

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

๘๖

การควบคุมแบบฟัซซี่สำหรับแขนกลน้ำหนักเบาชนิดสามแกน

FUZZY CONTROL FOR A LIGHT-WEIGHT CARTESIAN ROBOT



ณัฐพงศ์ จินจาคาม

NUTTAPONG JINJAKAM

วท.
คท. ๖๖
๒๕๔๖

เลขหม.....	47655
เลขทะเบียน.....	21 ส.ค. 2546
วัน, เดือน, ปี.....	

b.....	11316482
i.....	1210092

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-296-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FUZZY CONTROL FOR A LIGHT-WEIGHT CARTESIAN ROBOT



The seal of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang is circular and features a central emblem with a sunburst at the top, flanked by two tiered stupas. Below the sunburst is a central figure, possibly a deity or a symbol of knowledge. The entire emblem is surrounded by a decorative border. The text 'NUTTAPONG JINJAKAM' is superimposed over the central part of the seal.

NUTTAPONG JINJAKAM

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MOMGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2003

ISBN 974-324-296-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2003

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมแบบฟuzzyสำหรับแขนกลนำหนักเบาชนิดสามแกน
นักศึกษา	นายณัฐพงศ์ จินจากาม
รหัสนักศึกษา	43061134
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ปิติเขต สุรักษา

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เสนอ การประยุกต์และสร้างฮาร์ดแวร์สำหรับควบคุมแขนกลคาร์ทีเซียน นำหนักเบาชนิดสามแกน โดยใช้ระบบควบคุมที่นำมาประยุกต์เป็นตัวควบคุมแบบฟuzzyพีไอพลัสดี (Fuzzy PI+D Control) โดยส่งงานผ่านคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล จาก โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นด้วยภาษา ซี พลัส พลัส (Turbo C++) ผลการทดลองแสดงสำรวจควบคุมกับชุดควบคุมที่ใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID Control) และระบบควบคุมแบบพีไอพลัสดี (PI+D Control) โดยแสดงให้เห็นว่า โปรแกรมควบคุมทั้งสามแบบให้ผลสัมฤทธิ์ในการควบคุมได้ดี แต่สำหรับสภาวะการทำงานที่ต้องรับภาระที่มากขึ้นนั้น การควบคุมแบบฟuzzyพีไอพลัสดีให้ผลดีโดยสามารถทำงานได้ดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีและตัวควบคุมแบบพีไอพลัสดี ซึ่งผลที่ได้แสดงขีดความสามารถที่จะนำระบบที่ออกแบบและสร้างขึ้นนี้มาใช้งานได้จริงและสามารถพัฒนาเพื่อให้ใช้แทนเครื่องจักร CNC ที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศได้อีกด้วย

Thesis Title	Fuzzy Control for a Light-weight Cartesian Robot
Student	Mr.Nuttapong Jinjakam
Student ID.	43061134
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2003
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr.Pitikhate Sooraksa

ABSTACT

This thesis proposes the application and implementation of hardware for controlling light-weight Cartesian robot arms. The controller in this thesis is fuzzy PI+D control controlled by personal computer. Computer program is developed and written in Turbo C++. The experimental results are shown among conventional PID controller, PI+D controller and Fuzzy PI+D controller. According to the experimental results, all method provide good performance. For heavy load condition, however the result is that Fuzzy PI+D controller has better performance than conventional PID and conventional PI+D counterpart. The work implies a successful guideline to CNC implementation for import substitution.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องด้วยการสนับสนุนของบุคคลหลายฝ่าย ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ รศ.ดร.ปิติเขต สุรักษา อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาช่วยแนะแนวทางให้คำปรึกษาในการทำวิจัย ตลอดจนวิเคราะห์เพื่อแก้ปัญหาต่างๆ อันก่อให้เกิดผลประโยชน์ต่องานวิจัย ท่านอาจารย์ รศ.ดร.จกมล งามวิวิทย์ ที่ช่วยให้คำชี้แนะที่ดีในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอบคุณเพื่อนๆ และน้องๆ ประกอบด้วย คุณชมพูนุท เต็งเจริญ ที่ช่วยให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับโปรแกรม Matlab[®] และให้กำลังใจเสมอมา คุณธนา ภัทรเดช ที่ช่วยให้คำปรึกษาในการเขียนโปรแกรม Turbo C++ และแก้ไขปัญหามากมาย ในงานวิจัยเสมอมา คุณภูวนาท คำรองพร ที่ให้กำลังใจรวมทั้งทุกๆคนที่มีได้เอ่ยนามในที่นี้

และสุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้โอกาสในการศึกษา ดูแล เอาใจใส่และให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา

ณัฐพงศ์ จินจาคม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 สมมติฐานของการศึกษา.....	1
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	1
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีของระบบควบคุม.....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 การควบคุมแบบพี (Proportional Control).....	4
2.3 การควบคุมแบบไอ (Integral Control).....	4
2.4 การควบคุมแบบดี (Derivative Control).....	5
2.5 การควบคุมแบบพีไอดี (Proportional-Integral-Derivative Control).....	6
2.6 ข้อแตกต่างของการควบคุมแบบพีซีลอจิกและการควบคุมแบบดั้งเดิม.....	7
2.7 ระบบควบคุมพีซีพีไอพลัสดี.....	8
2.7.1 การหาสมการตัวควบคุมพีซีพีไอ.....	8
2.7.2 การหาสมการตัวควบคุมแบบดี.....	10
2.7.3 การหาสมการพีซีพีไอพลัสดี.....	11
2.8 การพีซีพีเคชัน กฎการควบคุม และการดีพีซีพีเคชัน.....	12
2.8.1 การพีซีพีเคชัน.....	12
2.8.2 กฎการควบคุมพีซี.....	14

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8.3 การตีพิมพ์ซีดีแผ่น.....	15
บทที่ 3 หลักการทำงานของแขนกลและการสร้างวงจร.....	21
3.1 ระบบการควบคุมแขนกลน้ำหนักเบาชนิด 3 แกน.....	21
3.2 หลักการทำงานของโปรแกรม.....	25
3.3 การออกแบบวงจรนับสัญญาณและวงจรกำเนิดพัลส์วีธีมอดูเลท.....	26
บทที่ 4 การทดลองการควบคุมตำแหน่งและผลการทดลองของแขนกล.....	27
4.1 ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของแขนกล.....	27
4.2 การทดลองและผลการทดลอง.....	28
4.2.1 การควบคุมแขนกลจริงด้วยการควบคุมแบบพีไอดี.....	28
4.2.2 การควบคุมแขนกลจริงด้วยการควบคุมแบบพีไอพลัสดี.....	40
4.2.3 การควบคุมแขนกลจริงด้วยการควบคุมแบบพีซีพีไอพลัสดี.....	51
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	64
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	64
5.2 ข้อเสนอแนะในการควบคุมแขนกล.....	65
5.3 แนวทางในการพัฒนาขั้นต่อไป.....	66
เอกสารอ้างอิง.....	67
ภาคผนวก ก.....	69
ประวัติผู้เขียน.....	70

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ตารางค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองสำหรับการควบคุมแบบพีไอดี.....	29
4.2 ตารางค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองสำหรับการควบคุมแบบพีไอพลัสดี.....	39
4.3 ตารางค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองสำหรับการควบคุมแบบพีซีซีพีไอพลัสดี.....	39
4.4 ตารางค่าเวลาต่างๆ ของการควบคุมแบบพีไอดี.....	40
4.5 แสดงเปอร์เซ็นต์ค่าฟุ้งเกิน (p) ของการควบคุมแบบพีไอดีในสภาวะ ไม่มีภาระและมีภาระ.....	51
4.6 ตารางค่าเวลาต่างๆ ของการควบคุมแบบพีไอพลัสดี.....	51
4.7 แสดงเปอร์เซ็นต์ค่าฟุ้งเกิน (p) ของการควบคุมแบบพีไอพลัสดี ในสภาวะไม่มีภาระและมีภาระ.....	52
4.8 ตารางค่าเวลาต่างๆ ของการควบคุมแบบพีซีซีพีไอพลัสดี.....	62
4.9 แสดงเปอร์เซ็นต์ค่าฟุ้งเกิน (p) ของการควบคุมแบบพีซีซีพีไอพลัสดี ในสภาวะไม่มีภาระและมีภาระ.....	62

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมแบบพีไอพลัสดี.....	8
2.2 ระบบควบคุมแบบพีซีพีไอพลัสดี.....	12
2.3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสำหรับสัญญาณอินพุตสำหรับพีซีพีไอ.....	13
2.4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสำหรับสัญญาณเอาต์พุตสำหรับพีซีพีไอ.....	13
2.5 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสำหรับสัญญาณอินพุตสำหรับพีซีดี.....	14
2.6 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสำหรับสัญญาณเอาต์พุตสำหรับพีซีดี.....	14
2.7 การจัดหมู่ความเป็นไปได้ของอินพุตสำหรับตัวควบคุมพีซีพีไอ.....	16
2.8 การจัดหมู่ความเป็นไปได้ของอินพุตสำหรับตัวควบคุมพีซีดี.....	19
3.1 รูปจำลองของแกนกลน้ำหนักเบาชนิด 3 แกนมองจากด้านบน.....	21
3.2 ระบบควบคุมแกนกลน้ำหนักเบาชนิด 3 แกน.....	22
3.3 ระยะห่างระหว่างเก็ลียวของบอลสกรู.....	23
3.4 ดีซีเซอร์ไวมอเตอร์ที่ใช้งาน.....	23
3.5 ภาระที่ใช้ในการทดลอง.....	23
3.6 ชุดวงจรอินเตอร์เฟสและชุดวงจรสนับสนุนการควบคุม.....	24
3.7 ระบบควบคุมแกนกลชนิด 3 แกนที่ใช้ในการทดลอง.....	24
3.8 ลำดับการทำงานของโปรแกรม.....	25
4.1 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกนกล.....	27
4.2 ผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 1 สำหรับการควบคุมแบบพีไอดี.....	29
4.3 ผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 2 สำหรับการควบคุมแบบพีไอดี.....	31
4.4 ผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 3 สำหรับการควบคุมแบบพีไอดี.....	32
4.5 ผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 4 สำหรับการควบคุมแบบพีไอดี.....	33
4.6 ผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 5 สำหรับการควบคุมแบบพีไอดี.....	35
4.7 ผลตอบสนองสถานะไม่มีภาระเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 2 สำหรับการควบคุมแบบพีไอดี.....	36
4.8 ผลตอบสนองสถานะมีภาระเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 2 สำหรับการควบคุมแบบพีไอดี.....	37
4.9 ผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 1 สำหรับการควบคุมแบบพีไอพลัสดี.....	41
4.10 ผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 2 สำหรับการควบคุมแบบพีไอพลัสดี.....	42
4.11 ผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 3 สำหรับการควบคุมแบบพีไอพลัสดี.....	43
4.12 ผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 4 สำหรับการควบคุมแบบพีไอพลัสดี.....	45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 ผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 5 สำหรับการควบคุมแบบพีไอพลัสดี.....	46
4.14 ผลตอบสนองสภาวะไม่มีภาระเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 3 สำหรับการควบคุมแบบพีไอพลัสดี....	47
4.15 ผลตอบสนองสภาวะมีภาระเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 3 สำหรับการควบคุมแบบพีไอพลัสดี.....	49
4.16 ผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 1 สำหรับการควบคุมแบบพีซีซีพีไอพลัสดี.....	53
4.17 ผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 2 สำหรับการควบคุมแบบพีซีซีพีไอพลัสดี.....	54
4.18 ผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 3 สำหรับการควบคุมแบบพีซีซีพีไอพลัสดี.....	55
4.19 ผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 4 สำหรับการควบคุมแบบพีซีซีพีไอพลัสดี.....	57
4.20 ผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 5 สำหรับการควบคุมแบบพีซีซีพีไอพลัสดี.....	58
4.21 ผลตอบสนองสภาวะไม่มีภาระเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 5 สำหรับการควบคุม แบบพีซีซีพีไอพลัสดี.....	59
4.22 ผลตอบสนองสภาวะมีภาระเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 5 สำหรับการควบคุม แบบพีซีซีพีไอพลัสดี.....	61

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบควบคุมที่ถูกเลือกใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ก็คือ ระบบควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งการปรับแต่งระบบควบคุมชนิดนี้จำเป็นจะต้องทราบฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการเสียก่อน แล้วจึงทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบควบคุม การปรับแต่งค่านี้จะได้ไม่ยากนักถ้าเราทราบฟังก์ชันถ่ายโอนแล้ว [1] แต่ในกรณีที่ไมทราบฟังก์ชันถ่ายโอนจะทำให้การปรับแต่งค่านั้นทำได้ยาก เนื่องจากระบบควบคุมแบบนี้เป็นระบบควบคุมแบบเชิงเส้น ดังนั้นค่าของพารามิเตอร์ที่ใช้อาจทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพได้แต่ในระบบควบคุมแบบฟัซซีนั้น การปรับแต่งค่าของระบบควบคุมไม่จำเป็นต้องทราบฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการอีกทั้งระบบควบคุมแบบนี้เป็นระบบควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น และไม่จำเป็นต้องทราบพารามิเตอร์ทุกค่าของกระบวนการ

1.2 สมมุติฐานการศึกษา

คาดว่าสามารถใช้การควบคุมแบบฟัซซีควบคุมแขนกลน้ำหนักเบาชนิดสามแกน [2,3] ให้เคลื่อนที่ตามตำแหน่งที่กำหนดในสถานะที่ไม่มีภาระและมีภาระ ได้แม่นยำ

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการควบคุมตำแหน่งโดยใช้ระบบควบคุมแบบฟัซซี เพื่อแก้ไขปัญหาในการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุม
2. แสดงผลตอบสนองกับระบบควบคุมแบบดั้งเดิม[4,5] เมื่อมีการเคลื่อนที่แบบขึ้นบันไดและการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่กำหนดทั้งในสถานะที่ไม่มีภาระและมีภาระ เพื่อสำรวจทางเลือกในการควบคุมแขนกลน้ำหนักเบาชนิดสามแกน

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้จะเป็นการประยุกต์ใช้งานของการควบคุมแบบฟัซซีกับระบบที่ไม่ทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มาควบคุมแขนกลน้ำหนักเบาชนิดสามแกน [6] เพื่อให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างแม่นยำและใช้เวลาในการทำงานให้น้อยที่สุด ผลตอบสนองที่ได้จากการควบคุมแขนกลน้ำหนักเบาชนิดสามแกนให้เคลื่อนที่ในสถานะที่ไม่มีภาระและมีภาระในระยะทางที่ต่างกันนำไป

เปรียบเทียบกับระบบควบคุมแบบพีไอดีดั้งเดิม และระบบควบคุมแบบพีเอฟเอสดี วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วยเนื้อหาทั้งหมด 5 บท ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงปัญหาของการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมเมื่อนำระบบควบคุมนั้นมาใช้กับระบบที่ไม่ทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 ทฤษฎีของระบบควบคุม กล่าวถึงคุณลักษณะของการควบคุมแบบดั้งเดิม ข้อแตกต่างระหว่างการควบคุมแบบดั้งเดิมกับการควบคุมแบบพีซีซี ระบบควบคุมแบบพีซีซีพีไอเอสดี

บทที่ 3 หลักการทำงานของแขนกลและการสร้างวงจร กล่าวถึงโครงสร้างของแขนกล ระบบควบคุมแขนกล หลักการทำงานของโปรแกรมควบคุมลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกล และการออกแบบวงจรมอเตอร์สัญญาณและวงจรถ่ายวีดิทัศน์

บทที่ 4 การทดลองการควบคุมตำแหน่งและผลการทดลองของแขนกล กล่าวถึงขั้นตอนการเคลื่อนที่ของแขนกล การทดลองและผลการทดลอง โดยการทดลองจะทำการทดลองให้แขนกลเคลื่อนที่สองแบบ คือ

1. การเคลื่อนที่ในสถานะที่ไม่มีภาระไปยังตำแหน่งที่ภาระตั้งอยู่แล้วนำภาระนั้นไปยังตำแหน่งที่ต้องการ
2. การเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่กำหนดเพียงตำแหน่งเดียวในสถานะที่ไม่มีภาระและมีภาระ

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง กล่าวถึงสรุปผลการทดลอง ข้อเสนอแนะในการควบคุมแขนกล ปัญหาที่พบในการทดลองและการแก้ไข และแนวทางในการพัฒนาขั้นต่อไป

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาค้นคว้าหลักการควบคุมแบบต่างๆ
2. ศึกษาวิธีการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุม
3. ศึกษาวิธีการใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก
4. ออกแบบวงจรมอเตอร์สำหรับการติดต่อกับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลและวงจรมอเตอร์ขับเคลื่อนการทำงานของโปรแกรมซึ่งประกอบด้วย วงจรนับสัญญาณ วงจรสร้างพัลส์วีดิทัศน์ และวงจรมอเตอร์

5. ทดลองใช้การควบคุมที่ได้พัฒนาขึ้นควบคุมแขนกล
6. แสดงผลที่ได้จากการทดลอง และสรุปผลการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีของระบบควบคุม

2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึง การควบคุมแบบพี (Proportional Control) การควบคุมแบบพีไอ (Proportional-Integral Control) การควบคุมแบบพีไอดี (Proportional-Integral-Derivative Control) และการสร้างการควบคุมแบบฟัซซีพีไอพลัสดี[7,8] (Fuzzy Proportional-Integral Plus Derivative Control) อย่างคร่าวๆ เนื่องจากในงานวิจัยนี้จะเน้นหนักในการประยุกต์ใช้งานการควบคุมแบบฟัซซีพีไอพลัสดี ซึ่งการออกแบบและจำลองผลการควบคุมใน[6] แต่ยังไม่มีการสร้างจริง เพื่อประยุกต์ใช้กับแขนกลนำหนักเบาชนิดสามแกน

2.2 การควบคุมแบบพี

การควบคุมแบบพีเป็นตัวควบคุมที่สามารถสร้างได้ง่าย โดยอาศัยความรู้พื้นฐานจากการขยายสัญญาณเท่านั้น ซึ่งตัวควบคุมแบบนี้สามารถสร้างได้จากวงจรขยายอิมพีแดนซ์หรืออาจเขียนเป็นซอฟต์แวร์ สำหรับตัวควบคุมแบบนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตของตัวควบคุม ($u(t)$) และสัญญาณผิดพลาด ($e(t)$) คือ

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.1)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P \quad (2.2)$$

โดยที่ K_p คือ เกนสัดส่วน

จุดเด่นของการควบคุมแบบพีคือสามารถสร้างได้ง่าย อย่างไรก็ตามตัวควบคุมชนิดนี้ไม่สามารถแก้ค่าผิดพลาดที่สภาวะอยู่ตัวหรือค่าผิดพลาดที่ช่วงเวลาอยู่ตัว[9] (Steady-state errors) ที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนค่าเป้าหมายหรือเมื่อเกิดการรบกวน (Disturbance)

2.3 การควบคุมแบบไอ

ในส่วนของตัวควบคุมแบบไอนี้ ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมจะเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณผิดพลาด นั่นคือจะวนวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.3)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (2.4)$$

โดยที่ K_i คือ เกนอินทิกรัล

ข้อดีของการควบคุมแบบนี้คือสามารถแก้ค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัวได้เนื่องจากสัญญาณเอาต์พุตจะเปลี่ยนแปลงจนกว่าสัญญาณผิดพลาดจะเป็นศูนย์

ข้อเสียของการควบคุมนี้คือจะไม่มีการตอบสนองจนกว่าจะเกิดสัญญาณผิดพลาดขึ้น

เพื่อที่จะแก้ปัญหานี้ จึงรวมการควบคุมแบบพีและธการควบคุมแบบไอเข้าด้วยกัน เป็นการควบคุมแบบพีไอ (PI controller) สมการการควบคุม แบบพีไอ คือ

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt] \quad (2.5)$$

โดยที่ $u(t)$ คือ สัญญาณเอาต์พุตของระบบควบคุม
 K_p คือ เกนสัดส่วน
 T_i คือ ค่าเวลาที่ใช้ในการเพิ่มค่าของสัญญาณควบคุม
 $e(t)$ คือ สัญญาณผิดพลาด

2.4 การควบคุมแบบดี

การควบคุมแบบดีใช้การคาดการณ์สัญญาณผิดพลาดโดยใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณผิดพลาด สมการความสัมพันธ์ของการควบคุมแบบดี คือ

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.6)$$

$$U(s) = K_d s \quad (2.7)$$

โดยที่ K_d คือ เกนอนุพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของการควบคุมแบบนี้คือเอาต์พุตจะมีค่ามากเมื่อสัญญาณผิดพลาดมีค่ามากและจะมีค่าลดลงเมื่อสัญญาณผิดพลาดลดลง

ข้อเสียคือเอาต์พุตจะเป็นศูนย์เมื่อสัญญาณผิดพลาดเป็นค่าคงที่

เพื่อที่จะแก้ปัญหานี้จึงรวมการควบคุมแบบพีและการควบคุมแบบดีเข้าด้วยกัน เป็นการควบคุมแบบพีดี (PD controller) สมการของการควบคุมแบบพีดี คือ

$$u(t) = K_p [e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (2.8)$$

โดยที่	$u(t)$	คือ สัญญาณเอาต์พุตของระบบควบคุม
	K_p	คือ เกนสัดส่วน
	T_d	คือ ค่าเวลาคงที่อนุพันธ์
	$e(t)$	คือ สัญญาณผิดพลาด

2.5 การควบคุมแบบพีไอดี

การควบคุมแบบพีไอดีได้รวมข้อดีของแต่ละการควบคุมดังกล่าวข้างต้นเข้าด้วยกัน สมการการควบคุมแบบพีไอดีแสดงดังต่อไปนี้

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (2.9)$$

โดยที่	$u(t)$	คือ สัญญาณเอาต์พุตของระบบควบคุม
	K_p	คือ เกนสัดส่วน
	T_i	คือ ค่าเวลาที่ใช้ในการเพิ่มค่าของสัญญาณควบคุม
	T_d	คือ ค่าเวลาคงที่อนุพันธ์
	$e(t)$	คือ สัญญาณผิดพลาด

ข้อดีของการควบคุมแบบพีไอดีคือ ระบบควบคุมจะตอบสนองเร็ว ทำให้เสถียรภาพในการควบคุมดีขึ้นกว่าระบบควบคุมแบบพีไอ สำหรับการเพิ่มการควบคุมแบบไอเข้าไปในการควบคุมแบบพี จะแก้ไขค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัว แต่จะทำให้เกิดค่าพุ่งเกิน (Overshoot) และมีค่าเวลาอยู่ตัว (Settling time) มากขึ้นแต่ด้วยการเพิ่มการควบคุมแบบดีเข้าไปทำให้ค่าพุ่งเกินและค่าเวลาคงตัวลดลง

ข้อเสียของการควบคุมแบบพีไอดี คือ การควบคุมแบบนี้ จะไม่เหมาะสำหรับใช้งานกับระบบที่มีค่ารบกวนที่มีความถี่สูง เนื่องจากการควบคุมแบบนี้จะทำการขยายสัญญาณรบกวน ดังกล่าวให้มีความมากขึ้น

2.6 ข้อแตกต่างของการควบคุมแบบพีซีลอจิกและการควบคุมแบบดั้งเดิม

ในอุตสาหกรรมจะใช้ตัวควบคุมแบบดั้งเดิมแบบพีไอดีเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากเป็นตัวควบคุมที่ใช้ได้กับระบบที่เป็นเชิงเส้น ออกแบบง่าย และต้นทุนไม่สูง ในปี ค.ศ.1991 Yamamoto และ Hashimoto [8] ได้กล่าวว่ามากกว่า 90% ของระบบควบคุมจะเป็นระบบควบคุมแบบพีไอดี

ถึงแม้ว่าระบบควบคุมแบบนี้จะสามารถใช้งานได้กับระบบเชิงเส้น แต่ก็ไม่สามารถใช้ได้กับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น หรือ ระบบที่มีอันดับสูง หรือ ระบบที่มีค่าเวลาหน่วงได้ รวมทั้งระบบที่ไม่สามารถระบุฟังก์ชันถ่ายโอนได้ ด้วยเหตุผลนี้ จึงได้มีการพัฒนาตัวควบคุมพีซีลอจิกขึ้น ซึ่งสามารถใช้ได้กับระบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นได้และยังใช้ได้กับระบบที่ไม่สามารถระบุฟังก์ชันถ่ายโอนได้อีกด้วย

การควบคุมแบบพีซีลอจิกเป็นการรวมกันของเงื่อนไขการควบคุมแบบ ถ้า...แล้ว... กฎพีซีลอจิกเป็นกฎที่ตั้งไว้โดยอาศัยการสังเกต อาศัยประสบการณ์ของผู้สร้างมากกว่าเทคนิคการทำความเข้าใจกับระบบ ในที่นี้จะยกตัวอย่างเกี่ยวกับการควบคุมอุณหภูมิ เช่น ต้องการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่ต้องการ $190^{\circ}\text{C} < \text{อุณหภูมิ} < 210^{\circ}\text{C}$ สามารถสร้างเงื่อนไข ถ้า...แล้ว... ได้ดังนี้

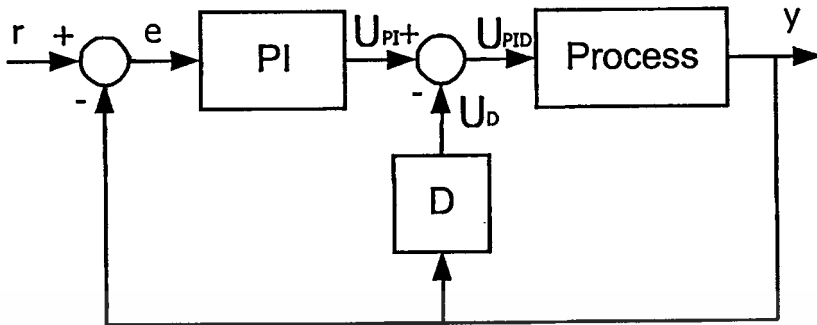
ถ้า (อุณหภูมิต่ำลง) และ (อุณหภูมิกำลังลดลง) แล้ว (ให้เครื่องทำความร้อนทำงาน)

หรือ ถ้า (ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น) และ (อุณหภูมิกำลังเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว)

แล้ว (ให้เครื่องทำความเย็นทำงานเต็มกำลัง)

ก็เหมือนกับเวลาอาบน้ำด้วยเครื่องทำน้ำอุ่นเราจะทำอย่างไรถ้าน้ำร้อนมากเกินไป เราก็จะต้องปรับให้น้ำนั้นร้อนน้อยลง ซึ่งพีซีลอจิกสามารถเลียนแบบพฤติกรรมการตัดสินใจของมนุษย์แต่ทำให้เป็นระบบอัตโนมัตินั่นเอง

2.7 ระบบควบคุมพีซีพีไอพลัสดี



รูปที่ 2.1 แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมแบบพีไอพลัสดี

การหาสมการเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบพีซีพีไอพลัสดีแบ่งออกเป็นสามขั้นตอน[10] คือ ขั้นแรกจะหาสมการเอาต์พุตของตัวควบคุมพีซีพีไอ ขั้นที่สองจะหาสมการเอาต์พุตของพีซีดี และขั้นตอนสุดท้ายคือ การนำสมการทั้งสองมารวมกัน

2.7.1 การหาสมการตัวควบคุมพีซีพีไอ

จากรูปที่ 2.1 สามารถเขียนสมการของตัวควบคุมแบบพีไอในรูปของโดเมนความถี่ได้ดังนี้

$$U_{PI}(s) = \left(K_P^c + \frac{K_i^c}{s} \right) E(s) \quad (2.10)$$

โดยที่ K_P^c คือ อัตราขยายของระบบควบคุม

K_i^c คือ อัตราขยายอินทิกรัล

$E(s)$ คือ ค่าความผิดพลาด

ในที่นี้สัญลักษณ์ด้วย c หมายถึงการควบคุมแบบพีไอดั้งเดิม (Conventional PI control)

จากสมการข้างต้นสามารถแปลงจากรูปแบบต่อเนื่องในโดเมนความถี่ s ให้เป็นแบบไม่ต่อเนื่องได้โดยอาศัยคุณสมบัติของการแปลงแบบเชิงเส้นคู่ (Bilinear transformation) ในโดเมนซี (Z-Domain) ดังนี้

$$U_{PI}(z) = \left(K_P^c - \frac{K_i^c T}{2} + \frac{K_i^c T}{1 - z^{-1}} \right) E(z) \quad (2.11)$$

ให้
$$K_p^c - \frac{K_i^c T}{2} = K_p$$

$$K_i^c T = K_i$$

ทำการแปลงอินเวอร์ต Z จะได้

$$U_{PI}(nT) - U_{PI}(nT-T) = K_p[e(nT) - e(nT-T)] + K_i T e(nT)$$

หารทั้งสมการด้วย T จะได้

$$\Delta U_{PI}(nT) = K_p e_v(nT) + K_i e_p(nT) \tag{2.12}$$

โดยที่
$$\Delta U_{PI}(nT) = \frac{U_{PI}(nT) - U_{PI}(nT-T)}{T}$$

$$e_v(nT) = \frac{e(nT) - e(nT-T)}{T}$$

$$e_p(nT) = e(nT)$$

ซึ่ง $\Delta U_{PI}(nT)$ คือ สัญญาณควบคุมที่เพิ่มขึ้นของตัวควบคุมแบบพีไอ

$e_v(nT)$ คือ สัญญาณผิดพลาด

$e_p(nT)$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณผิดพลาด

จากสมการที่ (2.12) สามารถจัดรูปแบบใหม่จะได้สมการพีซีพีไอดังนี้

$$U_{PI}(nT) = U_{PI}(nT-T) + K_{uPI} \Delta U_{PI}(nT) \tag{2.13}$$

เมื่อ
$$T \Delta U_{PI}(nT) = K_{uPI} \Delta U_{PI}(nT)$$

โดยที่ K_{uPI} คือ เกนของการควบคุมแบบพีซีพีไอ

2.7.2 การหาสมการตัวควบคุมแบบดี

จากรูปที่ 2.1 จะได้สมการดังนี้

$$U_D(s) = sK_d^c Y(s) \quad (2.14)$$

โดยที่ K_d^c คือ เกนอนุพันธ์

$Y(s)$ คือ สัญญาณเอาต์พุต

จากสมการข้างต้นสามารถแปลงจากรูปแบบต่อเนื่องให้เป็นแบบในโดเมนความถี่ไม่ต่อเนื่องได้โดยอาศัยคุณสมบัติของการแปลงแบบเชิงเส้นคู่ ดังนี้

$$U_D(z) = \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1} K_d^c Y(z) \quad (2.15)$$

$$U_D(z) = K_d^c \frac{2}{T} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} Y(z) \quad (2.16)$$

$$U_D(nT) + U_D(nT-T) = \frac{2K_d^c}{T} [y(nT) - y(nT-T)] \quad (2.17)$$

หารสมการ (2.17) ด้วย T ทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$\Delta U_D(nT) = K_d \Delta y(nT) \quad (2.18)$$

$$\Delta U_D(nT) = \frac{U_D(nT) + U_D(nT-T)}{T} \quad (2.19)$$

$$\Delta y(nT) = \frac{y(nT) - y(nT-T)}{T} \quad (2.20)$$

โดยที่ $\Delta U_D(nT)$ คือ สัญญาณควบคุมที่เพิ่มขึ้นของตัวควบคุมพีซีซีดี

$\Delta y(nT)$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเอาต์พุต

K_d คือ เกนอนุพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บวกสมการที่ (2.18) ด้วย $Ky_d(nT)$ เพื่อให้มีพจน์อ้างอิงในการทำพีชคณิตเกชัน โดยที่

$$Y_d(nT) = y(nT) - r(nT) = -e(nT) \quad (2.21)$$

$$\Delta U_D(nT) = K_d \Delta y(nT) + K y_d(nT) \quad (2.22)$$

จากสมการที่ (2.19) จะได้

$$U_D(nT) = -U_D(nT-T) + K_{uD} \Delta U_D(nT) \quad (2.23)$$

โดยที่ $\Delta U_D(nT) = K_{uD} \Delta U_D(nT)$

K_{uD} คือ อัตราขยายของตัวควบคุมพีชคณิต

K คือ อัตราขยายของสัญญาณเอาต์พุต

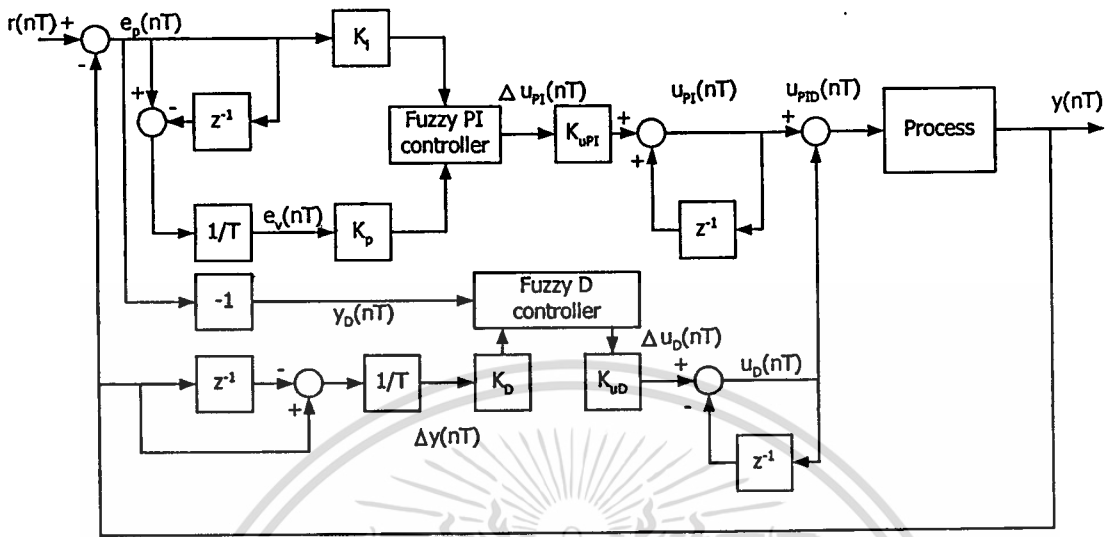
2.7.3 การหาสมการพีชคณิตโพลัสตี

สมการบรรยายตัวควบคุมพีชคณิตโพลัสตีได้จากการรวมกันของสมการตัวควบคุมพีชคณิตโพลัสตีและสมการตัวควบคุมพีชคณิต ดังนี้

$$U_{PID}(nT) = U_{PI}(nT) - U_D(nT) \quad (2.24)$$

หรือ
$$U_{PID}(nT) = U_{PI}(nT-T) + K_{uPI} \Delta U_{PI}(nT) + U_D(nT-T) - K_{uD} \Delta U_D(nT) \quad (2.25)$$

จากสมการที่(2.25)สามารถเขียนเป็นแผนภาพบล็อกของระบบควบคุมฟัซซีพีไอพลัสดีได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ระบบควบคุมแบบฟัซซีพีไอพลัสดี

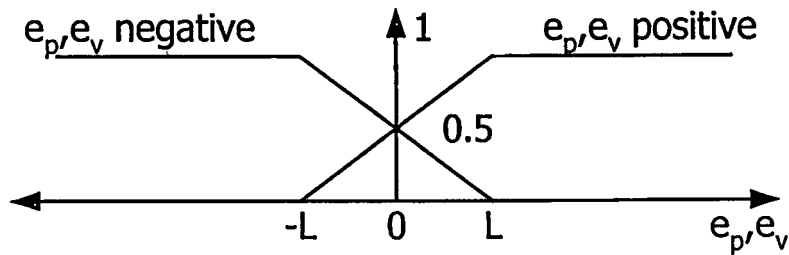
2.8 การฟัซซีฟิเคชัน กฎการควบคุม และการดีฟัซซีฟิเคชัน

ในหัวข้อนี้จะทำการตามขั้นตอนมาตรฐานของการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี ซึ่งมีอยู่ด้วยกันอยู่ 3 ขั้นตอนคือ การทำฟัซซีฟิเคชัน การสร้างกฎการควบคุม และการดีฟัซซีฟิเคชัน

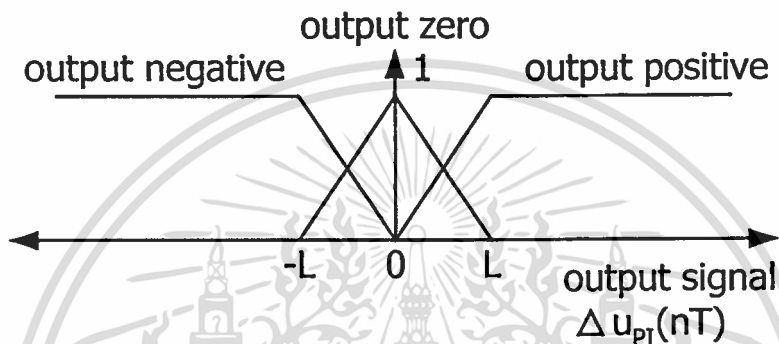
2.8.1 การฟัซซีฟิเคชัน

เราจะทำการหาความสัมพันธ์ของฟัซซีพีไอพลัสดีโดยจะแยกหาความสัมพันธ์ของฟัซซีพีไอและฟัซซีดี

ฟัซซีพีไอนั้นต้องการสัญญาณอินพุตสองสัญญาณด้วยกันคือ สัญญาณค่าผิดพลาด และ สัญญาณอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด และมีสัญญาณเอาต์พุตเพียงสัญญาณเดียวคือ สัญญาณควบคุมที่เพิ่มขึ้น ความเป็นสมาชิกของสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของฟัซซีพีไอแสดงดังรูปที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ โดยที่ L คือค่าคงที่มากกว่าศูนย์



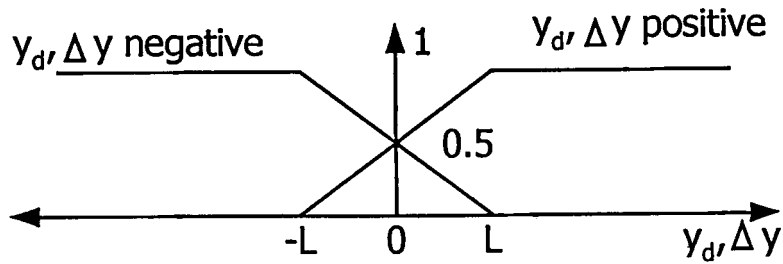
รูปที่ 2.3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของสัญญาณอินพุตสำหรับฟัซซีพีไอ



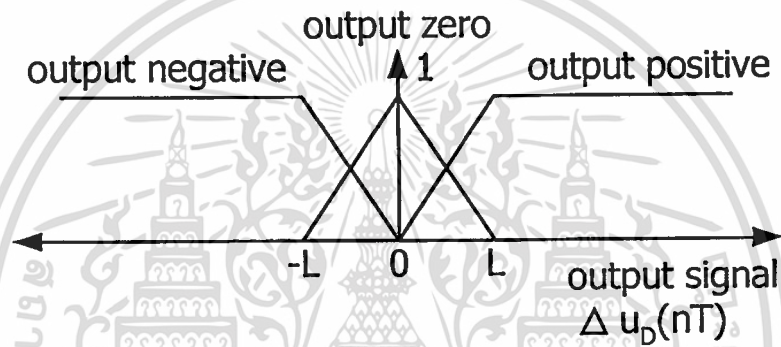
รูปที่ 2.4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของสัญญาณเอาต์พุตสำหรับฟัซซีพีไอ

ส่วนของฟัซซีดีนั้น ถ้าเราพิจารณาหลักการควบคุมในส่วนของฟัซซีดีในสมการที่ (2.23) จะเห็นว่ามีเพียงสัญญาณเดียวเท่านั้นที่เกี่ยวเนื่องกับสัญญาณเอาต์พุตคือ สัญญาณอัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเอาต์พุตซึ่ง โดยพื้นฐานของการควบคุมแบบฟัซซีนั้น ไม่สามารถที่จะให้เอาต์พุตได้ ดังนั้นจึงต้องมีสัญญาณอีกสัญญาณหนึ่งที่จะป้อนให้ฟัซซีดี ซึ่งก็คือสัญญาณที่ใช้บอกว่ขณะนั้น สัญญาณเอาต์พุตมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าสัญญาณอ้างอิง ($y_d(nT)$) นั่นเอง ดังในสมการที่ (2.22) โดยที่ถ้าสัญญาณนี้เป็นบวกนั้นหมายถึงสัญญาณเอาต์พุตมีค่ามากกว่าสัญญาณอ้างอิง

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอินพุตและเอาต์พุตสำหรับฟัซซีดีแสดงในรูปที่ 2.5 และ 2.6 ตามลำดับ



รูปที่ 2.5 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของสัญญาณอินพุตสำหรับฟัซซีดี



รูปที่ 2.6 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของสัญญาณเอาต์พุตสำหรับฟัซซีดี

2.8.2 กฎการควบคุมฟัซซี

อาศัยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกข้างต้น สามารถสร้างกฎการควบคุมของฟัซซีพีไอได้ดังนี้

(R1) IF $e_p = e_p \cdot n$ AND $e_v = e_v \cdot n$ THEN PI-output = $o \cdot n$

(R2) IF $e_p = e_p \cdot n$ AND $e_v = e_v \cdot p$ THEN PI-output = $o \cdot z$

(R3) IF $e_p = e_p \cdot p$ AND $e_v = e_v \cdot n$ THEN PI-output = $o \cdot n$

(R4) IF $e_p = e_p \cdot p$ AND $e_v = e_v \cdot p$ THEN PI-output = $o \cdot p$

โดยที่ e_p คือ สัญญาณผิดพลาด

e_v คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณผิดพลาด

PI-output คือ เอาต์พุตของระบบควบคุมฟัซซีพีไอ

$e_p \cdot p$ คือ ค่าผิดพลาดทางบวก

$e_p \cdot n$ คือ ค่าผิดพลาดทางลบ

$o \cdot p$ คือ เอาต์พุตทางบวก

$o \cdot n$ คือ เอาต์พุตทางลบ

$o \cdot z$ คือ เอาต์พุตเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นเดียวกับฟิซซีพีไอ เราสามารถสร้างกฎการควบคุมของฟิซซีดีได้ดังนี้

(R5) IF $y_d = y_d \cdot p$ AND $\Delta y = \Delta y \cdot p$ THEN D-output = $o \cdot z$

(R6) IF $y_d = y_d \cdot p$ AND $\Delta y = \Delta y \cdot n$ THEN D-output = $o \cdot p$

(R7) IF $y_d = y_d \cdot n$ AND $\Delta y = \Delta y \cdot p$ THEN D-output = $o \cdot n$

(R8) IF $y_d = y_d \cdot n$ AND $\Delta y = \Delta y \cdot n$ THEN D-output = $o \cdot z$

จากกฎทั้งหมด สำหรับกฎข้อที่ 1 (R1) ถ้าเราพิจารณาที่ฟิซซีพีไอ เื่อนไขค่าความผิดพลาดทางลบหมายถึงเอาต์พุตของระบบนั้นมีค่ามากกว่าสัญญาณอ้างอิง และ อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าผิดพลาดทางลบหมายถึงสัญญาณเอาต์พุตมีค่ามากกว่าศูนย์ (ตัวควบคุมเริ่มทำงานขับให้มีสัญญาณออกไป) เนื่องจากสมการเอาต์พุตของฟิซซีพีไอนั้นมีพจน์ของการควบคุมมากกว่าสมการควบคุมของฟิซซีดี จึงกำหนดค่าพจน์นี้มีเป็นลบและค่าเอาต์พุตของฟิซซีดีมีค่าเป็นศูนย์ แล้วจึงรวมสมการทั้งสองเข้าด้วยกันจากกฎข้อที่ 1 และ 5 (R5)

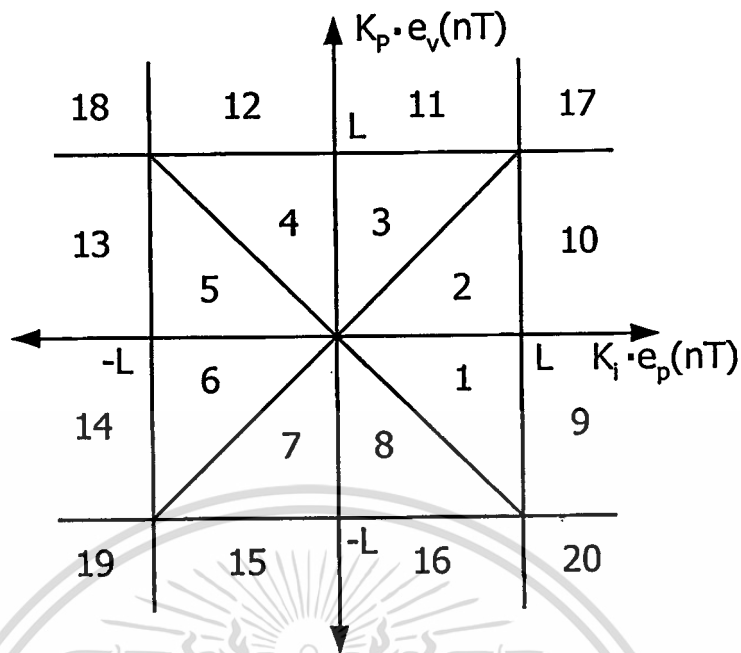
สำหรับกฎข้อที่ 2 (R2) ซึ่งเอาต์พุตมีค่ามากกว่าสัญญาณอ้างอิงและกำลังลดลง ดังนั้นจะกำหนดค่าเอาต์พุตของฟิซซีพีไอให้เป็นศูนย์ และค่าของเอาต์พุตของฟิซซีดีมีค่าเป็นบวก

2.8.3 การดีฟิซซีพีเคชัน

ในการทำดีฟิซซีพีเคชันของตัวควบคุมฟิซซีพีไอและฟิซซีดีนี้จะใช้หลักการของค่าศูนย์กลางเพื่อให้ได้ค่าเอาต์พุตของสมการที่ (2.26)

$$\Delta U(nT) = \frac{\sum \{ \text{ค่าความเป็นสมาชิกของอินพุต} \times \text{ค่าเอาต์พุตที่สอดคล้องกับค่าอินพุต} \}}{\sum \{ \text{ค่าความเป็นสมาชิกของอินพุต} \}} \quad (2.26)$$

สำหรับตัวควบคุมฟิซซีพีไอขอบเขตของค่าอินพุตได้ถูกแบ่งออกเป็น 12 ขอบเขต ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยที่ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของสัญญาณผิดพลาด (ได้จากกราฟของ e_p ในรูปที่ 2.3) แทนด้วยแกน X ($K_i \cdot e_p(nT)$) และ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอัตราการเปลี่ยนแปลงสัญญาณค่าผิดพลาด (ได้จากกราฟของ e_v ในรูปที่ 2.5) แทนด้วยแกน Y ($K_p \cdot e_v(nT)$)



รูปที่ 2.7 การจัดหมู่ความเป็นไปได้ของอินพุตสำหรับตัวควบคุมฟัซซีพีโอ

กฎการควบคุมของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีโอ (R1-R4) กับฟังก์ชันสมาชิกและขอบเขตนั้นจะถูกใช้ในการประเมินค่าที่เหมาะสมของกฎการควบคุมฟัซซีในแต่ละขอบเขต ถ้าเราพิจารณาค่าแห่งของความผิดพลาด $K_i \cdot e_p(nT)$ และอัตรา $K_p \cdot e_v(nT)$ ในขอบเขตที่ 1 และ 2 (ในรูปที่ 2.7) ที่ขอบเขตที่ 1 ตัวอย่างเช่น เมื่อ $e_p(nT)$ อยู่ในช่วง $[0, L]$ และ $e_v(nT)$ อยู่ในช่วง $[-L, 0]$ สำหรับทั้งสองสัญญาณนี้ให้ $e_v \cdot n > 0.5 > e_p \cdot n$ ดังนั้น จากรูปที่ 2.3 และ กฎข้อที่ 1 เมื่อใช้ตรรกศาสตร์ Zadeh “AND” จะได้

$$\{\text{“error} = e_p \cdot n \text{ AND rate} = e_v \cdot n\text{”}\} = \min\{e_p \cdot n, e_v \cdot n\} = e_p \cdot n \quad (2.28)$$

เพราะฉะนั้นกฎข้อที่ 1 จะให้

$$\text{กฎข้อที่ 1} \begin{cases} \text{เลือกค่าความเป็นสมาชิกของอินพุตเป็น } e_p \cdot n; \\ \text{ค่าเอาท์พุทที่สอดคล้องกับความเป็นสมาชิกคือ } 0 \cdot n; \end{cases}$$

ในการทำงานเดียวกันจะได้กฎที่ 2 – 4 (R2–R4) ดังนี้

$$\text{กฎข้อที่ 2} \begin{cases} \text{เลือกค่าความเป็นสมาชิกของอินพุตเป็น } e_p \cdot n; \\ \text{ค่าเอาต์พุตที่สอดคล้องกับความเป็นสมาชิกคือ } o \cdot z; \end{cases}$$

$$\text{กฎข้อที่ 3} \begin{cases} \text{เลือกค่าความเป็นสมาชิกของอินพุตเป็น } e_v \cdot n; \\ \text{ค่าเอาต์พุตที่สอดคล้องกับความเป็นสมาชิกคือ } o \cdot z; \end{cases}$$

$$\text{กฎข้อที่ 4} \begin{cases} \text{เลือกค่าความเป็นสมาชิกของอินพุตเป็น } e_p \cdot n; \\ \text{ค่าเอาต์พุตที่สอดคล้องกับความเป็นสมาชิกคือ } o \cdot n; \end{cases}$$

สามารถพิสูจน์ได้ว่าที่กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นจริงสำหรับขอบเขตที่ 1 และ ขอบเขตที่ 2 โดยสมการที่ (2.20)

$$\Delta U_{PI}(nT) = \frac{e_p \cdot n \cdot o \cdot n + e_p \cdot n \cdot o \cdot z + e_v \cdot n \cdot o \cdot z + e_v \cdot n \cdot o \cdot z + e_v \cdot p \cdot o \cdot p}{e_p \cdot n + e_p \cdot n + e_v \cdot n + e_v \cdot p} \quad (2.29)$$

ด้วยการใช้ $o \cdot p = L$, $o \cdot n = -L$, $o \cdot z = 0$ (จากรูปที่ 2.4) และสูตรทางเรขาคณิตจากฟังก์ชันความเป็นสมาชิกช่วยในการหาสมการของเส้นขอบเขตในรูปที่ 2.7 ได้ดังนี้

$$e_p \cdot p = \frac{K_i}{2L} \frac{e_p(nT) + L}{2L}, \quad e_p \cdot n = \frac{K_i}{2L} \frac{e_p(nT) + L}{2L} \quad (2.30)$$

$$e_v \cdot p = \frac{K_p}{2L} \frac{e_v(nT) + L}{2L}, \quad e_v \cdot n = \frac{K_p}{2L} \frac{e_v(nT) + L}{2L}$$

(2.31)

$$\text{จะได้} \quad \Delta U_{PI} = \frac{L}{2(2L - K_i \cdot e_p(nT))} [K_i \cdot e_p(nT) + K_p \cdot e_v(nT)] \quad (2.32)$$

โดยที่ $e_p(nT) \geq 0$ ในขอบเขตที่ 1 และ 2 ด้วยวิธีเดียวกันนี้สามารถหาสมการของขอบเขตที่ 5 และ 6 ได้ดังนี้

$$\Delta U_{PI} = \frac{L}{2(2L + K_i e_p(nT))} [K_i e_p(nT) + K_p e_v(nT)] \quad (2.33)$$

เมื่อ $e_p(nT) \leq 0$ ในขอบเขตที่ 5 และ 6 ดังนั้นเมื่อหาสมการของขอบเขตทั้งหมด 20 ขอบเขต ด้วยวิธีเดียวกับวิธีข้างต้นจะได้สมการทั้งหมดดังต่อไปนี้

$$\Delta U_{PI}(nT) = \frac{L[K_i e_p(nT)] + K_p e_v(nT)}{2(2L - K_i |e_p(nT)|)} \quad \text{สำหรับขอบเขต 1, 2, 5, 6} \quad (2.34)$$

$$= \frac{L[K_i e_p(nT)] + K_p e_v(nT)}{2(2L - K_p |e_v(nT)|)} \quad \text{สำหรับขอบเขต 3, 4, 7, 8} \quad (2.35)$$

$$= \frac{1}{2} [K_p e_v(nT) + L] \quad \text{สำหรับขอบเขต 9, 10} \quad (2.36)$$

$$= \frac{1}{2} [K_i e_p(nT) + L] \quad \text{สำหรับขอบเขต 11, 12} \quad (2.37)$$

$$= \frac{1}{2} [K_p e_v(nT) - L] \quad \text{สำหรับขอบเขต 13, 14} \quad (2.38)$$

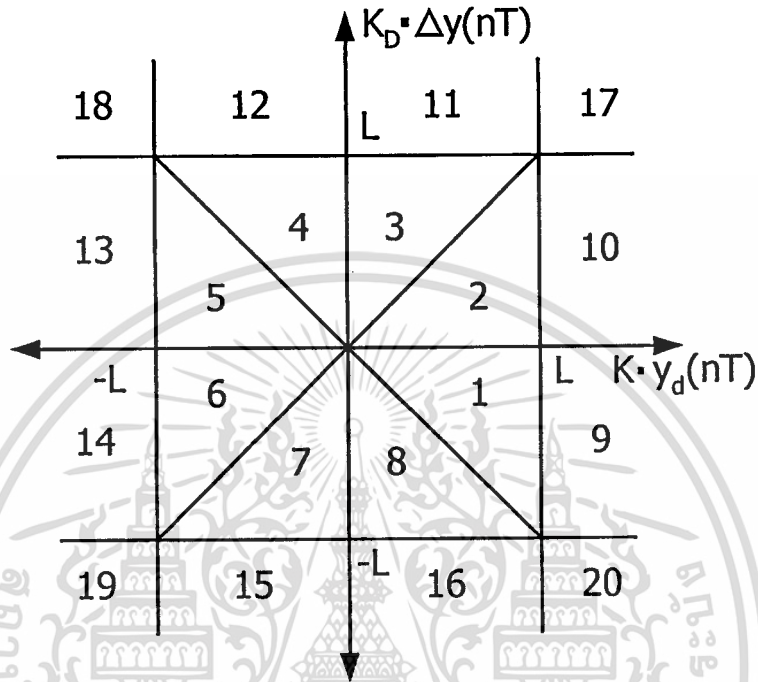
$$= \frac{1}{2} [K_p e_v(nT) - L] \quad \text{สำหรับขอบเขต 15, 16} \quad (2.39)$$

$$= 0 \quad \text{สำหรับขอบเขต 18, 20} \quad (2.40)$$

$$= L \quad \text{สำหรับขอบเขต 17} \quad (2.41)$$

$$= -L \quad \text{สำหรับขอบเขต 19} \quad (2.42)$$

การทำดีพีซซีพีเคชันของตัวควบคุมพีซซีดี จะใช้วิธีเดียวกันกับตัวควบคุมพีซซีพีโอ ยกเว้น สัญญาณอินพุตในกรณีนี้จะแตกต่างกัน ซึ่งการจัดขอบเขตของ 2 อินพุตสามารถจัดได้ 20 ขอบเขตดัง แสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การจัดหมู่ความเป็นไปได้ของอินพุตสำหรับตัวควบคุมพีซซีดี

เช่นเดียวกับสมการที่ (2.34)-(2.42) โดยที่ค่า $o.p = L$, $o.n = L$, $o.z = 0$ และหาสมการเส้นขอบเขตในรูปที่ 2.8 ได้โดยอาศัยเรขาคณิต

$$y_{d.p} = \frac{K y_d(nT) + L}{2L}, \quad y_{d.n} = \frac{K y_d(nT) + L}{2L} \quad (2.43)$$

$$\Delta y.p = \frac{K_d \Delta y(nT) + L}{2L}, \quad \Delta y.n = \frac{K_d \Delta y(nT) + LD}{2L} \quad (2.44)$$

จะได้สมการสำหรับทั้ง 20 ขอบเขตดังนี้

$$\Delta U_D(nT) = \frac{L[Ky_d(nT)] - K_d \Delta y(nT)}{2(2L - K |y_d(nT)|)} \quad \text{สำหรับขอบเขต 1, 2, 5, 6} \quad (2.45)$$

$$= \frac{L[Ky_d(nT)] - K_d \Delta y(nT)}{2(2L - K_d |\Delta y(nT)|)} \quad \text{สำหรับขอบเขต 3, 4, 7, 8} \quad (2.46)$$

$$= \frac{1}{2} [-K_d \Delta y(nT) + L] \quad \text{สำหรับขอบเขต 9, 10} \quad (2.47)$$

$$= \frac{1}{2} [Ky_d(nT) - L] \quad \text{สำหรับขอบเขต 11, 12} \quad (2.48)$$

$$= \frac{1}{2} [K_d \Delta y(nT) - L] \quad \text{สำหรับขอบเขต 13, 14} \quad (2.49)$$

$$= \frac{1}{2} [Ky_d(nT) + L] \quad \text{สำหรับขอบเขต 15, 16} \quad (2.50)$$

$$= 0 \quad \text{สำหรับขอบเขต 18, 20} \quad (2.51)$$

$$= -L \quad \text{สำหรับขอบเขต 17} \quad (2.52)$$

$$= L \quad \text{สำหรับขอบเขต 19} \quad (2.53)$$

ค่าคงที่ K ที่คูณอยู่กับสัญญาณ $y_d(nT)$ เปลี่ยนเหมือนกับแกนของตัวควบคุม

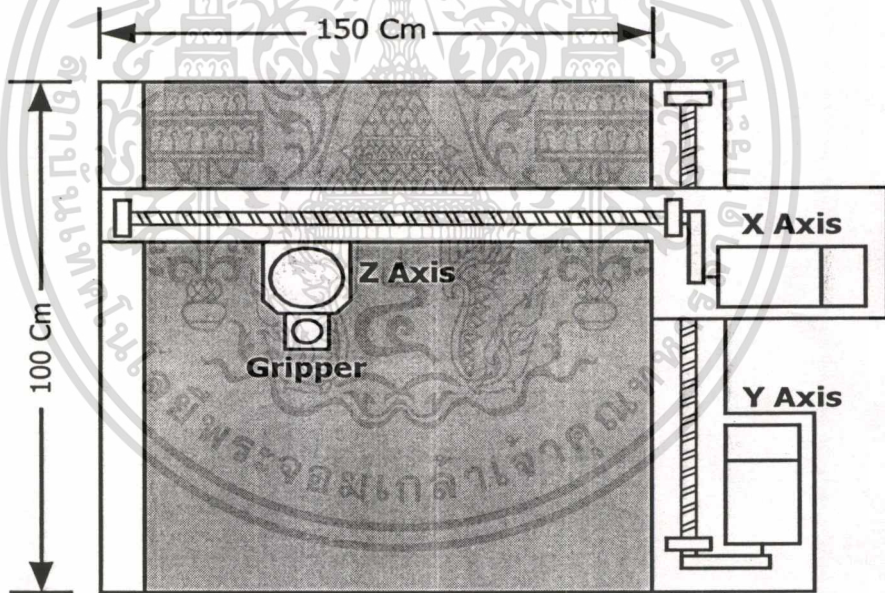
เมื่อเราทราบถึงหลักการควบคุมแบบพีไอดี และ พีซีพีไอพลัสดีแล้ว โดยส่วนที่ยังไม่ได้ทำการวิจัยต่อขอจาก[6] ก็คือ การสร้างจริง โดยในขั้นต่อไปจะต้องทราบหลักการทำงานของแกนกลที่จะนำการควบคุมแบบพีซีมาประยุกต์ใช้งาน การสร้างวงจร ระบบการควบคุมแกนกล และการพัฒนาโปรแกรมเพื่อสร้างเป็นการควบคุมที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งจะกล่าวในบทที่ 3 ต่อไป

บทที่ 3

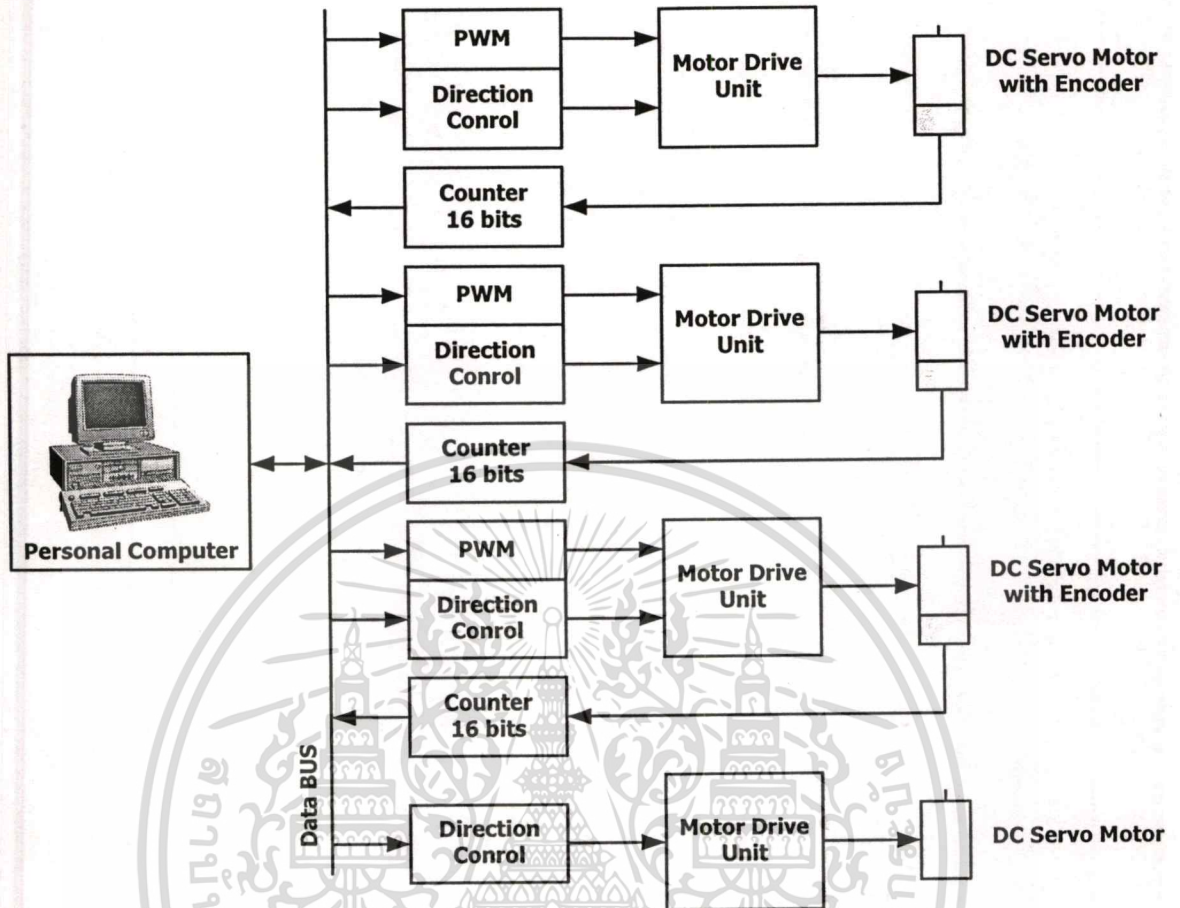
หลักการทํางานของแขนกลและการสร้างวงจร

ในบทนี้จะกล่าวถึง หลักการทํางานและการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการควบคุมแขนกลนำหนักเบาชนิดสามแกน ซึ่งประกอบด้วย วิธีการรับและส่งข้อมูลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลและแขนกล การออกแบบวงจรถอดรหัส การออกแบบวงจรมับสัญญาณ การออกแบบ วงจรขับเคลื่อน ส่วนประกอบต่างๆของแขนกล โปรแกรมที่ใช้ในการพัฒนาระบบ และหลักการทํางานของโปรแกรมที่ใช้ควบคุมแขนกล ในที่นี้จะไม่กล่าวถึงโครงสร้างของกระบวนการควบคุมเนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการประยุกต์ใช้งานการควบคุมแบบพีซี[11] สำหรับระบบที่ไม่สามารถทราบโครงสร้างของกระบวนการได้

3.1 ระบบการควบคุมแขนกลนำหนักเบาชนิด 3 แกน



รูปที่ 3.1 รูปจำลองของแขนกลนำหนักเบาชนิด 3 แกนมองจากด้านบน



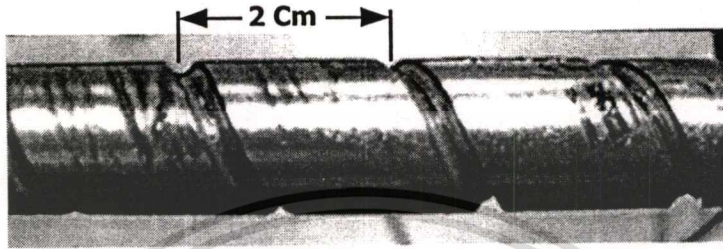
รูปที่ 3.2 ระบบควบคุมแกนกลน้ำหนักราชคณิต 3 แกน

จากรูปที่ 3.2 แสดงระบบควบคุมแกนกลน้ำหนักราชคณิต 3 แกน (ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า แกนกล) ประกอบด้วย คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่มีความเร็วในการประมวลผล 133 MHz เพื่อใช้โปรแกรมเทอร์โบ ซี พลัส พลัส เวอร์ชัน 3.0 ทำงานบน DOS เวอร์ชัน 2.0 ควบคุมแกนกล ด้วยการควบคุมแบบพีไอดีพีโอพลัสดี และพีซีพีโอพลัสดี ส่งและรับข้อมูลผ่านทาง ISA Slot [12] โดยจะส่งข้อมูลขนาด 8 บิตให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051 เพื่อกำเนิดสัญญาณพัลส์วริมอดูเลทและส่งต่อไปที่วงจรมอเตอร์พร้อมกับส่งสัญญาณควบคุมทิศทางขนาด 2 บิต ให้วงจรมอเตอร์ด้วยเช่นกัน และจะรับข้อมูลขนาด 16 บิต เข้ามาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051 ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรมอเตอร์สัญญาณ โดยวงจรมอเตอร์สัญญาณกำเนิดสัญญาณพัลส์วริมอดูเลท และวงจรมอเตอร์นี้จะอยู่นอกคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลทั้งหมด มอเตอร์ที่ใช้งานมีกำลังขนาด 180 วัตต์ 2 ตัว และ 300 วัตต์ 1 ตัว ทั้งหมด มีแรงดันใช้งานสูงสุด 75 โวลต์ 3.4 แอมป์ 3000 รอบต่อนาที (กำเนิดพัลส์ 1000 ลูกต่อรอบ) ส่วนประกอบของแกนกลประกอบด้วย ดีซีเซอร์โวมอเตอร์ พูลเลย์ สายพาน รางเลื่อน และ บอลสกรูที่มีระยะห่างระหว่างเกลียว

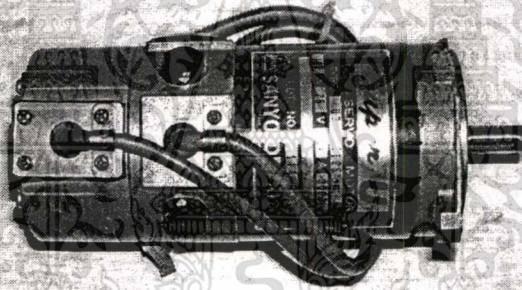
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ 2 เซนติเมตร ดังแสดงอุปกรณ์และชิ้นส่วนสำคัญที่ใช้ในการสร้างแขนกลในรูปที่ 3.3-3.7 ดังนั้น เราสามารถหาระยะทางการเคลื่อนที่ของแขนกลต่อพัลส์ได้ดังนี้ คือ

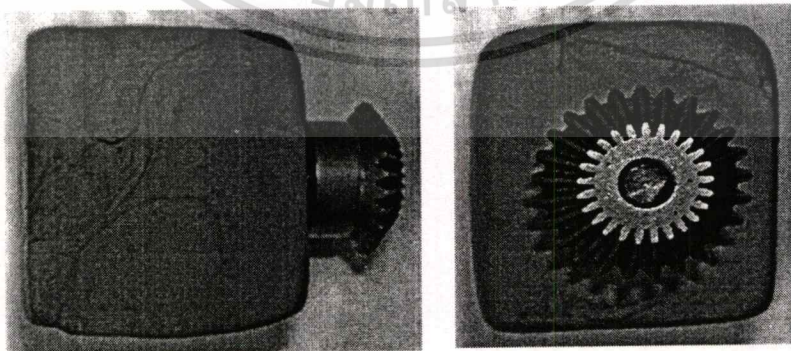
$$\begin{aligned} \text{ระยะทางการเคลื่อนที่} &= 2 \text{ เซนติเมตร} / 1000 \text{ พัลส์} \\ &= 0.002 \text{ เซนติเมตรต่อพัลส์} \end{aligned}$$



รูปที่ 3.3 ระยะห่างระหว่างเกลียวของบอลสกรู

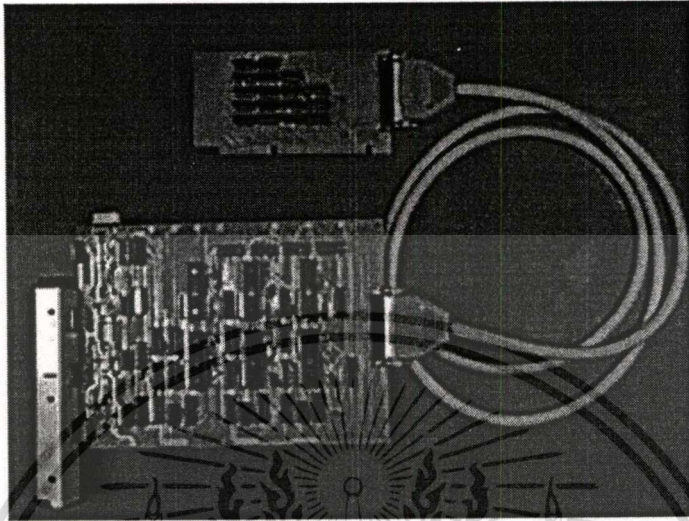


รูปที่ 3.4 มอเตอร์ที่ใช้ในงาน

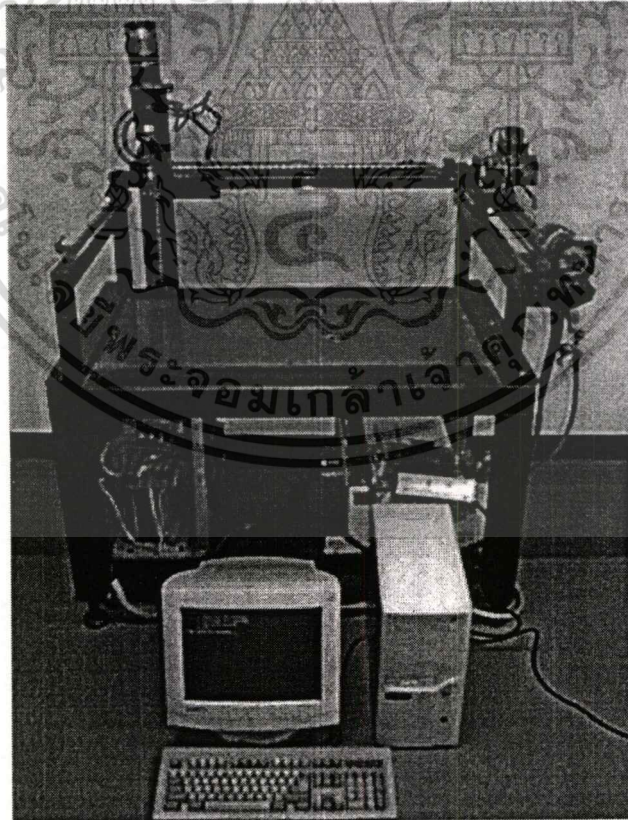


รูปที่ 3.5 ภาระที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ชุดวงจรอินเตอร์เฟสและชุดวงจรสนับสนุนการควบคุม

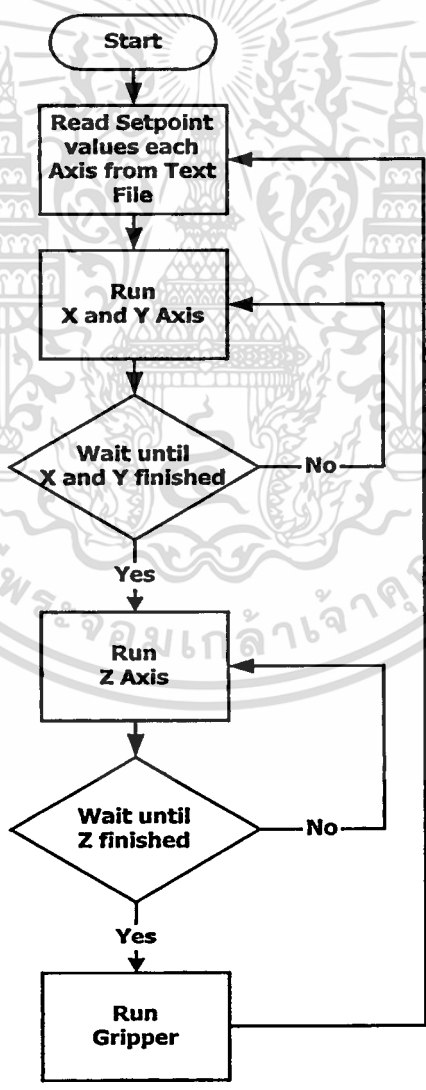


รูปที่ 3.7 ระบบควบคุมแกนกลชนิด 3 แกนที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 หลักการทำงานของโปรแกรม

การควบคุมทั้งหมดที่ใช้ในการควบคุมแขนกลนี้พัฒนามาด้วยโปรแกรมภาษาซี พลัส พลัส [13] เวอร์ชัน 2.0 ทั้งหมด โดยขั้นตอนการทำงานจะเริ่มจากการอ่านค่าเป้าหมายทั้งหมดจากเท็กซ์ไฟล์ (setpoint.txt) แล้วจึงเริ่มต้นทำงาน ซึ่งจะเริ่มทำงานจากแกน X และ Y พร้อมกันก่อน เมื่อทั้งสองแกนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายแรกเรียบร้อยแล้ว (ตำแหน่งที่ภาาระวางอยู่) แกน Z ก็จะเริ่มทำงานเคลื่อนที่ลงมาที่ตำแหน่งที่กำหนดไว้ หลังจากนั้นมือจับก็จะเริ่มทำงานโดยจับภาาระไว้ หลังจากนั้นแกน Z ก็จะทำงานอีกครั้ง เพื่อยกภาาระขึ้นไปยังตำแหน่งก่อนที่จะเคลื่อนที่ลงมาจับภาาระ และ แกน X และ Y ก็จะเริ่มทำงานโดยจะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่จะวางภาาระ เมื่อเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งดังกล่าวแล้ว แกน Z และมือจับก็จะทำงานเช่นเดิมเพื่อวางภาาระลง การควบคุมที่ใช้ในการทดลองนี้จะมีลำดับการทำงานแบบเดียวกันทั้งหมด ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบวงจรมัลติเพล็กซ์สัญญาณและวงจรถ่ายสัญญาณพัลส์วีธีมอดูเลต

เพื่อให้สะดวกในการสร้างวงจรมัลติเพล็กซ์สัญญาณ และ วงจรถ่ายสัญญาณพัลส์วีธีมอดูเลต ดังนั้น จึงนำ ไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051 [14] มาโปรแกรมการทำงานให้เป็นตัวมัลติเพล็กซ์สัญญาณจากส่วนกำเนิดพัลส์ของดีซีซีเซอร์ไวโมเตอร์และตัวแปลงสัญญาณขนาด 8 บิตให้เป็นสัญญาณพัลส์วีธีมอดูเลต เพื่อส่งต่อไปภาคขับมอเตอร์ต่อไป

เมื่อสร้างวงจรถ่ายสัญญาณพัลส์วีธีมอดูเลตทั้งหมดเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการทดลองการเคลื่อนที่ของแขนกลด้วยการควบคุมแบบพีไอดี พีไอพลัสดี และพีซีพีไอพลัสดี ที่ค่าอัตราการขยายต่างกัน แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบถึงการทำงานของแต่ละการควบคุม ซึ่งจะกล่าวในบทที่ 4 ต่อไป



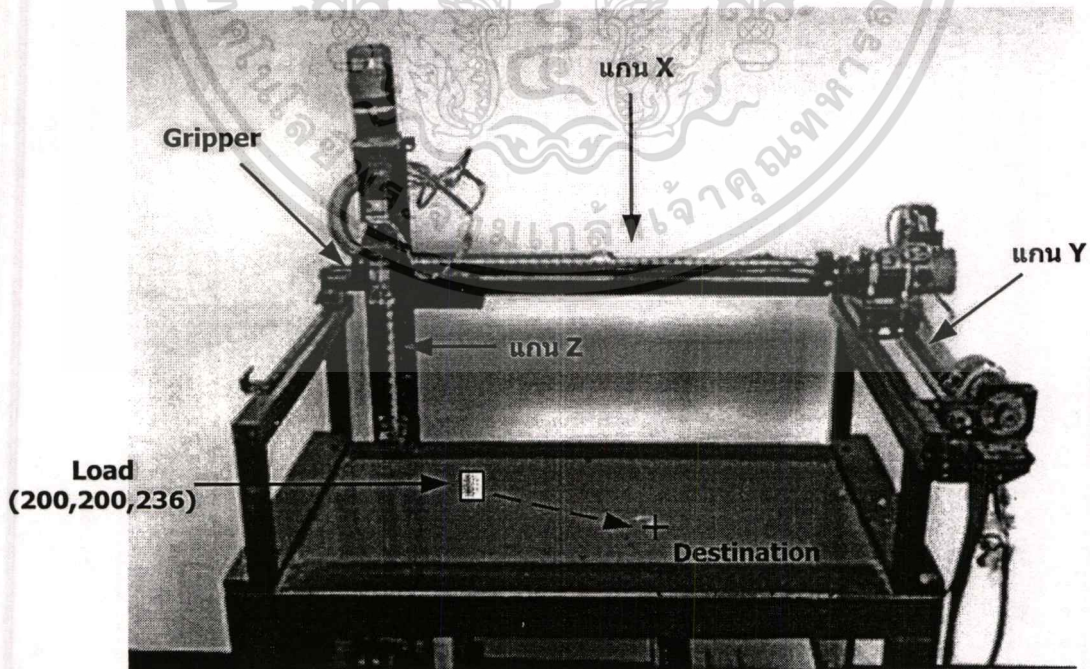
บทที่ 4

การทดลองการควบคุมตำแหน่งและผลการทดลองของแขนกล

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนในการทดลองการเคลื่อนที่จริงของแขนกล โดยเคลื่อนที่ในสถานะที่มีภาระและไม่มีภาระ และ เคลื่อนที่เป็นระยะทาง 190 มิลลิเมตร และนำผลการทดลองที่ได้จากการเคลื่อนที่จริงโดยลองใช้การควบคุมทั้งสามชนิด คือ การควบคุมแบบพีไอดีดั้งเดิม การควบคุมแบบพีไอพลัสดีแบบตัดแปลง และ การควบคุมแบบพีซีพีไอพลัสดี เพื่อเป็นทางเลือกในการประยุกต์ใช้การควบคุม ในการแสดงผลตอบสนองนั้นจะดูจาก ค่าเวลาหน่วง(t_d) ค่าเวลาไต่ขึ้น(t_r) ค่าเวลาคงตัว(t_s) และเปอร์เซ็นต์ ค่าพุ่งเกิน(Percent Overshoot: P_o) ที่คำนวณได้จากกราฟของผลตอบสนอง

4.1 ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของแขนกล

แขนกลที่สร้างขึ้นเป็นแขนกลแบบฉาก (Cartesian arms) ในสามมิติ คือ มีแกน X Y และ Z โดยที่ XY เป็นระนาบซึ่งในทีนี้คือพื้นที่โต๊ะงาน ซึ่งมีขนาด 1000 มม. x 1500 มม. และ แกนในแนวตั้ง Z มีพิสัยการปฏิบัติงาน 250 มม. แขนกลที่สร้างขึ้นนี้ทำจากวัสดุอลูมิเนียมซึ่งมีน้ำหนักเบา แสดงในรูปแบบที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ตำแหน่งพิกัดสำคัญสำหรับอ้างอิงในการเคลื่อนที่ของแขนกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเคลื่อนที่ขั้นแรกของแขนกลจะเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นที่พิกัด $X=10$ mm, $Y=10$ mm และ $Z=10$ mm ในสภาวะไม่มีภาระไปยังตำแหน่งที่ภาระวางอยู่ ซึ่งจะเคลื่อนที่ในแนวระนาบ $X Y$ ก่อนจากตำแหน่ง $X=10$ mm, $Y=10$ mm ไปยังตำแหน่ง $X=200$ mm, $Y=200$ mm จากนั้นจึงเลื่อนแกน Z จากตำแหน่ง $Z=10$ mm ไปยัง $Z=236$ mm จากนั้นมือจับจึงเริ่มทำงาน เมื่อมือจับภาระเรียบร้อยแล้วแขนกลจะเคลื่อนที่เพื่อนำภาระไปยังตำแหน่งปลายทางที่ตำแหน่ง $X=500$ mm, $Y=400$ mm เมื่อระนาบ $X Y$ เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง $X=500$ mm, $Y=400$ mm เรียบร้อยแล้ว แกน Z จึงจะเคลื่อนที่จาก $Z=20$ mm ไปยังตำแหน่ง $Z=236$ mm และวางภาระลง ส่วนของน้ำหนักของภาระนั้นมีขนาดเท่ากับ 200 กรัม

การเคลื่อนที่อีกแบบหนึ่งเป็นการเคลื่อนที่ในระยะทาง 190 มิลลิเมตร คือแต่ละแกนจะเคลื่อนที่จากตำแหน่ง $X=10$ mm, $Y=10$ mm และ $Z=10$ mm ไปยังตำแหน่ง $X=200$ mm, $Y=200$ mm และ $Z=200$ mm โดยในการเคลื่อนที่นั้นจะเคลื่อนที่ในระนาบ $X Y$ ก่อน เมื่อการเคลื่อนที่ในแนวระนาบทั้งสองไปยังตำแหน่งเป้าหมายแล้ว จึงเคลื่อนที่แกน Z ทั้งในสภาวะที่ไม่มีภาระและมีภาระ โดยภาระมีน้ำหนักเท่ากับ 2 กิโลกรัม

4.2 การทดลองและผลการทดลอง

เมื่อโปรแกรมเริ่มทำงานจะสร้างแฟ้มข้อมูลเพื่อจัดเก็บข้อมูลค่าความผิดพลาดตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งโปรแกรมทำงานเสร็จ จากนั้นเพื่อหาผลตอบสนองจึงได้พัฒนาโปรแกรมด้วยโปรแกรม Matlab เพื่อช่วยในการอ่านแฟ้มข้อมูลเพื่อนำไปพล็อตกราฟและคำนวณค่าเวลาได้ขึ้น ค่าเวลาหน่วง และ ค่าเวลาคงตัว ในการคำนวณหาค่าเวลาคงตัวนั้นจะแบ่งการคำนวณออกเป็นสองกรณีคือกรณีของผลตอบสนองที่ไม่เกิดค่าพุ่งเกิน โดยจะคิดที่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ และในกรณีของผลตอบสนองที่เกิดค่าพุ่งเกินโดยจะคิดที่ 0-100 เปอร์เซ็นต์

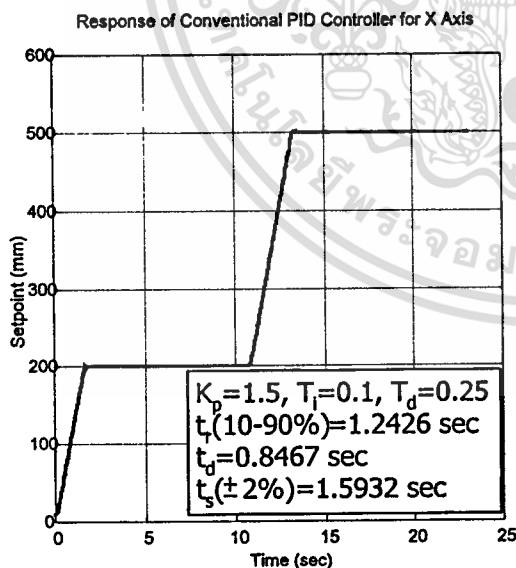
4.2.1 การควบคุมแขนกลจริงด้วยการควบคุมแบบพีไอดี

ในการทดลองได้ทำการทดลองเคลื่อนที่ทั้งหมด 5 ครั้ง ในแต่ละครั้งจะทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีไปจากเดิม สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่เลือกนั้นพิจารณาให้ ค่าเวลาได้ขึ้น ค่าเวลาหน่วง และค่าเวลาอยู่ตัว มีค่าน้อยที่สุด ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ นั้นแสดงในตารางที่ 4.1

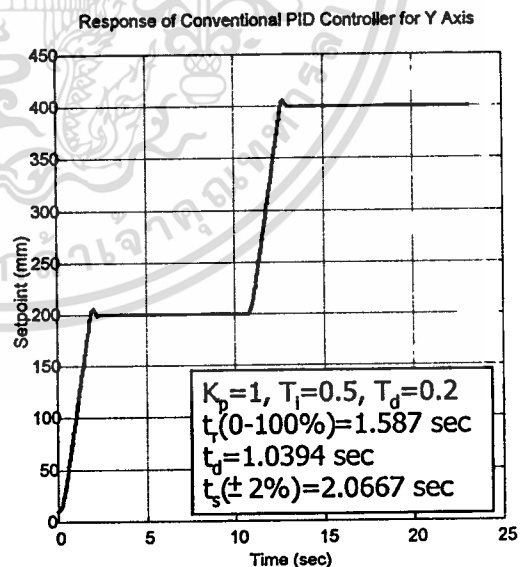
อนึ่ง พารามิเตอร์ในตารางที่ 4.1 นี้ ได้จากวิธีการลองผิดลองถูก ซึ่งเป็นเกณฑ์ลองแล้วได้ค่าที่ดีเท่าที่ผู้ทดลองได้ใช้ความสามารถปรับแต่ง

ตารางที่ 4.1 ตารางค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองสำหรับการควบคุมแบบพีไอดี

	K_p	T_i	T_d
พารามิเตอร์ที่ 1 - สำหรับแกน X และแกน Z	1.5	0.1	0.25
- สำหรับแกน Y	1	0.5	0.2
พารามิเตอร์ที่ 2 - สำหรับแกน X และแกน Z	2.5	0.5	0.5
- สำหรับแกน Y	1.5	0.25	1
พารามิเตอร์ที่ 3 - สำหรับแกน X และแกน Z	5	0.01	0.5
- สำหรับแกน Y	1.5	0.5	1.5
พารามิเตอร์ที่ 4 - สำหรับแกน X และแกน Z	3	0.02	0.75
- สำหรับแกน Y	1.75	0.55	1.75
พารามิเตอร์ที่ 5 - สำหรับแกน X และแกน Z	7.5	0.02	0.5
- สำหรับแกน Y	1.2	0.01	0.1

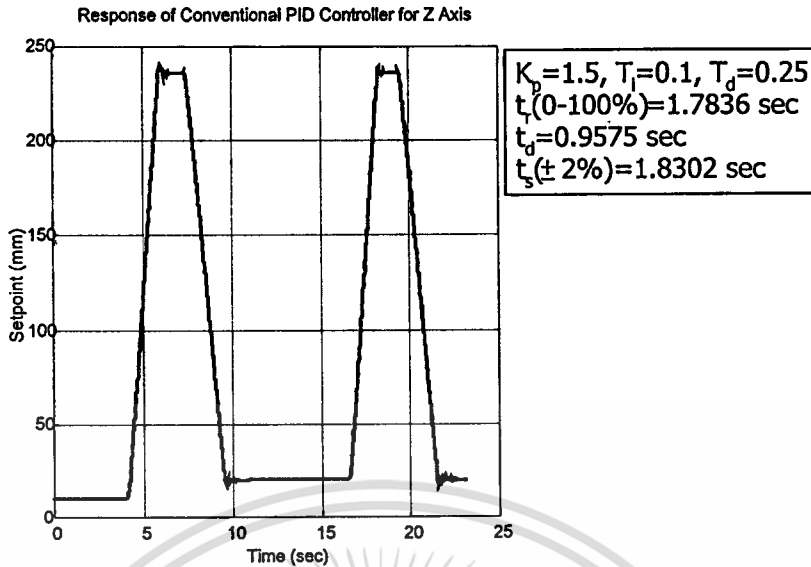


(ก) ผลตอบสนองของแกน X



(ข) ผลตอบสนองของแกน Y

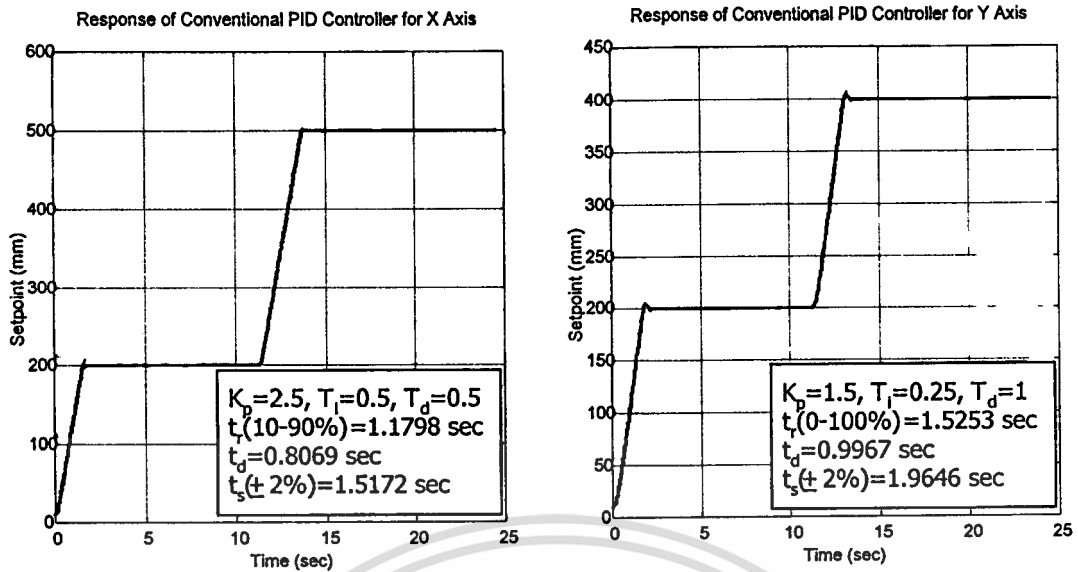
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) ผลตอบสนองของแกน Z

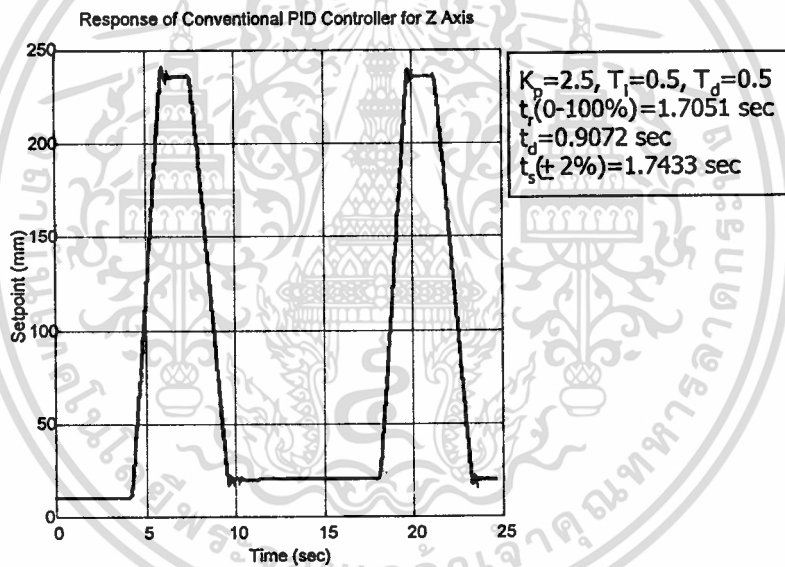
รูปที่ 4.2 ผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 1 สำหรับการควบคุมแบบพีไอดี

จากรูปที่ 4.2 (ก) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=1.5, T_i=0.1$ และ $T_d=0.25$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาไต่ขึ้นคิดที่ 10–90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.2426 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.8467 วินาที และค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.5932 วินาที รูปที่ 4.2 (ข) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=1.5, T_i=0.1$ และ $T_d=0.25$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาไต่ขึ้นคิดที่ 0–100 เปอร์เซ็นต์ได้เท่ากับ 1.587 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 1.0394 วินาที และค่าเวลาคงตัวเท่ากับ 2.0667 วินาที รูปที่ 4.2 (ค) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=1, T_i=0.5$ และ $T_d=0.2$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาไต่ขึ้นคิดที่ 0–100 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.7836 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.9575 วินาที และค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.8302 วินาที เวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมดเท่ากับ 23.021978 วินาที ต่อไปจะเป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ 2



(ก) ผลตอบสนองของแกน X

(ข) ผลตอบสนองของแกน Y



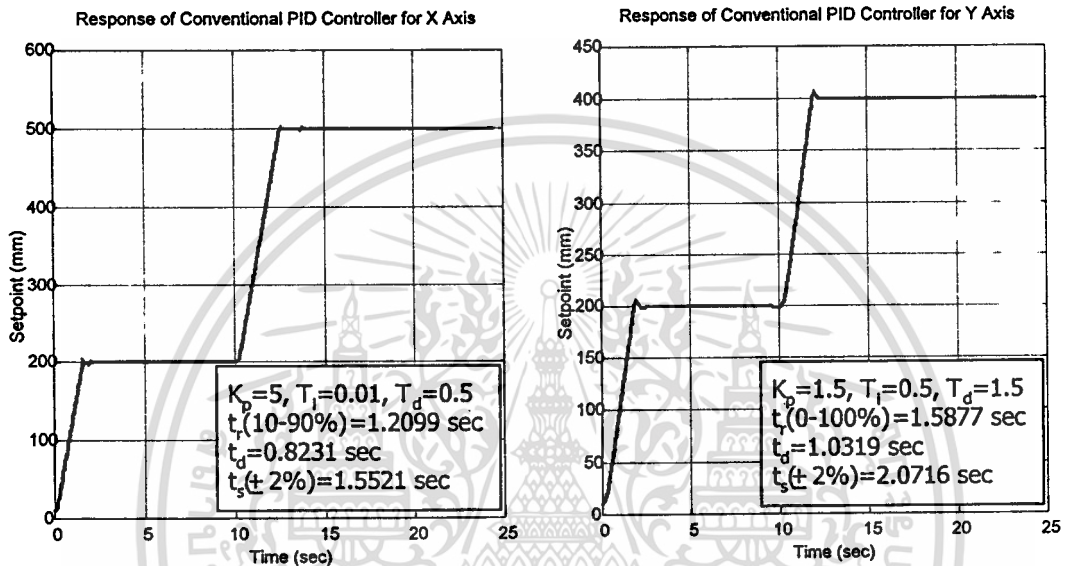
(ค) ผลตอบสนองของแกน Z

รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 2 สำหรับการควบคุมแบบพีไอดี

จากรูปที่ 4.3 (ก) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=2.5$, $T_i=0.5$ และ $T_d=0.5$ จากผลตอบสนองข้างต้น เราสามารถคำนวณหาค่าเวลาไต่ขึ้น คิดที่ 10–90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.1798 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.8069 วินาที และค่าเวลากงตัว เท่ากับ 1.5172 วินาที รูปที่ 4.3 (ข) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=1.5$, $T_i=0.25$ และ $T_d=1$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาไต่ขึ้นคิดที่ 0-100 เปอร์เซ็นต์ได้เท่ากับ 1.5253 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.9967 วินาที และค่าเวลากงตัวเท่ากับ 1.9646 วินาที

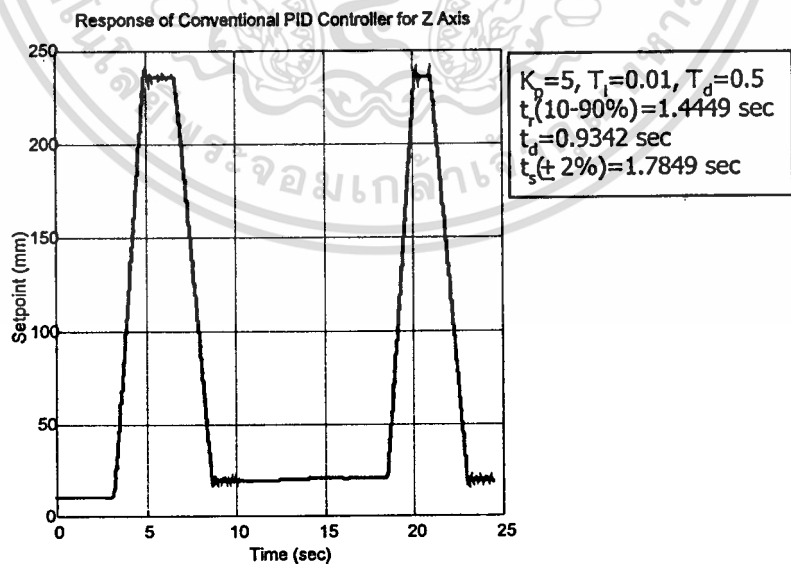
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.3 (ค) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=2.5$, $T_i=0.5$ และ $T_d=0.5$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิกที่ 0-100 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.7051 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.9072 วินาที และค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.7433 วินาที เวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมดเท่ากับ 24.56044 วินาที ต่อไปจะเป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ 3



(ก) ผลตอบสนองของแกน X

(ข) ผลตอบสนองของแกน Y

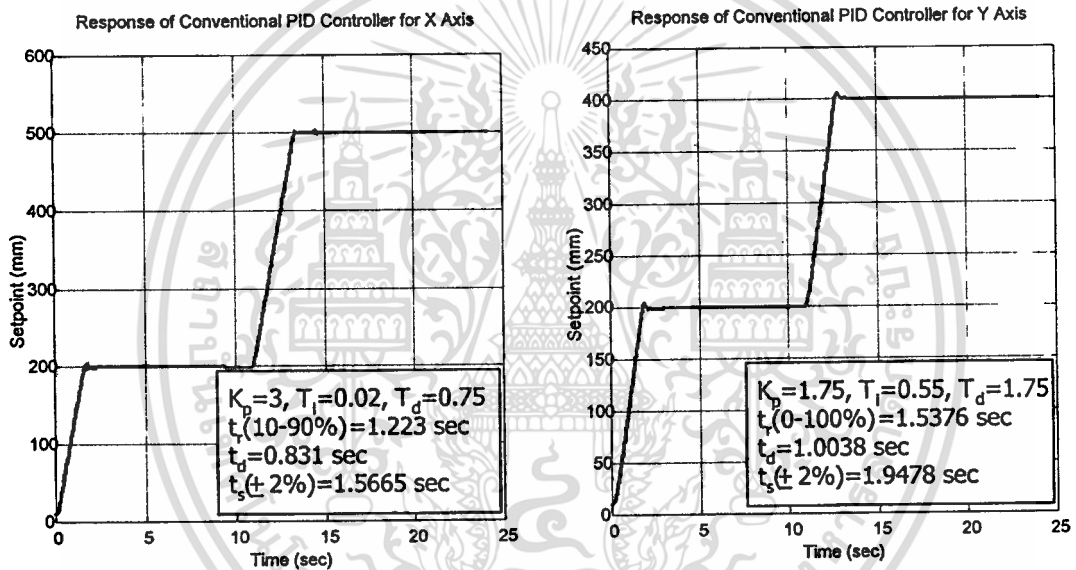


(ค) ผลตอบสนองของแกน Z

รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 3 สำหรับการควบคุมแบบพีไอดี

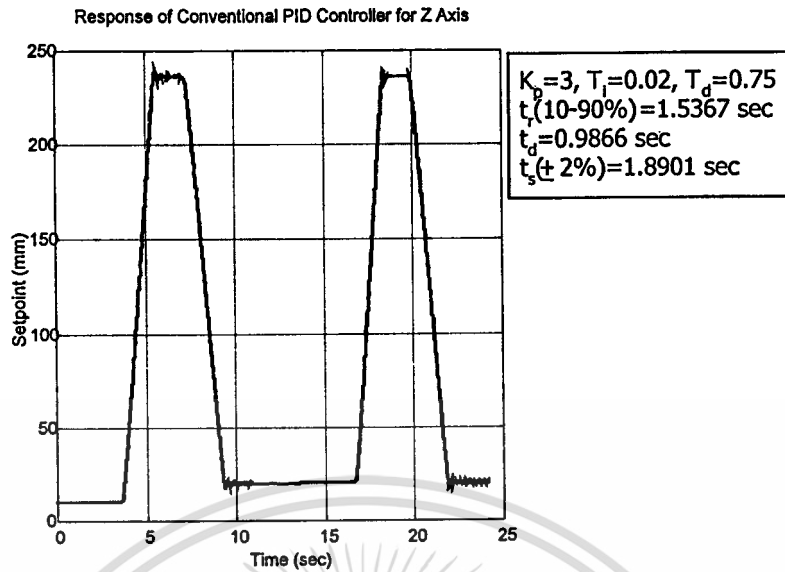
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 (ก) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=5$, $T_i=0.01$ และ $T_d=0.5$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิกที่ 10–90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.2099 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.8231 วินาที และค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.5521 วินาที รูปที่ 4.4 (ข) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=1.5$, $T_i=0.5$ และ $T_d=1.5$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิกที่ 0-100 เปอร์เซ็นต์ได้เท่ากับ 1.5877 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 1.0319 วินาที และค่าเวลาคงตัวเท่ากับ 2.0716 วินาที รูปที่ 4.4 (ค) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=5$, $T_i=0.01$ และ $T_d=0.5$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิกที่ 10–90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.4449 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.9342 วินาที และค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.7894 วินาที เวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมดเท่ากับ 24.395604 วินาที ต่อไปจะเป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ 4



(ก) ผลตอบสนองของแกน X

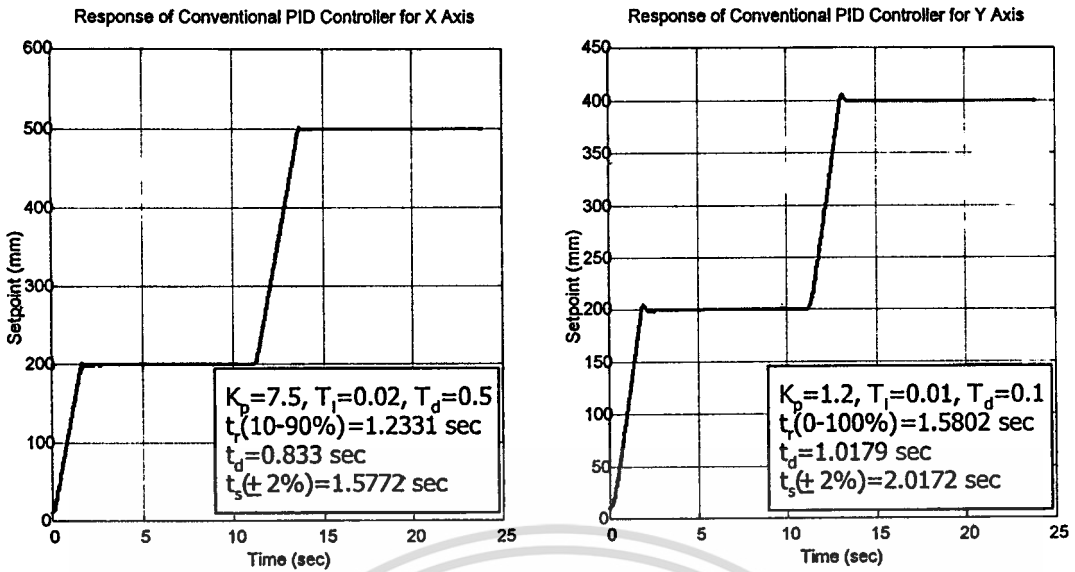
(ข) ผลตอบสนองของแกน Y



(ก) ผลตอบสนองของแกน Z

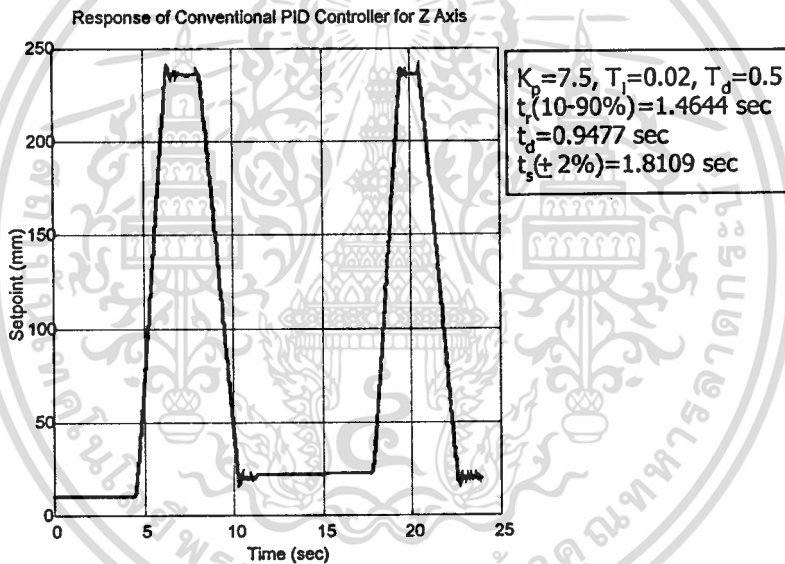
รูปที่ 4.5 ผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 4 สำหรับการควบคุมแบบพีไอดี

จากรูปที่ 4.5 (ก) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=3$, $T_i=0.02$ และ $T_d=0.75$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาไต่ขึ้นคิดที่ 10–90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.223 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.831 วินาที และค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.5665 วินาที รูปที่ 4.5 (ข) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=1.75$, $T_i=0.55$ และ $T_d=1.75$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาไต่ขึ้น คิดที่ 0-100 เปอร์เซ็นต์ได้เท่ากับ 1.5376 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 1.0038 วินาที และค่าเวลาคงตัวเท่ากับ 1.9478 วินาที รูปที่ 4.5 (ค) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=3$, $T_i=0.02$ และ $T_d=0.75$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาไต่ขึ้นคิดที่ 10–90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.5367 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.9866 วินาที และค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.8901 วินาที เวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมดเท่ากับ 24.065934 วินาที ต่อไปจะเป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ 5



(ก) ผลตอบสนองของแกน X

(ข) ผลตอบสนองของแกน Y



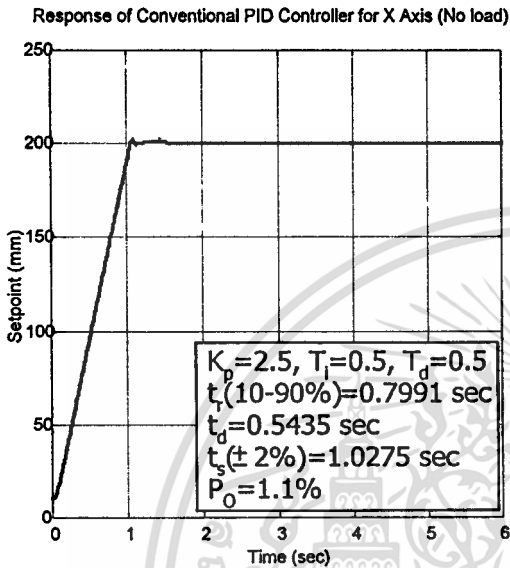
(ค) ผลตอบสนองของแกน Z

รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 5 สำหรับการควบคุมแบบพีไอดี

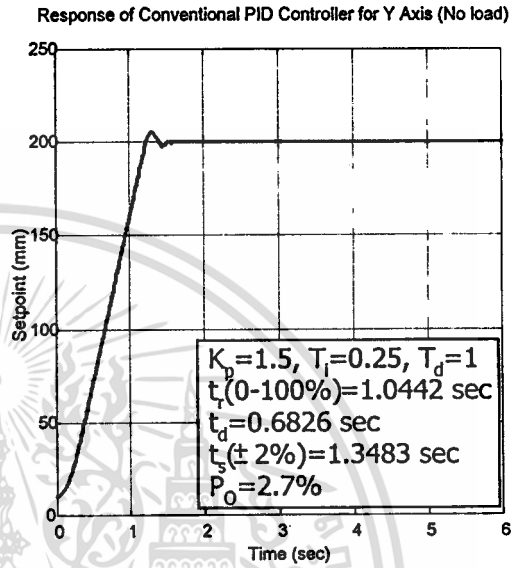
จากรูปที่ 4.6 (ก) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=7.5, T_i=0.02$ และ $T_d=0.5$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.2331 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.833 วินาที และค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.5772 วินาที รูปที่ 4.6 (ข) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=1.2, T_i=0.01$ และ $T_d=0.1$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 0-100 เปอร์เซ็นต์ได้เท่ากับ 1.5802 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 1.0179 วินาที และค่าเวลาคงตัวเท่ากับ 2.0172 วินาที รูปที่ 4.6 (ค) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=7.5, T_i=0.02$ และ $T_d=0.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

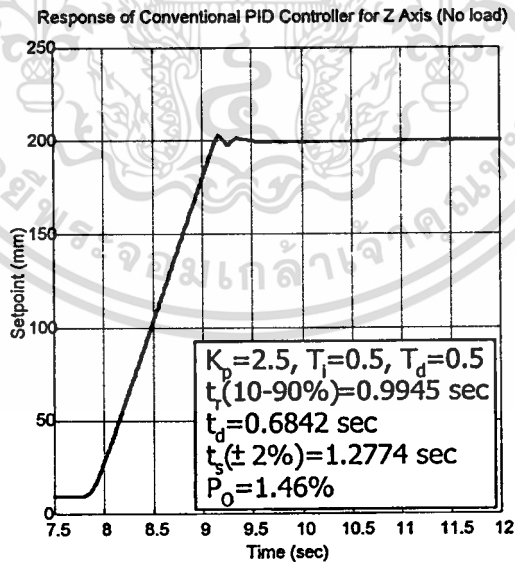
จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.4644 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.9477 วินาที และค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.8109 วินาที เวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมดเท่ากับ 23.846154 วินาที ต่อไปจะเป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ 2 ในสถานะไม่มีภาระ



(ก) ผลตอบสนองของแกน X



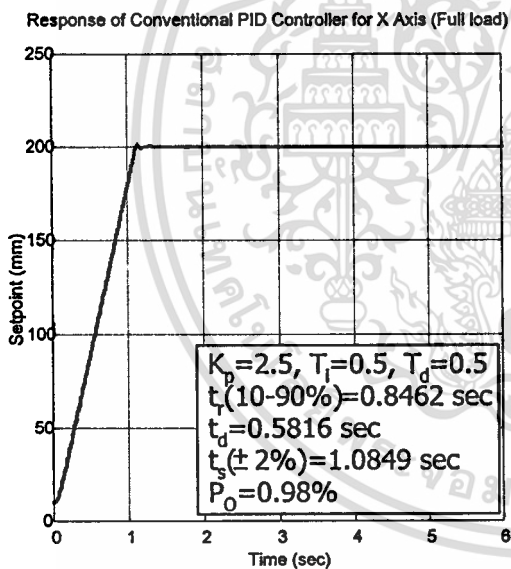
(ข) ผลตอบสนองของแกน Y



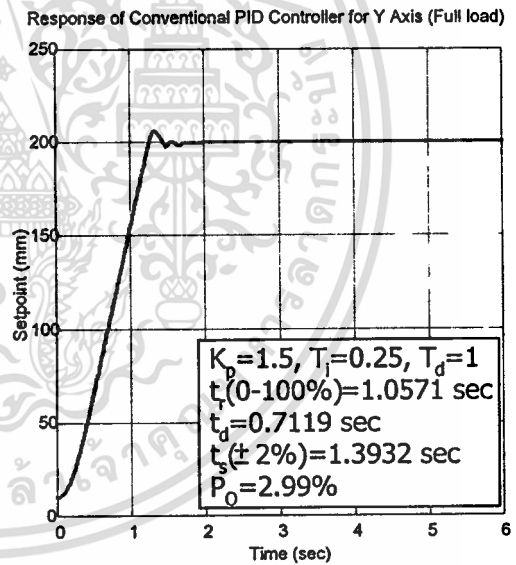
(ค) ผลตอบสนองของแกน Z

รูปที่ 4.7 ผลตอบสนองสถานะไม่มีภาระเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 2 สำหรับการควบคุมแบบพีไอดี

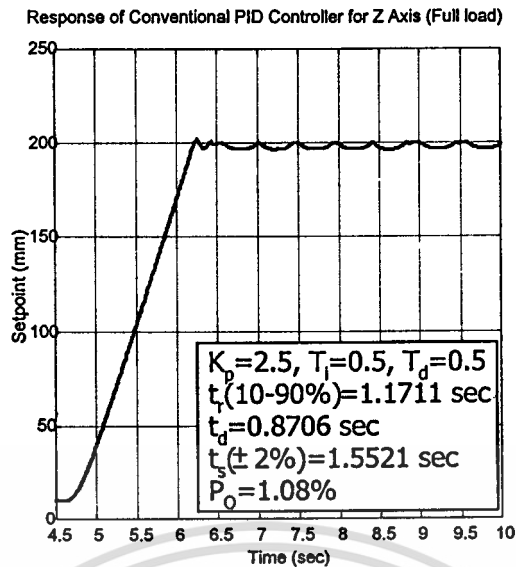
จากรูปที่ 4.7 (ก) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=2.5$, $T_i=0.5$ และ $T_d=0.5$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 0.7991 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.5435 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.0275 วินาที และ เปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินเท่ากับ 1.1 เปอร์เซ็นต์ รูปที่ 4.7 (ข) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=1.5$, $T_i=0.25$ และ $T_d=1$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 0-100 เปอร์เซ็นต์ได้เท่ากับ 1.0442 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.6826 วินาที ค่าเวลาคงตัวเท่ากับ 1.3483 วินาที และ เปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินเท่ากับ 2.7 เปอร์เซ็นต์ รูปที่ 4.7 (ค) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=2.5$, $T_i=0.5$ และ $T_d=0.5$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 0.9945 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.6842 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.2774 วินาที และวินาที และ เปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกิน เท่ากับ 1.46 เปอร์เซ็นต์ เวลาที่ใช้ในการงานทั้งหมดเท่ากับ 25.659341 วินาที ต่อไปจะเป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ 2 ในสภาวะมีภาระ



(ก) ผลตอบสนองของแกน X



(ข) ผลตอบสนองของแกน Y



(ก) ผลตอบสนองของแกน Z

รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองสถานะมีภาระเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 2 สำหรับการควบคุมแบบพีไอดี

จากรูปที่ 4.8 (ก) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=2.5$, $T_i=0.5$ และ $T_d=0.5$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10–90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 0.8462 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.5816 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.0849 วินาที และ เปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินเท่ากับ 0.98 เปอร์เซ็นต์ รูปที่ 4.8 (ข) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=1.5$, $T_i=0.25$ และ $T_d=1$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 0–100 เปอร์เซ็นต์ได้เท่ากับ 1.0571 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.7119 วินาที ค่าเวลาคงตัวเท่ากับ 1.3932 วินาที และ เปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินเท่ากับ 2.99 เปอร์เซ็นต์ รูปที่ 4.8 (ค) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=2.5$, $T_i=0.5$ และ $T_d=0.5$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10–90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.1711 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.8706 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.5521 วินาที และ เปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกิน เท่ากับ 1.08 เปอร์เซ็นต์ เวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมดเท่ากับ 22.032967 วินาที โดยภาระมีน้ำหนักเท่ากับ 2 กิโลกรัม

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าเวลาต่างๆของการควบคุมแบบพีไอดี

	$t_r(\text{sec})$			$t_d(\text{sec})$			$t_s(\pm 2\%)(\text{sec})$		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
พารามิเตอร์ที่ 1	1.2426	1.587	1.7836	0.8467	1.0394	0.9575	1.5932	2.0667	1.8302
พารามิเตอร์ที่ 2	1.1798	1.5253	1.7051	0.8069	0.9967	0.9072	1.5172	1.9646	1.7433
พารามิเตอร์ที่ 3	1.2099	1.5877	1.4499	0.8231	1.0319	0.9342	1.5521	2.0716	1.7849
พารามิเตอร์ที่ 4	1.2230	1.5376	1.5357	0.8310	1.0038	0.9866	1.5665	1.9478	1.8901
พารามิเตอร์ที่ 5	1.2331	1.5802	1.4644	0.8330	1.0179	0.9477	1.5772	2.0172	1.8109
พารามิเตอร์ที่ 2									
- สภาวะไม่มีภาระ	0.7991	1.0422	0.9945	0.5435	0.6826	0.6842	1.0275	1.3483	1.2774
- สภาวะมีภาระ	0.8462	1.0571	1.1711	0.5816	0.7119	0.8706	1.0849	1.3932	1.5521

ตารางที่ 4.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกิน (P_o) ของการควบคุมแบบพีไอดีในสภาวะไม่มีภาระและมีภาระ

	$P_o(\%)$		
	X	Y	Z
พารามิเตอร์ที่ 2			
- สภาวะไม่มีภาระ	1.1	2.7	1.46
- สภาวะมีภาระ	0.98	2.99	1.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

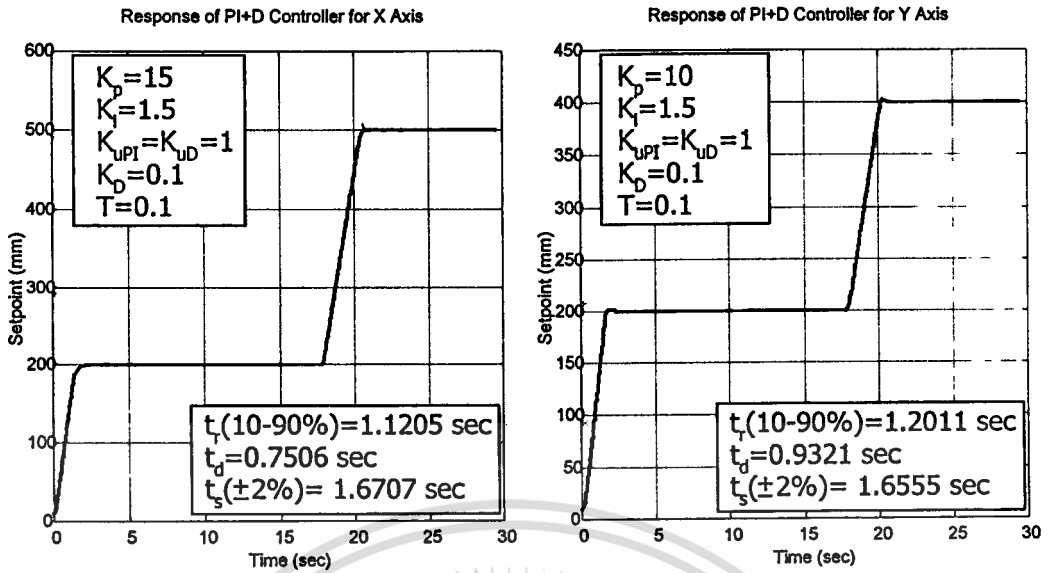
4.2.2 การควบคุมแขนกลจริงด้วยการควบคุมแบบพีไอพลัสดี

ในการทดลองได้ทำการทดลองเคลื่อนที่ทั้งหมด 5 ครั้ง ในแต่ละครั้งจะทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอพลัสดีไปจากเดิม จากนั้นจึงทำการเลือกชุดพารามิเตอร์ที่ผู้ทดลองคิดว่าดีที่สุด โดยพิจารณาจากค่าเวลาไต่ขึ้น ค่าเวลาหน่วงและค่าเวลาอยู่ตัว เพื่อทำการทดลองขั้นต่อไป ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ นั้นแสดงในตารางที่ 4.4

หมายเหตุ สำหรับการควบคุมแบบพีไอพลัสดีนี้ เป็นแบบที่ปรับเปลี่ยนคัดแปลงโดยเพิ่มแกน K_{up} และ K_{ud} แทนการใช้คาบเวลาสุ่มที่ใช้กันทั่วไป

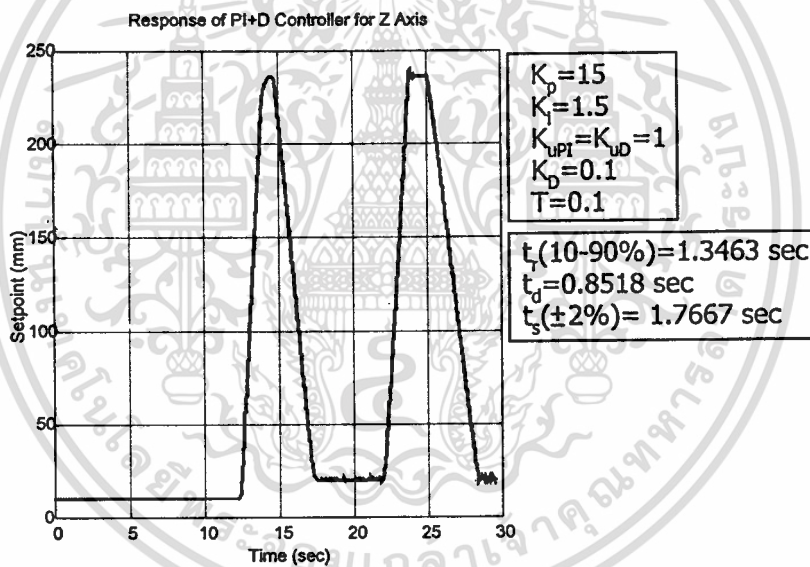
ตารางที่ 4.4 ตารางค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองสำหรับการควบคุมแบบพีไอพลัสดี

	K_p	K_i	K_{up}	K_D	K_{ud}	T
พารามิเตอร์ที่ 1 - สำหรับแกน X และแกน Z	15	1.5	1	0.1	1	0.1
- สำหรับแกน Y	10	1.25	1	0.1	1	0.1
พารามิเตอร์ที่ 2 - สำหรับแกน X และแกน Z	14.5	1.5	1	0.11	1.2	0.15
- สำหรับแกน Y	13	1.5	0.75	0.09	0.9	0.15
พารามิเตอร์ที่ 3 - สำหรับแกน X และแกน Z	15	1.45	1	0.1	1	0.1
- สำหรับแกน Y	14.5	1.3	0.8	0.1	1	0.1
พารามิเตอร์ที่ 4 - สำหรับแกน X และแกน Z	15	1.45	1	0.1	1	0.1
- สำหรับแกน Y	14.5	1.32	0.78	0.1	1	0.1
พารามิเตอร์ที่ 5 - สำหรับแกน X และแกน Z	15	1	1	0.1	1	0.1
- สำหรับแกน Y	14.5	1.31	0.77	0.1	1	0.1



(ก) ผลตอบสนองของแกน X

(ข) ผลตอบสนองของแกน Y



(ค) ผลตอบสนองของแกน Z

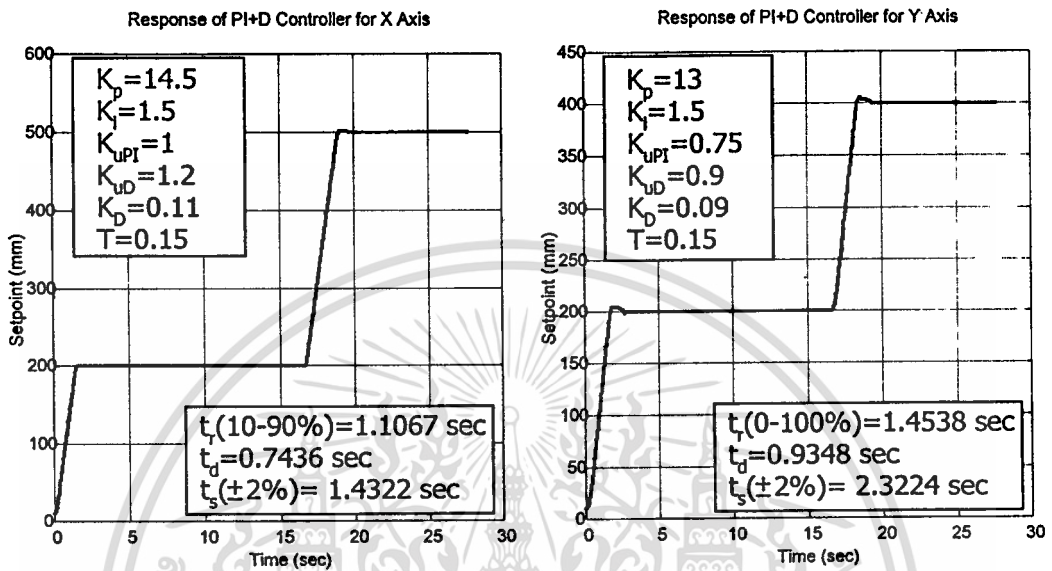
รูปที่ 4.9 ผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 1 สำหรับการควบคุมแบบพีไอพลัสดี

จากรูปที่ 4.9 (ก) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=15$, $K_i=1.5$, $K_D=0.1$, $K_{UPI}=1$, $K_{UD}=1$ และ $T=0.1$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาไต่ขึ้นคิดที่ 10–90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.1205 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.7506 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.6707 วินาที รูปที่ 4.9 (ข) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=10$, $K_i=1.5$, $K_D=0.1$, $K_{UPI}=1$, $K_{UD}=1$ และ $T=0.1$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาไต่ขึ้นคิดที่ 10–90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.2011 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.9321 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.6555 วินาที รูปที่ 4.9 (ค) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=15$, $K_i=1.5$, $K_D=0.1$, $K_{UPI}=1$, $K_{UD}=1$ และ $T=0.1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

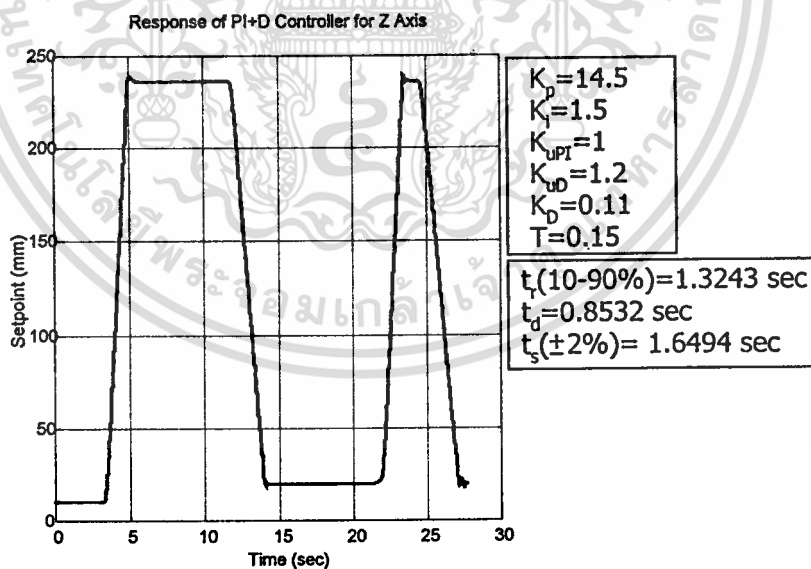
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหา ค่าเวลาได้ขั้นคิดที่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.3463 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.8518 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.7667 วินาที เวลาที่ใช้ในการงานทั้งหมดเท่ากับ 29.505945 วินาที ต่อไปจะเป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ 2



(ก) ผลตอบสนองของแกน X

(ข) ผลตอบสนองของแกน Y

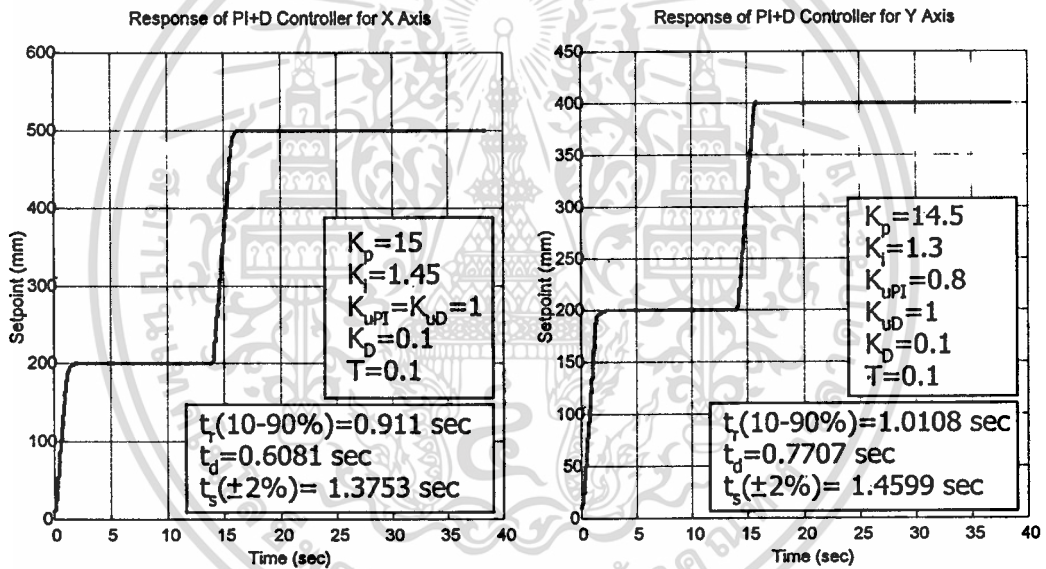


(ค) ผลตอบสนองของแกน Z

รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 2 สำหรับการควบคุมแบบพีไอพลัสดี

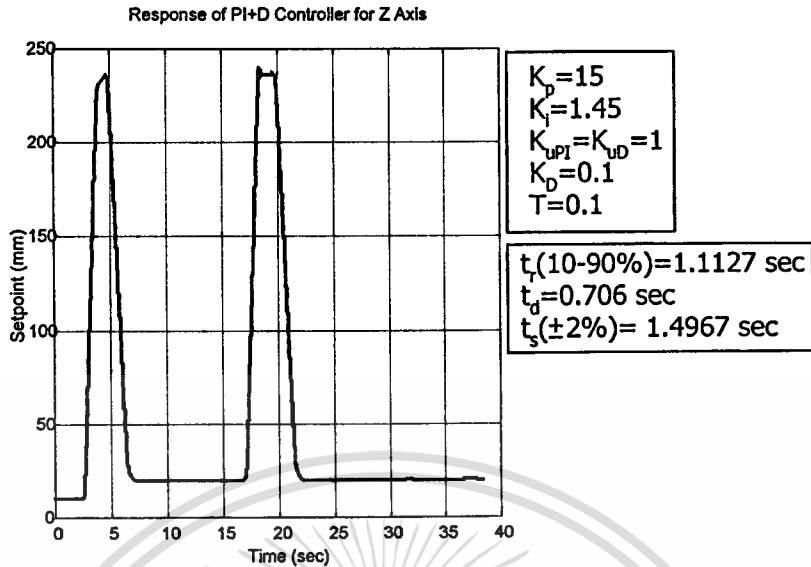
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.10 (ก) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=14.5$, $K_i=1.5$, $K_D=0.11$, $K_{upI}=1$, $K_{uD}=1.2$ และ $T=0.1$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10–90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.1067 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.7436 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.4322 วินาที รูปที่ 4.10 (ข) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=13$, $K_i=1.5$, $K_D=0.09$, $K_{upI}=0.75$, $K_{uD}=1$ และ $T=0.15$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 0–100 เปอร์เซ็นต์ได้เท่ากับ 1.4538 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.9348 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 2.3224 วินาที รูปที่ 4.10 (ค) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=14.5$, $K_i=1.5$, $K_D=0.11$, $K_{upI}=1$, $K_{uD}=1.2$ และ $T=0.1$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10–90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.3243 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.8532 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.6494 วินาที เวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมดเท่ากับ 27.637363 วินาที ต่อไปจะเป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ 3



(ก) ผลตอบสนองของแกน X

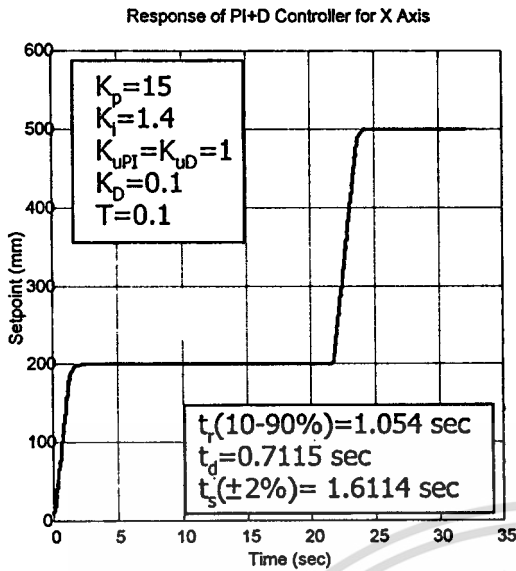
(ข) ผลตอบสนองของแกน Y



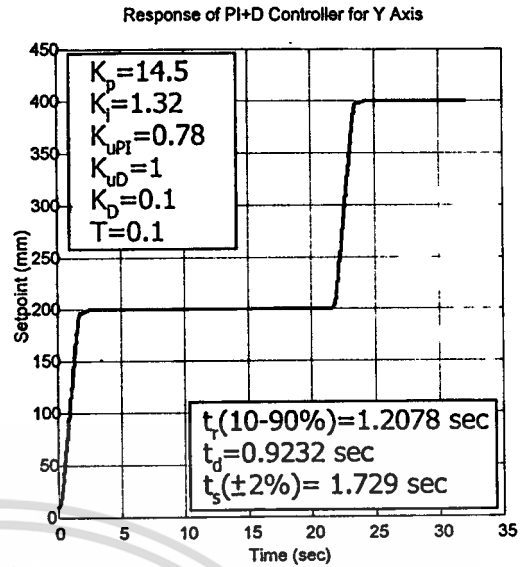
(ก) ผลตอบสนองของแกน Z

รูปที่ 4.11 ผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 3 สำหรับการควบคุมแบบพีไอพลัสดี

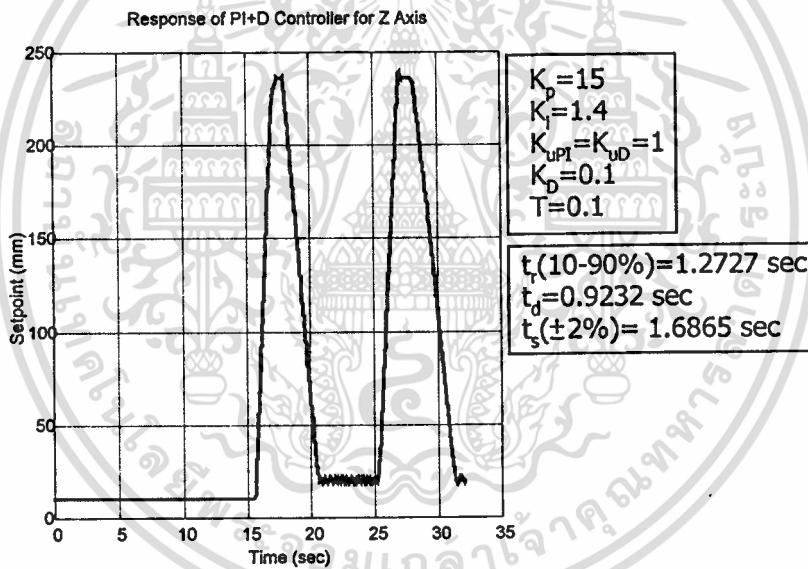
จากรูปที่ 4.11 (ก) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=15$, $K_i=1.45$, $K_D=0.1$, $K_{upl}=1$, $K_{ud}=1$ และ $T=0.1$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 0.911 วินาที ค่าเวลาน่วงเท่ากับ 0.6081 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.3753 วินาที รูปที่ 4.11 (ข) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=14.5$, $K_i=1.3$, $K_D=0.1$, $K_{upl}=0.8$, $K_{ud}=1$ และ $T=0.1$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ได้เท่ากับ 1.0108 วินาที ค่าเวลาน่วงเท่ากับ 0.7707 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.4599 วินาที รูปที่ 4.11 (ค) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=15$, $K_i=1.45$, $K_D=0.1$, $K_{upl}=1$, $K_{ud}=1$ และ $T=0.1$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.1127 วินาที ค่าเวลาน่วงเท่ากับ 0.706 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.4967 วินาที เวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมดเท่ากับ 38.296703 วินาที ต่อไปจะเป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ 4



(ก) ผลตอบสนองของแกน X



(ข) ผลตอบสนองของแกน Y



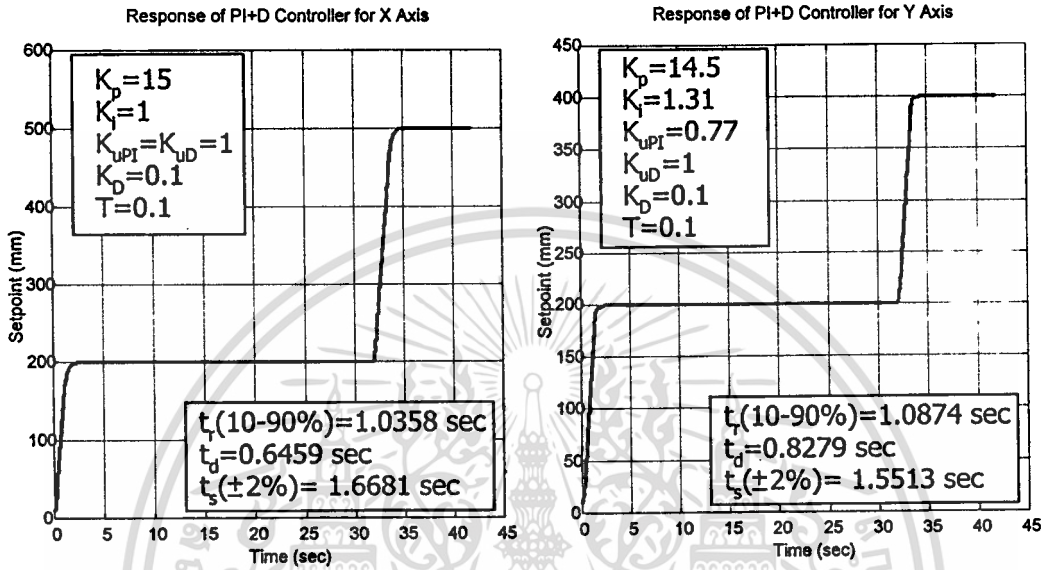
(ค) ผลตอบสนองของแกน Z

รูปที่ 4.12 ผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 4 สำหรับการควบคุมแบบที่โอพลัสดี

จากรูปที่ 4.12 (ก) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=15$, $K_i=1.4$, $K_D=0.1$, $K_{upI}=1$, $K_{uD}=1$ และ $T=0.1$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.054 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.7115 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.6114 วินาที รูปที่ 4.12 (ข) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=14.5$, $K_i=1.32$, $K_D=0.1$, $K_{upI}=0.78$, $K_{uD}=1$ และ $T=0.1$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ได้เท่ากับ 1.2078 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.9232 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.729 วินาที รูปที่ 4.12 (ค) เป็นผลตอบสนอง

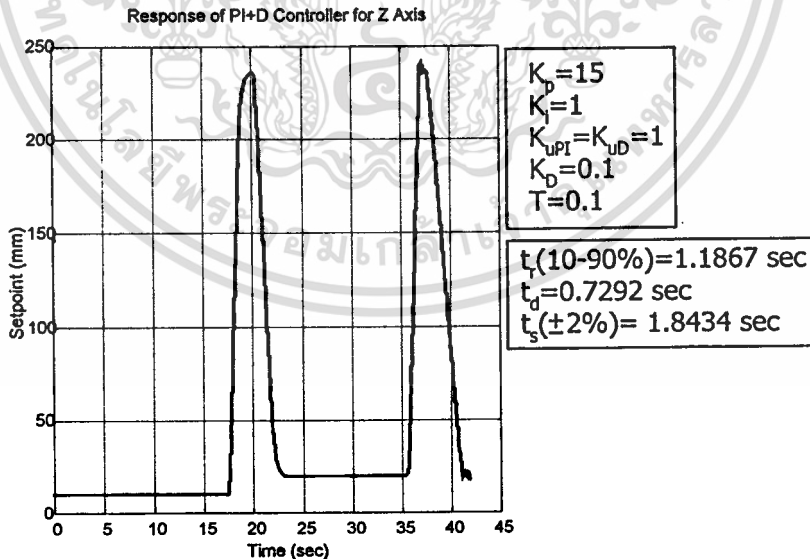
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=15$, $K_i=1.4$, $K_d=0.1$, $K_{UPI}=1$, $K_{UD}=1$ และ $T=0.1$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหา ค่าเวลาได้ขึ้นคิกที่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.2727 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.9232 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.6865 วินาที เวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมดเท่ากับ 32.032967 วินาทีต่อไปจะเป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ 5



(ก) ผลตอบสนองของแกน X

(ข) ผลตอบสนองของแกน Y

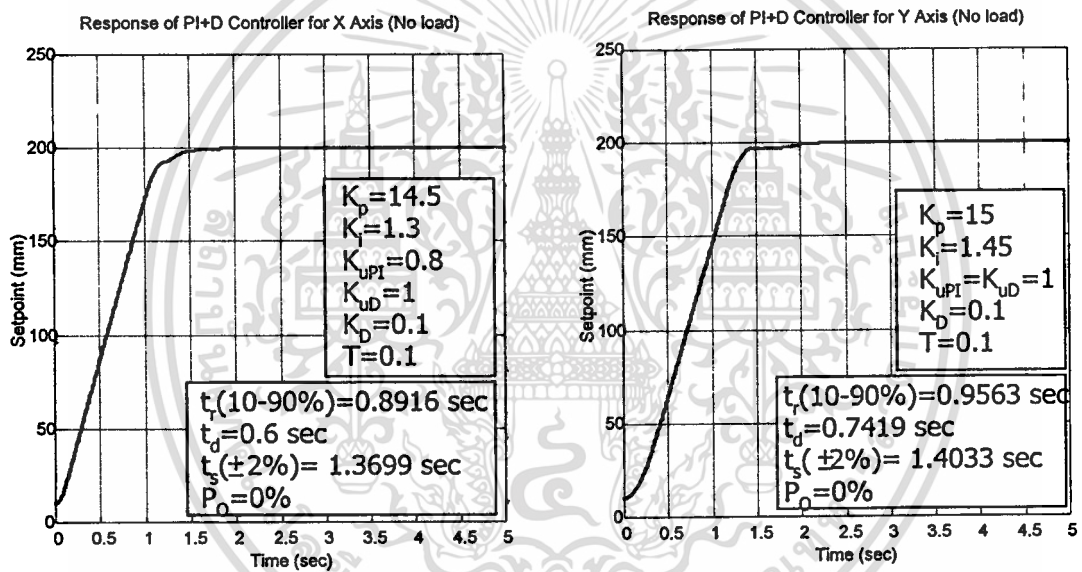


(ค) ผลตอบสนองของแกน Z

รูปที่ 4.13 ผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 5 สำหรับการควบคุมแบบพีไอพลัสดี

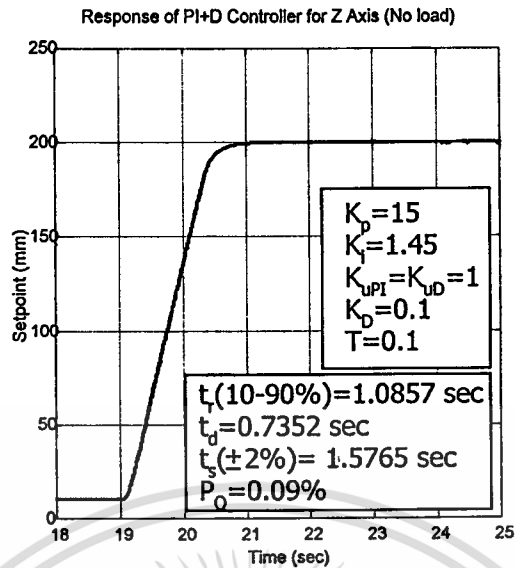
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.13 (ก) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=15$, $K_i=1$, $K_D=0.1$, $K_{upl}=1$, $K_{ud}=1$ และ $T=0.1$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.0358 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.6459 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.6681 วินาที รูปที่ 4.13 (ข) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=14.5$, $K_i=1.31$, $K_D=0.1$, $K_{upl}=0.77$, $K_{ud}=1$ และ $T=0.1$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ได้เท่ากับ 1.0874 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.8279 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.5513 วินาที รูปที่ 4.13 (ค) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=15$, $K_i=1$, $K_D=0.1$, $K_{upl}=1$, $K_{ud}=1$ และ $T=0.1$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.1867 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.7292 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.8434 วินาที เวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมดเท่ากับ 41.813187 วินาที ต่อไปจะเป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ 3 ในสภาวะไม่มีภาระ



(ก) ผลตอบสนองของแกน X

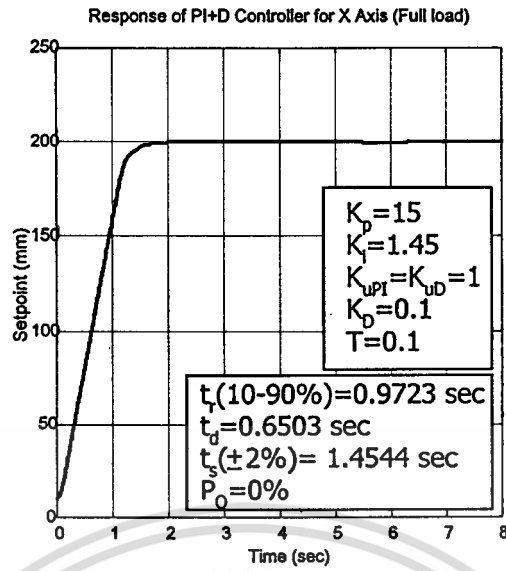
(ข) ผลตอบสนองของแกน Y



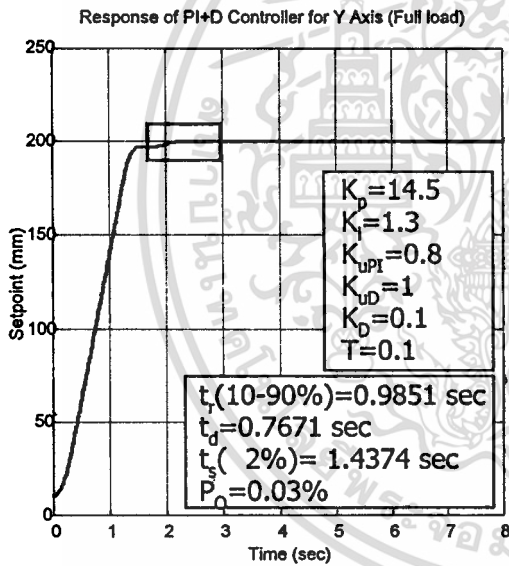
(ก) ผลตอบสนองของแกน Z

รูปที่ 4.14 ผลตอบสนองในสภาวะไม่มีภาระเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 3 สำหรับการควบคุมแบบพีไอพลัสดี

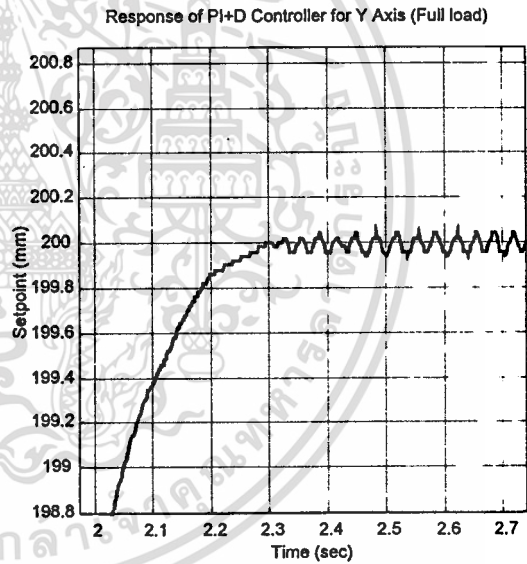
จากรูปที่ 4.14 (ก) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=15$, $K_i=1.45$, $K_D=0.1$, $K_{UPI}=1$, $K_{UD}=1$ และ $T=0.1$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถ คำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10–90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 0.8916 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.6 วินาที ค่าเวลาคงตัวเท่ากับ 1.3699 วินาที รูปที่ 4.14 (ข) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=14.5$, $K_i=1.3$, $K_D=0.1$, $K_{UPI}=0.8$, $K_{UD}=1$ และ $T=0.1$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10–90 เปอร์เซ็นต์ได้เท่ากับ 0.9563 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.7419 วินาที ค่าเวลาคงตัวเท่ากับ 1.4033 วินาที รูปที่ 4.14 (ค) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=15$, $K_i=1.45$, $K_D=0.1$, $K_{UPI}=1$, $K_{UD}=1$ และ $T=0.1$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10–90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.0857 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.7352 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.5765 วินาที และการเคลื่อนที่ในแกนนี้เกิดค่าพุ่งเกินขึ้น ซึ่งเปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินมีค่าเท่ากับ 0.09 เปอร์เซ็นต์ เวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมดเท่ากับ 25.604396 วินาที ต่อไปจะเป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ 3 ในสภาวะมีภาระ



(1) ผลตอบสนองของแกน X

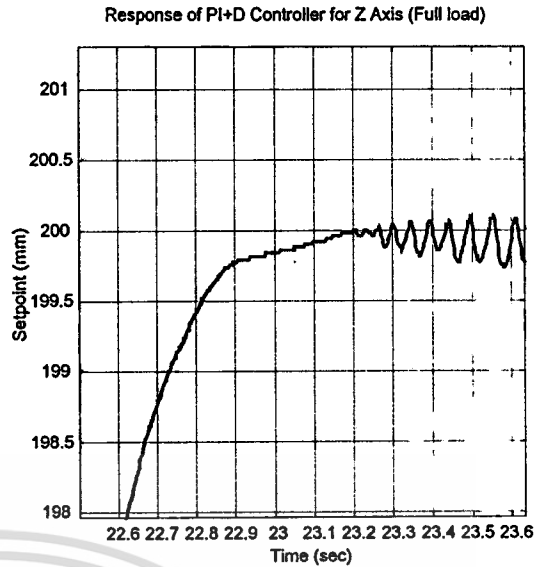
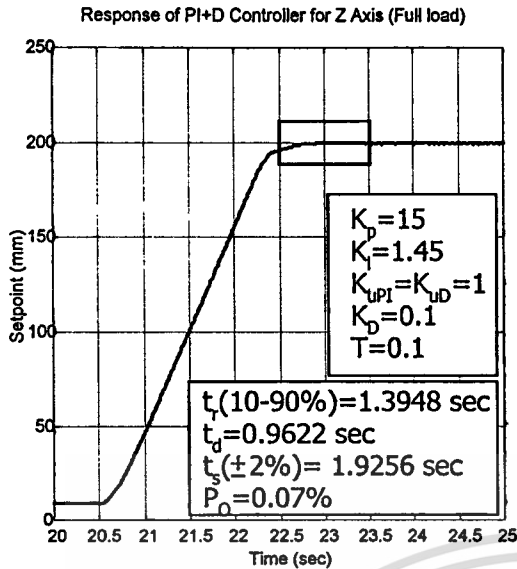


(ข) ผลตอบสนองของแกน Y



(ค) ภาพขยายของผลตอบสนองของแกน Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) ผลตอบสนองของแกน Z

(จ) ภาพขยายของผลตอบสนองของแกน Z

รูปที่ 4.15 ผลตอบสนองในสภาวะมีภาระเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 3 สำหรับการควบคุมแบบพีไอพลัสดี

จากรูปที่ 4.11 (ก) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=15$, $K_i=1.45$, $K_D=0.1$, $K_{UPI}=1$, $K_{UD}=1$ และ $T=0.1$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 0.9723 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.6503 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.4544 วินาที รูปที่ 4.11 (ข) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=14.5$, $K_i=1.3$, $K_D=0.1$, $K_{UPI}=0.8$, $K_{UD}=1$ และ $T=0.1$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 0.9851 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.7671 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.4374 วินาที และเปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินมีค่าเท่ากับ 0.03 เปอร์เซ็นต์ ส่วนรูปที่ 4.11 (ค) นั้นเป็นภาพขยายในกรอบสี่เหลี่ยมของรูปที่ 4.11 (ข) รูปที่ 4.11 (ง) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=15$, $K_i=1.45$, $K_D=0.1$, $K_{UPI}=1$, $K_{UD}=1$ และ $T=0.1$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.3948 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.9622 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.9256 วินาที และเปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินมีค่าเท่ากับ 0.07 เปอร์เซ็นต์ ส่วนรูปที่ 4.11 (จ) นั้นเป็นภาพขยายในกรอบสี่เหลี่ยมของรูปที่ 4.11 (ง) เวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมดเท่ากับ 25.164835 วินาที โดยภาระมีน้ำหนักเท่ากับ 2 กิโลกรัม

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าเวลาต่างๆของการควบคุมแบบพีไอพลัสดี

	t_r (sec)			t_d (sec)			$t_s (\pm 2\%)$ (sec)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
พารามิเตอร์ที่ 1	1.1205	1.2011	1.3463	0.7506	0.9321	0.8518	1.6707	1.6555	1.7667
พารามิเตอร์ที่ 2	1.1067	1.4538	1.3243	0.7436	0.9348	0.8532	1.4322	2.3224	1.6494
พารามิเตอร์ที่ 3	0.9110	1.0108	1.1127	0.6081	0.7707	0.7060	1.3753	1.4599	1.4967
พารามิเตอร์ที่ 4	1.0540	1.2078	1.2727	0.7115	0.9232	0.9232	1.6114	1.7290	1.6865
พารามิเตอร์ที่ 5	1.0358	1.0874	1.1867	0.6459	0.8279	0.7292	1.6681	1.5513	1.8434
<u>พารามิเตอร์ที่ 3</u>									
- สภาวะไม่มีภาระ	0.8916	0.9563	1.0857	0.6000	0.7419	0.7352	1.3699	1.4033	1.5765
- สภาวะมีภาระ	0.9723	0.9851	1.3948	0.6503	0.7671	0.9622	1.4544	1.4374	1.9256

ตารางที่ 4.6 แสดงเปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกิน (P_o) ของการควบคุมแบบพีไอพลัสดี
ในสภาวะไม่มีภาระและมีภาระ

	P_o (%)		
	X	Y	Z
<u>พารามิเตอร์ที่ 3</u>			
- สภาวะไม่มีภาระ	0	0	0.09
- สภาวะมีภาระ	0	0.03	0.07

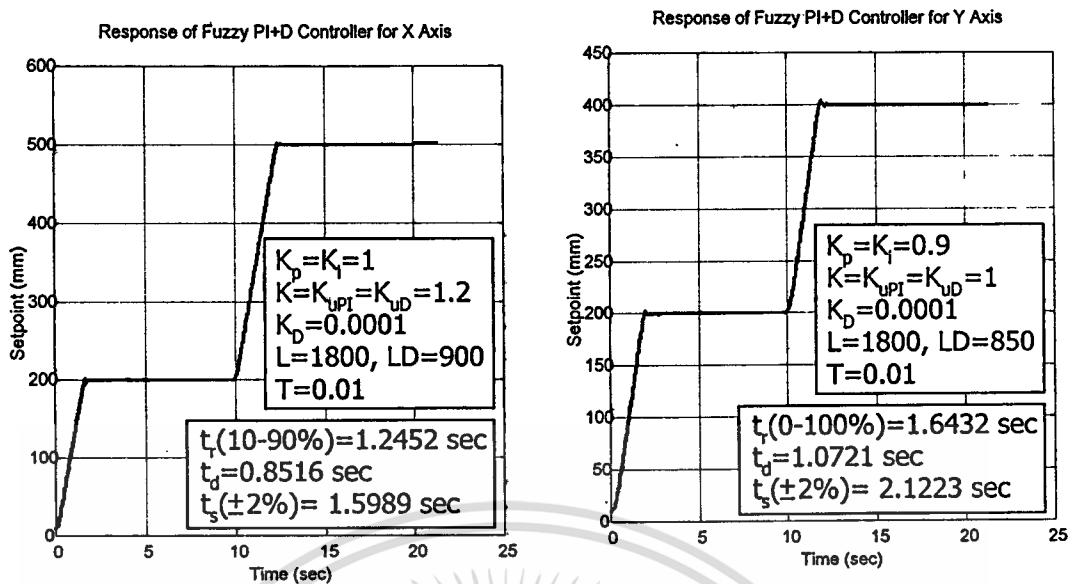
4.2.3 การควบคุมแขนกลจริงด้วยการควบคุมแบบพีซีพีไอพลัสดี

ในการทดลองได้ทำการทดลองเคลื่อนที่ทั้งหมด 5 ครั้ง ในแต่ละครั้งจะทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีซีพีไอพลัสดีไปจากเดิม ในการปรับค่า L และ LD นั้นผู้ทดลองจะกำหนดให้ค่าดังกล่าวอยู่ในช่วง 500-2500 เนื่องจากผู้ทดลองพบว่า ถ้าค่า L และ LD นี้ มีค่าน้อยจะทำให้ผลตอบสนองที่ได้ไม่ดีเท่าที่ควร กล่าวคือ มีค่าเวลาไต่ขึ้น ค่าเวลาหน่วง และ ค่าเวลาอยู่ตัวมากนั่นเอง แต่ถ้าปรับค่า L และ LD ให้มากขึ้นก็จะทำให้เกิดค่าพุ่งเกินมากขึ้นตามไปด้วย ค่าพารามิเตอร์ต่างๆนั้นแสดงในตารางที่ 4.7 เมื่อ LD คือ ขอบเขตการแบ่งฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของพีซีดี

ตารางที่ 4.7 ตารางค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองสำหรับการควบคุมแบบพีไอพลัสดี

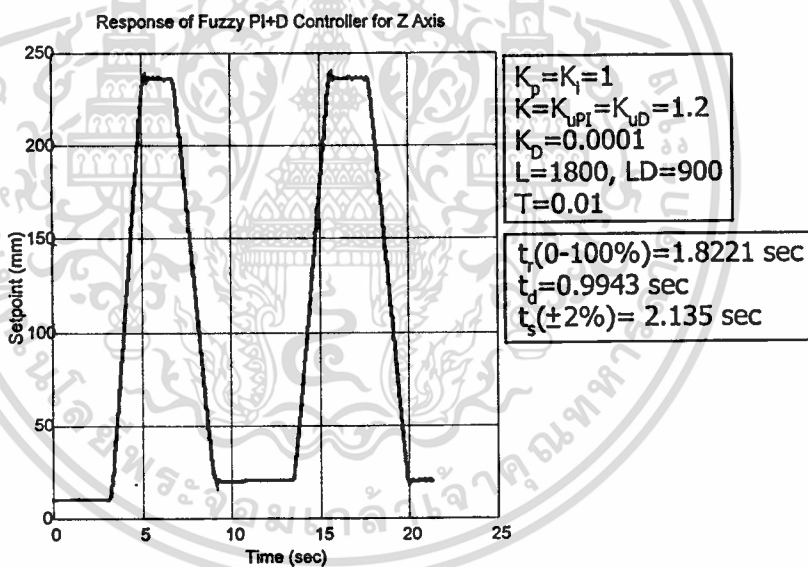
	K_p	K_i	K_{upI}	K_D	K	K_{ud}	L	LD	T
พารามิเตอร์ที่ 1									
- สำหรับแกน X และแกน Z	1	1	1.2	0.0001	1.2	1.2	1800	900	0.01
- สำหรับแกน Y	0.9	0.9	1	0.0001	1	1	1800	850	0.01
พารามิเตอร์ที่ 2									
- สำหรับแกน X และแกน Z	1	1	1.2	0.0001	1.2	1.2	1000	1000	0.01
- สำหรับแกน Y	0.75	0.75	0.5	0.0001	0.75	0.5	1000	1000	0.01
พารามิเตอร์ที่ 3									
- สำหรับแกน X และแกน Z	1.5	1.5	2.5	0.0005	1.5	2	800	800	0.01
- สำหรับแกน Y	1	1	1.5	0.0002	1	1.5	750	750	0.01
พารามิเตอร์ที่ 4									
- สำหรับแกน X และแกน Z	2	2	1	0.0002	2	1	1100	1100	0.01
- สำหรับแกน Y	1.25	1.25	0.75	0.0001	1.5	0.75	1100	1100	0.01
พารามิเตอร์ที่ 5									
- สำหรับแกน X และแกน Z	1	1	1	0.0001	1	1	1800	1000	0.01
- สำหรับแกน Y	0.8	1	0.8	0.0001	0.8	0.8	1800	1000	0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ผลตอบสนองของแกน X

(ข) ผลตอบสนองของแกน Y

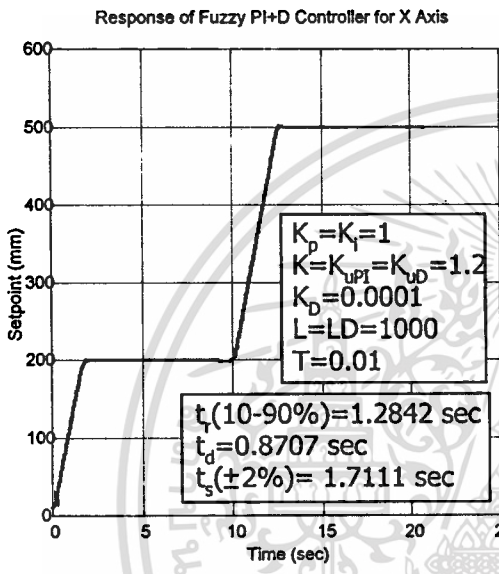


(ค) ผลตอบสนองของแกน Z

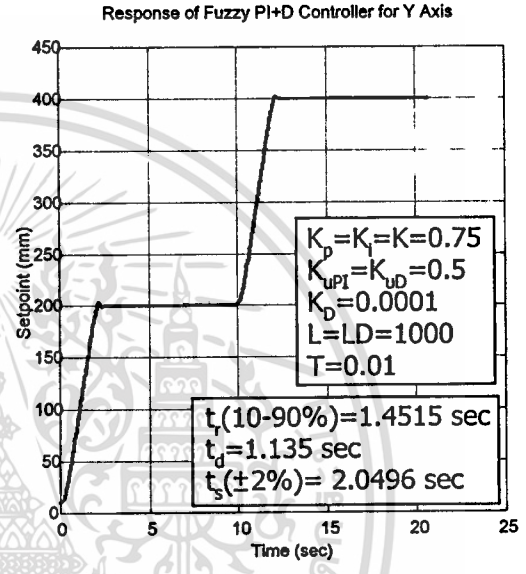
รูปที่ 4.16 ผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 1 สำหรับการควบคุมแบบฟัซซีพีไอพลัสดี

จากรูปที่ 4.16 (ก) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p = K_i = 1$, $K_D = 0.0001$, $K_{upI} = K_{uD} = K = 1.2$, $L = 1800$, $LD = 900$ และ $T = 0.01$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.2452 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.8516 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.5989 วินาที รูปที่ 4.16 (ข) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p = K_i = 1$, $K_D = 0.0001$, $K_{upI} = K_{uD} = K = 1.2$, $L = 1800$, $LD = 900$ และ $T = 0.01$

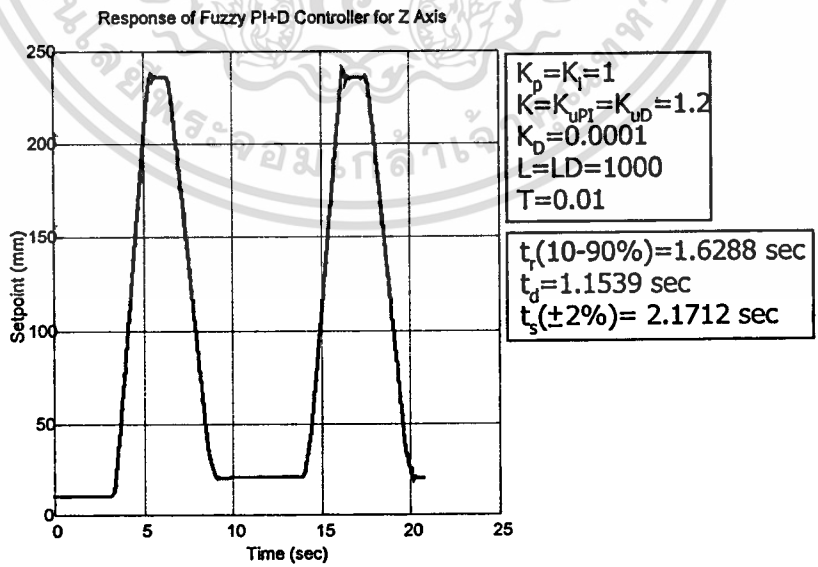
จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 0-100 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.6432 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 1.0721 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 2.1223 วินาที และ รูปที่ 4.16 (ค) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p = K_i = 0.9$, $K_D = 0.0001$, $K_{upI} = K_{ud} = K = 1$, $L = 1800$, $LD = 850$ และ $T = 0.01$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 0-100 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.8221 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.9943 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 2.135 วินาที เวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมดเท่ากับ 21.263736 วินาที ต่อไปจะเป็นผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 2



(ก) ผลตอบสนองของแกน X



(ข) ผลตอบสนองของแกน Y

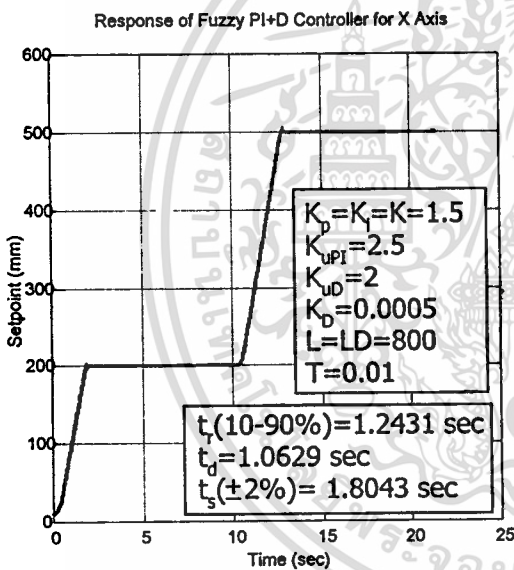


(ค) ผลตอบสนองของแกน Z

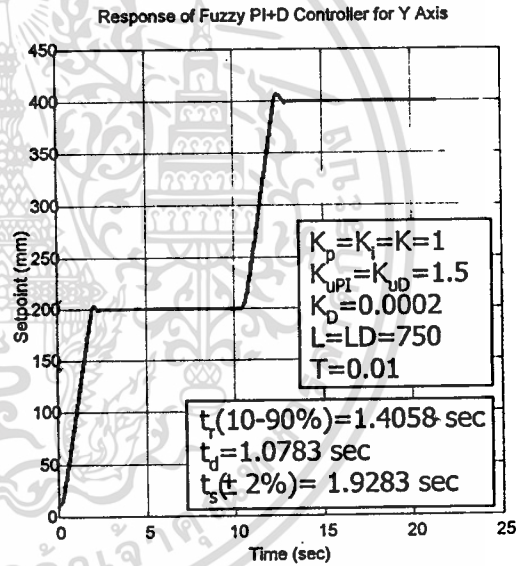
รูปที่ 4.17 ผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 2 สำหรับการควบคุมแบบพีซีพีไอพลัสดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

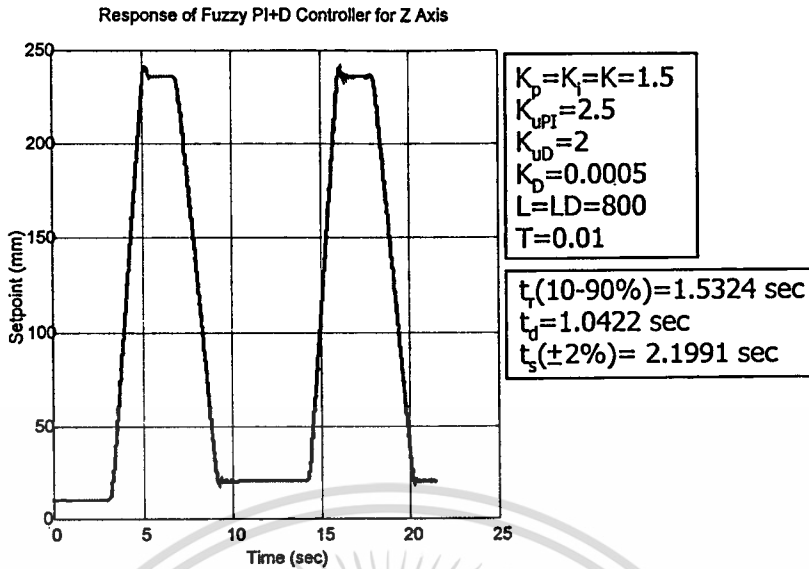
จากรูปที่ 4.17 (ก) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p = K_i = 1$, $K_D = 0.0001$, $K_{UPI} = K_{UD} = K = 1.2$, $L = 1000$, $LD = 1000$ และ $T = 0.01$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10–90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.2842 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.8707 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.7111 วินาที รูปที่ 4.17 (ข) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p = K_i = K = 1$, $K_D = 0.0001$, $K_{UPI} = K_{UD} = 0.5$, $L = 1000$, $LD = 1000$ และ $T = 0.01$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้น คิดที่ 10–90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.4515 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 1.135 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 2.0469 วินาที และ รูปที่ 4.17 (ค) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p = K_i = 1$, $K_D = 0.0001$, $K_{UPI} = K_{UD} = K = 1.2$, $L = 1000$, $LD = 1000$ และ $T = 0.01$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10–90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.6288 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 1.1539 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 2.1712 วินาที เวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมดเท่ากับ 20.659341 วินาที ต่อไปจะเป็นผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 3



(ก) ผลตอบสนองของแกน X



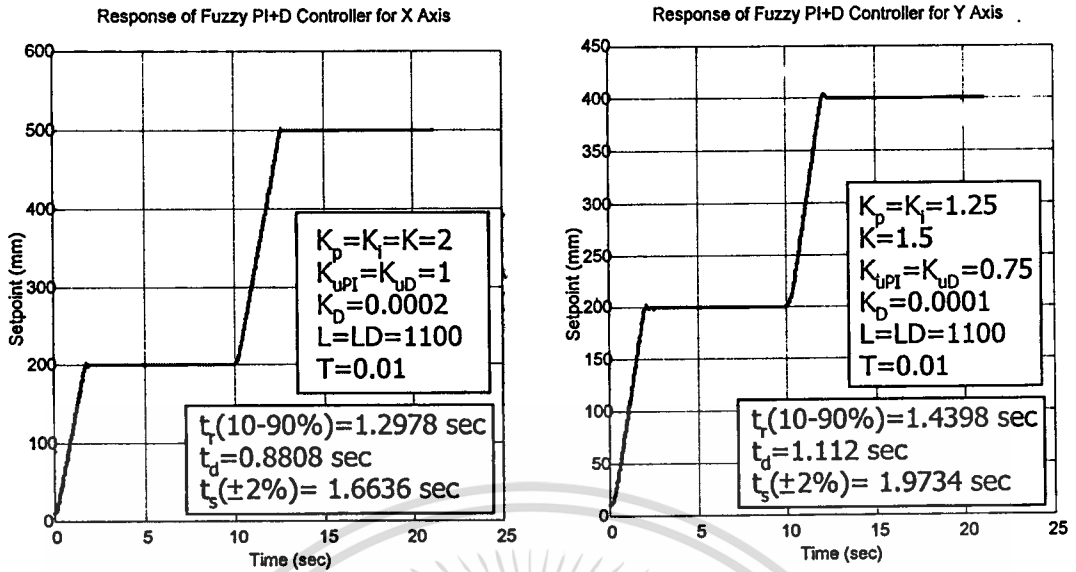
(ข) ผลตอบสนองของแกน Y



(ก) ผลตอบสนองของแกน Z

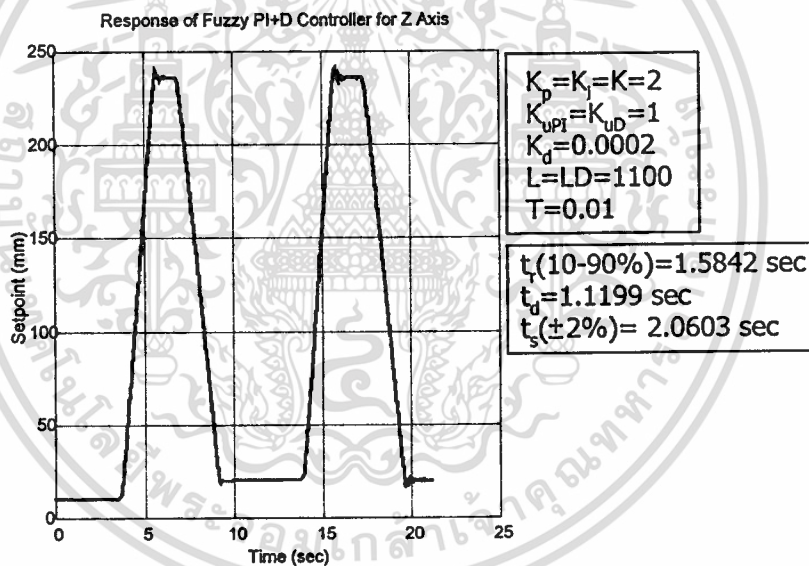
รูปที่ 4.18 ผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 3 สำหรับการควบคุมแบบพีซีพีไอพลัสดี

จากรูปที่ 4.18 (ก) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p = K_i = K_d = 1.5$, $K_{upI} = 2.5$, $K_{ud} = 2$, $K_D = 0.0005$, $L = 800$, $LD = 800$ และ $T = 0.01$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้น คิดที่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.2431 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 1.0629 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.8043 วินาที รูปที่ 4.18 (ข) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p = K_i = K_d = 1$, $K_D = 0.0002$, $K_{upI} = K_{ud} = 1.5$, $L = 750$, $LD = 750$ และ $T = 0.01$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้น คิดที่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.4058 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 1.0783 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.9283 วินาที และ รูปที่ 4.18 (ค) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p = K_i = K_d = 1.5$, $K_{upI} = 2.5$, $K_{ud} = 2$, $K_D = 0.0005$, $L = 800$, $LD = 800$ และ $T = 0.01$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้น คิดที่ 0-100 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.8389 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 1.0422 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 2.1991 วินาที เวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมดเท่ากับ 21.373626 วินาที ต่อไปจะเป็นผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 4



(ก) ผลตอบสนองของแกน X

(ข) ผลตอบสนองของแกน Y



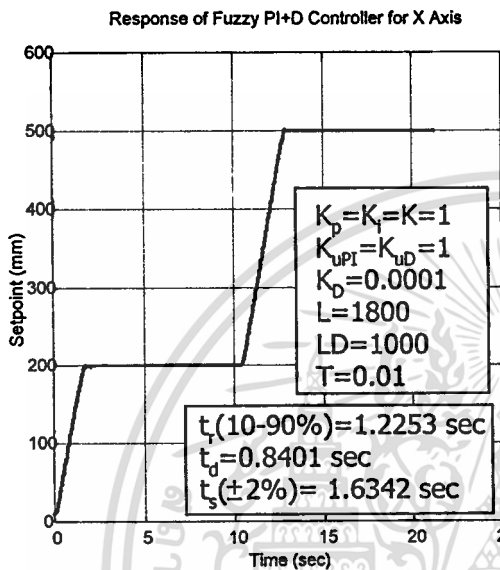
(ค) ผลตอบสนองของแกน Z

รูปที่ 4.19 ผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 4 สำหรับการควบคุมแบบพีซีซีพีโอพลัสดี

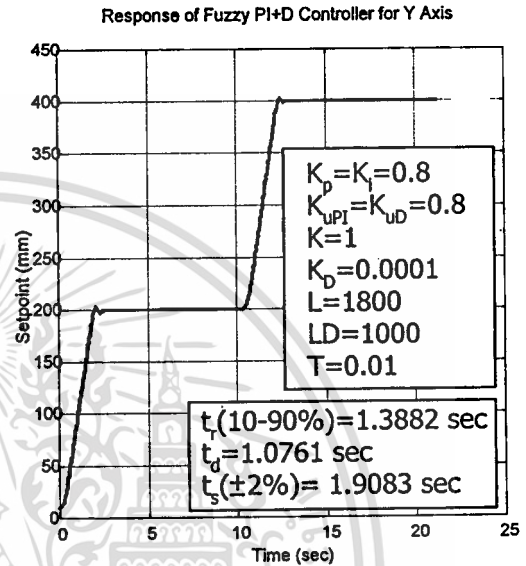
จากรูปที่ 4.19 (ก) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=K_i=K_d=2$, $K_{UPI}=K_{UD}=1$, $K_D=0.0002$, $L=1100$, $LD=1100$ และ $T=0.01$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิตที่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.2978 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.8808 วินาที ค่าเวลางดตัว เท่ากับ 1.6636 วินาที รูปที่ 4.19 (ข) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=K_i=1.25$, $K=0.75$, $K_D=0.0001$, $K_{UPI}=K_{UD}=0.75$, $L=1100$, $LD=1100$ และ $T=0.01$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้น คิตที่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.4398 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 1.112 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

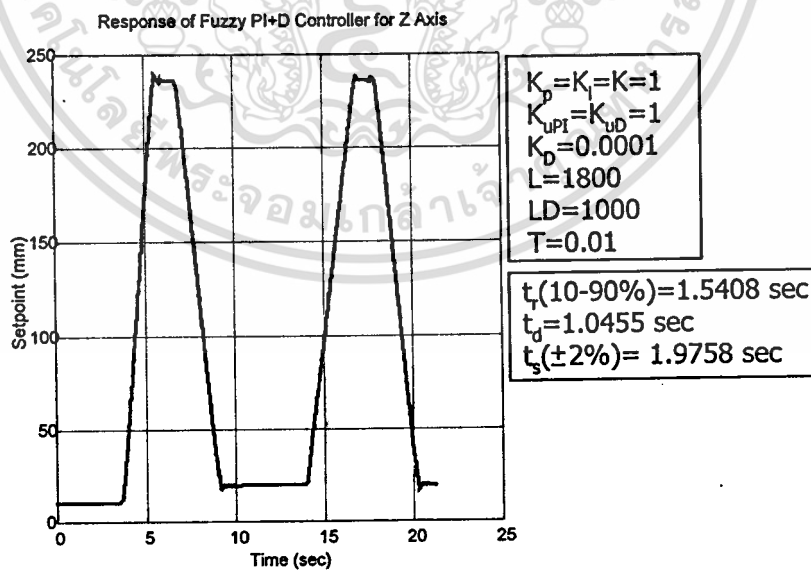
ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.9734 วินาที และ รูปที่ 4.19 (ค) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=K_i=K_d=2$, $K_{UPI}=K_{UD}=1$, $K_D=0.0002$, $L=1100$, $LD=1100$ และ $T=0.01$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.5842 วินาที ค่าเวลาน่วงเท่ากับ 1.1199 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 2.0603 วินาที เวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมดเท่ากับ 21.043956 วินาทีต่อไปจะเป็นผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 5



(ก) ผลตอบสนองของแกน X



(ข) ผลตอบสนองของแกน Y

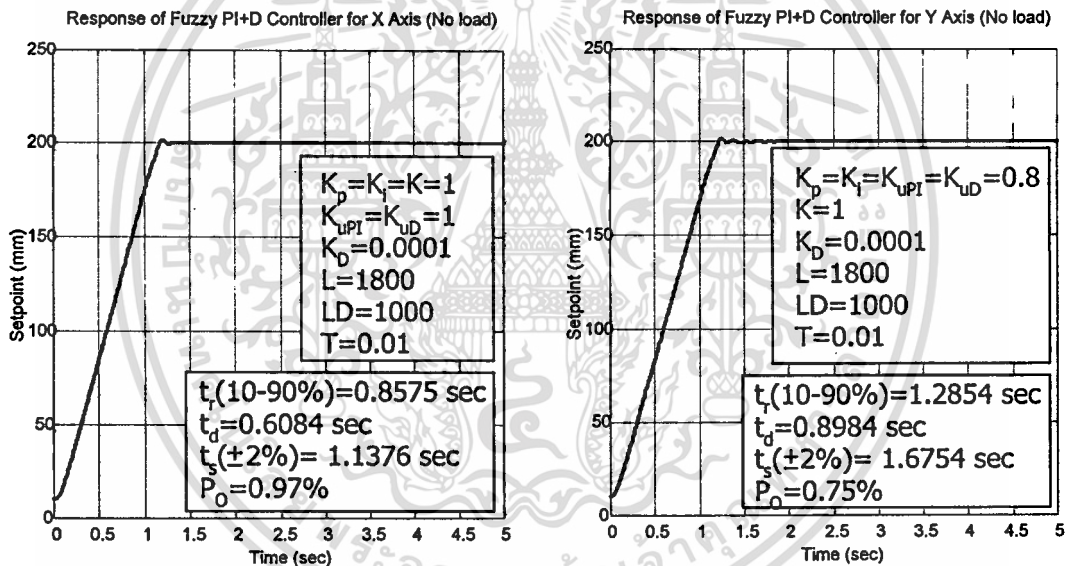


(ค) ผลตอบสนองของแกน Z

รูปที่ 4.20 ผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 5 สำหรับการควบคุมแบบพีซีพีไอพลัสดี

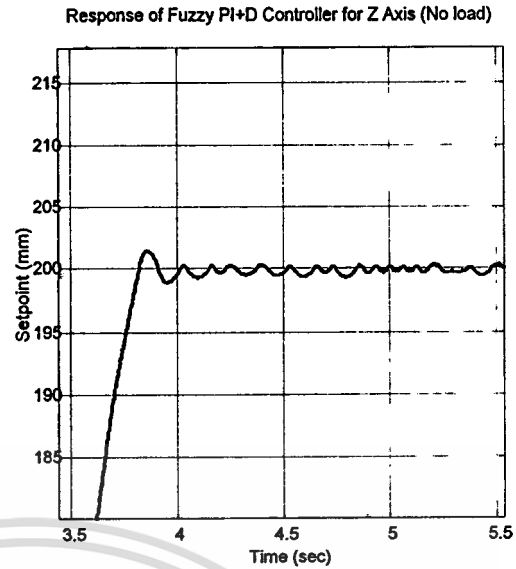
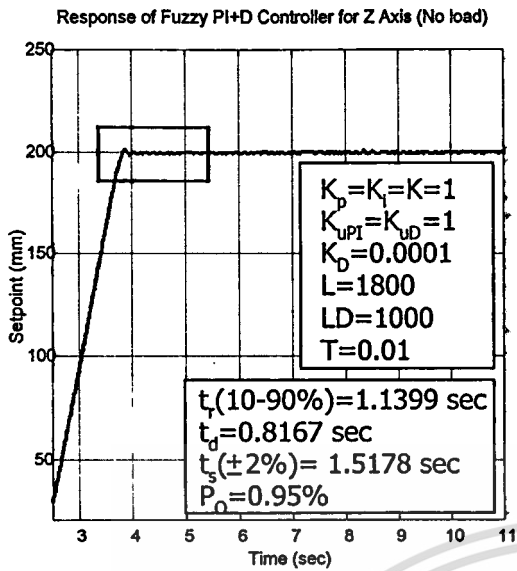
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.20 (ก) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=K_i=K=K_{uPI}=K_{uD}=1$, $K_D=0.0001$, $L=1800$, $LD=1000$ และ $T=0.01$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.2253 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.8401 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.6342 วินาที รูปที่ 4.20 (ข) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=K_i=K=K_{uPI}=K_{uD}=0.8$, $K_i=1$, $K_D=0.0001$, $L=1800$, $LD=1000$ และ $T=0.01$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้น คิดที่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.3882 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 1.0761 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.9083 วินาที และ รูปที่ 4.20 (ค) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=K_i=K=K_{uPI}=K_{uD}=1$, $K_D=0.0001$, $L=1800$, $LD=1000$ และ $T=0.01$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.5408 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 1.0455 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.9758 วินาที เวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมดเท่ากับ 21.208791 วินาที ต่อไปจะเป็นผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 5 ในสถานะไม่มีภาระ



(ก) ผลตอบสนองของแกน X

(ข) ผลตอบสนองของแกน Y

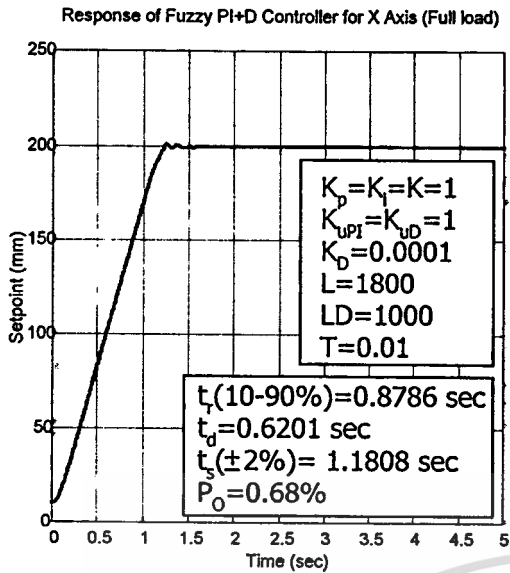


(ก) ผลตอบสนองของแกน Z

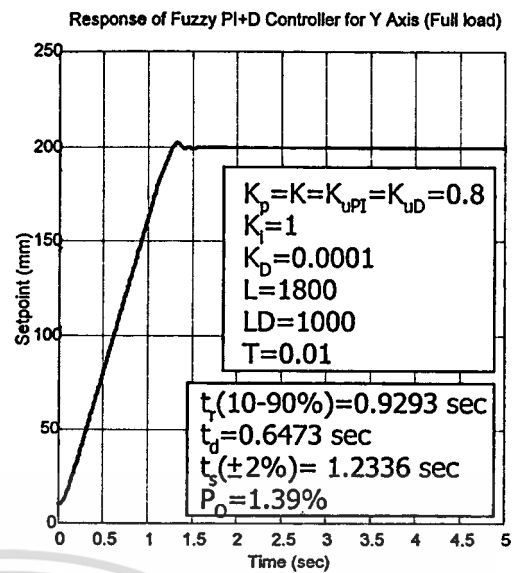
(ง) ภาพขยายผลตอบสนองของแกน Z

รูปที่ 4.21 ผลตอบสนองในสภาวะไม่มีภาระเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 5 สำหรับการควบคุมแบบพีซีพีไอพลัสดี

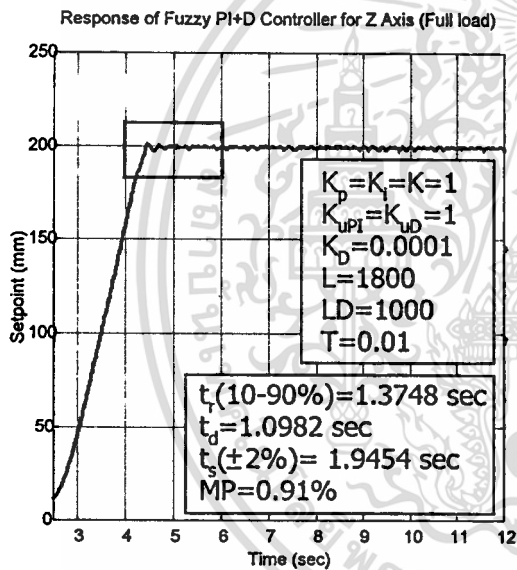
จากรูปที่ 4.21 (ก) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=K_v=K_d=K_{UPI}=K_{UD}=1$, $K_D=0.0001$, $L=1800$, $LD=1000$ และ $T=0.01$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10–90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 0.8575 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.6084 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.1376 วินาที และ เปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินเท่ากับ 0.97 เปอร์เซ็นต์ รูปที่ 4.21 (ข) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=K_v=K_{UPI}=K_{UD}=0.8$, $K_i=1$, $K_D=0.0001$, $L=1800$, $LD=1000$ และ $T=0.01$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้น คิดที่ 10–90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.2854 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.8984 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.6754 วินาที และ เปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินเท่ากับ 0.97 เปอร์เซ็นต์ รูปที่ 4.21 (ค) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=K_v=K_d=K_{UPI}=K_{UD}=1$, $K_D=0.0001$, $L=1800$, $LD=1000$ และ $T=0.01$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10–90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.1399 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.8167 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.5178 วินาที และ เปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินเท่ากับ 0.95 เปอร์เซ็นต์ เวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมดเท่ากับ 10.10989 วินาที ต่อไปจะเป็นผลตอบสนองเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 5 ในสภาวะมีภาระ



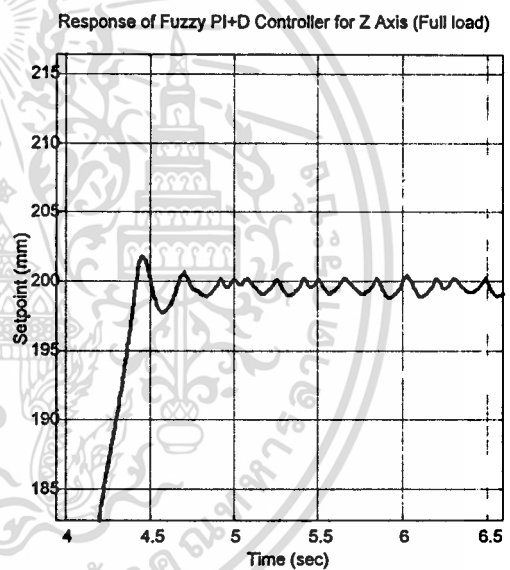
(ก) ผลตอบสนองของแกน X



(ข) ผลตอบสนองของแกน Y



(ค) ผลตอบสนองของแกน Z



(ง) ภาพขยายผลตอบสนองของแกน Z

รูปที่ 4.22 ผลตอบสนองในสถานะมีภาระเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่ 5
สำหรับการควบคุมแบบพีซีพีไอพลัสดี

จากรูปที่ 4.22 (ก) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p = K_i = K_d = K_{upl} = K_{ud} = 1$, $K_D = 0.0001$, $L = 1800$, $LD = 1000$ และ $T = 0.01$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคิดที่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 0.8786 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.6201 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.1808 วินาที และ เปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินเท่ากับ 0.68 เปอร์เซ็นต์ รูปที่ 4.22 (ข) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p = K_i = K_{upl} = K_{ud} = 0.8$, $K_i = 1$, $K_D = 0.0001$, $L = 1800$, $LD = 1000$ และ $T = 0.01$

จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้น คัดที่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 0.9293 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 0.6473 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.2336 วินาที และ เปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกิน เท่ากับ 1.39 เปอร์เซ็นต์ รูปที่ 4.22 (ก) เป็นผลตอบสนองเมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p=K_i=K_d=K_{up}=K_{ud}=1$, $K_p=0.0001$, $L=1800$, $LD=1000$ และ $T=0.01$ จากผลตอบสนองข้างต้นเราสามารถคำนวณหาค่าเวลาได้ขึ้นคัดที่ 10-90 เปอร์เซ็นต์ ได้เท่ากับ 1.3748 วินาที ค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 1.0982 วินาที ค่าเวลาคงตัว เท่ากับ 1.9454 วินาที และ เปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินเท่ากับ 0.91 เปอร์เซ็นต์ เวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมดเท่ากับ 11.263736 วินาที โดยภาระมีน้ำหนักเท่ากับ 2 กิโลกรัม

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าเวลาต่างๆของการควบคุมแบบพีซซีพีโอพลัสดี

	t_r (10-90%) (sec)			t_d (sec)			t_s ($\pm 2\%$) (sec)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
พารามิเตอร์ที่ 1	1.2332	1.6432	1.8221	0.8434	1.0618	0.9976	1.5858	2.0759	2.1272
พารามิเตอร์ที่ 2	1.2842	1.4515	1.6288	0.8707	1.1350	1.1539	1.7138	2.0522	2.1712
พารามิเตอร์ที่ 3	1.2431	1.4058	1.8389	1.0629	1.0783	1.0422	1.8043	1.9283	2.1991
พารามิเตอร์ที่ 4	1.2978	1.4398	1.5842	0.8808	1.1120	1.1199	1.6662	1.9760	2.0603
พารามิเตอร์ที่ 5	1.2253	1.3882	1.5408	0.8401	1.0761	1.0455	1.6342	1.9083	1.9758
<u>พารามิเตอร์ที่ 5</u>									
- สภาวะไม่มีภาระ	0.8575	0.9015	1.1399	0.6084	0.6252	0.8167	1.1376	1.1862	1.5178
- สภาวะมีภาระ	0.8786	0.9293	1.3748	0.6201	0.6473	1.0982	1.1808	1.2336	1.9454

ตารางที่ 4.9 แสดงเปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกิน (P_o) ของการควบคุมแบบพีซซีพีโอพลัสดี ในสภาวะไม่มีภาระและมีภาระ

	P_o (%)		
	X	Y	Z
<u>พารามิเตอร์ที่ 5</u>			
- สภาวะไม่มีภาระ	0.97	0.88	0.95
- สภาวะมีภาระ	0.68	1.39	0.91

หมายเหตุ การทดลองดังกล่าวข้างต้นเป็นการทดลองเพื่อสำรวจทางเลือกในการควบคุมแขนกล
นำหนักเบาชนิดสามแกน โดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการลองผิดลองถูก เพราะไม่ได้ทำการหาแบบ
จำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลที่สร้างจริง ดังจะเห็นได้ว่าการควบคุมทั้งสามแบบนี้ สามารถให้
ผลสัมฤทธิ์ในการควบคุม เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ชุดต่างๆที่ใช้ในการทดลองของแต่ละรูปแบบของ
การควบคุมเป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการปรับละเอียด โดยไม่มีชุดพารามิเตอร์ควบคุมให้มีค่าเท่ากัน จึง
ไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้ในเชิงทฤษฎี เพียงแต่มีข้อสังเกตว่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแต่ละชุดนั้นได้มีการ
การปรับแต่งโดยผู้ทดลองเป็นหลัก ซึ่งผู้ทดลองได้พยายามปรับแต่งให้ได้ค่าที่ดีเท่าที่สามารถกระทำได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยการควบคุมแบบพีชชีสำหรับแขนกลน้ำหนักเบาชนิดสามแกนนี้เป็นงานวิจัยภาคสนามที่เน้นการสร้างและสำรวจแนวทางที่เป็นไปได้ในการควบคุมแขนกลดังกล่าว ซึ่งเริ่มจากการออกแบบวงจร สร้างวงจร และพัฒนาโปรแกรม โดยควบคุมแขนกลให้ทำงานได้จริงโดยเคลื่อนที่ในสถานะไม่มีภาระและมีภาระเคลื่อนที่ในระยะใกล้ และย้ายภาระไปยังตำแหน่งที่ต้องการ และนำผลตอบสนองที่ได้จากการควบคุมแบบพีไอดี พีโอพลัสดี และ พีชชีพีโอพลัสดี มาสำรวจสมรรถนะ เพื่อเป็นทางเลือกสำหรับการประยุกต์ใช้งานของการควบคุม

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองการควบคุมแขนกลน้ำหนักเบาชนิดสามแกน เพื่อให้ นำภาระขนาด 200 กรัม ไปยังตำแหน่งที่ต้องการนั้น พบว่าการควบคุมแบบพีไอดีและการควบคุมแบบพีโอพลัสดีนั้น มี ค่าเวลาไต่ขึ้น ค่าเวลาหน่วง และค่าเวลาอยู่ตัวดีกว่าการควบคุมแบบพีชชีเล็กน้อย แต่เมื่อสำรวจกับเวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมดแล้ว (Overall operating time) การควบคุมแบบพีชชีใช้เวลาในการทำงานน้อยที่สุด รองลงมาคือการควบคุมแบบพีไอดี และการควบคุมแบบพีโอพลัสดีตามลำดับ สำหรับการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 190 มิลลิเมตรในสถานะที่ไม่มีภาระนั้นการควบคุมทั้งสามแบบนี้ให้ผลที่ใกล้เคียงกัน ส่วนในสถานะมีภาระขนาด 2 กิโลกรัม นั้น การควบคุมแบบพีชชีให้ผลดีกว่าการควบคุมแบบพีไอดีในส่วนของค่าพุ่งเกิน และให้ผลตอบสนองที่เร็วกว่าสำหรับการควบคุมแบบพีโอพลัสดี การทดลองปรับค่าพารามิเตอร์การควบคุมแบบพีไอดีและการควบคุมแบบพีโอพลัสดีนั้น อาศัยการลองผิดลองถูก (Trial-error) ดังนั้นในการปรับค่าพารามิเตอร์จึงต้องกระทำอย่างระมัดระวัง จะเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมแบบพีโอพลัสดีนั้นจะเป็นค่าที่ใกล้เคียงกัน

ถึงแม้ว่าการควบคุมแบบพีชชีจะมีค่าเวลาไต่ขึ้น ค่าเวลาหน่วง และค่าเวลาคงตัว มากกว่าการควบคุมแบบพีไอดีและการควบคุมแบบพีโอพลัสดี ก็ตาม แต่เวลาโดยรวมในการทำงานนั้นเร็วกว่าการควบคุมแบบพีไอดี อยู่ประมาณ 3-5 วินาที และเร็วกว่าการควบคุมแบบพีโอพลัสดีอยู่ประมาณ 15-20 วินาที ถึงแม้ว่าเวลาการทำงานในหนึ่งรอบของการควบคุมแบบพีไอดีนั้นจะไม่แตกต่างจากการควบคุมแบบพีชชีมากนัก แต่ถ้าเราพิจารณาถึงการทำงานจริงที่มีการทำงานหลายๆ รอบการทำงาน ซึ่งก็คือมีการเปลี่ยนตำแหน่งไปมาหลายตำแหน่งก็จะทำให้เห็นความแตกต่างของเวลามากขึ้น

อนึ่ง หากมองจากการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีผู้พัฒนาคนละทีม การเลือกพารามิเตอร์แต่ละชุดจากกระบวนการลองผิดลองถูกของแต่ละผลิตภัณฑ์หรือวิธีการให้ได้การทำงานที่ดีที่สุดในรูปแบบนั้นๆ อาจถือได้ว่าเป็นการสำรวจและสังเกตมากกว่าเปรียบเทียบกันโดยตรง ทั้งนี้สมรรถนะที่ได้จะเป็นตัวชี้วัด

5.2 ปัญหาที่พบในการทดลองและการแก้ไข

1. ในการควบคุมแขนกลนั้นจะต้องมีการอ่านข้อมูลเข้าและส่งข้อมูลออกเพื่อติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกอยู่ตลอดเวลา ฉะนั้นการอ่านและส่งข้อมูลจะต้องทำได้ในทันที (Real-Time) มิฉะนั้นแล้วจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการควบคุมได้ เนื่องจากสัญญาณผิดพลาดและสัญญาณควบคุมไม่สามารถควบคุมแขนกลได้ จะทำให้เกิดการแกว่งขึ้นได้ ซึ่งในการทดลองครั้งแรกนั้น ควบคุมผ่านโปรแกรม Delphi เวอร์ชัน 5.0 ซึ่งทำงานบน Windows 98 และโปรแกรมภาษาซี พลัส พลัส ไม่สามารถควบคุมแขนกลได้เนื่องจากในการส่งและรับข้อมูลไม่สามารถทำได้ในทันที ดังนั้นจึงได้ทำการแก้ไขโดยการเปลี่ยนจากการทำงานใช้โปรแกรม Delphi ที่ทำงานบน Windows มาใช้โปรแกรมภาษาซี พลัส พลัส และทำงานบน Dos ซึ่งผลที่ได้ในการส่งและรับข้อมูลทำได้ดีขึ้นจึงสามารถควบคุมแขนกลได้
2. เมื่อวงจรนับเริ่มทำงานครั้งแรกนั้นจะเริ่มดันที่ค่าศูนย์ ซึ่งเมื่อแกนใดแกนหนึ่งเคลื่อนที่ก็จะทำให้อีกแกนหนึ่งสั่นและในบางครั้งค่าที่วงจรมับได้นั้นมีค่าเป็น 65535 ซึ่งจะทำให้การเคลื่อนที่นั้นผิดทิศทางได้ ดังนั้นเพื่อไม่ให้เกิดข้อผิดพลาดเช่นนี้ ในการทำงานครั้งแรกนั้นจะกำหนดค่าเริ่มต้นให้เป็น 500 หรือค่าเริ่มต้นอยู่ที่ 10 มิลลิเมตรนั่นเอง
3. ในการปรับค่าของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมนั้นเป็นการปรับค่าแบบลองผิดลองถูก ซึ่งอาจจะทำให้ระบบและวงจรจับเกิดความเสียหายได้ ดังนั้น จึงต้องอาศัยผู้มีประสบการณ์ช่วยในการปรับแต่ง
4. ในการทดลองนั้นจะต้องคำนึงถึงระบบไฟฟ้าด้วยเนื่องจากมีการติดต่อกับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลโดยตรง ซึ่งถ้าวงจรเกิดการลัดวงจร อาจจะทำให้ความเสียหายแก่คอมพิวเตอร์ได้

5.3 แนวทางในการพัฒนาขั้นต่อไป

การพัฒนาขั้นต่อไปคือการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับระบบควบคุมที่สุดหรือใกล้เคียงที่สุด ด้วยการใช้วิธี จีเนติก อัลกอริทึม (Genetic algorithm) [8] หรือ อาจทำการทดลองเปรียบเทียบตรง โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการควบคุมชุดเดียวกัน สำหรับการควบคุมในแต่ละรูปแบบ ซึ่งก็เป็นหัวข้อวิจัยที่ดีที่ควรสำรวจต่อไป หรือ จากการจำลองผลใน [6] ได้ชี้ให้เห็นว่าหากปรับใช้พารามิเตอร์

ชุดเดียวกันระหว่างการควบคุมทั้งสามแบบที่กล่าวไว้การควบคุมแบบพีซีพีไอพลัสดีให้ผลดีที่สุด จึงเป็นหัวข้อที่ควรตรวจสอบในเชิงปฏิบัติวิศวกรรมกับกระบวนการแบบไม่เป็นเชิงเส้นต่างๆ และพัฒนาโปรแกรมควบคุมแขนกลให้มีความซับซ้อนมากขึ้นเพื่อให้สามารถโปรแกรมให้เคลื่อนที่แบบวงกลมและวงรีได้ ซึ่งก็คือการพัฒนาให้เป็นแขนกลสามารถทำงานได้เหมือนกับเครื่องจักรซีเอ็นซี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Tsung-Tai Huang, Hung-Yuan Chung, Jin-Jye Lin. "A fuzzy PID controller being like parameter varying PID." Fuzzy Systems Conference Proceedings, 1999., Seoul, South Korea, Vol.1, 22-25 Aug. 1999. pp.269 – 276.
- [2] Xuezhang Hou, Sze-kai Tsui, "A control theory for Cartesian flexible robot arms." Journal of Mathematical Analysis and Applications. Vol.225, No.1, 1 Sept. 1998, pp. 265-288.
- [3] Hyuk Lim, Jin-Woo Seo, Chong-Ho Choi, "Position control of XY table in CNC machining center with non-rigid ballscrew." Proceeding of the 2000 American Control Conference, 2000., Chicago, IL, USA, Vol.3, 28-30 June 2000, pp. 1542-1546.
- [4] Santos M., De la Cruz J.M., Dormido S., De Madrid A.P., "Between fuzzy-PID and PID-conventional controllers: a good choice." Biennial Conference of The North American Fuzzy Information Processing Society, 1996., Berkeley, CA, USA, 19-22 June 1996, pp. 123-127.
- [5] Chen Liu, Jian-Xin Xu, Chang-Chieh Hang, "Comparison between a fuzzy PID controller and a kind of nonlinear PID controller." Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision and Control, 1997., San Diego, CA, USA, Vol.3, 10-12 Dec. 1997, pp. 2736-2741.
- [6] Malki H.A., Misir D., Feigenspan D., Guanrong Chen, "Fuzzy PID control of a flexible-joint robot arm with uncertainties-from time-varying loads." IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.5, Issue 3, May 1997, pp. 371-378.
- [7] Huang Y, Yasunobu S. "A general practical design method for fuzzy PID control from conventional PID control." The Ninth IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2000., San Antonio, TX, USA, Vol.2, 7-10 May 2000. pp.969-972.
- [8] Tang K.S., Kim Fung Man, Guanrong Chen, Kwong S., "An optimal fuzzy PID controller." IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.48, Issue 4, Aug. 2001, pp. 757-765.
- [9] Katsuhiko Ogata. **Modern Control Engineering**. Third edition. USA. : Prentice Hall, Inc. 1997.
- [10] Rattan K.S., Van Cleave D., "Design and implementation of a reduced-rule fuzzy logic PID controller." 19th International Conference of The North American Fuzzy Information Processing Society, 2000., Atlanta, GA, USA, 13-15 July 2000, pp. 465-469.
- [11] Bao-Gang Hu, Mann G.K.I., Gosine R.G., "A systematic study of fuzzy PID controllers- function-based evaluation approach." IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol.9, Issue 5, Oct. 2001, pp. 699-712.
- [12] Santos M., Dormido S., De la Cruz J.M., "Fuzzy-PID controllers vs. fuzzy-PI controllers." Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 1996., New Orleans, LA, USA, Vol.3, 8-11 Sept. 1996, pp. 1598-1604.
- [13] ธันวา ศรีประโมง. การเขียนโปรแกรมภาษาซี สำหรับวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่สี่. กรุงเทพฯ. :

เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร. 2539. หากท่านนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] สุนทร วิฑูสรพจน์. การใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล 8051. กรุงเทพฯ. : บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน). 2538.
- [15] M.A. Mazidi and J.G. Mazidi, "The 80x86 IBM PC & Compatible Computer," Prentice Hall, 1995.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. Jinkam N. and Sooraksa P., “Conventional versus Fuzzy Control: Performance Evaluation for Lightweight Cartesian Robot Arms.” International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS’ 2001), Cheju National University, Jeju Island, Korea, 17-21 Oct. 2001, pp.441-443.
2. Nuttapong Jinkam and Pitikhate Sooraksa., “A position control for lightweight cartesian robot arm.” The First Thailand Materials Science and Technology Conference, Bangkok, Thailand, Jul. 19-20, pp.60-63, 2000.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายณัฐพงศ์ จินจาคาม
เกิดวันที่	6 กันยายน 2519 จังหวัดราชบุรี
การศึกษา	ปีการศึกษา 2531-2535 มัธยมศึกษาปีที่ 4 โรงเรียนวิสุทธรังษี จังหวัดกาญจนบุรี ปีการศึกษา 2536-2540 ประกาศนียบัตรบัณฑิตวิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2540-2542 ระดับปริญญาตรี อดสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประวัติการทำงาน	1 มีนาคม 2545 – 31 สิงหาคม 2545 ผู้ช่วยนักวิจัย City University of Hong Kong Department of Electronic Engineering 17 มกราคม – ปัจจุบัน พนักงานบริษัท ซีเกท เทคโนโลยี ประเทศไทย จำกัด ตำแหน่ง วิศวกรระดับ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้