวะ ที่สำนักวิจัยและบริการคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2536 ถึง พ.ศ. 2539



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้