



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การควบคุมการเคลื่อนที่เหมาะสมแบบพีไอดีสำหรับแขนกล

โดย นายธนกฤต ภัทรเกษวิทย์

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.มงคล หวังสถิตย์วงศ์)

21 พฤษภาคม 2550

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สินชัย ชินวรรตน์)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริพรรณ ธงชัย)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.วิบูลย์ เลิศวิมลนันท์)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.พีชัย อัมมมงคล)

การควบคุมการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมแบบฟิโอดีสำหรับแขนกล

นายธนกฤต ภัทรเกษวิทย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชื่อ : นายธนกฤต ภัทรเกษวิทย์
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : การควบคุมการเคลื่อนที่เหมาะสมแบบฟิโอดีสำหรับแขนกล
 สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สีนชัย ชินวรรธน์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริพรรณ ธงชัย
 ปีการศึกษา : 2549

บทคัดย่อ

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์การวางแผนการกำหนดการเคลื่อนที่ของแขนกลซึ่งเป็นงานที่ซับซ้อนและสำคัญในการออกแบบและการประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ งานวิจัยได้นำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้รับการพัฒนาใหม่เพื่อให้สอดคล้องของการวางแผนการกำหนดการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกำหนดพื้นที่และการเคลื่อนที่ของแขนกลโดยภายใต้ในการบังคับแขนกลจะทำให้เคลื่อนที่และควบคุมผลการได้มีประสิทธิภาพตามฟังก์ชันที่กำหนดแขนกลที่นำมาใช้ในงานวิจัยเป็นแขนกลที่มีอยู่เดิมโดยนำไปพัฒนาการเคลื่อนที่ให้ดียิ่งขึ้นเมื่อกำหนดการเคลื่อนที่และสามารถควบคุมได้ทำให้ไปตามที่วัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 60 หน้า)

คำสำคัญ : คาร์ทีเซียน, แชนก, พีไอดี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

Name : Mr. Thanakrit Pattaraketwit

Thesis Title : Trajectory PID Optimization Control of Manipulator

Major Field : Mechanical Engineering

King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok

Thesis Advisors: Assistant Professor Dr.Sinchai Chinvorarat

Assistant Professor Dr.Siripun Thongchai

Academic Year : 2006

Abstract

Planning of Manipulator pose trajectory is a crucial role and application of Manipulator in task space. This paper present a unified approach to optimal pose trajectory planning trajectory for manipulator in program computer. The Manipulator pose ruled surface is formed as a motion locus of configuration vector. The panning of Manipulator pose trajectory is accomplished through the way of generating and optimizing Manipulator pose ruled surfaces under the constraints of kinematics and dynamics for function motion and optimal control.

(Total 60 pages)

Keywords : Cartesian , Manipulator , PID

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ดีเพราะได้รับการชี้แนะแนวทางทางวิชาการที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งและยังเอื้อเพื่อสถานที่ทำงานวิจัยโดยให้คำปรึกษาที่มีพระคุณอย่างสูงต่อในการทำงานวิทยานิพนธ์รวมทั้งความเอาใจใส่ของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สินชัย ชินวรรตน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริพรรณ ชงชัย และรุ่นพี่ทุกคนที่เอื้อเพื่ออุปกรณ์ต่างๆ

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่เป็นห่วงใยและให้กำลังใจตลอดมาคอยอบรมสั่งสอนไม่ว่าจะเป็นเรื่องความเป็นห่วงและให้ความแนะนำให้ออกาสทางการศึกษาจนประสบความสำเร็จจนถึงวันนี้

ธนกฤต ภัทรเกษวิทย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฅ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตการวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	3
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของแขนกล	3
2.2 สรีระของแขนกล	3
2.3 อัลกอริทึมในการควบคุมแขนกล	4
2.4 ไคเนเมติกส์ผกผัน (Inverse Kinematics)	5
2.5 ส่วนประกอบของแขนกล	6
2.6 การควบคุมโดยการคำนวณแรงบิด (Computed-Torque Control)	7
2.7 การควบคุมโดยการป้อนกลับเพื่อลดการเชื่อมต่อแบบไม่เชิงเส้น	9
2.8 การวางแผนการเคลื่อนที่ (Trajectory Planning)	11
2.9 การส่งพารามิเตอร์ข้อต่อจากฟังก์ชันของเวลาเป็นฟังก์ชันของพารามิเตอร์วิถี	20
2.10 การสร้างเส้นโค้งที่จำกัดความเร็ว (Construction of Velocity Limit Curve)	22
2.11 การสร้างเส้นทางเวลาของแนววิถีที่ใช้เวลาน้อยที่สุด	25
2.12 การควบคุมแขนกลโดยใช้เวลาน้อยที่สุด (Time-Optimal Robot Control)	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	30
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้	30
3.2 การหาค่าความเร็วความเร่ง	35
บทที่ 4 ผลของการวิจัย	37
4.1 โปรแกรมควบคุม	37
4.2 ผลการทดลองที่ 1	38
4.3 ผลการทดลองที่ 2	41
4.4 ผลการทดลองที่ 3	44
4.5 ผลการทดลองที่ 4	47
4.6 ผลการทดลองที่ 5	50
4.7 ผลการทดลองที่ 6	53
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	57
5.1 สรุป	57
5.2 ข้อเสนอแนะ	58
เอกสารอ้างอิง	59
ประวัติผู้วิจัย	60

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4-1	สมรรถนะของระบบควบคุม PID X=20 แกน Y=30 แกน Z=20	39
4-2	สมรรถนะของระบบควบคุม Optimization PID X=20 แกน Y=30 แกน Z=20	40
4-3	สมรรถนะของระบบควบคุม PID X=30 แกน Y=50 แกน Z=40	42
4-4	สมรรถนะของระบบควบคุม Optimization PID X=30 แกน Y=50 แกน Z=40	43
4-5	สมรรถนะของระบบควบคุม PID 80 แกน Y=60 แกน Z=70	45
4-6	สมรรถนะของระบบควบคุม Optimization PID 80 แกน Y=60 แกน Z=70	46
4-7	สมรรถนะของระบบควบคุม PID X=50 แกน Y=100 แกน Z=100	48
4-8	สมรรถนะของระบบควบคุม Optimization PID X=50 แกน Y=100 แกน Z=100	49
4-9	สมรรถนะของระบบควบคุม PID แกน X=50 แกน Y=100 แกน Z=100	51
4-10	สมรรถนะของระบบควบคุม Optimization X=50 แกน Y=100 แกน Z=100	52
4-11	สมรรถนะของระบบควบคุม PID X=50 แกน Y=40 แกน Z=100	54
4-12	สมรรถนะของระบบควบคุม PID X=50 แกน Y=40 แกน Z=100	55
4-13	การเปรียบเทียบของ Rise Time ของไม่มี PID,PID ธรรมดา,PID Optimization	56
4-14	การเปรียบเทียบของ Rise Time ของไม่มี PID,PID ธรรมดา,PID Optimization	56

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 บล็อกไดอะแกรม Direct Kinematics	4
2-2 แขนกลคาร์เทเซียนและการเคลื่อนที่ของแต่ละแกน	6
2-3 ระบบควบคุมแขนกลแบบอิงแบบจำลอง	8
2-4 ระบบควบคุมที่มีส่วนอิงแบบจำลองอยู่นอกวงเซอร์โว	9
2-5 เส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกล	11
2-6 การเคลื่อนที่ของแขนกลแบบแบ่งจุด	12
2-7 เส้นทางหลายทางเลือกสำหรับจุดหนึ่งจุด	13
2-8 กราฟแสดงตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่ง	14
2-9 เส้นทางแบบเส้นตรง	16
2-10 เส้นทางแบบตรงผสมกับพาราโบลา	17
2-11 เส้นทางการเคลื่อนที่ของมือแขนกลในปริภูมิคาร์ทีเซียน	20
2-12 พิสัยของความเร่งที่ยอมรับได้ในแผนภาพ $\ddot{s}^2 / \ddot{s}$	22
2-13 เส้นโค้งจำกัดความเร็วในแผนภาพ $s / \dot{s}$	23
2-14 แหล่งปลายทางแนววิถีและแหล่งต้นทางแนววิถีบนเส้นโค้งจำกัด	24
2-15 ความเร็วพิสัยที่ยอมรับได้ของความเร่งในแผนภาพ $\ddot{s}^2 / \ddot{s}$ ที่จุดวิกฤต	24
2-16 การควบคุมโดยการป้อนกลับเพื่อลดการเชื่อมต่อแบบไม่เชิงเส้นและการปรับรูปแนววิถี	27
3-1 โปรแกรม LABVIEW	30
3-2 แขนกลแบบคาร์เทเซียนแบบ 3 แกน	31
3-3 ชุดขับเคลื่อนเซอร์โวมอเตอร์ 3 ชุด	31
3-4 การ์ดควบคุมมอเตอร์แบบ PCI	32
3-5 ชุดหม้อแปลงไฟฟ้า	32
3-6 เครื่องคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ	33
3-7 เส้นทางหลายทางเลือกสำหรับจุดหนึ่งจุด	33
3-8 กราฟ ตำแหน่ง ความเร็วและความเร่ง	35
4-1 หน้าต่างแสดงผลในการณำลองด้วยโปรแกรม	37
4-2 หน้าต่างแสดงผลในการทดลองกระบวนการ PID	37

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-3 ผลการตอบสนองของระบบเมื่อไม่มีตัวควบคุม PID แกน X=20 แกน Y=30 แกน Z=20	38
4-4 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม PID แกน X=20 แกน Y=30 แกน Z=20	39
4-5 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม Optimization PID แกน X=20 แกน Y=30 แกน Z=20	40
4-6 ผลการตอบสนองของระบบเมื่อไม่มีตัวควบคุม PID X=30 แกน Y=50 แกน Z=40	41
4-7 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม PID แกน X=30 แกน Y=50 แกน Z=40	42
4-8 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม Optimization PID แกน X=30 แกน Y=50 แกน Z=40	43
4-9 ผลการตอบสนองของระบบเมื่อไม่มีตัวควบคุม PID แกน X=80 แกน Y=60 แกน Z=70	44
4-10 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม PID แกน X=80 แกน Y=60 แกน Z=70	45
4-11 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม Optimization PID แกน X=80 แกน Y=60 แกน Z=70	46
4-12 ผลการตอบสนองของระบบเมื่อไม่มีตัวควบคุม PID แกน X=50 แกน Y=100 แกน Z=100	47
4-13 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม PID แกน X=50 แกน Y=100 แกน Z=100	48
4-14 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม Optimization PID แกน X=50 แกน Y=100 แกน Z=100	49
4-15 ผลการตอบสนองของระบบเมื่อไม่มีตัวควบคุม PID แกน X=50 แกน Y=40 แกน Z=100	50
4-16 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม PID แกน X=50 แกน Y=40 แกน Z=100	51
4-17 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม Optimization PID แกน X=50 แกน Y=40 แกน Z=100	52
4-18 ผลการตอบสนองของระบบเมื่อไม่มีตัวควบคุม PID แกน X=70 แกน Y=80 แกน Z=100	53

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-19	ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม PID แกน X=70 แกนY=80 แกน Z=100	54
4-20	ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม Optimization PID แกน X=70 แกนY=80 แกน Z=100	55

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	ความเร่งในการเคลื่อนที่
S	ระยะทางในการเคลื่อนที่
T	เวลาในการเคลื่อนที่
V	ความเร็วในการเคลื่อนที่
$F(s)$	เป็นเวกเตอร์มุมของข้อต่อ ณ ตำแหน่ง S บนเส้นทาง
$U(t)$	โพรไฟล์แรงบิดวงเปิดที่ใช้เวลาน้อยที่สุด
$C(\theta)$	เวกเตอร์แรงจากโน้มถ่วง
$D(\theta)$	เมตริกซ์สมมาตรเกี่ยวกับความเร่งความเฉื่อย
$h(\theta, \dot{\theta})$	เวกเตอร์แรงหนีศูนย์กลาง
PID^{-1}	การคำนวณย้อนกลับจากตัวควบคุม พี ไอ ดี
G_c	แบบจำลองของตัวควบคุม
G_p	แบบจำลองระบบย่อยข้อต่อแขนกลของข้อต่อหนึ่ง
$\ddot{S}_a$	Maximum Admissible Acceleration
$\ddot{S}_d$	Maximum Admissible Deceleration
$\dot{S}_{max}^2$	Maximum Velocity
T_{min}^i	ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของแรงบิด
T_{max}^i	ค่าขีดจำกัดสูงสุดของแรงบิด
$\dot{\theta}(t)$	เวกเตอร์ความเร็วเชิงมุม
$\ddot{\theta}(t)$	เวกเตอร์ความเร่งเชิงมุม
α_{ij}	สเกลาร์ความเร็วเชิงมุม
λ_i	สเกลาร์ความเร่งเชิงมุม

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทยมีความเจริญก้าวหน้าทางด้านอุตสาหกรรมไปมากเป็นเหตุผลจากการพัฒนาทางเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์อุตสาหกรรมบางประเภทเป็นที่ต้องการสิ่งของจำนวนมากๆ หรือทำงานในลักษณะซ้ำซากหรืองานเป็นอันตรายแก่ผู้ปฏิบัติงานในลักษณะที่ใช้เครื่องจักรอัตโนมัติทำงานแทนได้

ณชล และ สถาพร วิศวกรรมหุ่นยนต์ [1 , 2] ได้ทำการวิธีการควบคุมโดยใช้เวลาน้อยที่สุด (Time-Optimal Control Algorithm) จะสามารถถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาโปรไฟล์แนววิถีที่ใช้เวลาน้อยที่สุด

Yoram Koren [3] ได้ทำการควบคุมแบบกลไกให้มีการเคลื่อนที่เป็นระบบอัตโนมัติซึ่งทำให้มีการเคลื่อนที่ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

Gary W. Johnson. and Nesimi Ertugrul. [4 , 5] ได้ใช้โปรแกรม Labview เข้ามาในการควบคุมทางด้าน Control ซึ่งโปรแกรม Labview เป็นโปรแกรมสามารถใช้ได้ง่ายและเป็นโปรแกรมที่ได้รับการพัฒนาใหม่

Pfeiffer, F. and Johanni and Chen, Y. Desrochers [6 , 7] ได้ควบคุมแบบกลไกโดยใช้เวลาน้อยที่สุดโดยอาศัยทางด้านทฤษฎี Minimum-Time Control และ Trajectory Planning ของแบบกลไกเข้ามาควบคุมแบบกลไกให้ใช้เวลาให้ดีที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อปรับปรุงควบคุมแบบกลไกที่อยู่ในโรงงานมีการพัฒนาที่ดีขึ้น
- 1.2.2 สร้าง Optimization ในการควบคุมแบบกลไกแบบ 3 แกน
- 1.2.3 ทำศึกษาแนวทางแก้ปัญหาในการเคลื่อนที่ของแบบกลไก 3 แกนคาร์ทีเซียน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ควบคุมแบบกลไกให้มีการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมโดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้รับการพัฒนาใหม่ซึ่งทำให้มีการเคลื่อนที่อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

- 1.4.1 โปรแกรม LABVIEW
- 1.4.2 แขนกลแบบคาร์เทเซียนแบบ 3 แกน
- 1.4.3 เซอร์โวมอเตอร์พร้อมเอ็นโค้ดเดอร์ 3 ตัว
- 1.4.4 ชุดขับเซอร์โวมอเตอร์ 3 ชุด
- 1.4.5 การ์ดควบคุมมอเตอร์แบบ PCI
- 1.4.6 เครื่องคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ

1.5 ขั้นตอนวิธีการทำงานวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาทางทฤษฎีข้อมูลแขนกลคาร์เทเซียน
- 1.5.2 ศึกษาโปรแกรม LABVIEW นำมาใช้
- 1.5.3 ทำการสร้างแบบจำลอง
- 1.5.4 วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของแขนกลคาร์เทเซียน
- 1.5.5 ประเมินผลการเคลื่อนที่ของแขนกลคาร์เทเซียน
- 1.5.6 ทำการแก้ไขลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกล
- 1.5.7 เก็บข้อมูลเปรียบเทียบผลการทดลอง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับในการวิจัย

- 1.6.1 นำแขนกลไปใช้งานอุตสาหกรรมจริง
- 1.6.2 ทำให้มีการพัฒนาทางด้าน Program Soft Ware และ Hare Ware เพื่อใช้งานควบคุม
- 1.6.3 ใช้ในการพัฒนาในการเรียนการสอนได้

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของแขนกล

แขนกลถูกออกแบบให้เคลื่อนที่โดยการเลียนแบบการเคลื่อนไหวของมนุษย์เพื่อให้สามารถทำงานแทนมนุษย์ได้โดยผ่านการควบคุมจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์อีกทีหนึ่ง

แขนกลประเภทแขนกล (Robot Arm) นั้นใช้ในการเชื่อมงานพ่นสีงานหีบห่องานจับวางตามตำแหน่งและงานประกอบผลิตภัณฑ์ที่ผลิตอยู่ทุกวันนี้เช่น การวางตำแหน่งของตัวไอซีลงบนแผ่นวงจร หรือการประกอบชิ้นส่วนรถยนต์ ซึ่งปัจจุบันบางส่วนของงานหรือทั้งหมดของกระบวนการทำโดยแขนกลทั้งสิ้นองค์ประกอบของระบบแขนกลที่ดูซับซ้อนสามารถแบ่งออกได้อย่างชัดเจนได้เป็น 3 กลุ่ม

2.1.1 ฮาร์ดแวร์

2.1.2 คอมพิวเตอร์หรือคอนโทรลเลอร์

2.1.3 โปรแกรมควบคุม

แขนกล (Manipulator) คือข้อต่อที่ต่อกันเป็นอนุกรมเพื่อทำงานเหมือนสิ่งเคลื่อนที่ได้ อย่างอิสระหรือเปรียบได้กับแขนของมนุษย์โดยมีมอเตอร์เป็นตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อ

2.2 สรีระของแขนกล

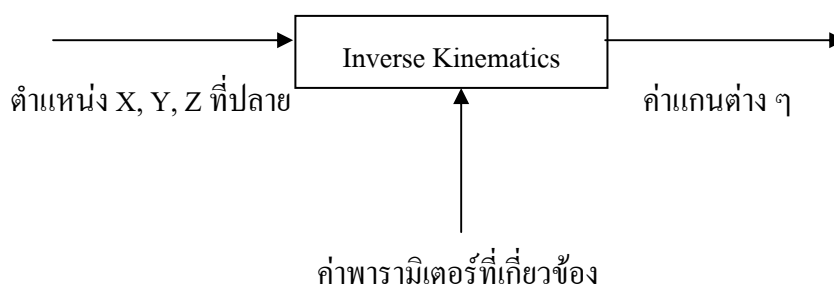
องค์ประกอบพื้นฐานที่ครอบคลุมการเคลื่อนที่ของแขนกลคือการออกแบบของรูปร่างและความซับซ้อนของโปรแกรมควบคุมแขนกลถูกออกแบบมาให้มีรูปแบบและขนาดต่าง ๆ มากมาย และโปรแกรมควบคุมเป็นส่วนทำให้เกิดผลสูงสุดกับความต้องการในแต่ละลักษณะเฉพาะของแขนกล ในสภาพแวดล้อม 3 มิติของเราในทุกวันนี้มีวิธีอันหลากหลายที่จะออกแบบแขนกลให้ขยับไปถึงยังทุกจุดในขอบเขตการทำงานของตัวเอง ด้วยต้องมีมอเตอร์ 1 ตัวต่อหนึ่งองศาอิสระ (Degree of Freedom) อย่างน้อยที่สุดต้องมีมอเตอร์ 3 ตัวเพื่อการทำงานในตำแหน่งสามมิติ (ระนาบของแกน X, Y และ Z) และอีก 3 ตัวเพื่อการหมุนมือ (ROLL PITCH และ YAW)

2.3 อัลกอริทึมในการควบคุมแขนกล

สิ่งหนึ่งที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการทำงานของแขนกล คือ ความแม่นยำและเที่ยงตรงซึ่งการเคลื่อนไหวกการทำงานของแขนกลจะประกอบด้วยการเคลื่อนไหวของ ฐานไหล่ข้อศอกข้อมือเป็นต้น การเคลื่อนไหวตามส่วนต่างๆ นี้ จะส่งผลให้มือเคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งต่าง ๆ ที่ปฏิบัติงานฉะนั้นถ้าส่วนต่าง ๆ นี้มีการควบคุมที่ไม่ดีพอจะส่งผลถึงความแม่นยำและเที่ยงตรงในการทำงานนั้น ดังนั้น มือของแขนกลจะเคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งใด ๆ ได้นั้น ขึ้นอยู่กับข้อต่อต่างๆเคลื่อนไปในตำแหน่งที่เหมาะสมและสอดคล้องกันด้วยซึ่งการควบคุมก็ต้องควบคุมตำแหน่งของข้อต่อต่างให้เหมาะสมกันซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยสมการคณิตศาสตร์ สำหรับสมการที่จะกล่าวถึงในที่นี้มี 2 ลักษณะด้วยกันคือ สมการ Direct Kinematics และสมการ Inverse Kinematics ซึ่งสมการทั้ง 2 ลักษณะใช้แสดงความสัมพันธ์ของข้อต่อต่างๆ และตำแหน่งปลายมือ โดยรายละเอียดจะกล่าวต่อไป

ก่อนที่จะกล่าวถึงสมการของแขนกลในแขนกลคือดีกรีออฟฟรียดอม (Degree of Freedom) หรือ DOF หมายถึงจำนวนข้อต่อหรือจุดต่อที่เคลื่อนที่เป็นอิสระต่อกันส่วนอีกคำคือ Link หมายถึง สิ่งที่เชื่อมต่อระหว่างข้อต่อกับข้อต่อซึ่งข้อต่อนั้นอาจจะเป็นการเคลื่อนที่แบบ R หรือแบบ P ก็ได้สมการ Inverse Kinematics

ความหมายของสมการ Inverse Kinematics จะมีความหมายที่ตรงข้ามกับสมการ Direct Kinematics คือจากเดิมป้อนค่าของมุมที่ข้อต่อต่างๆ เข้าไปในผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นตำแหน่ง X, Y, Z แต่สมการ Inverse Kinematics นี้จะเป็นการป้อนตำแหน่ง X, Y, Z ของปลายมือเข้าไปแล้วจะได้ผลลัพธ์เป็นมุมของแต่ละข้อต่อว่าต้องเคลื่อนไปกี่องศาจากตำแหน่ง Home ปลายมือจึงจะไปอยู่ตำแหน่งที่ต้องการบล็อกไดอะแกรม การทำงานจะแสดงได้ดังในภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 บล็อกไดอะแกรม Inverse Kinematics

จากภาพที่ 2-1 โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ยังคงใช้ค่าเหมือนเดิมทุกประการจากความหมายของสมการ Inverse Kinematics เมื่อป้อนตำแหน่ง X, Y, Z ที่ปลายมือและค่าพารามิเตอร์ที่

เกี่ยวข้องกับผลลัพธ์จะได้เป็นมุมของแกนต่าง ๆ คือ X , Y , Z โดยสามารถเขียนเป็นอัลกอริทึมของสมการ Inverse Kinematics ได้ดังภาพที่ 2-1

สำหรับการประยุกต์ใช้งานอัลกอริทึมของสมการ Inverse Kinematics อันดับแรกที่เราเห็นได้ชัดคือควบคุมการจับวัตถุที่ตำแหน่ง X , Y , Z ต้นทางให้นำไปวางที่ตำแหน่ง X , Y , Z ปลายทางโดยคอมพิวเตอรืจะเป็นตัวคำนวณค่าของมุมที่ข้อต่อต่าง ๆ เมื่อคำนวณเสร็จคอมพิวเตอรืจะส่งค่ามุมต่าง ๆ ไปให้กับชุดขับเคลื่อนของชุดขับเคลื่อนก็จะทำการขับเคลื่อนข้อต่อต่าง ๆ ไปตามมุมที่ได้มาจากอัลกอริทึมของสมการ Inverse Kinematics ผลลัพธ์ที่ได้ปลายมือจะอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ จากนั้นก็เป็นหน้าที่ของผู้เขียนโปรแกรมควบคุมว่าจะให้ทำอะไรต่อไป

อัลกอริทึมของสมการ Inverse Kinematics เป็นเพียงส่วนที่ช่วยคำนวณค่ามุมของแต่ละข้อต่อเคลื่อนไปเพื่อให้มืออยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ ส่วนที่สองของการประยุกต์ใช้งานของอัลกอริทึมของสมการ Inverse Kinematics โดยการใช้ควบคุมกับกล้องในการมองภาพกล้องจะทำหน้าที่ประมวลสัญญาณภาพที่รับเข้ามาเปลี่ยนให้เป็นตำแหน่ง X , Y , Z ของวัตถุแล้วส่งค่า X , Y , Z ไปให้กับอัลกอริทึมของสมการ Inverse Kinematics ซึ่งจะทำให้แขนกลสามารถทำงานได้เหมือนกับมีดวงตาในการมองเห็นวัตถุ

2.4 ไคเนเมติกส์ผกผัน (Inverse Kinematics)

กล่าวถึงเรื่องของไคเนเมติกส์ตรงหรือ Direct Kinematics ซึ่งเป็นเรื่องเกี่ยวกับการแปลงข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับมุมหมุนของข้อต่อหมุนหรือระยะชักของข้อต่อให้กลายเป็นข้อมูลเรื่องตำแหน่งและองศาการหมุนของมือแขนกลเมื่อเทียบจากฐานแขนกลหรือระบบพิกัดฐานในหัวข้อที่นี้กล่าวถึงเรื่องที่มีความสำคัญในระดับเดียวกับไคเนเมติกส์ตรงคือเรื่องไคเนเมติกส์ผกผัน หรือ Inverse Kinematics ไคเนเมติกส์ผกผันจะเกี่ยวข้องกับการแปลงข้อมูลเรื่องตำแหน่งและองศาการหมุนของมือหุ่นยนต์ให้กลายเป็นข้อมูลเรื่องมุมหมุนของข้อต่อหมุนหรือระยะชักของข้อต่อปริศนาวิธีการหาผลเฉลยไคเนเมติกส์ผกผัน (Inverse Kinematics Solution) ที่มีใช้อยู่ในขณะนี้สามารถแยกเป็น 2 วิธีใหญ่ คือ

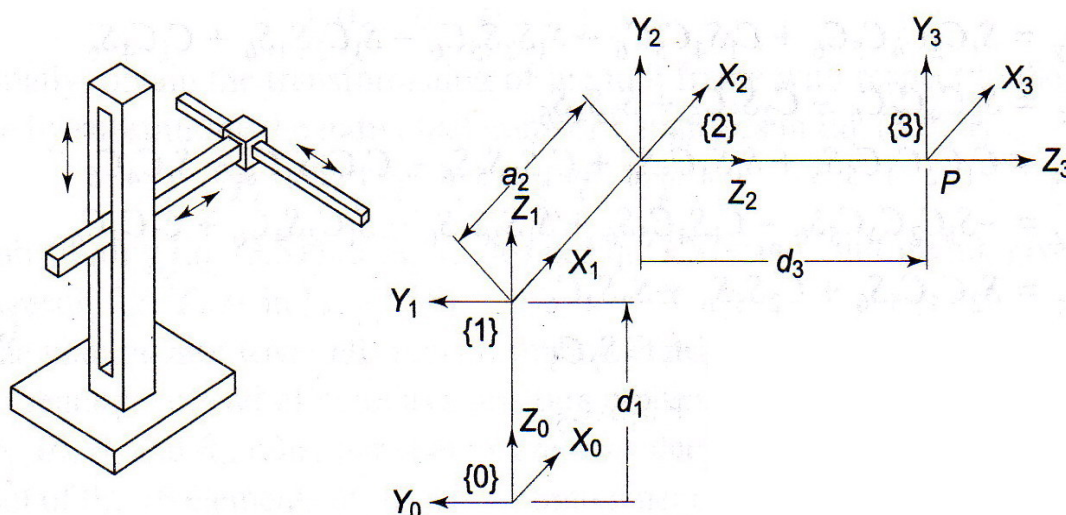
2.4.1 เทคนิคการแปลงผกผันสำหรับผลเฉลยมุมออยเลอร์ (Inverse Transform Technique for Euler Angles Solution)

2.4.2 เทคนิคทางเรขาคณิต (Geometric Approach)

เนื่องจากการใช้งานแขนกลในอุตสาหกรรมนั้นโดยรวมแล้วจะเน้นไปที่การใช้แขนกลที่มีข้อต่อแบบข้อต่อหมุนจะเน้นจะกล่าวถึงไคเนเมติกส์ผกผันในกรณีที่แขนกลมีแต่ข้อต่อหมุนเท่านั้น โดยที่วิธีการหาผลเฉลยที่จะใช้คือเทคนิคทางเรขาคณิต

รูปแบบของแขนกลที่มีใช้ในปัจจุบันสามารถแบ่งเป็น 4 ประเภทใหญ่ตามรูปแบบของพิกัดและการเคลื่อนที่ตามภาพที่ 2-2 ดังนี้

2.4.2.1 แขนกลเคลื่อนที่ในพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian Coordinates) ประกอบด้วยแกนเชิงเส้น (Linear Axis) 3 แกน



ภาพที่ 2-2 แขนกลคาร์ทีเซียนและการเคลื่อนที่ของแต่ละแกน

2.5 ส่วนประกอบของแขนกล

Manipulator หรือ Rover เป็นส่วนประกอบหลักของแขนกลประกอบด้วยชิ้นส่วน (Links) ข้อต่อ (Joints) และ โครงสร้างของตัวแขนกล

2.5.1 End Effectors เป็นส่วนสุดท้ายต่อกับข้อต่อส่วนสุดท้ายของแขนกลโดยปกติใช้หยิบจับวัตถุหรือทำงานเฉพาะทางเช่นแบบที่ติดตั้งเครื่องเชื่อมหรือเครื่องพ่นสีโดยปกติการควบคุมโดยใช้ชุดควบคุม PLC (Programmable Logic Controller)

2.5.2 Actuators ชุดขับเคลื่อนหรือชุดขับเคลื่อนของแขนกลรูปแบบใช้โดยทั่วไปได้แก่มอเตอร์กระแสตรงหรือมอเตอร์ไฮดรอลิก

2.5.3 Sensors อุปกรณ์ตรวจวัดค่าโดยแปลงค่าทางกายภาพให้เป็นแบบค่าสามารถตรวจวัดได้เช่นแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าเพื่อใช้วัดข้อมูลของแขนกลในการรับรู้สภาพแวดล้อมเช่นชุดควบคุมที่ต้องการจะทราบตำแหน่งของชิ้นส่วนของแขนกลว่าอยู่ ณ ตำแหน่งใดเมื่อเทียบกับที่สามารถทราบได้ว่าแขนกลอยู่ในตำแหน่งใดแม้ว่าจะอยู่ในที่ลับเพราะชุดตรวจวัดของเราอยู่ในโครงสร้างและมีการส่งค่ากลับมายังสมองตลอดเวลา หลักการเหมือนแขนกลโดยใช้ชุดเครื่องมือวัดป้อนกลับ (Feedback Sensors) ส่งข้อมูลจากแต่ละข้อต่อไปยังชุดควบคุมต่อไป

2.5.4 Processor and Controller ชุดควบคุมคล้ายๆกับสมองของมนุษย์โดยได้รับข้อมูลจาก เซนเซอร์และสั่งการ ไปยังชุดขับ (Actuators) เพื่อให้เคลื่อนที่ได้ดังตั้งโปรแกรมไว้

2.5.5 Software โปรแกรมแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มโดยกลุ่มแรกเป็นระบบปฏิบัติการพื้นฐานของ (Operating Systems) กลุ่มที่ 2 เป็น โปรแกรมของแขนกล (Robotic Software) ซึ่งจะทำกำหนัดการเคลื่อนที่ของข้อต่อจากสมการจลนศาสตร์จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งต่อไปยังชุดควบคุมและกลุ่มที่ 3 เป็นโปรแกรมที่มีการควบคุมเฉพาะทาง

2.5.6 Power Supply แหล่งจ่ายพลังงานเป็นส่วนสำคัญที่จ่ายกำลังงานให้ไปยังชุดควบคุมและ Manipulator แบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆได้แก่แหล่งจ่ายไฟฟ้าและแหล่งจ่ายพลังงานในการขับเคลื่อนเช่นในแขนกลระบบนิวเมติกส์ต้องมีแหล่งจ่ายลมอัดเป็นต้น

2.6 การควบคุมโดยการคำนวณแรงบิด (Computed-Torque Control)

สมการพลวัตสำหรับอธิบายการเคลื่อนที่ของแขนกลที่มีข้อต่อหมุนจะอยู่ในรูปของ

$$\tau(t) = D(\theta(t)), \ddot{\theta}(t) + h(\theta(t), \dot{\theta}(t)) + c(\theta(t)) \quad (2-1)$$

โดยที่ $D(\theta)$ คือเมทริกซ์สมมาตรเกี่ยวกับความเร่งเชิงความเฉื่อย (Inertial Acceleration Related Matrix) ขนาด $n \times n$ $h(\theta, \dot{\theta})$ คือเวกเตอร์แรงคอริโอลิสและแรงหนีศูนย์กลาง (Coriolis and Centrifugal Force Vector) ขนาด $n \times 1$ และ $C(\theta)$ คือเวกเตอร์จากแรงโน้มถ่วง (Gravity Loading Force Vector) สมาชิกแต่ละตัวของเมทริกซ์ $D(\theta)$ และเวกเตอร์ $C(\theta)$ จะเป็นฟังก์ชันของ มุมหมุนของข้อต่อ (θ) ในขณะที่สมาชิกแต่ละตัวของเวกเตอร์ $h(\theta, \dot{\theta})$ จะเป็นฟังก์ชันของทั้งมุม หมุน

ปัญหาของการควบคุมระบบซึ่งมีความซับซ้อนอย่างเช่นระบบแขนกลจะสามารถทำได้โดย การคำนวณค่าแรงบิดดังนี้ กำหนดให้

$$\tau = \alpha \tau' + \beta \quad (2-2)$$

โดย τ เป็นเวกเตอร์ของแรงบิดขนาด $n \times 1$ เลือกให้

$$\alpha = D(\theta)$$

$$\beta = h(\theta, \dot{\theta}) + c(\theta) \quad (2-3)$$

โดยการใช้กฎของเซอร์โว (Servo Law) จะได้

$$\tau' = \ddot{\theta}_d + K_v \dot{E} + K_p E \quad (2-4)$$

โดยที่

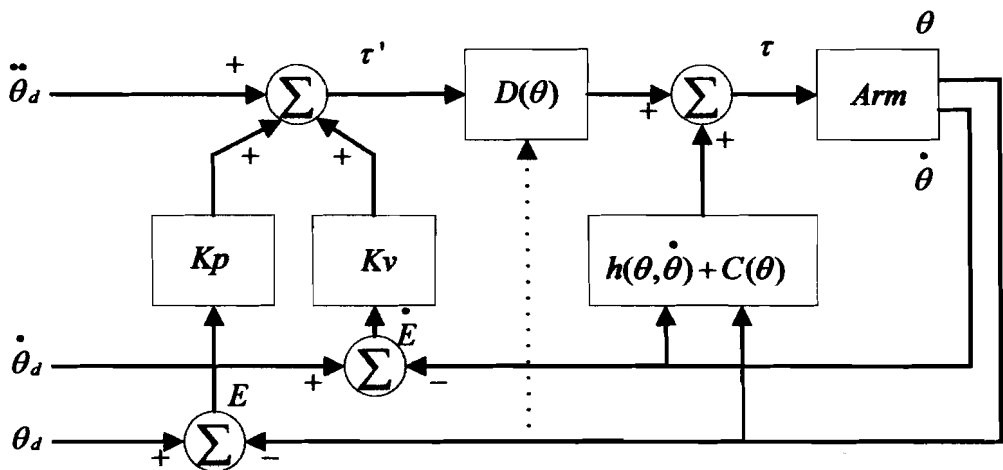
$$E = \theta_d - \theta \quad (2-5)$$

จากสมการ (2-1) ถึง (2-4) เห็นได้ว่าระบบควบคุมแบบปิด (Closed Loop Control Systems) มีสมการค่าความคลาดเคลื่อน (Error Equation) ที่อยู่ในรูปของ

$$\ddot{E} + K_v \dot{E} + K_p E = 0 \quad (2-6)$$

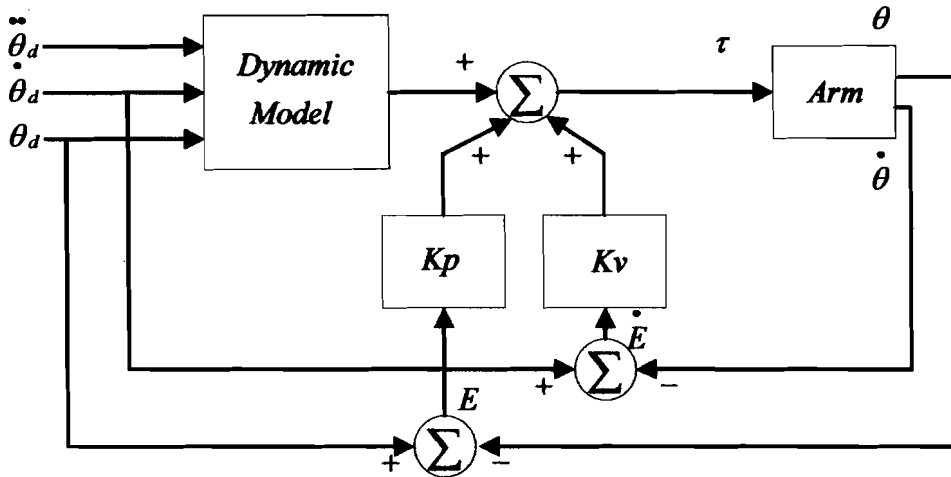
สังเกตได้ว่าสมการค่าความคลาดเคลื่อนนี้เป็นสมการเวกเตอร์ที่ไม่มีลักษณะการเชื่อมต่อ (De-couple) ถ้าเมทริกซ์ K_v และ K_p เป็นเมทริกซ์ทแยงมุม (Diagonal Matrix) สมการที่ (2-6) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\ddot{e}_i + k_{vi} \dot{e}_i + k_{pi} e_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2-7)$$



ภาพที่ 2-3 ระบบควบคุมแบบอิงแบบจำลอง

อีกรูปแบบหนึ่งที่เป็นไปได้ของการควบคุมโดยการคำนวณแรงบิดได้แสดงไว้ในภาพที่ 2-3 ในกรณีนี้ส่วนควบคุมแบบอิงแบบจำลอง (Model-based Control) อยู่นอกวงเซอร์โวอย่างไรก็ดี รูปแบบของระบบควบคุมตามที่ได้แสดงไว้ดังภาพที่ 2-4 จะไม่ทำให้เกิดลักษณะการไม่เชื่อมต่อเหมือน



ภาพที่ 2-4 ระบบควบคุมที่มีส่วนอิงแบบจำลองอยู่นอกวงเซอร์โว

ในกรณีแรกถ้าให้ $D(\theta_d) \cong D(\theta)$, $h(\theta_d, \dot{\theta}_d) \cong h(\theta, \dot{\theta})$ และ $c(\theta_d) \cong c(\theta)$ สมการค่าความคลาดเคลื่อนของระบบควบคุมแบบกลจะอยู่ในรูปของ

$$\ddot{E} + D^{-1}(\theta)K_v \dot{E} + D^{-1}(\theta)K_p E = 0 \quad (2-8)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อโครงแบบ Configuration ของแขนกลเปลี่ยนไป อัตราขยายวงปิดที่มีผล (Effective Closed-loop Gain) ก็จะเปลี่ยนไปด้วยและเปลี่ยนรูป (Quasi-static Pole) ของระบบก็จะมี การเปลี่ยนตำแหน่งในระนาบจริง-จินตภาพ (Real-Imaginary Plane) อย่างไรก็ตามการที่ (2-8) สามารถนำมาใช้เป็นจุดเริ่มต้นในการออกแบบตัวควบคุมแบบคงทน (Robust Controller) นั่นคือ ออกแบบตัวควบคุมให้มีอัตราขยายคงที่ถึงแม้ว่าโพลจะมีการเปลี่ยนตำแหน่งและให้การเปลี่ยนตำแหน่งของโพลก็จะเป็นไปในลักษณะที่ทำให้โพลอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมเสมอในทางตรงกันข้ามการออกแบบตัวควบคุมที่มีอัตราขยายที่แปรผันได้ (Variable Gain) ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งซึ่งจะทำให้ ตำแหน่งโพลที่สถิตย์ก็ยังคงอยู่ในตำแหน่งเดิม ถึงแม้ว่าโครงแบบของแขนกลจะเปลี่ยนไป

2.7 การควบคุมโดยการป้อนกลับเพื่อลดการเชื่อมต่อแบบไม่เชิงเส้น

จากสมการการเคลื่อนที่ของแขนกลตามสมการที่ (2-9) หรือ

$$D(\theta)\ddot{\theta}(t) + h(\theta, \dot{\theta}) + c(\theta) = u(t) \quad (2-9)$$

โดยที่ $u(t)$ คือเวกเตอร์แรงบิดขนาด $n \times 1$ เนื่องจากเมทริกซ์ $D(\theta)$ มีคุณสมบัติไม่เป็นเอกฐาน (Non-Singular) ไม่ว่าแขนกลจะมีโครงแบบเช่นไรสมการที่ (2-9) จะสามารถถูกทำให้ลักษณะการเชื่อมต่อนั้นหายไป และทำให้สมการกลายเป็นเซตของสมการอนุพันธ์อันดับที่ 2 จึงเห็นซึ่งส่งผลให้สามารถควบคุมแต่ละข้อของแขนกลแยกจากกันได้ การจำกัดลักษณะการเชื่อมต่อนั้นนี้สามารถทำได้โดยใช้สัญญาณควบคุม $u(t)$ ซึ่งอยู่ในรูปของ

$$u(t) = h(\theta, \dot{\theta}) + c(\theta) - D(\theta) \begin{pmatrix} \alpha_{11} \theta_1(t) + \alpha_{01} \dot{\theta}_1(t) - \lambda_1 u_{ref}^1(t) \\ \vdots \\ \alpha_{1n} \theta_n(t) + \alpha_{0n} \dot{\theta}_n(t) - \lambda_n u_{ref}^n(t) \end{pmatrix} \quad (2-10)$$

โดยที่ α_{ij} และ λ_i เป็นค่าสเกลาร์ เมื่อใช้สัญญาณควบคุมแบบนี้จะได้ว่า

$$D(\theta) \ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) + c(\theta) = h(\theta, \dot{\theta}) + c(\theta) - D(\theta) \begin{pmatrix} \alpha_{11} \theta_1(t) + \alpha_{01} \dot{\theta}_1(t) - \lambda_1 u_{ref}^1(t) \\ \vdots \\ \alpha_{1n} \theta_n(t) + \alpha_{0n} \dot{\theta}_n(t) - \lambda_n u_{ref}^n(t) \end{pmatrix} \quad (2-11)$$

ซึ่งนำไปสู่

$$D(\theta) \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_1(t) + \alpha_{11} \dot{\theta}_1(t) + \alpha_{01} \theta_1(t) - \lambda_1 u_{ref}^1(t) \\ \vdots \\ \ddot{\theta}_n(t) + \alpha_{1n} \dot{\theta}_n(t) + \alpha_{0n} \theta_n(t) - \lambda_n u_{ref}^n(t) \end{pmatrix} = 0 \quad (2-12)$$

และเนื่องจากเมทริกซ์ $D(\theta)$ มีคุณสมบัติไม่เป็นเอกฐานสมการที่ (2-12) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$\ddot{\theta}_i(t) + \alpha_{1i} \dot{\theta}_i(t) + \alpha_{0i} \theta_i(t) = \lambda_i u_{ref}^i(t) \quad , \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2-13)$$

ซึ่งสมการที่ (2-13) นี้มีลักษณะเป็นระบบเชิงเส้นอันดับที่ 2 แบบไม่เชื่อมต่อ (De-Coupled Second Order Linear System)

2.8 การวางแผนการเคลื่อนที่ (Trajectory planning)

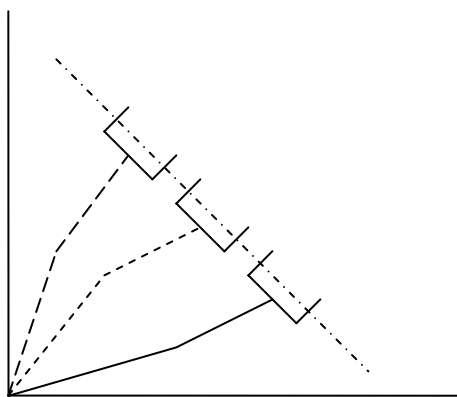
คือการวางแผนให้แขนกลเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นไปยังจุดสิ้นสุดโดยทำการควบคุมผ่านโดยโปรแกรมและในระหว่างการเคลื่อนที่นั้นแขนกลต้องหลบหลีกสิ่งกีดขวางและเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่วางแผนไว้

ส่วนทราเจกทอรี (Trajectory) หมายถึง ประวัติของเวลาของตำแหน่งการเคลื่อนที่หรือความเร็วและความเร่งของแต่ละองศาอิสระ (Degree of Freedom: DOF) รวมถึงมนุษย์ผู้ควบคุมที่เข้ามาเกี่ยวข้องกับแขนกลเพื่อสั่งงานให้แขนกลเดินทางไปตามเส้นทางที่กำหนดเพื่อง่ายต่อการสั่งงานของมนุษย์ผู้ควบคุมจำเป็นต้องเขียนแสดงในฟังก์ชันของเวลาเพื่อบ่งบอกถึงงานต้องการและมักบ่งบอกถึงแผนการเคลื่อนที่ในรูปแบบง่าย ๆ ที่ต้องการ จากนั้นปล่อยให้ระบบทำการคิดค้นหาในรายละเอียด

ยกตัวอย่างเช่นผู้ใช้งานอาจจะบอกจุดหรือตำแหน่งที่ต้องการและการหมุนของแขนกลนั้นส่วนระบบที่เหลือจะทำการวิเคราะห์เองในการจัดวางอย่างไรให้ได้ตามระยะเวลา ความเร็ว หรือตัวแปรอื่นๆที่กำหนด

การนำเสนอแผนการเคลื่อนที่ในคอมพิวเตอร์ ภายหลังจากการวางแผนสุดท้ายในการสร้างแผนการเคลื่อนที่ที่จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาการทำงาน (Run Time) โดยทั่วไปการคำนวณ ตำแหน่ง ความเร็ว ความเร่ง จะเกิดขึ้นพร้อมๆกัน ในการคำนวณค่าต่างๆเรียกว่าอัตราการปรับค่า (Path Update Rate) โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 20-200Hz

คำว่าเส้นทาง (Path) หมายถึง ลำดับการเคลื่อนที่ของแขนกลเป็นไปตามขั้นที่กำหนด โดยไม่คำนึงถึงระยะเวลา เช่น แขนกลเคลื่อนที่จากจุด A ไปยังจุด B และไปยัง จุด C ลำดับขั้นของการเคลื่อนที่ที่จะเรียกว่า “เส้นทาง” หรือ Path ส่วนทราเจกทอรีนั้นมักจะคำนึงถึงระยะเวลาในแต่ละเส้นทางที่เคลื่อนที่



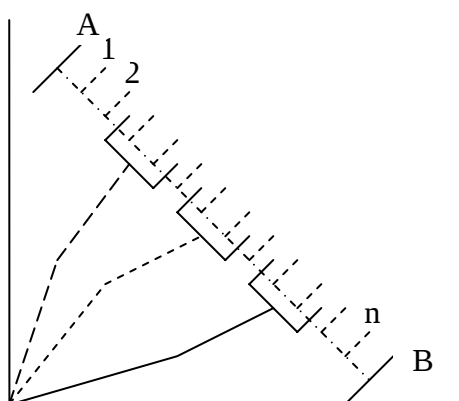
ภาพที่ 2-5 เส้นทางเคลื่อนที่ของแขนกล

ภาพที่ 2-5 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลโดยในกรณีของเส้นทางนั้นไม่คำนึงถึงว่า แขนกลนั้นเคลื่อนที่ไปถึงจุด B และ C ที่เวลาเท่าใดแต่ในกรณีของทราเจกทอรีจะพิจารณาถึงความเร็วและความเร่งของแขนกลนั้นเคลื่อนที่ไปยังจุด B และ C ในเวลาที่ต่างทำให้เกิดทราเจกทอรีที่แตกต่างกัน ซึ่งจะอธิบายถึงความเร็วและความเร่งของแขนกลอีกด้วย

ในมิติแบบข้อต่อและมิติแบบแขนกล การที่เขียน การพิจารณาแขนกลที่ปลายแขนกลอยู่ ณ ตำแหน่ง A ในระนาบสามมิติ ถูกสั่งให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง B สามารถที่จะคำนวณโดยใช้ จลนศาสตร์ผกผันเพื่อหาระยะการเคลื่อนที่ของมุมในแต่ละข้อต่อและเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ ซึ่งระยะเคลื่อนที่ของมุมในแต่ละข้อต่อจะนำไปใช้ในการควบคุมเพื่อควบคุมแขนกล

การเคลื่อนที่ของแขนกลโดยการใช้ค่าระยะเคลื่อนที่ของมุมในแต่ละข้อต่อนี้เรียกว่า มิติแบบ ข้อต่อ (Joint-Space) ถึงแม้ว่าแขนกลสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการแต่การเคลื่อนที่ ระหว่างจุดเริ่มต้นกับจุดปลายนั้นไม่สามารถพิจารณาได้

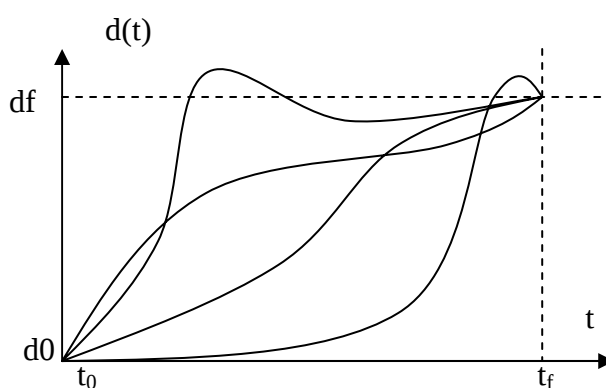
ในกรณีที่สองถ้าลากเส้นตรงระหว่างจุด A และจุด B และการควบคุมแขนกลให้เคลื่อนที่จากจุด A ไปจุด B แต่ในกรณีนี้ต้องบังคับให้แขนกลเคลื่อนที่ไปตามแนวเส้นตรงที่ลากระหว่างจุดสองจุดนั้นด้วยวิธีแบ่งเส้นตรงนั้นออกเป็นส่วนๆเท่าๆกันแล้วให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังทีละจุดย่อยๆ เหล่านั้นที่จุดเริ่มจากจุด A ไปยังจุด 0 ไปยังจุด 1 ไปยังจุด 2 และไปจนถึงจุด B โดยการเคลื่อนที่ไปยังแต่ละจุดนั้นใช้วิธีจลนศาสตร์ผกผันคล้ายกับข้างต้น จะสังเกตว่าวิธีนี้ทราบถึงสถานะของ หุ่นยนต์ในขณะที่เคลื่อนที่จากจุด A ไปยังจุด B ตลอดเวลาลำดับการเคลื่อนที่วิธีนี้เรียกว่ามิติแบบ คาร์ทีเซียน (Cartesian Space) โดยใช้การคำนวณมิติแบบข้อต่อประกอบในการเคลื่อนที่ไปยังจุด แบ่งแต่ละส่วนย่อย ดังภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 การเคลื่อนที่ของแขนกลแบบแบ่งจุด

แผนการเคลื่อนที่แบบคาร์ทีเซียนอาจจะเป็นที่เข้าใจง่ายเพราะแผนการเคลื่อนที่ที่อยู่ในพิกัดคาร์ทีเซียน แต่อย่างไรก็ตาม ซึ่งเป็นกรณีที่แขนกลไม่สามารถเคลื่อนที่ไปได้หรือเกินขอบเขตที่สามารถเคลื่อนที่ไปถึงหรืออาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของมุมอย่างกะทันหันในการเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง

ในการคำนวณเส้นทางเดินของแขนกล (Space Trajectories) โดยพิจารณาในภาพของมุมของการเคลื่อนที่โดยใช้ฟังก์ชันโพลิโนเมียลกำลังสาม พิจารณาการเคลื่อนที่ของแขนกลจากตำแหน่งเริ่มต้นที่เวลา t_0 ไปตำแหน่งสุดท้ายที่เวลา t_f แล้วใช้จลนศาสตร์ผกผันคำนวณหามุมที่ตรงกันกับตำแหน่งและการเคลื่อนที่ที่ต้องการโดยตำแหน่งที่เริ่มต้นของแขนกลจะทราบค่าในรูปของตำแหน่งเริ่มต้นคือฟังก์ชันแต่ละข้อต่อเริ่มต้นเวลา t_0 และเวลาสุดท้าย t_f ดังตามภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-7 เส้นทางหลายทางเลือกสำหรับจุดหนึ่งจุด

ในฟังก์ชันที่ราบเรียบ (Smooth Function) ต้องทราบค่าอย่างน้อย 4 เงื่อนไขของ $q(t)$ โดย 2 เงื่อนไขมาจากค่าเริ่มต้นและค่าสุดท้าย

$$q(0) = q_0, q(t_f) = q_f \quad (2-14)$$

ส่วนอีก 2 เงื่อนไขมาจากกรณีฟังก์ชันนั้นต่อเนื่อง (Continuous)

$$\dot{q}(0) = 0, \dot{q}(t_f) = 0 \quad (2-15)$$

จากเงื่อนไขทั้ง 4 นั้นสามารถนำมาวิเคราะห์ได้โพลิโนเมียลดีกรีสาม (Third Degree Polynomials) หรือ Cubic ซึ่งมีรูปดังสมการ (2-16)

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (2-16)$$

ส่วนความเร็ว (Velocity) และความเร่ง (Acceleration) ในสมการ (2-17) และสมการ (2-18) ตามลำดับ

$$\dot{q}(t) = a_1 + 2a_2t + 3a_3t^2 \quad (2-17)$$

$$\ddot{q}(t) = 2a_2 + 6a_3t \quad (2-18)$$

สามารถได้มาซึ่ง 4 สมการ 4 ตัวแปรตาม (2-19) ถึง (2-22)

$$q_0 = a_0 \quad (2-19)$$

$$q_f = a_0 + a_1t_f + a_2t_f^2 + a_3t_f^3 \quad (2-20)$$

$$0 = a_1 \quad (2-21)$$

$$0 = a_1 + a_2t_f + a_3t_f^2 \quad (2-22)$$

หาผลลัพธ์สมการที่ (2-19) ถึง (2-22) ได้ว่า

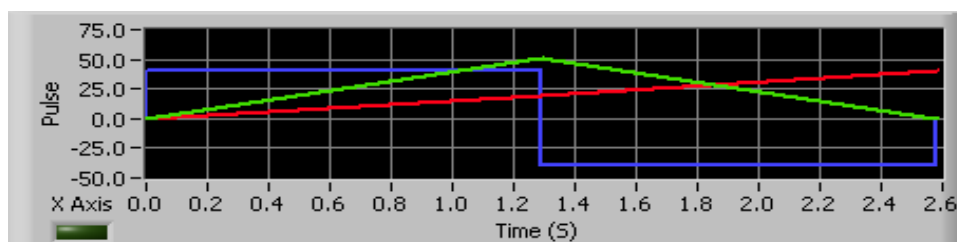
$$a_0 = q_0 \quad (2-23)$$

$$a_1 = 0 \quad (2-24)$$

$$a_2 = \frac{3}{t_f^2}(q_f - q_0) \quad (2-25)$$

$$a_3 = -\frac{3}{t_f^3}(q_f - q_0) \quad (2-26)$$

สามารถใช้สมการ (2-23) ถึง (2-24) คำนวณหาคำตอบของพอลิโนเมียลดีกรีสามซึ่งระหว่างจุดเริ่มต้นใดกับจุดสุดท้ายในกรณีของการเริ่มและจุดสุดท้ายมีความเร็วเป็นศูนย์



ภาพที่ 2-8 กราฟแสดงตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่ง

อีกวิธีหนึ่งคือวิธีโพลิโนเมียลกำลังสามผ่านจุดโดยจากที่ผ่านมาได้ศึกษาถึงการเคลื่อนที่พิจารณาโดยระบุช่วงเวลาที่ต้องการและจุดหมายที่ต้องการโดยทั่วไปเราต้องการให้เส้นทางการเคลื่อนที่นั้นผ่านจุดระหว่างกลาง (Intermediate) วิธีโพลิโนเมียลกำลังสามผ่านจุด (Cubic Polynomials for A Part with Via Points) การเคลื่อนที่ผ่านจุดระหว่างกลางนั้นจะเคลื่อนที่ไปอย่างต่อเนื่องไม่มีการหยุด (Without Stopping)

ดังนั้นต้องคำนวณหาสมการที่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ (Constraints) โดยเงื่อนไขบังคับที่ได้มาดังนี้

$$q^n(0) = q_0^n \quad (2-27)$$

$$q^n(t_f) = q_f^n \quad (2-28)$$

นั่นคือต้องทราบความเร็วของข้อต่อที่จุดเริ่มต้น $q^n(0)$ และความเร็วของข้อต่อจุดที่ต้องการเคลื่อนที่ไป (Velocities at the via points) $q^n(t_f)$ และสมการที่ (2-29) ถึง (2-32) ที่อธิบายโพลิโนเมียลดีกรีสาม คือ

$$q_0 = a_0 \quad (2-29)$$

$$q_f = a_0 + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3 \quad (2-30)$$

$$q_0^n = a_1^n \quad (2-31)$$

$$q_f^n = a_1^n + a_2^n t_f + a_3^n t_f^2 \quad (2-32)$$

แก้สมการที่ (2-29) ถึง (2-32) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ a_0, a_1, a_2, a_3 ได้ว่า

$$a_0 = q_0 \quad (2-33)$$

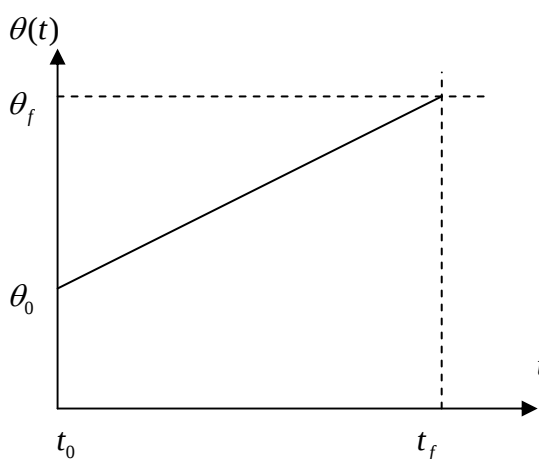
$$a_1 = q_0^n \quad (2-34)$$

$$a_2 = \frac{3}{t_f^2}(q_f - q_0) - \frac{2}{t_f}q_0^n - \frac{1}{t_f}q_f^n \quad (2-35)$$

$$a_3 = -\frac{2}{t_f^3}(q_f - q_0) + \frac{1}{t_f^2}(q_f^n + q_0^n) \quad (2-36)$$

ใช้สมการที่ (2-33) ถึง (2-36) คำนวณหาโพลีโนเมียลดีกรีสามที่เชื่อมต่อระหว่างจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายที่ทราบค่าความเร็วของข้อต่อ ณ จุดเริ่มต้น (Initial Velocities) $\dot{q}_0$ และความเร็วสุดท้าย (Final Velocities) $\dot{q}_f$

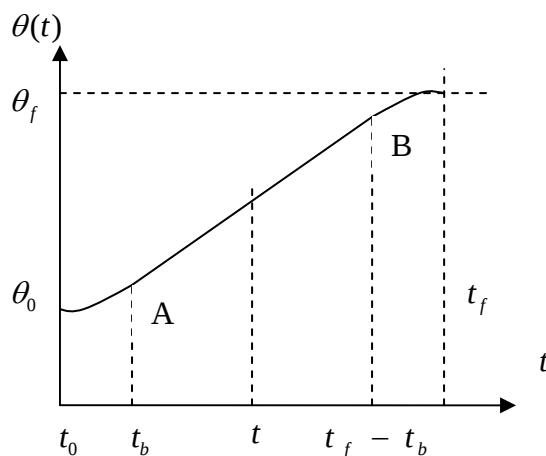
วิธีเส้นตรงที่ปลายเป็นพาราโบลา (Method of Linear Segments with Parabolic Blends) เป็นวิธีที่ใช้ในการคำนวณหาเส้นทางการเคลื่อนที่ คือเส้นทางการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง (Linear) คือการใช้การเทียบค่า (Interpolation) จากจุดเริ่มต้นไปจุดสุดท้ายเป็นเส้นตรงที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่และความเร่งเป็นศูนย์ซึ่งหมายถึงความเร่งที่จุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายต้องเป็นค่าอนันต์ (Infinite) เพื่อที่จะทำให้เกิดค่าความเร็วที่จุดปลายทั้งสองข้างอย่างทันที่ดังภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 เส้นทางแบบเส้นตรง

ในหัวข้อนี้เราพิจารณาการเคลื่อนที่ของข้อต่อ (Motion of Each Joint) เป็นแบบเส้นตรง แต่ไม่ได้หมายความว่าจุดปลายของแกนกลเคลื่อนที่เป็นแนวของเส้นตรง

การเคลื่อนที่ของข้อต่อเป็นแบบเส้นตรงมีข้อบกพร่องที่จุดปลายทั้งสองคือค่าความเร่งเข้าสู่อนันต์ อันทำให้เกิดผลเสียหายต่ออุปกรณ์ของแกนกลเพื่อป้องกันค่าความเร่งเข้าสู่ค่าอนันต์จึงนำกราฟพาราโบลามารวมเข้าที่ปลายทั้งสองข้างดังภาพที่ 2-10



ภาพที่ 2-10 เส้นทางแบบตรงผสมกับพาราโบลา

ในการนำกราฟพาราโบลามาเพิ่มที่ปลายทั้งสองข้างโดยประมาณว่าช่วงระยะเวลาเท่ากัน นั้น คือ มีค่าความเร่งคงที่ในค่าเดียวกันสมมติว่า ณ จุดเริ่มต้นค่าตำแหน่งของมุมเป็น q_0 ที่เวลา $t_0 = 0$ และจุดสุดท้ายค่าตำแหน่งของมุมเป็น q_f ที่เวลา t_f สามารถเขียนสมการพาราโบลา คือ

$$q(t) = c_0 + c_1 t + \frac{1}{2} c_2 t^2 \quad (2-37)$$

$$\dot{q}(t) = c_1 + c_2 t \quad (2-38)$$

$$\ddot{q}(t) = c_2 \quad (2-39)$$

พบว่าค่าความเร่งคงที่และค่าความเร็วต่อเนื่อง ณ จุด A และ B แทนค่าที่เงื่อนไขที่ปลายทั้งสองข้าง (Boundary Conditions)

$$q(t = 0) = q_0 = c_0 \quad (2-40)$$

$$\dot{q}(t = 0) = 0 = c_1 \quad (2-41)$$

$$\ddot{q}(t) = c_2 \quad (2-42)$$

จะได้ค่าคงที่

$$c_0 = q_0 \quad (2-43)$$

$$c_1 = 0 \quad (2-44)$$

$$c_2 = \frac{w}{t_b} \quad (2-45)$$

ทำให้สมการพาราโบลาอยู่ในรูปของ

$$q(t) = q_0 + \frac{1}{2}c_2 t^2 \quad (2-46)$$

$$q(t) = c_2 t \quad (2-47)$$

$$q(t) = c_2 \quad (2-48)$$

โดยในช่วงของเส้นตรง ค่าความเร็วคงที่ขึ้นอยู่กับชุดขับถ้าให้ค่าความเร็วคงที่เป็น w แทน
ค่าหาสมการในช่วง A และ B ได้ว่า

$$q_A = q_0 + \frac{1}{2}c_2 t_b^2 \quad (2-49)$$

$$q_A = c_2 t_b = w \quad (2-50)$$

$$q_B = q_A + w((t_f - t_b) - t_b) + w(t_f - 2t_b) \quad (2-51)$$

$$q_B = q_A = w \quad (2-52)$$

$$q_f = q_f + (q_A - q_0) \quad (2-53)$$

$$q = 0 \quad (2-54)$$

โดยในช่วงเวลา t_b จำนวนได้จาก

$$c_2 = \frac{w}{t_b} \quad (2-55)$$

$$q_f = q_0 + c_2 t_b^2 + w(t_f - 2t_b) \quad (2-56)$$

$$q_f = q_0 + \frac{w}{t_b} t_b^2 + w(t_f - 2t_b) \quad (2-57)$$

$$t_b = \frac{q_0 - q_f + w t_f}{w} \quad (2-58)$$

และค่าความเร็วเชิงมุมสูงสุด

$$w_{\max} = \frac{2(q_f - q_0)}{t_f} \quad (2-59)$$

ส่วนครึ่งหลังของพาราโบลาคล้ายกันเพียงแต่ความเร่งเป็นค่าลบ

$$q(t) = q_f - \frac{1}{2}c_2(t_f - t)^2 \quad (2-60)$$

$$q(t) = q_f - \frac{w}{2t_b}c_2(t_f - t)^2 \quad (2-61)$$

$$\dot{q}(t) = \frac{w}{t_b}(t_f - t) \quad (2-62)$$

$$\ddot{q}(t) = -\frac{w}{t_b} \quad (2-63)$$

วิธีการหาเส้นทางทราเจกทอรีแบบคาร์ทีเซียน (Cartesian Space Trajectories) ศึกษาถึงการเคลื่อนที่ของแขนกลในพิกัดคาร์ทีเซียนตามด้วยตำแหน่งและการหมุนของแขนกลนอกเหนือจากการวางแผนการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงแล้ว ยังมีวิธีการอื่นอีกที่จะใช้ในการขับเคลื่อนเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกล

วิธีการวางแผนการเคลื่อนที่ข้อต่อ (Joint Space Trajectories) นำมาใช้ได้ในแบบคาร์ทีเซียน แต่มีข้อแตกต่างคือจะต้องคำนวณค่าระยะเคลื่อนที่ของข้อต่อซ้ำกันโดยวิธีคำนวณทางจลนศาสตร์ผกผัน ซึ่งแตกต่างกับวิธีของการเคลื่อนที่ข้อต่อที่สามารถนำค่าที่คำนวณมาใช้ได้ทันที

แต่วิธีของทราเจกทอรีแบบคาร์ทีเซียนค่าที่ได้คือ ค่าตำแหน่งและการหมุนของแขนกลโดยจะต้องนำมาคำนวณหาค่าของข้อต่อโดยใช้สมการจลนศาสตร์ผกผัน

สามารถอธิบายได้ในลำดับการคำนวณ คือ

2.8.1 เพิ่มเวลาในการคำนวณ $t = t + dt$

2.8.2 คำนวณตำแหน่งและการหมุนบนเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ต้องการ

2.8.3 คำนวณค่าการเคลื่อนที่ของข้อต่อสำหรับค่าตำแหน่งและการหมุนของแขนกลโดยใช้จลนศาสตร์ผกผัน

2.8.4 ส่งค่าที่คำนวณได้ผ่านไปยังชุดควบคุม

2.8.5 ลำดับข้างต้นในเวลาที่ถัดไป คือ เพิ่มเวลาซึ่งนำไปสู่

$$D(q) \ddot{q} + a_1 \dot{q} + a_0 q - l_1 u_{ref}^1(t) = 0 \quad (2-64)$$

และเนื่องจากเมทริกซ์ $D(q)$ มีคุณสมบัติไม่เป็นเอกฐาน สมการที่ (2-64) จะเขียนใหม่ได้เป็น

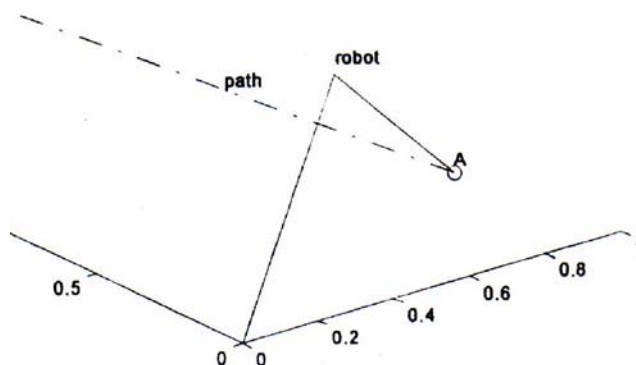
$$\ddot{q}_i(t) + a_{1i} \dot{q}_i(t) + a_{0i} q_i(t) = l_i u_{ref}^i(t) \quad , \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2-65)$$

ซึ่งสมการที่ (2-65) นี้มีลักษณะเป็นระบบเชิงเส้นอันดับที่ 2 แบบไม่เชื่อมต่อ (De-Coupled Second Order Linear System)

2.9 การส่งพารามิเตอร์ข้อต่อจากฟังก์ชันของเวลาเป็นฟังก์ชันของพารามิเตอร์วิถี

ตามที่กล่าวมาข้างต้นว่าขั้นตอนวิธีการควบคุมโดยใช้เวลาน้อยที่สุดนั้นจะสามารถนำมาใช้ในงานได้ก็ต่อเมื่อทางการเคลื่อนที่ของแขนกลนั้นเป็นที่ทราบล่วงหน้า เส้นทางเคลื่อนที่นี้จะเป็นเส้นทางเคลื่อนที่ของจุดปลายของมือแขนกล (End-Effector) ในปริภูมิคาร์ทีเซียน (Cartesian Space) กำหนดให้ทุกจุดบนเส้นทางเคลื่อนที่ของมือแขนกลจะมีเซตของมุมหมุนข้อต่อที่เป็นไปได้อย่างเดียว (Unique) ที่จะทำให้จุดปลายของมือแขนกลอยู่บนเส้นทางเคลื่อนที่นี้ เพราะฉะนั้น การส่งฟังก์ชัน (Function Mapping) จะสามารถทำได้จาก

$$q(t) = f(s), q \in R^n \quad (2-66)$$



ภาพที่ 2-11 เส้นทางเคลื่อนที่ของมือแขนกลในปริภูมิคาร์ทีเซียน

โดยที่ $q(t)$ เป็นเวกเตอร์มุมหมุนข้อต่อ (Joint Angle Vector) ณ เวลา t และ $f(s)$ เป็นเวกเตอร์มุมหมุนข้อต่อ ณ ตำแหน่ง s บนเส้นทาง โดยปกติแล้ว s จะเป็นระยะทางจากตำแหน่งเริ่มต้น (Initial Position) ของมือแขนกล (จุด A ในภาพที่ 2-11) โดยจะวัดไปตามทางบนเส้นทางการเคลื่อนที่ โดยใช้การส่งฟังก์ชันตามที่ได้ให้ไว้ในสมการที่ (2-66) เวกเตอร์ความเร็วเชิงมุม (Angular Velocity Vector) และเวกเตอร์ความเร่งเชิงมุม (Angular Acceleration Vector) จะสามารถหาได้ดังนี้

$$\dot{q}(t) = \dot{f}(s) \quad (2-67)$$

และ
$$\ddot{q}(t) = \ddot{f}(s) + \dot{f}'(s) \quad (2-68)$$

โดยที่ $\dot{q}(t)$ เป็นเวกเตอร์ความเร็วเชิงมุมและ $\ddot{q}(t)$ เป็นเวกเตอร์ความเร่งเชิงมุม prime(.) เป็นส่วนที่บอกถึงอนุพันธ์ (Derivative) เมื่อเทียบกับพารามิเตอร์วิถี (Path Parameter) s และ dot(.) เป็นส่วนที่บอกถึงอนุพันธ์เมื่อเทียบกับเวลา

จากวิธีการสร้างแบบจำลองพลวัตระบบการเคลื่อนที่ของแขนกลสามารถเขียนในรูปของ

$$D(q)\ddot{q} + \dot{q}^T H(q)\dot{q} + c(q) = T \quad (2-69)$$

โดย $H(q)$ คือเทนเซอร์ของแรงคอริโอลิสและแรงหนีศูนย์กลาง (Tensor of Coriolis and Centrifugal Forces) ขนาด $n \times n$ โดยการแทนค่าจากสมการที่ (2-67) ถึงสมการที่ (2-68) ลงในสมการที่ (2-69) สมการการเคลื่อนที่ของแขนกลก็จะสามารถให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันของพารามิเตอร์วิถีได้ดังนี้

$$D(f(s))\ddot{f}(s) + \dot{f}'(s)^T H(f(s))\dot{f}(s) + c(f(s)) = T$$

$$[D(f(s))\dot{f}'(s) + \dot{f}'(s)^T H(f(s))\dot{f}(s) + c(f(s))] = T \quad (2-70)$$

สมการที่ (2-70) สามารถเขียนในรูปของ

$$d(s)\ddot{f}(s) + h(s)\dot{f}(s) + c(s) = T \quad (2-71)$$

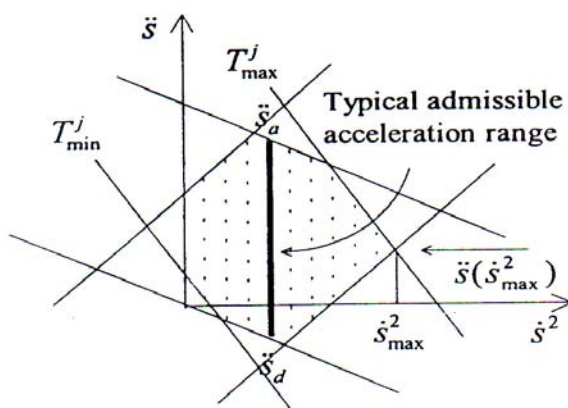
โดยที่ $d(s) = D(f(s))\dot{f}'(s)$ ($d(s)$ เรียกว่าเวกเตอร์ความเฉื่อยที่มีผล (Effective Inertia Vector)) $h(s) = D(f(s))\ddot{f}(s) + \dot{f}'(s)^T H(f(s))\dot{f}(s)$ และ $c(s) = c(f(s))$ สมการที่ (2-71) นี้ จะถูกกำหนดพิสัย (Range) โดยขีดจำกัดแรงบิดแอคชูเอเตอร์นั้นคือ

$$T_{\min}^i \leq d_i(s)\ddot{s} + h_i(s)\dot{s}^2 + c_i(s) \leq T_{\max}^i, i = 1, 2, \dots, n \quad (2-72)$$

โดยที่ $T_{\min}^i$ จะเป็นขีดจำกัดขั้นต่ำสุดของแรงบิด (Minimum Torque Limit) ในกรณีข้อต่อที่ i $T_{\max}^i$ จะเป็นขีดจำกัดสูงสุดของแรงบิด (Maximum Torque Limit) ในกรณีข้อต่อที่ i และ n คือระดับขั้นความเสรีหรือจำนวนของข้อต่อ สมการที่ (2-71) และ (2-72) นี้จะมีส่วนสำคัญกับขั้นตอนถัดไปของขั้นตอนวิธีการควบคุมโดยใช้เวลาน้อยที่สุด

2.10 การสร้างเส้นโค้งที่ขีดจำกัดความเร็ว (Construction of Velocity Limit Curve)

ณ ที่ค่าหนึ่งของ s พิสัยของความเร่งที่ยอมรับได้ (Admissible Acceleration) $\ddot{s}$ ในแผนภาพ (Diagram) $\ddot{s} / \dot{s}$ ก็จะมีลักษณะคล้ายกับภาพที่ 2-12 แผนภาพสร้างขึ้นมาโดยใช้สมการที่ (2-17) และสมการที่ (2-72)



$\ddot{s}_a$ - Maximum admissible acceleration

$\ddot{s}_d$ - Maximum admissible deceleration

$\dot{s}_{\max}$ Maximum velocity

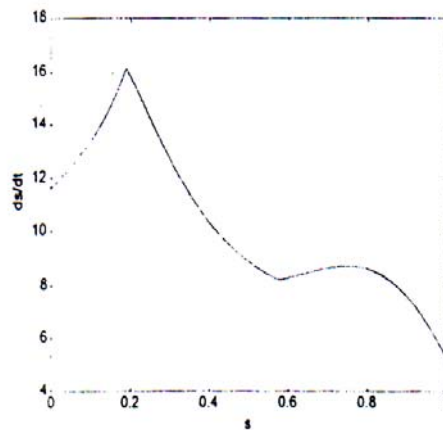
ภาพที่ 2-12 พิสัยของความเร่งที่ยอมรับได้ในแผนภาพ $\ddot{s} / \dot{s}$

จากแผนภาพ $\ddot{s} / \dot{s}$ นี้ ณ ที่ ความเร็วที่เป็นไปได้สูงสุด (Maximum Admissible Velocity) $\dot{s}_{\max}$ ค่าของความเร่งที่ยอมรับได้สูงสุด (Maximum Admissible Acceleration) $\ddot{s}_a$ และค่าของความหน่วงที่ยอมรับได้สูงสุด (Maximum Admissible Deceleration) $\ddot{s}_d$ จะเป็นค่าเดียวกัน เนื่องจากค่าของ $d(s)$, $h(s)$ และ $c(s)$ สำหรับทุกจุดบนเส้นทางหรือทุกค่าของ s นั้นเป็นค่าที่ทำให้ ความเร็วที่เป็นไปได้สูงสุดสำหรับทุกค่า s จะสามารถหาได้ดังนี้

$$\mathcal{S}_{\max}^2(s) = \min_{ij} \max_{T_i T_j} \frac{d_j(s)(T_i - c_i(s)) - d_i(s)(T_j - c_j(s))}{d_j(s)h_i(s) - d_i(s)h_j(s)} \quad (2-73)$$

$$i, j = 1, 2, \dots, n$$

ค่า T_i ในสมการที่ (2-73) นั้นสามารถเป็นค่า $T_{\min}^i$ หรือ $T_{\max}^i$ ขึ้นอยู่กับค่าของ $d_j(s)h_i(s) - d_i(s)h_j(s)$ ถ้า $d_j(s)h_i(s) - d_i(s)h_j(s) = 0$ ณ บางค่า s แล้วแอกซุเอเตอร์ที่ i และแอกซุเลเตอร์ที่ j จะไม่มีผลต่อการสร้างค่าขีดจำกัดความเร็ว หรือขีดจำกัดความเร็วมีค่าอนันต์ (Infinite) ตัวอย่างของเส้นโค้งขีดจำกัดความเร็ว (Velocity Limit Curve) ในแผนภาพ $s / \mathcal{S}$ จะอยู่ในภาพที่ 2-13



ภาพที่ 2-13 เส้นโค้งขีดจำกัดความเร็วในแผนภาพ $s / \mathcal{S}$

เมื่อเส้นโค้งขีดจำกัดความเร็วได้แล้วจุดบนเส้นโค้งขีดจำกัดความเร็วที่ต้องพิจารณา คือ จุดสัมผัส (Tangent Point) จุดไม่ต่อเนื่อง (Discontinuity Point) จุดวิกฤต (Critical Point) และจุดเอกฐาน (Singular Point) จุดเหล่านี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาวะ (Condition) บนเส้นโค้งขีดจำกัดความเร็วโดยเปลี่ยนจากแหล่งปลายทางแนววิถี (Trajectory Sink) เป็นแหล่งต้นทางแนววิถี (Trajectory Source)

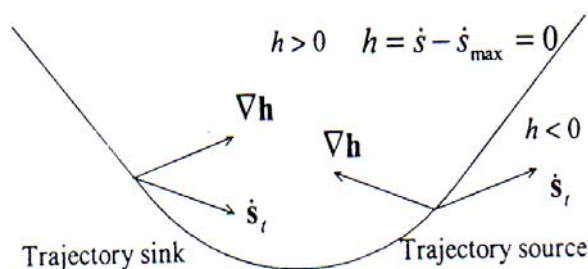
$$- \frac{\partial \mathcal{S}_{\max}^2(s)}{\partial s} \mathcal{S}_{\max}^2(s) + \mathcal{S}_{\max}^2(s, \mathcal{S}_{\max}^2(s)) = 0 \quad (2-74)$$

ในขณะที่แหล่งปลายทางแนววิถีคือจุดที่

$$- \frac{\partial \mathcal{S}_{\max}^2(s)}{\partial s} \mathcal{S}_{\max}^2(s) + \mathcal{S}_{\max}^2(s, \mathcal{S}_{\max}^2(s)) = 0 \quad (2-75)$$

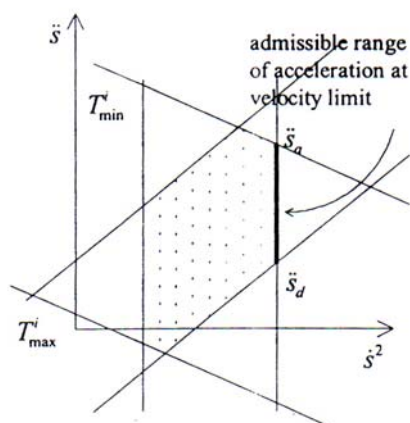
การเปลี่ยนจากแหล่งปลายทางแนววิถีเป็นแหล่งต้นทางแนววิถีเกิดขึ้นเมื่อการเปลี่ยนเครื่องหมายในส่วน $-\frac{\partial s_{\max}^*(s)}{\partial s} s_{\max}^*(s) + s_{\max}^*(s, s_{\max}^*)$ แผนภาพซึ่งแสดงตำแหน่งของแหล่งปลายทางแนววิถีและแหล่งต้นทางแนววิถีบนเส้นโค้งจำกัดความเร็วจะอยู่ในภาพที่ 2-14

$$h = \frac{\partial h}{\partial s} \frac{\partial h}{\partial s} \frac{\partial h}{\partial s} = \frac{\partial s_{\max}^*(s)}{\partial s} \frac{\partial h}{\partial s}, s_{\max}^* = \frac{\partial s_{\max}^*(s)}{\partial s} s_{\max}^*(s, s_{\max}^*) \quad (2-76)$$



ภาพที่ 2-14 แหล่งปลายทางแนววิถีและแหล่งต้นทางแนววิถีบนเส้นโค้งจำกัดความเร็ว

ในกรณีของจุดวิกฤตค่าความเฉื่อยที่มีผล (Effective Intertia) ค่าหนึ่ง $(d_i(s))$ จะมีค่าเป็นศูนย์ ส่วนในกรณีของจุดเอกฐานนั้น จุดเอกฐานจะเป็นจุดวิกฤตซึ่งภาวะที่แสดงในสมการที่ (2-43) และสมการที่ (2-44) ภาวะใดภาวะหนึ่งไม่เป็นจริงที่จุดวิกฤตค่าของความเร่งที่ยอมรับได้สูงสุดและค่าของความหน่วงที่ยอมรับสูงสุดจะไม่เท่ากันพิสัยของความเร่งที่ยอมรับได้ (Admissible Acceleration Range) ที่จุดวิกฤตจะแสดงอยู่ในภาพที่ 2-15



ภาพที่ 2-15 พิสัยที่ยอมรับได้ของความเร่งในแผนภาพ s'' / s^2 ที่จุดวิกฤต

เพื่อให้การใช้ค่าความหน่วงในการคำนวณการเคลื่อนที่โดยใช้เวลาน้อยที่สุดนั้นเป็นไปได้ อย่างเป็นไปอย่างถูกต้องค่าที่จะต้องนำมาใช้แทนค่าคือความเร่งที่เป็นไปได้ (Feasible Acceleration) และความหน่วงที่เป็นไปได้ (Feasible Deceleration) ณ จุดสัมผัสจุดไม่ต่อเนื่องจุดวิกฤตและจุดเอกฐาน โดยที่ความเร่งที่เป็นไปได้อาจจะกำหนดโดย

$$\ddot{x}_{af} = \ddot{x}_{max} \frac{\partial \ddot{x}_{max}(s_+)}{\partial s} \quad (2-77)$$

และความหน่วงที่เป็นไปได้อาจจะกำหนดโดย

$$\ddot{x}_{df} = \ddot{x}_{max} \frac{\partial \ddot{x}_{max}(s_-)}{\partial s} \quad (2-78)$$

โดยที่ s_+ คือ พารามิเตอร์ s ที่จุดสัมผัส จุดวิกฤตหรือจุด เอกฐานในขณะที่เครื่องหมาย+เป็น ส่วนที่บอกว่าเป็นการหาอนุพันธ์จากทางด้านขวา และเครื่องหมาย - เป็นส่วนที่บอกว่าเป็นการหา อนุพันธ์จากด้านซ้าย การหาอนุพันธ์จากทางด้านขวาและจากทางด้านซ้ายเป็นเรื่องที่สำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีของจุดวิกฤตและจุดเอกฐาน เนื่องจากอนุพันธ์ ณ จุดวิกฤตและจุดเอกฐาน จะไม่สามารถหาได้โดยตรงเฉพาะลักษณะของพิสัยของความเร่งที่ยอมรับได้ทั้งในกรณีของจุด วิกฤตและจุดเอกฐานจะทำให้เส้นโค้งจำกัดความเร็วมีลักษณะที่ไม่สามารถหาอนุพันธ์ได้ที่จุด สัมผัส อนุพันธ์จากทางด้านขวาและจากทางด้านซ้ายที่จุดสัมผัสจะมีค่าประมาณเท่ากัน ในส่วน กรณีของจุดไม่ต่อเนื่องค่าความเร่งที่ยอมรับได้สูงสุดลดความหน่วงที่ยอมรับได้สูงสุดจะเป็นค่า เดียวกัน และหาได้จากจุดที่มีความเร็วต่ำกว่า ณ จุดไม่ต่อเนื่อง (s_-) โดยอาศัยสมการหรือสำหรับ ทั้งความเร่งและความหน่วง ซึ่งการเลือกจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของเส้นโค้งจำกัดความเร็ว เมื่อทำ การพิจารณาในลักษณะนี้ จุดไม่ต่อเนื่องก็จะเป็นเหมือนจุดสัมผัสในขั้นตอนวิธีสร้างสำหรับ เส้นทางเวลาของแนววิถีที่ใช้เวลาน้อยที่สุด (Time-Optimal Trajectory Time History)

2.11 การสร้างเส้นทางเวลาของแนววิถีที่ใช้เวลาน้อยที่สุด

ขั้นตอนวิธีการควบคุมโดยใช้เวลาน้อยที่สุดสำหรับการสร้างเส้นทางเวลาของแนววิถี โดยอาศัยแผนภาพ $\dot{x} / \ddot{x}$ จะสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.11.1 จากจุดเริ่มต้น (Initial Point) ในแผนภาพ $s / \ddot{x}$ ให้หาปริพันธ์ไปข้างหน้าตามเวลา (Integrate Forward Through Time) ค่าของความเร่งที่ยอมรับได้สูงสุด (Maximum Allowable Acceleration) ซึ่งหาได้จาก

$$a(s, s) = \min_i \left(\frac{T_i - c_i(s) - h_i(s)}{d_i(s)} \right) \quad \text{subject to } T_i \in [T_{\min}^i, T_{\max}^i], i = 1, 2, \dots, n \quad (2-79)$$

ถ้าหาปริพันธ์ไปได้เรื่อยๆ จนถึงจุดสุดท้าย (Final Point) ให้ไปที่ข้อ 6 แต่ถ้าแนวการหาปริพันธ์ชนกับเส้นโค้งจำกัดความเร็วที่จุด s_h ให้ไปที่ข้อ 2.11.1

2.11.2 ถ้าจุด s_h ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดที่ระบุในสมการที่ หรือ จุด s_h จะเป็นจุดเอกฐานให้ตั้ง $s_t = s_h$ และไปที่ข้อ แต่ถ้า s_h เป็นไปตามข้อกำหนดที่ระบุในสมการที่ (2-42) หรือ (2-43) ให้ไปที่ข้อ 3

2.11.3 หาจุดวิกฤตหรือจุดสัมผัสที่อยู่ใกล้กับจุด s_h ที่สุดโดยให้หาไปข้างหน้าไปตามเส้นโค้งจำกัดความเร็ว และกำหนดจุดวิกฤตหรือจุดสัมผัสที่หาได้เป็นจุด s_t (s_t ณ s_h)

2.11.4 จากจุด s_t ให้หาปริพันธ์ไปข้างหลังตามเวลา (Integrate Backward Through Time) ของค่าความหน่วงที่เป็นไปได้สูงสุด (Maximum Feasible Deceleration) ตามที่ระบุในสมการที่ (2-46) จนกระทั่งแนววิถีตัดกับแนววิถีที่มีอยู่เดิมที่จุด s_{cr} โดยที่ s_{cr} < s_h ณ ที่จุดนี้แนววิถีจะเปลี่ยนจากการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งเป็นการเคลื่อนที่ด้วยความหน่วง

2.11.5 จากจุด s_t ให้หาปริพันธ์ไปข้างหน้าของค่าความเร่งที่เป็นไปได้สูงสุด (Maximum Feasible Acceleration) ตามที่ระบุในสมการที่ (2-45) จนกระทั่งแนววิถีชนกับเส้นโค้งจำกัดความเร็วอีกครั้งหรือแนววิถีผ่านจุดสุดท้ายถ้าแนววิถีชนกับเส้นโค้งจำกัดความเร็วให้ไปที่ 2 แต่ถ้าแนววิถีผ่านจุดสุดท้ายให้ไปที่ข้อ 6

2.11.6 จากจุดสุดท้าย (Final Point) ให้หาปริพันธ์ไปข้างหลังเวลา (Intergrate Backward Through Time) ของค่าความหน่วงที่ยอมได้สูงสุด (Maximum Allowable Deceleration) ซึ่งหาได้จาก

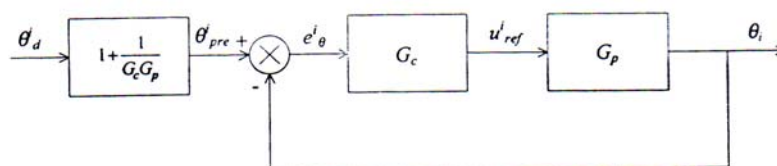
$$a(s, s) = \max_i \left(\frac{T_i - c_i(s) - h_i(s)}{d_i(s)} \right) \quad \text{subject to } T_i \in [T_{\min}^i, T_{\max}^i], i = 1, 2, \dots, n \quad (2-80)$$

ในกรณีที่ของสมการที่ (2-79) และ (2-80) ถ้า $d_i(s) = 0$ ในกรณีของข้อต่อ i แอคชูเอเตอร์ข้อต่อที่ i ก็จะไม่มีบทบาทในการกำหนดขอบเขตของความเร่งหรือความหน่วงในอีกขอบเขตของความเร่งหรือความหน่วงจะถูกกำหนดโดยแอคชูเอเตอร์ที่เหลือจำนวน $n-1$ ตัวหลังจากที่ขั้นตอนวิธีได้สิ้นสุดลงแล้ว ผลที่ได้คือ พารามิเตอร์วิถี $s, \dot{s}$ หรือ $\ddot{s}$ ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา ค่าของ $s, \dot{s}$ และ $\ddot{s}$ ที่ได้จะสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาเส้นทางเวลาของแนววิถีข้อต่อ

(Joint Trajectory Time History) และโพรไฟล์แรงบิดวงเปิด (Open-Loop Torque Profile) สำหรับการเคลื่อนที่โดยใช้เวลาน้อยที่สุด

2.12 การควบคุมແຂกโดยใช้เวลาน้อยที่สุด (Time-Optimal Manipulator Control)

พิจารณาระบบแชนกที่ใช้ในการควบคุมโดยการป้อนกลับเพื่อลดการเชื่อมต่อแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear De-coupled Feedback Control) ที่แสดงไว้ในภาพที่ 2-16 สัญญาณเข้าอ้างอิง (Reference Input Signal) จะสามารถถูกปรับรูปข้างหน้า (Pre-sharp) ได้โดยตัวผกผัน (Inverse) ของแบบจำลองระบบย่อยข้อต่อแชนก (Robot Joint Sub-System Model) และแบบจำลองตัวควบคุม (Controller Model)



ภาพที่ 2-16 การควบคุมโดยการป้อนกลับเพื่อลดต่อเชื่อมแบบไม่เชิงเส้นและการปรับรูปแนววิถี

ในภาพที่ G_c คือแบบจำลองของตัวควบคุมซึ่งในที่นี้กำหนดให้เป็นตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller) G_p คือ แบบจำลองระบบย่อยข้อต่อแชนกของข้อต่อหนึ่งที่ได้หลังจากการใช้ตัวชดเชยแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed-Forward Compensator) ในการลดการเชื่อมต่อ (De-Couple) ของระบบแชนกเพื่อให้ระบบกลายเป็นเซตของระบบอันดับสองเชิงเส้น (Linear Second Order System) การปรับสัญญาณเข้าอ้างอิงในลักษณะนี้เรียกว่า การปรับรูปข้างหน้าของแนววิถี (Trajectory Pre-shaping) จะเห็นได้ว่าการปรับรูปข้างหน้าจะนำไปสู่การที่ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ของแต่ละวงควบคุมข้อต่อ (Joint Control Loop) มีค่าเปลี่ยนเป็น 1 หรือทำให้แต่ละระบบย่อยข้อต่อสามารถติดตามคำสั่งควบคุมได้อย่างสมบูรณ์การปรับรูปข้างหน้าวิถีสามารถอธิบายได้โดย

$$q_{pre}^i(s) = q_d^i(s) + \frac{1}{G_c G_p(s)} q_d^i(s) \quad (2-81)$$

โดยที่ $q_{pre}^i(s)$ เป็นผลการแปลงลาปลาซ (Laplace Transform) ของแนววิถีที่ต้องการที่ถูกปรับรูปข้างหน้า (Pre-shaped Desired Trajectory) สำหรับข้อต่อที่ i $q_d^i(s)$ เป็นผลการแปลง

ลาปลาซของแนววิถีที่ต้องการและ $G_c G_p(s)$ เป็นผลการแปลงลาปลาซของแบบจำลองตัวควบคุม และระบบย่อยข้อต่อแขนกลสมการที่ (2-49) นั้นไม่สามารถนำไปใช้ได้ทันทีเนื่องจากสาเหตุในเรื่องของการทำได้จริง (Realisability) อย่างไรก็ตาม การปรับรูปร่างหน้าของแนววิถีจะสามารถคำนวณได้จากโพรไฟล์แรงบิดวงเปิดที่ใช้เวลาน้อยที่สุด (Time-Optimal Open-loop Torque Profile) ดังนั้นเริ่มจากสมการที่ (2-49) สามารถเขียนในโดเมนเวลา (Time Domain) ได้ดังนี้

$$q_{pre}^i(t) - q_d^i(t) = L^{-1} \left[\frac{1}{G_c G_p(s)} q_d^i(s) \right] \quad (2-82)$$

โดยที่ $L^{-1}[\cdot]$ คือ ตัวดำเนินการผลการแปลงลาปลาซผกผัน (Inverse Laplace Transform Operator) อาศัยจากพิจารณาวงควบคุม (Control Loop) จะเห็นได้ว่า q_i จะสมมูล (Equivalent) กับ q_d^i เนื่องจากฟังก์ชันถ่ายโอนมีค่าเป็นหนึ่ง ดังนั้น

$$q_{pre}^i(t) - q_d^i(t) = e_q^i(t) \quad (2-83)$$

โดยที่ $e_q^i(t)$ เป็นสัญญาณค่าคลาดเคลื่อนของการควบคุม (Control Error Signal) เนื่องจากขั้นตอนวิธีควบคุมโดยใช้เวลาน้อยที่สุดจะให้ผลลัพธ์ในเรื่องของโพรไฟล์แรงบิดวงเปิดที่ใช้เวลาน้อยที่สุดด้วยค่า $u_{ref}^i(t)$ จะสามารถคำนวณได้โดยใช้

$$u(t) = h(q, \dot{q}) + c(q) - D(\dot{q}) \begin{matrix} \frac{1}{M} \\ \frac{1}{M} \\ \frac{1}{M} \\ \frac{1}{M} \\ \frac{1}{M} \end{matrix} \begin{matrix} a_{11} \ddot{q}_1(t) + a_{01} q_1(t) - l_1 u_{ref}^1(t) \\ a_{22} \ddot{q}_2(t) + a_{02} q_2(t) - l_2 u_{ref}^2(t) \\ a_{33} \ddot{q}_3(t) + a_{03} q_3(t) - l_3 u_{ref}^3(t) \\ a_{44} \ddot{q}_4(t) + a_{04} q_4(t) - l_4 u_{ref}^4(t) \\ a_{55} \ddot{q}_5(t) + a_{05} q_5(t) - l_5 u_{ref}^5(t) \end{matrix} \quad (2-84)$$

โดยที่ $U(t)$ คือ โพรไฟล์แรงบิดวงเปิดที่ใช้เวลาน้อยที่สุดที่ได้จากขั้นตอนวิธี และ q กับ $\dot{q}$ ก็ได้จากขั้นตอนวิธีเช่นกัน นอกจากนี้ $u_{ref}^i(t)$ ก็ยังสามารถคำนวณได้จาก

$$\ddot{q}_i(t) + a_{1i} \dot{q}_i(t) + a_{0i} q_i(t) = l_i u_{ref}^i(t), i = 1, 2, \dots, n \quad (2-85)$$

โดยที่ q , $\dot{q}$ และ $\ddot{q}$ ก็จะเป็นผลลัพธ์จากขั้นตอนวิธี เมื่อตัวควบคุมที่มีลักษณะเป็นตัวควบคุมดิจิทัลตรง (Direct Digital Controller) เช่นตัวควบคุมแบบพีไอดีถูกนำมาใช้ ค่าของสัญญาณค่าคลาดเคลื่อนของการควบคุมก็จะสามารถคำนวณได้จากค่าสัญญาณควบคุมหรือ

$$e_q^i(k) = PID^{-1}(u_{ref}^i(k)) \Big|_{opt} \quad (2-86)$$

โดยที่ $e_q^i(k)$ คือสัญญาณคลาดเคลื่อนเวลา (Discrete Time Error Signal) $u_{ref}^i(k) \Big|_{opt}$ คือ $u_{ref}^i(t)$ ที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่โดยใช้เวลาน้อยที่สุดในเวลา และ $PID^{-1}(\cdot)$ แสดงการคำนวณย้อนกลับจากตัวควบคุมแบบพีไอดีในเวลา สมการที่ (2-86) จึงสามารถเขียนในเวลาได้เป็น

$$q_{pre}^i(k) = q_d^i(k) + PID^{-1}(u_{ref}^i(k) \Big|_{opt}) \quad (2-87)$$

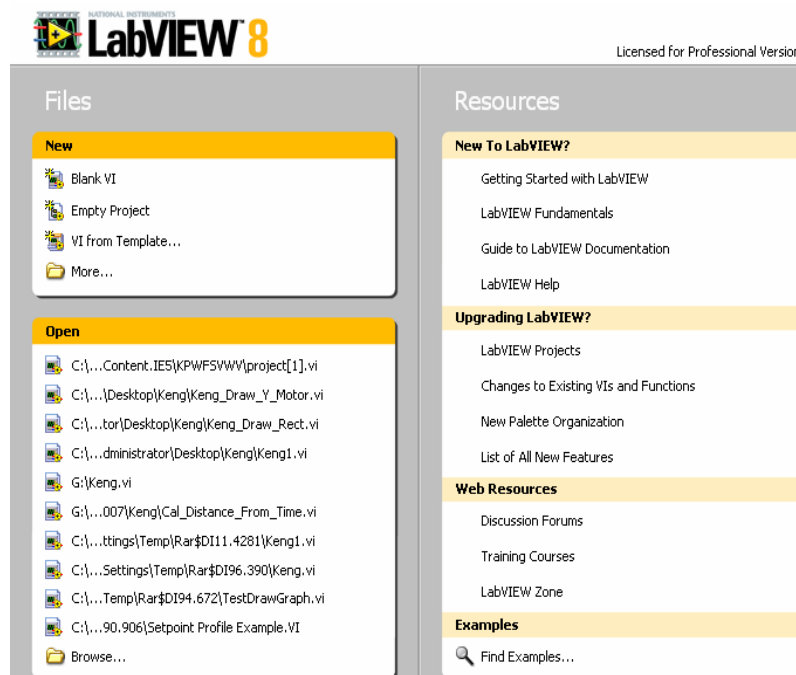
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

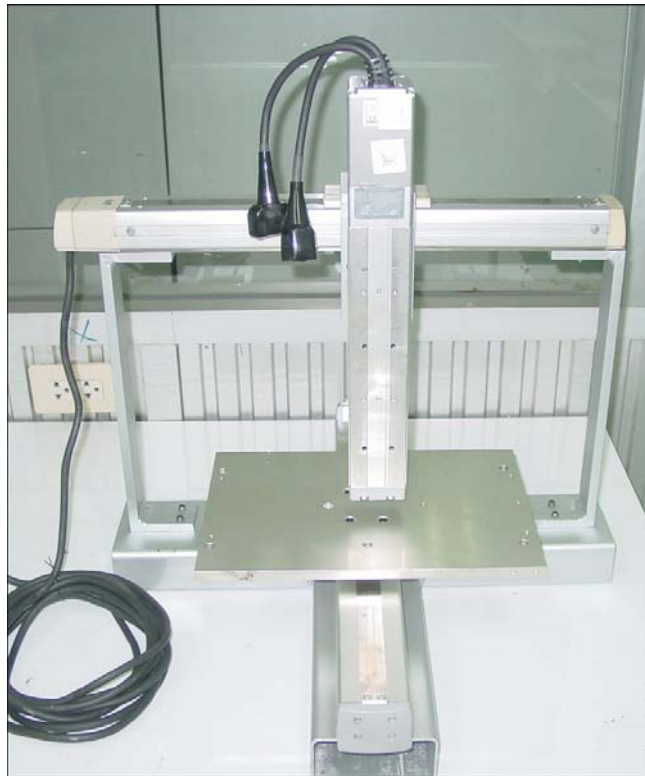
เนื่องในปัจจุบันการใช้งานและการวิจัยทางด้านแขนงกลมีกันอย่างมากมายและแพร่หลายจึงทำให้มีอุปกรณ์ที่ใช้พัฒนาโปรแกรมสำหรับออกแบบและสร้างเกี่ยวกับแขนกลโดยเฉพาะมีอย่างแพร่หลายและในส่วนประกอบของงานวิจัยนี้จะมีองค์ประกอบดังนี้

องค์ประกอบทางด้านฮาร์ดแวร์การรับค่าจากเซนเซอร์เพื่อหาตำแหน่งของแขนกลการเคลื่อนที่ทางเดินของแขนกลโดยใช้การหา Optimization ส่วนเชื่อมโยงกับโปรแกรม Labview ในการกำหนดการเคลื่อนที่

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้



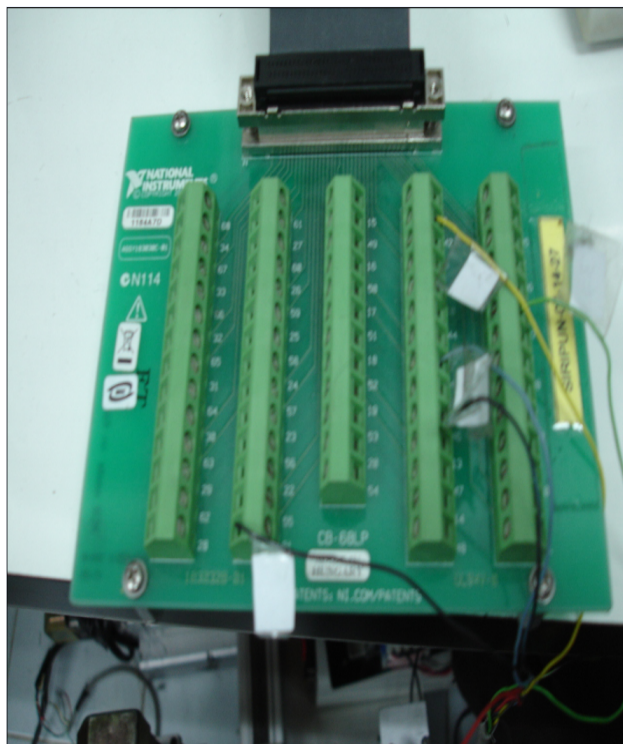
ภาพที่ 3-1 โปรแกรม LABVIEW



ภาพที่ 3-2 แขนกลแบบคาร์ทีเซียนแบบ 3 แกน



ภาพที่ 3-3 ชุดขับเคลื่อนเซอร์โวมอเตอร์ 3 ชุด



ภาพที่ 3-4 การ์ดควบคุมมอเตอร์แบบ PCI

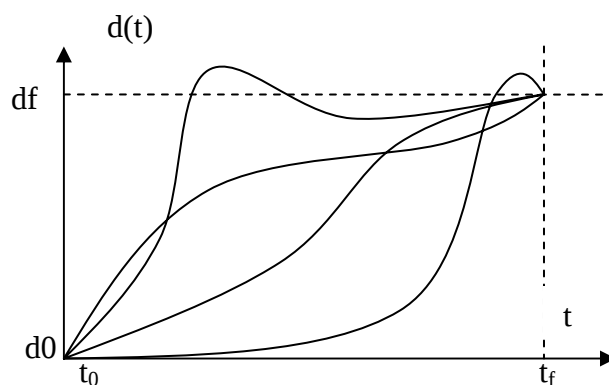


ภาพที่ 3-5 ชุดหม้อแปลงไฟฟ้า



ภาพที่ 3-6 เครื่องคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ

ในการคำนวณเส้นทางเดินของแขนกล (Space Trajectories) โดยพิจารณาในรูปของมุมของการเคลื่อนที่โดยใช้ฟังก์ชันโพลิโนเมียลกำลังสามพิจารณาการเคลื่อนที่ของแขนกลจากตำแหน่งเริ่มต้นที่เวลา t_0 ไปตำแหน่งสุดท้ายที่เวลา t_f แล้วใช้คณิตศาสตร์พหุนามที่ตรงกันกับตำแหน่งและการเคลื่อนที่ที่ต้องการ โดยตำแหน่งที่เริ่มต้นของแขนกลจะทราบค่าในรูปของตำแหน่งเริ่มต้นคือฟังก์ชันแต่ละข้อต่อเริ่มต้นเวลา t_0 และเวลาสุดท้าย t_f ดังแสดงตามภาพที่ 3-5



ภาพที่ 3-7 เส้นทางหลายทางเลือกสำหรับจุดหนึ่งจุด

ในฟังก์ชันที่ราบเรียบ (Smooth Function) ต้องทราบค่าอย่างน้อย 4 เงื่อนไขของ $q(t)$ โดย 2 เงื่อนไขมาจากค่าเริ่มต้นและค่าสุดท้าย

$$q(0) = q_0, q(t_f) = q_f \quad (3-1)$$

ส่วนอีก 2 เงื่อนไขมาจากกรณีฟังก์ชันนั้นต่อเนื่อง (Continuous)

$$\dot{q}(0) = 0, \dot{q}(t_f) = 0 \quad (3-2)$$

จากเงื่อนไขทั้ง 4 นั้นสามารถนำมาวิเคราะห์ได้โพลีโนเมียลดีกรีสาม (Third Degree Polynomials) หรือ Cubic ซึ่งมีรูปดังสมการ (3-3)

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (3-3)$$

ส่วนความเร็ว (Velocity) และความเร่ง (Acceleration) ในสมการ (3-4) และสมการ (3-5) ตามลำดับ

$$\dot{q}(t) = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 \quad (3-4)$$

$$\ddot{q}(t) = 2a_2 + 6a_3 t \quad (3-5)$$

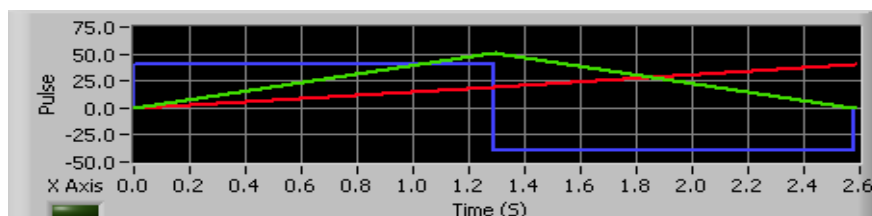
สามารถได้มาซึ่ง 4 สมการ 4 ตัวแปรตาม (3-6)

$$\begin{aligned} q_0 &= a_0 \\ q_f &= a_0 + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3 \\ 0 &= a_1 \\ 0 &= a_1 + 2a_2 t_f + 6a_3 t_f^2 \end{aligned} \quad (3-6)$$

หาผลลัพธ์สมการ (3-6) ได้ว่า

$$\begin{aligned} a_0 &= q_0 \\ a_1 &= 0 \\ a_2 &= \frac{3}{t_f^2}(q_f - q_0) \\ a_3 &= -\frac{3}{t_f^3}(q_f - q_0) \end{aligned} \quad (3-7)$$

สามารถใช้สมการ (3-7) คำนวณหาคำตอบของโพลีโนเมียลดีกรีสามซึ่งต่อระหว่างจุดเริ่มต้น ใดกับจุดสุดท้ายในกรณีของการเริ่มและจุดสุดท้ายมีความเร็วเป็นศูนย์



ภาพที่ 3-8 กราฟ ตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่ง

3.2 การหาค่าความเร็วความเร่ง

ในการเคลื่อนที่ของแต่ละแกนนั้นสิ่งที่ต้องสนใจในการเคลื่อนที่คือระยะทางการเคลื่อนที่ของแกนกล (Displacement) ความเร็วของการเคลื่อนที่ของแกนกล (Velocity) และความเร่งของแกนกล (Acceleration) โดยค่าต่างๆมีความหมายดังนี้

อัตราเร็ว (สัญลักษณ์ : v) คืออัตราของ การเคลื่อนที่ หรือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่ง ก็ได้หลายครั้งมักเขียนในรูป ระยะทาง d ที่เคลื่อนที่ไปต่อหน่วยของเวลา t อัตราเร็วเป็นปริมาณ สเกลาร์ ที่มี ไดมอนด์เป็นระยะทาง/เวลา ปริมาณ เวกเตอร์ที่เทียบเท่ากับอัตราเร็วรู้จักกันในนาม ความเร็ว อัตราเร็ววัดในหน่วยเชิงกายภาพเดียวกับความเร็วแต่อัตราเร็วไม่ได้มีองค์ประกอบของ ทิศทางแบบที่ความเร็วมีอัตราเร็วจึงเป็นองค์ประกอบที่เรียกว่าขนาดของความเร็วในรูปสัญลักษณ์ ทางคณิตศาสตร์อัตราเร็วคือ

$$\vec{v} = \frac{d\vec{s}}{dt} \quad (3-8)$$

ความเร็วเป็นปริมาณเวกเตอร์ขณะที่ อัตราเร็วที่เป็นปริมาณสเกลาร์ซึ่งมีปริมาณเท่ากันแต่มี ทิศทางของการเคลื่อนที่เฉพาะเข้ามา ความเร็วจึงกล่าวได้ว่าเป็นส่วนประกอบในด้านของอัตราเร็ว

ความเร่ง (Acceleration สัญลักษณ์ : a) คือ อัตราการเปลี่ยนแปลง (หรืออนุพันธ์เวลา) ของ ความเร็ว เป็นปริมาณเวกเตอร์ที่มีหน่วยเป็น ความยาว/เวลา² ในหน่วยเอสไอกำหนดให้หน่วยเป็น m/s^2 เมื่อวัตถุมีความเร่งในช่วงเวลาหนึ่ง ความเร็วของมันจะเปลี่ยนแปลงไปความเร่งอาจมีค่า เป็นบวกหรือลบก็ได้ ซึ่งเรามักจะเรียกความเร่งกับความหน่วง ตามลำดับความเร่งมีนิยามว่า "อัตรา การเปลี่ยนแปลงความเร็วของวัตถุในช่วงเวลาหนึ่ง" และกำหนดโดยสมการนี้

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (3-9)$$

เมื่อ

a คือ เวกเตอร์ความเร่ง หน่วย pluse/s^2

v คือ เวกเตอร์ความเร็ว ในหน่วย pluse/s

t คือ เวลาในหน่วยวินาที

หรือเขียนเป็นอีกสมการได้

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{u}}{t} \quad (3-10)$$

เมื่อ

$\vec{a}$ คือ ความเร่งเฉลี่ย (pluse/s^2)

u คือ ความเร็วต้น (pluse/s)

v คือ ความเร็วปลาย pluse

t คือ ช่วงเวลา (s)

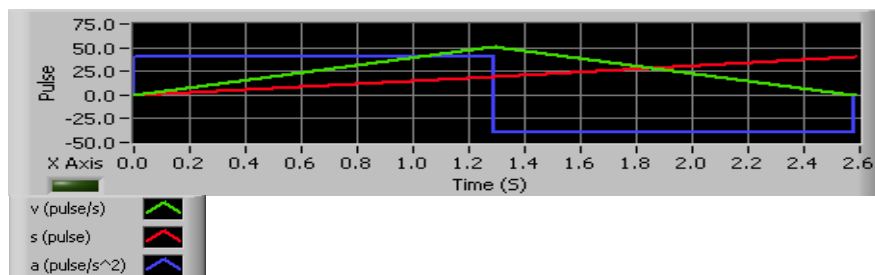
บทที่ 4

ผลของการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองระบบควบคุมแบบ Optimal PID ที่ได้ทำการออกแบบเพื่อทำการควบคุมระยะการเคลื่อนที่ตามแนวแกนทั้ง 3 ของแขนกลเพื่อให้ได้ระยะทางตามที่ได้ทำการกำหนดไว้ผลการทดลองจะแสดงให้เห็นจากผลการทดลองควบคุมระบบจริงที่ควบคุมด้วย Optimal PID และไม่ได้ถูกควบคุมด้วย PID เปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรม Simulation

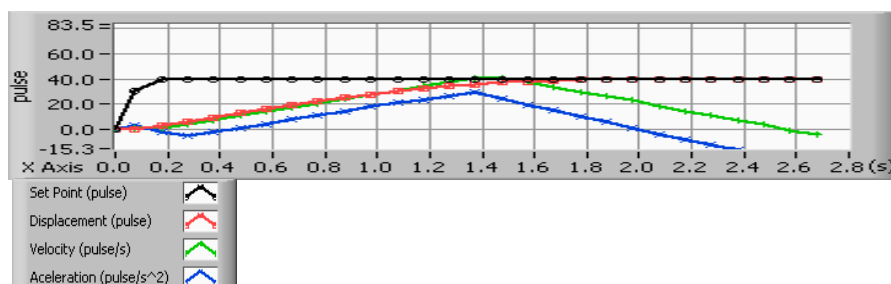
4.1 โปรแกรมควบคุม

การทดลองในการทำงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างโปรแกรมโดยใช้โปรแกรม Labview 8.0 เพื่อสร้างระบบสำหรับการควบคุมแขนกลขึ้นมาเป็นแบบ 3 แกนเพื่อการตรวจวัดและแสดงผลการเคลื่อนที่ของแกนต่างๆ เพื่อหาระยะทางการเคลื่อนที่ความเร็วความเร่ง



ภาพที่ 4-1 ของหน้าต่างแสดงผลในกรณีจำลองด้วยโปรแกรม โดยที่

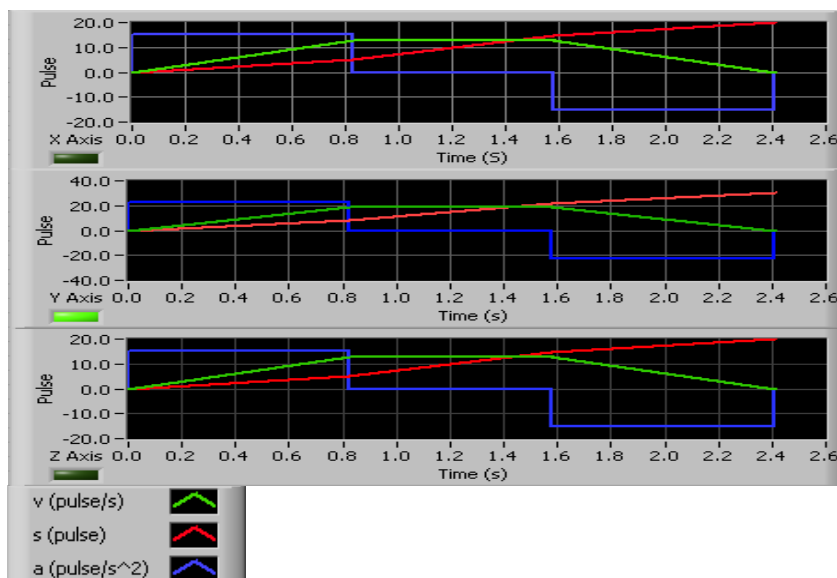
v = ความเร็ว (pulse/s) s = ระยะทาง (pulse) a = ระยะทาง (pulse/s²)



ภาพที่ 4-2 ของหน้าต่างแสดงผลในการทดลองกระบวนการ PID

4.2 ผลการทดลองที่ 1

4.2.1 ผลการทดลองการจำลองด้วยโปรแกรมระยะเคลื่อนแกน X=20 แกน Y=30 แกน Z=20



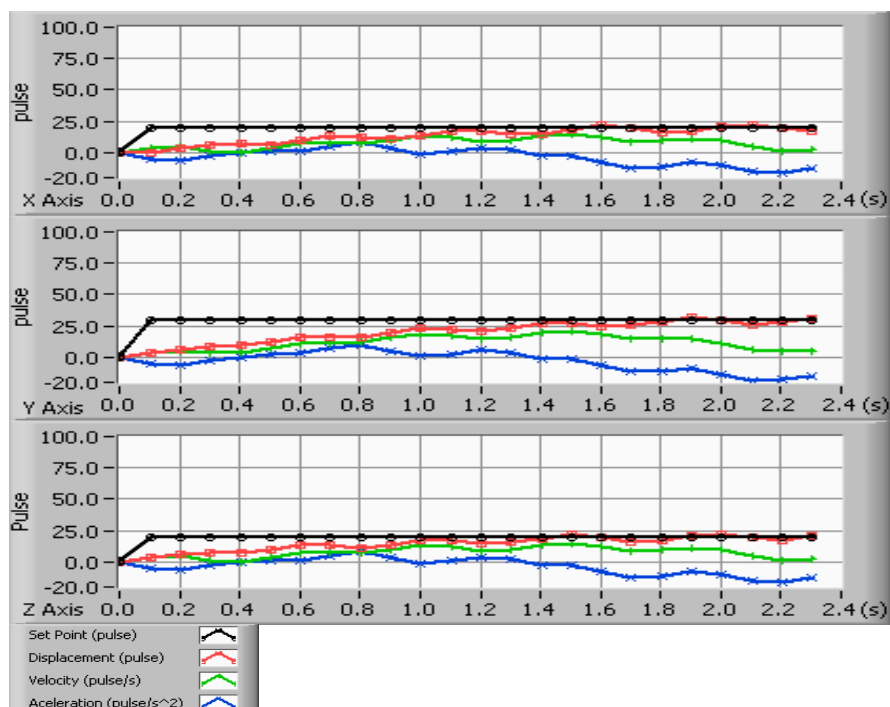
ภาพที่ 4-3 ผลการตอบสนองของระบบเมื่อไม่มีตัวควบคุม PID แกน X=20 แกน Y=30 แกน Z=20

จากภาพที่ 4-3 เราให้แกน X=20 Y=30 Z=20 จะเห็นได้ว่าแกน X ความเร่งที่มีเส้นสีน้ำเงินจะมีความค่าสูง 15 Pulse ให้ความเร็วเป็นเส้นสีเขียวมีการเคลื่อนที่ Pulse ที่วินาที 0.8 จากนั้นความเร่งมาอยู่ที่ 0 Pulse ไปจนถึงวินาที 1.55 เพราะว่าความเร่งที่จากนั้นความเร็วเส้นสีเขียวจะลดลงทำให้ความเร่งสีน้ำเงินจะมี Pulse มีค่าติดลบเพราะว่าเป็นความหน่วงถึงเวลาที่วินาที 2.4 ความเร็วจะอยู่ที่ 0 Pulse เพราะระยะทางได้กำหนดค่าไว้ทำให้ความเร่งและความเร็วอยู่ที่ 0 Pulse

แกน Y ความเร่งที่มีเส้นสีน้ำเงินจะมีความค่าสูง 20 Pulse ให้ความเร็วเป็นเส้นสีเขียวมีการเคลื่อนที่ 20 Pulse ที่วินาที 0.8 จากนั้นความเร่งมาอยู่ที่ 0 Pulse ไปจนถึงวินาที 1.55 เพราะว่าความเร่งที่จากนั้นความเร็วเส้นสีเขียวจะลดลงทำให้ความเร่งสีน้ำเงินจะมี Pulse มีค่าติดลบเพราะว่าเป็นความหน่วงถึงเวลาที่วินาที 2.4 ความเร็วจะอยู่ที่ 0 Pulse เพราะระยะทางได้กำหนดค่าไว้ทำให้ความเร่งและความเร็วอยู่ที่ 0 Pulse

แกน Z ความเร่งที่มีเส้นสีน้ำเงินจะมีความค่าสูง 15 Pulse ให้ความเร็วเป็นเส้นสีเขียวมีการเคลื่อนที่ 20 Pulse ที่วินาที 0.8 จากนั้นความเร่งมาอยู่ที่ 0 Pulse ไปจนถึงวินาที 1.55 เพราะว่าความเร่งที่จากนั้นความเร็วเส้นสีเขียวจะลดลงทำให้ความเร่งสีน้ำเงินจะมี Pulse มีค่าติดลบเพราะว่าเป็นความหน่วงถึงเวลาที่วินาที 2.4 ความเร็วจะอยู่ที่ 0 Pulse เพราะระยะทางได้กำหนดค่าไว้ทำให้ความเร่งและความเร็วอยู่ที่ 0 Pulse

4.2.2 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม PID ระยะเคลื่อนที่แกน X=20 แกน Y=30 แกน Z=20



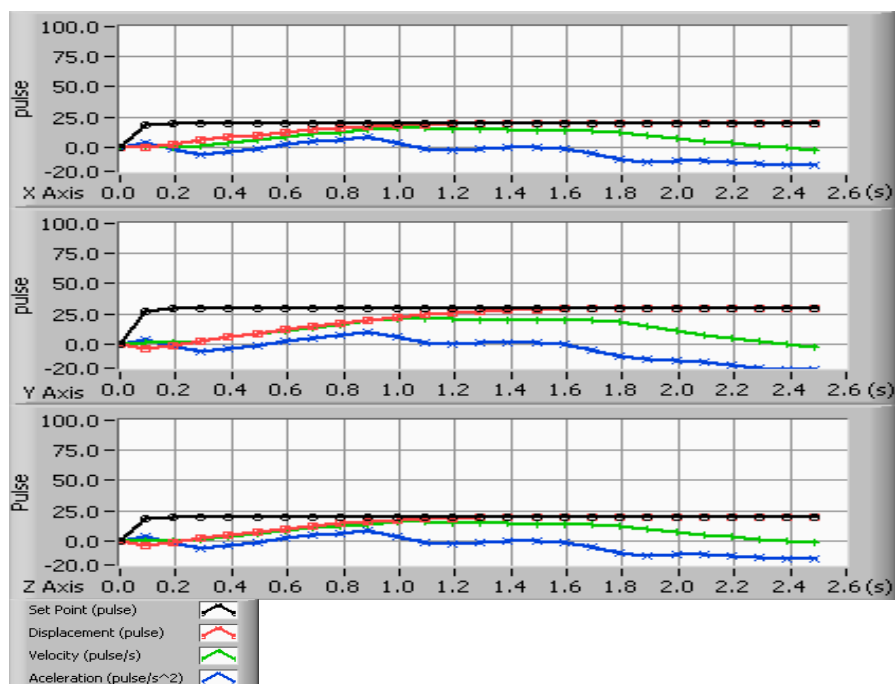
ภาพที่ 4-4 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม PID แกน X=20 แกน Y=30 แกน Z=20

ตารางที่ 4-1 สมรรถนะของระบบควบคุม PID แกน X=20 แกน Y=30 แกน Z=20

Time Delay			Rise Time			Setting Time			Overshoot		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0.1	0.1	0.1	1.0	1.3	0.9	1.9	1.8	1.8	20%	22%	20%

จากภาพที่ 4-4 เป็นการทดลองควบคุมระยะทางการเคลื่อนที่ของแกนกล 3 แกนเข้าสู่จุดเป้าหมายที่ตำแหน่ง แกน X=20 แกน Y=30 แกน Z=20 โดยใช้การควบคุมแบบ PID เพิ่มขึ้นพบว่าระบบมีค่าหน่วงเวลา (Time Delay) ที่แกน X= 0.1 วินาที แกน Y= 0.1 วินาที แกน Z= 0.1 วินาที มีค่าเวลาไต่ระดับ (Rise Time) แกน X= 1.0 วินาที แกน Y= 1.3 วินาที แกน Z= 1.5 วินาที และมีค่าเวลาคงตัว (Setting Time) แกน X= 1.9 วินาที แกน Y= 1.8 วินาที แกน Z= 1.8 วินาที การเกิดค่า Overshoot แกน X =20% แกน Y=22% แกน Z= 20%

4.2.3 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม Optimization PID แกน X=20 แกน Y=30 แกน Z=20



ภาพที่ 4-5 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม Optimization PID แกน X=20 แกน Y=30 แกน Z=20

ตารางที่ 4-2 สมรรถนะของระบบควบคุม Optimization PID แกน X=20 แกน Y=30 แกน Z=20

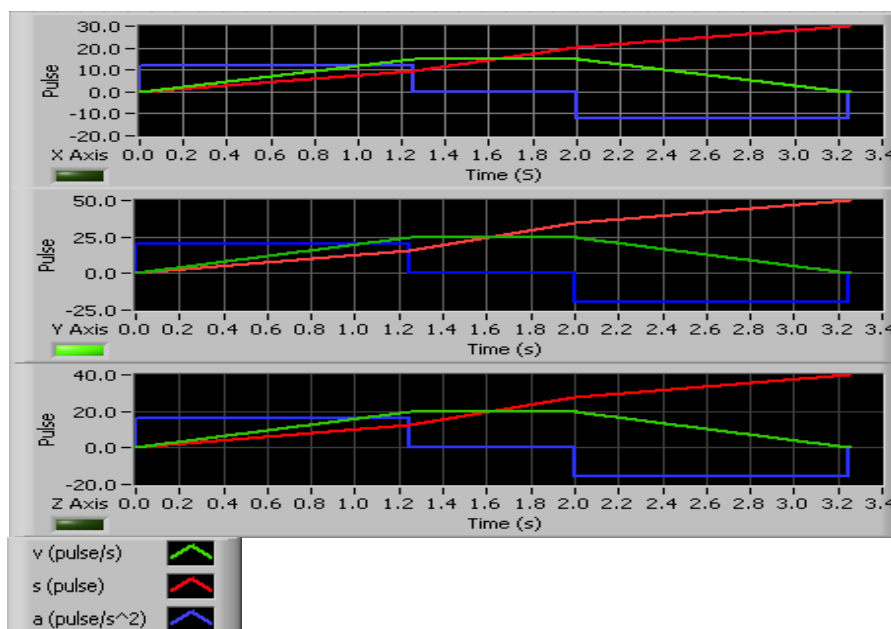
Time Delay			Rise Time			Setting Time			Overshoot		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0.2	0.25	0.2	0.8	1.2	1.0	0.8	1.2	1.0	0%	0%	0%

จากภาพที่ 4-5 เป็นการทดลองควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล 3 แกนเข้าสู่จุดเป้าหมายที่ตำแหน่ง แกน X=20 แกน Y=30 แกน Z=20 โดยใช้การควบคุมแบบ PID เพิ่มขึ้นพบว่าระบบมีค่าหน่วงเวลา (Time Delay) ที่แกน X= 0.2 วินาที แกน Y= 0.25 วินาที แกน Z= 0.2 วินาทีที่มีค่าเวลาได้ระดับ (Rise Time) แกน X= 1.0 วินาที แกน Y= 1.2 วินาที แกน Z=1.0 วินาทีและมีค่าเวลากงตัว (Setting Time) แกน X= 1.0 วินาที แกน Y=1.2 วินาที แกน Z=1.0 วินาทีและโดยไม่มี Overshoot

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า Optimization PID ทำให้ระบบเข้าสู่ระดับอ้างอิงเร็วขึ้นและลดการ Overshoot ได้เมื่อเปรียบเทียบกับ PID แบบธรรมดาและถ้าเปรียบเทียบกับโดยไม่ใช้ PID จะทำเวลาที่เร็วกว่า

4.3 การทดลองที่ 2

4.3.1 ผลการทดลองการจำลองด้วยโปรแกรมระยะเคลื่อนแกน X=30 แกน Y=50 แกน Z=40



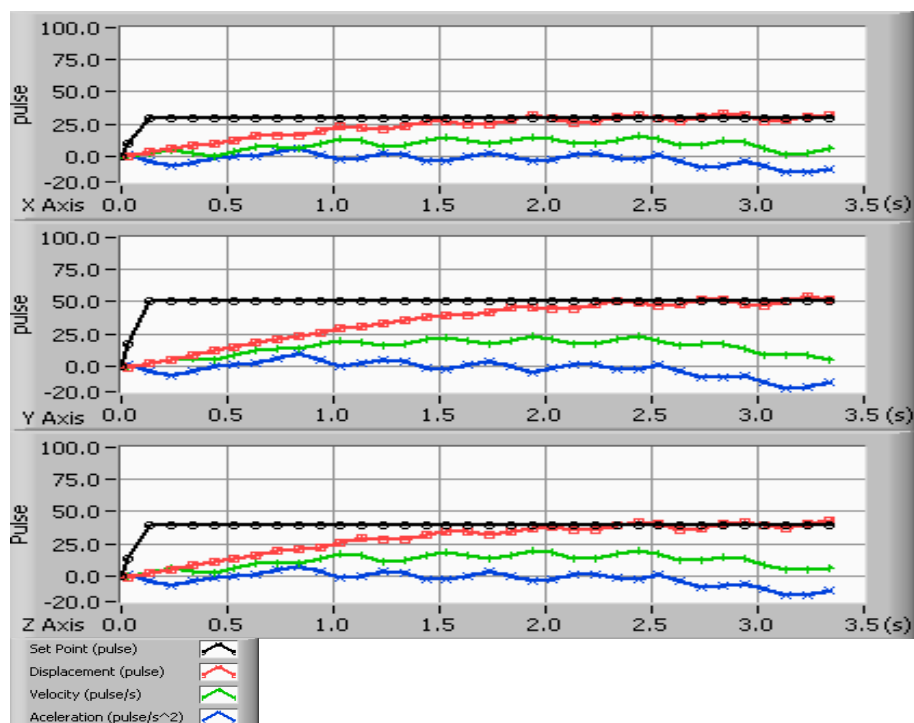
ภาพที่ 4-6 ผลการตอบสนองของระบบเมื่อไม่มีตัวควบคุม PID แกน X=30 แกน Y=50 แกน Z=40

จากภาพที่ 4-36 เราให้แกน X=30 Y=50 Z=40 จะเห็นได้ว่าแกน X ความเร่งที่มีเส้นสีน้ำเงินจะมีความค่าสูง 10 Pulse ให้ความเร็วเป็นเส้นสีเขียวมีการเคลื่อนที่ Pulse ที่วินาที 1.25 จากนั้นความเร่งมาอยู่ที่ 0 Pulse ไปจนถึงวินาที 2.0 เพราะว่าความเร่งคงที่จากนั้นความเร็วเส้นสีเขียวจะลดลงทำให้ความเร่งสีน้ำเงินจะมี Pulse มีค่าติดลบเพราะว่าเป็นความหน่วงถึงเวลาที่วินาที 3.25 ความเร็วจะอยู่ที่ 0 Pulse เพราะระยะทางได้กำหนดค่าไว้ทำให้ความเร่งและความเร็วอยู่ที่ 0 Pulse

แกน Y ความเร่งที่มีเส้นสีน้ำเงินจะมีความค่าสูง 20 Pulse ให้ความเร็วเป็นเส้นสีเขียวมีการเคลื่อนที่ 25 Pulse ที่วินาที 1.25 จากนั้นความเร่งมาอยู่ที่ 0 Pulse ไปจนถึงวินาที 2.0 เพราะว่าความเร่งคงที่จากนั้นความเร็วเส้นสีเขียวจะลดลงทำให้ความเร่งสีน้ำเงินจะมี Pulse มีค่าติดลบเพราะว่าเป็นความหน่วงถึงเวลาที่วินาที 3.25 ความเร็วจะอยู่ที่ 0 Pulse เพราะระยะทางได้กำหนดค่าไว้ทำให้ความเร่งและความเร็วอยู่ที่ 0 Pulse

แกน Z ความเร่งที่มีเส้นสีน้ำเงินจะมีความค่าสูง 20 Pulse ให้ความเร็วเป็นเส้นสีเขียวมีการเคลื่อนที่ 20 Pulse ที่วินาที 1.25 จากนั้นความเร่งมาอยู่ที่ 0 Pulse ไปจนถึงวินาที 2.0 เพราะว่าความเร่งคงที่จากนั้นความเร็วเส้นสีเขียวจะลดลงทำให้ความเร่งสีน้ำเงินจะมี Pulse มีค่าติดลบเพราะว่าเป็นความหน่วงถึงเวลาที่วินาที 3.25 ความเร็วจะอยู่ที่ 0 Pulse เพราะระยะทางได้กำหนดค่าไว้ทำให้ความเร่งและความเร็วอยู่ที่ 0 Pulse

4.3.2 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม PID แกน X=30 แกน Y=50 แกน Z=40



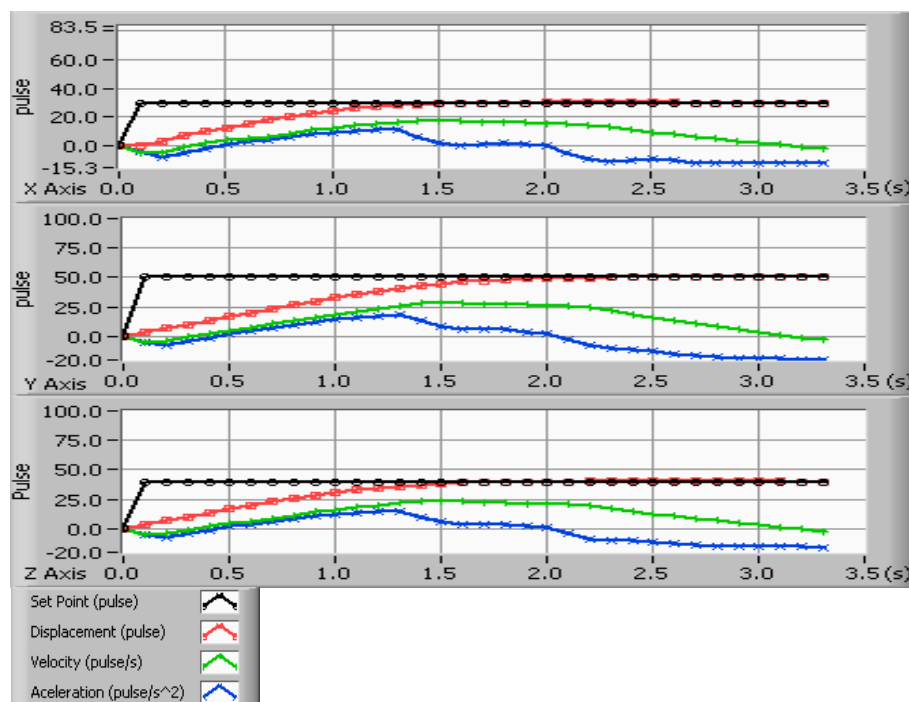
ภาพที่ 4-7 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม PID แกน X=30 แกน Y=50 แกน Z=40

ตารางที่ 4-3 สมรรถนะของระบบควบคุม PID แกน X=30 แกน Y=50 แกน Z=40

Time Delay			Rise Time			Setting Time			Overshoot		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0.4	0.3	0.4	1.5	1.9	1.6	1.5	2.1	2.0	10%	15%	15%

จากภาพที่ 4-7 เป็นการทดลองควบคุมระยะทางการเคลื่อนที่ของแขนกล 3 แกนเข้าสู่จุดเป้าหมายที่กำหนด แกน X=30 แกน Y=50 แกน Z=40 โดยใช้การควบคุมแบบ PID เพิ่มขึ้นพบว่าระบบมีค่าหน่วงเวลา (Time Delay) ที่แกน X= 0.4 วินาที แกน Y= 0.3 วินาที แกน Z= 0.4 วินาที มีค่าเวลาไต่ระดับ (Rise Time) แกน X= 1.5 วินาที แกน Y= 1.9 วินาที แกน Z=1.6 วินาที และมีค่าเวลาคงตัว (Setting Time) แกน X= 1.5 วินาที แกน Y=2.1 วินาที แกน Z=2.0 วินาที การเกิดค่า Overshoot แกน X=10% แกน Y=15% แกน Z= 15%

4.3.3 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม Optimization PID แกน X=30 แกน Y=50 แกน Z=40



ภาพที่ 4-8 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม Optimization PID แกน X=30 แกน Y=50 แกน Z=40

ตารางที่ 4-4 สมรรถนะของระบบควบคุม Optimization PID แกน X=30 แกน Y=50 แกน Z=40

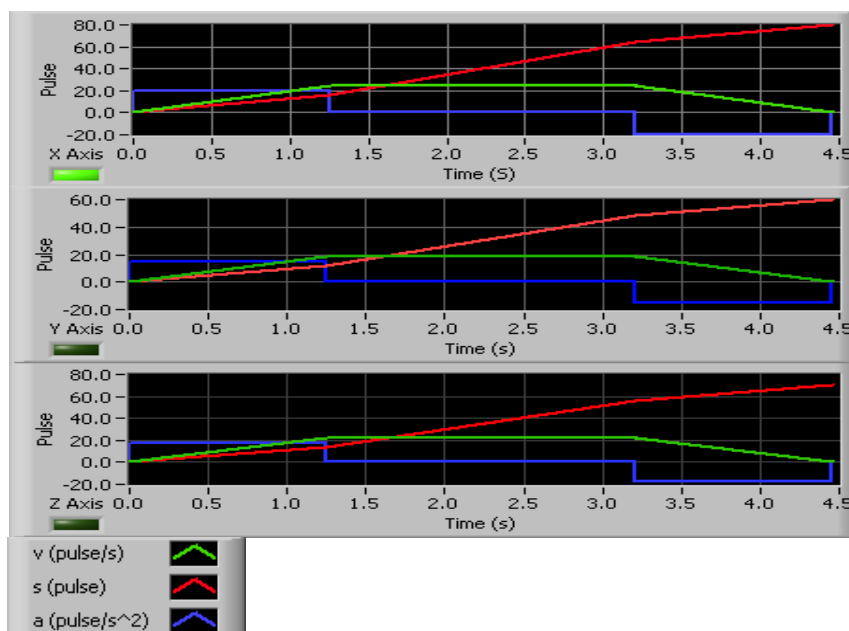
Time Delay			Rise Time			Setting Time			Overshoot		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0.2	0.25	0.2	1.1	1.2	1.2	1.3	1.7	1.4	0%	0%	0%

จากภาพที่ 4-8 เป็นการทดลองควบคุมการเคลื่อนที่ของแกนกล 3 แกนเข้าสู่จุดเป้าหมายที่ตำแหน่ง แกน X=20, แกน Y=30, แกน Z=20 โดยใช้การควบคุมแบบ PID เพิ่มขึ้นพบว่าระบบมีค่าหน่วงเวลา (Time Delay) ที่แกน X= 0.2 วินาที แกน Y= 0.25 วินาที แกน Z= 0.2 วินาทีที่มีค่าเวลาใต้ระดับ (Rise Time) แกน X= 1.1 วินาที แกน Y= 1.2 วินาที แกน Z=1.2 วินาทีและมีค่าเวลาคงตัว (Setting Time) แกน X= 1.3 วินาที แกน Y=1.7 วินาที แกน Z=1.4 วินาทีและโดยไม่มี Overshoot

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า Optimization PID ทำให้ระบบเข้าสู่ระดับอ้างอิงเร็วขึ้นและลดการ Overshoot ได้เมื่อเปรียบเทียบกับใช้ PID แบบธรรมดาและถ้าเปรียบเทียบกับโดยไม่ใช้ PID จะทำเวลาที่เร็วกว่า

4.4 การทดลองที่ 3

4.4.1 ผลการทดลองการจำลองด้วยโปรแกรมระยะเคลื่อนแกน X=80 แกน Y=60 แกน Z=70



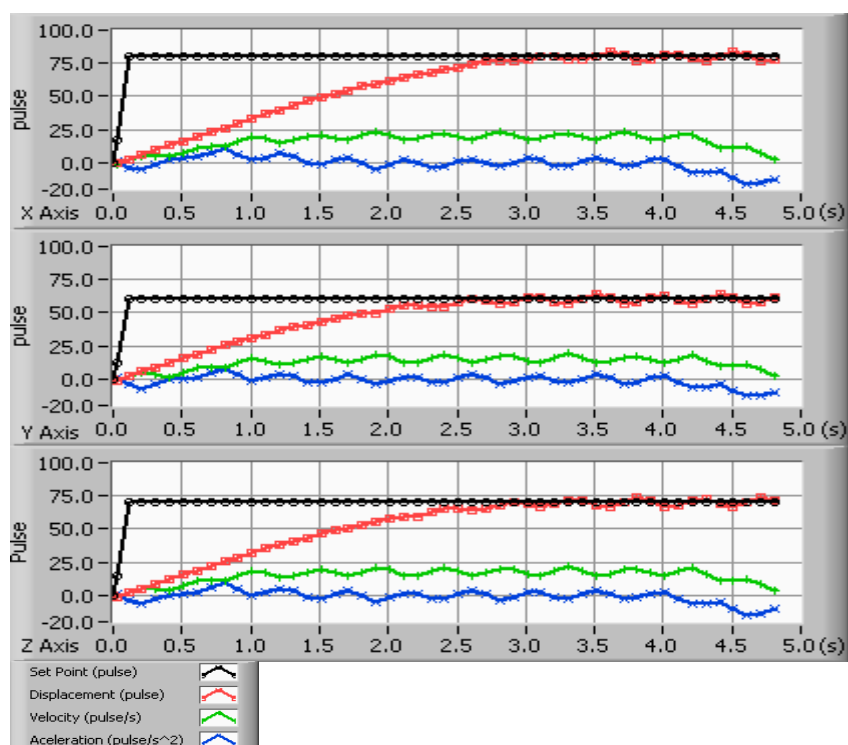
ภาพที่ 4-9 ผลการตอบสนองของระบบเมื่อไม่มีตัวควบคุม PID แกน X=80 แกน Y=60 แกน Z=70

จากภาพที่ 4-9 เราให้แกน X=80 Y=60 Z=70 จะเห็นว่าแกน X ความเร่งที่มีเส้นสีน้ำเงินจะมีความค่าสูง 20 Pulse ให้ความเร็วเป็นเส้นสีเขียวมีการเคลื่อนที่ 20 Pulse ที่วินาที 1.25 จากนั้นความเร่งมาอยู่ที่ 0 Pulse ไปจนถึงวินาที 3.23 เพราะว่าความเร่งคงที่จากนั้นความเร็วเส้นสีเขียวจะลดลงทำให้ความเร่งสีน้ำเงินจะมี Pulse มีค่าติดลบเพราะว่าเป็นความหน่วงถึงเวลาที่วินาที 4.5 ความเร็วจะอยู่ที่ 0 Pulse เพราะระยะทางได้กำหนดค่าไว้ทำให้ความเร่งและความเร็วอยู่ที่ 0 Pulse

แกน Y ความเร่งที่มีเส้นสีน้ำเงินจะมีความค่าสูง 20 Pulse ให้ความเร็วเป็นเส้นสีเขียวมีการเคลื่อนที่ 20 Pulse ที่วินาที 1.25 จากนั้นความเร่งมาอยู่ที่ 0 Pulse ไปจนถึงวินาที 3.23 เพราะว่าความเร่งคงที่จากนั้นความเร็วเส้นสีเขียวจะลดลงทำให้ความเร่งสีน้ำเงินจะมี Pulse มีค่าติดลบเพราะว่าเป็นความหน่วงถึงเวลาที่วินาที 4.5 ความเร็วจะอยู่ที่ 0 Pulse เพราะระยะทางได้กำหนดค่าไว้ทำให้ความเร่งและความเร็วอยู่ที่ 0 Pulse

แกน Z ความเร่งที่มีเส้นสีน้ำเงินจะมีความค่าสูง 20 Pulse ให้ความเร็วเป็นเส้นสีเขียวมีการเคลื่อนที่ 20 Pulse ที่วินาที 1.25 จากนั้นความเร่งมาอยู่ที่ 0 Pulse ไปจนถึงวินาที 3.23 เพราะว่าความเร่งคงที่จากนั้นความเร็วเส้นสีเขียวจะลดลงทำให้ความเร่งสีน้ำเงินจะมี Pulse มีค่าติดลบเพราะว่าเป็นความหน่วงถึงเวลาที่วินาที 4.5 ความเร็วจะอยู่ที่ 0 Pulse เพราะระยะทางได้กำหนดค่าไว้ทำให้ความเร่งและความเร็วอยู่ที่ 0 Pulse

4.4.2 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม PID แกน X=80 แกน Y=60 แกน Z=70



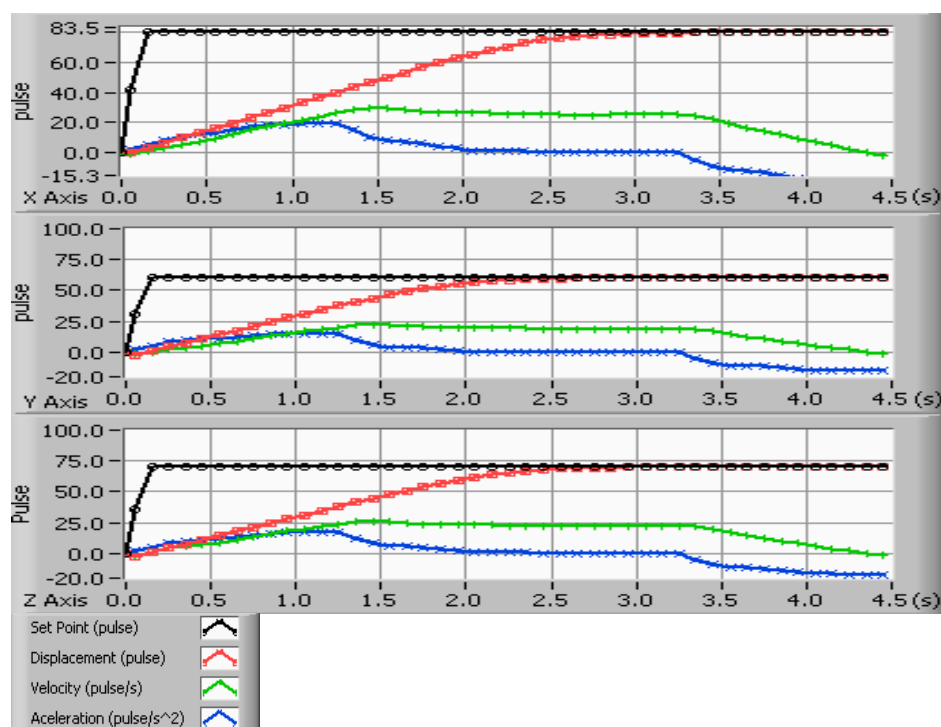
ภาพที่ 4-10 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม PID แกน X=80 แกน Y=60 แกน Z=70

ตารางที่ 4-5 สมรรถนะของระบบควบคุม PID แกน X=80 แกน Y=60 แกน Z=70

Time Delay			Rise Time			Setting Time			Overshoot		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0.4	0.5	0.5	2.1	1.5	1.9	2.8	2.0	2.2	20%	23%	20%

จากภาพที่ 4-10 เป็นการทดลองควบคุมระยะทางการเคลื่อนที่ของแขนกล 3 แกนเข้าสู่จุดเป้าหมายที่ตำแหน่ง แกน X=30 แกน Y=50 แกน Z=40 โดยใช้การควบคุมแบบ PID เพิ่มขึ้นพบว่าระบบมีค่าหน่วงเวลา (Time Delay) ที่แกน X= 0.4 วินาที แกน Y= 0.5 วินาที แกน Z= 0.5 วินาที มีค่าเวลาไต่ระดับ (Rise Time) แกน X= 2.1 วินาที แกน Y= 1.5 วินาที แกน Z=1.9 วินาที และมีค่าเวลาคงตัว (Setting Time) แกน X= 2.8 วินาที แกน Y=2.0 วินาที แกน Z=2.2 วินาที การเกิดค่า Overshoot แกน X=20% แกน Y=23% แกน Z= 20%

4.4.3 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม Optimization PID แกน X=80 แกน Y=60 แกน Z=70



ภาพที่ 4-11 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม Optimization PID แกน X=80 แกน Y=60 แกน Z=70

ตารางที่ 4-6 สมรรถนะของระบบควบคุม Optimization PID แกน X=80 แกน Y=60 แกน Z=70

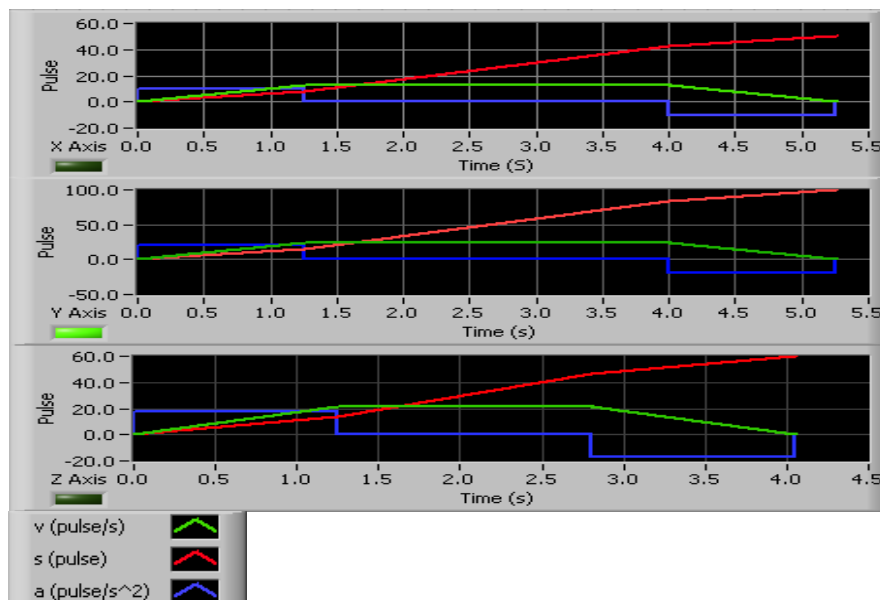
Time Delay			Rise Time			Setting Time			Overshoot		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0.4	0.4	0.4	2.1	1.5	1.9	2.3	1.9	2.2	0%	0%	0%

จากภาพที่ 4-11 เป็นการทดลองควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล 3 แกนเข้าสู่จุดเป้าหมายที่ตำแหน่ง แกน X=20 แกน Y=30 แกน Z=20 โดยใช้การควบคุมแบบ PID เพิ่มขึ้นพบว่าระบบมีค่าหน่วงเวลา (Time Delay) ที่แกน X= 0.2 วินาที แกน Y= 0.25 วินาที แกน Z= 0.2 วินาที มีค่าเวลาได้ระดับ (Rise Time) แกน X= 2.1 วินาที แกน Y= 1.5 วินาที แกน Z=1.9 วินาที และมีค่าเวลาคงตัว (Setting Time) แกน X=2.3 วินาที แกน Y=1.9 วินาที แกน Z=2.2 วินาที และโดยไม่มี Overshoot

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า Optimization PID ทำให้ระบบเข้าสู่ระดับอ้างอิงเร็วขึ้นและลดการ Overshoot ได้เมื่อเปรียบเทียบกับ PID แบบธรรมดาและถ้าเปรียบเทียบกับไม่ใช่ PID จะทำเวลาที่เร็วกว่า

4.5 การทดลองที่ 4

4.5.1 ผลการทดลองการจำลองด้วยโปรแกรมระยะเคลื่อนแกน X=50 แกน Y=100 แกน Z=100



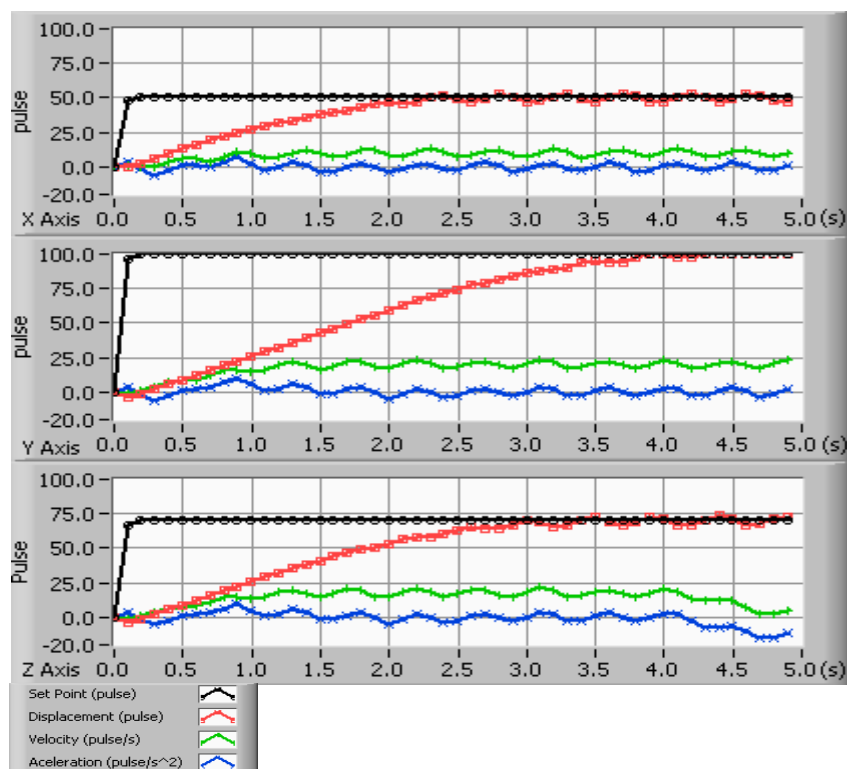
ภาพที่ 4-12 เป็นค่าไม่มี PID Control แกน X=50 แกน Y=100 แกน Z=100

จากภาพที่ 4-12 เราให้แกน X=50 Y=100 Z=100 จะเห็นได้ว่าแกน X ความเร่งที่มีเส้นสีน้ำเงินจะมีความค่าสูง 15 Pulse ให้ความเร็วเป็นเส้นสีเขียวมีการเคลื่อนที่ 15 Pulse ที่วินาที 1.25 จากนั้นความเร่งมาอยู่ที่ 0 Pulse ไปจนถึงวินาที 2.7 เพราะว่าความเร่งจากนั้นความเร็วเส้นสีเขียวจะลดลงทำให้ความเร่งสีน้ำเงินจะมี Pulse มีค่าติดลบเพราะว่าเป็นความหน่วงถึงเวลาที่วินาที 4.1 ความเร็วจะอยู่ที่ 0 Pulse เพราะระยะทางได้กำหนดค่าทำให้ความเร่งและความเร็วอยู่ที่ 0 Pulse

แกน Y ความเร่งที่มีเส้นสีน้ำเงินจะมีความค่าสูง 25 Pulse ให้ความเร็วเป็นเส้นสีเขียวมีการเคลื่อนที่ 25 Pulse ที่วินาที 1.25 จากนั้นความเร่งมาอยู่ที่ 0 Pulse ไปจนถึงวินาที 2.7 เพราะว่าความเร่งจากนั้นความเร็วเส้นสีเขียวจะลดลงทำให้ความเร่งสีน้ำเงินจะมี Pulse มีค่าติดลบเพราะว่าเป็นความหน่วงถึงเวลาที่วินาที 4.1 ความเร็วจะอยู่ที่ 0 Pulse เพราะระยะทางได้กำหนดค่าไว้ทำให้ความเร่งและความเร็วอยู่ที่ 0 Pulse

แกน Z ความเร่งที่มีเส้นสีน้ำเงินจะมีความค่าสูง 20 Pulse ให้ความเร็วเป็นเส้นสีเขียวมีการเคลื่อนที่ 20 Pulse ที่วินาที 1.25 จากนั้นความเร่งมาอยู่ที่ 0 Pulse ไปจนถึงวินาที 2.7 เพราะว่าความเร่งจากนั้นความเร็วเส้นสีเขียวจะลดลงทำให้ความเร่งสีน้ำเงินจะมี Pulse มีค่าติดลบเพราะว่าเป็นความหน่วงถึงเวลาที่วินาที 4.1 ความเร็วจะอยู่ที่ 0 Pulse เพราะระยะทางได้กำหนดค่าไว้ทำให้ความเร่งและความเร็วอยู่ที่ 0 Pulse

4.5.2 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม PID แกน X=50 แกน Y=100 แกน Z=100



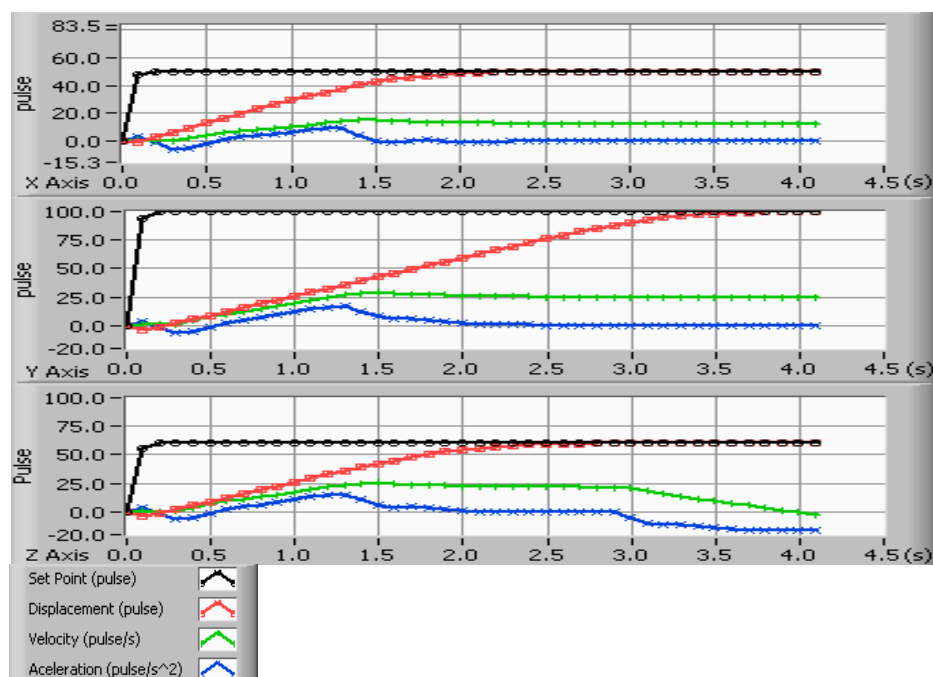
ภาพที่ 4-13 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุมแกน PID X=50 แกน Y=100 แกน Z=100

ตารางที่ 4-7 สมรรถนะของระบบควบคุม PID แกน X=50 แกน Y=100 แกน Z=100

Time Delay			Rise Time			Setting Time			Overshoot		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0.4	0.4	0.3	2.1	3.5	2.7	2.3	4.0	3.0	15%	10%	18%

จากภาพที่ 4-13 เป็นการทดลองควบคุมระยะทางการเคลื่อนที่ของแขนกล 3 แกนเข้าสู่จุดเป้าหมายที่กำหนด แกน X=50 แกน Y=100 แกน Z=100 โดยใช้การควบคุมแบบ PID เพิ่มขึ้นพบว่าระบบมีค่าหน่วยเวลา (Time Delay) ที่แกน X= 0.4 วินาที แกน Y= 0.4 วินาที แกน Z= 0.3 วินาที มีค่าเวลาไต่ระดับ (Rise Time) แกน X= 2.1 วินาที แกน Y= 3.5 วินาที แกน Z=2.7 วินาที และมีค่าเวลาคงตัว (Setting Time) แกน X= 2.3 วินาที แกน Y=4.0 วินาที แกน Z=3.0 วินาที การเกิดค่า Overshoot แกน X=15% แกน Y=10% แกน Z= 18

4.5.3 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม Optimization PID แกน X=50 แกน Y=100 แกน Z=100



ภาพที่ 4-14 ผลการทดลองใช้ตัวควบคุม Optimization PID แกน X=50 แกน Y=100 แกน Z=100

ตารางที่ 4-8 สมรรถนะของระบบควบคุม Optimization PID แกน X=50 แกน Y=100 แกน Z=100

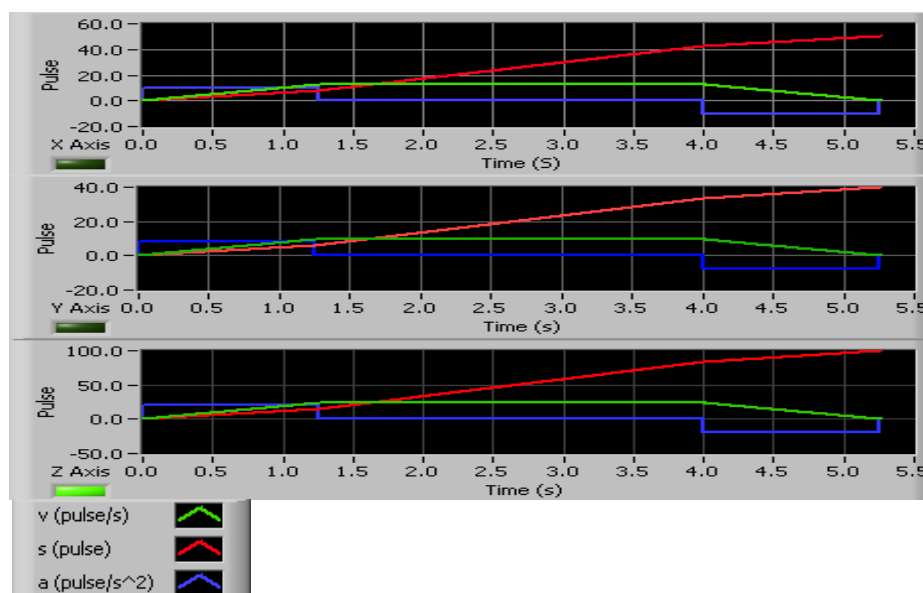
Time Delay			Rise Time			Setting Time			Overshoot		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0.3	0.3	0.3	1.3	2.9	1.9	2.1	3.5	2.2	0%	0%	0%

จากภาพที่ 4-14 เป็นการทดลองควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล 3 แกนเข้าสู่จุดเป้าหมายที่ตำแหน่ง แกน X=50 แกน Y=50 แกน Z=100 โดยใช้การควบคุมแบบ PID เพิ่มขึ้นพบว่าระบบมีค่าหน่วงเวลา (Time Delay) ที่แกน X= 0.3 วินาที แกน Y= 0.3 วินาที แกน Z= 0.3 วินาที มีค่าเวลาได้ระดับ (Rise Time) แกน X= 1.3 วินาที แกน Y= 2.9 วินาที แกน Z=1.9 วินาที และมีค่าเวลากงตัว (Setting Time) แกน X= 2.1วินาที แกน Y=3.5 วินาที แกน Z=2.2 วินาทีและโดยไม่มี Overshoot

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า Optimization PID ทำให้ระบบเข้าสู่ระดับอ้างอิงเร็วขึ้นและลดการ Overshoot ได้เมื่อเปรียบเทียบกับ PID แบบธรรมดาและถ้าเปรียบเทียบกับโดยไม่ใช้ PID จะทำเวลาที่เร็วกว่า

4.6 การทดลองที่ 5

4.6.1 ผลการทดลองการจำลองด้วยโปรแกรมระยะเคลื่อนแกน X=50 แกนY=40 แกน Z=100



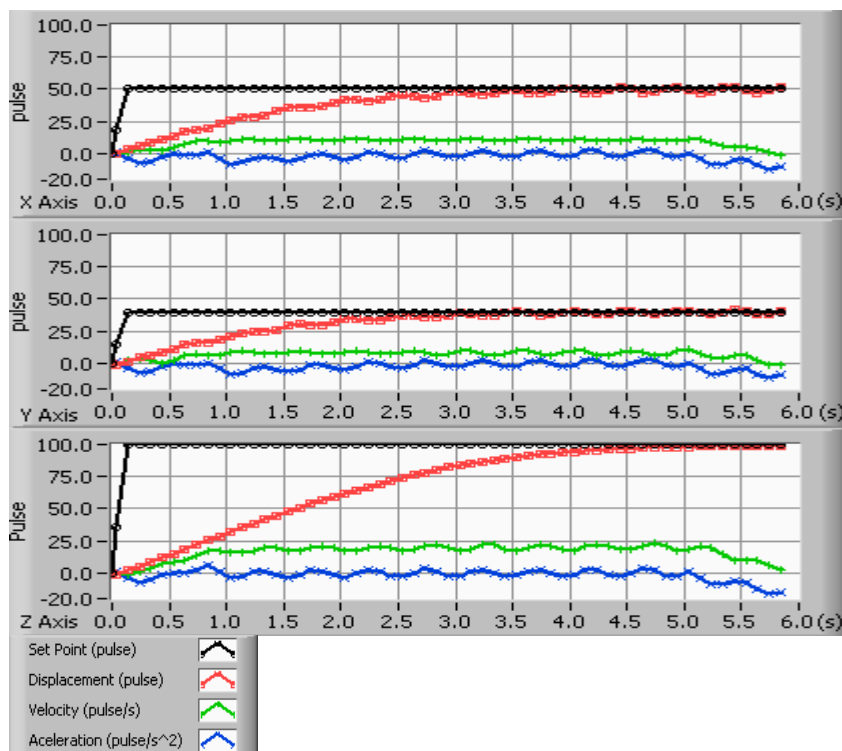
ภาพที่ 4-15 เป็นค่า ไม่มี PID Control แกน X=50 แกนY=40 แกนZ=100

จากภาพที่ 4-15 เราให้แกน X=50 Y=40 Z=100 จะเห็นได้ว่าแกน X ความเร่งที่มีเส้นสีน้ำเงิน จะมีความค่าสูง 15 Pulse ให้ความเร็วเป็นเส้นสีเขียวมีการเคลื่อนที่ 15 Pulse ที่วินาที 1.25 จากนั้น ความเร่งมาอยู่ที่ 0 Pulse ไปจนถึงวินาที 2.7 เพราะว่าความเร็วคงที่จากนั้นความเร็วเส้นสีเขียวจะ ลดลงทำให้ความเร่งสีน้ำเงินจะมี Pulse มีค่าติดลบเพราะว่าเป็นความหน่วงถึงเวลาที่วินาที 4.1 ความเร็วจะอยู่ที่ 0 Pulse เพราะระยะทางได้กำหนดค่าไว้ทำให้ความเร่งและความเร็วอยู่ที่ 0 Pulse

แกน Y ความเร่งที่มีเส้นสีน้ำเงินจะมีความค่าสูง 25 Pulse ให้ความเร็วเป็นเส้นสีเขียวมีการ เคลื่อนที่ 25 Pulse ที่วินาที 1.25 จากนั้นความเร่งมาอยู่ที่ 0 Pulse ไปจนถึงวินาที 2.7 เพราะว่า ความเร็วคงที่จากนั้นความเร็วเส้นสีเขียวจะลดลงทำให้ความเร่งสีน้ำเงินจะมี Pulse มีค่าติดลบ เพราะว่าเป็นความหน่วงถึงเวลาที่วินาที 4.1 ความเร็วจะอยู่ที่ 0 Pulse เพราะระยะทางได้กำหนดค่า ไว้ทำให้ความเร่งและความเร็วอยู่ที่ 0 Pulse

แกน Z ความเร่งที่มีเส้นสีน้ำเงินจะมีความค่าสูง 20 Pulse ให้ความเร็วเป็นเส้นสีเขียวมีการ เคลื่อนที่ 20 Pulse ที่วินาที 1.25 จากนั้นความเร่งมาอยู่ที่ 0 Pulse ไปจนถึงวินาที 2.7 เพราะว่า ความเร็วคงที่จากนั้นความเร็วเส้นสีเขียวจะลดลงทำให้ความเร่งสีน้ำเงินจะมี Pulse มีค่าติดลบ เพราะว่าเป็นความหน่วงถึงเวลาที่วินาที 4.1 ความเร็วจะอยู่ที่ 0 Pulse เพราะระยะทางได้กำหนดค่า ไว้ทำให้ความเร่งและความเร็วอยู่ที่ 0 Pulse

4.6.2 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม PID แกน X=50 แกน Y=40 แกน Z=100



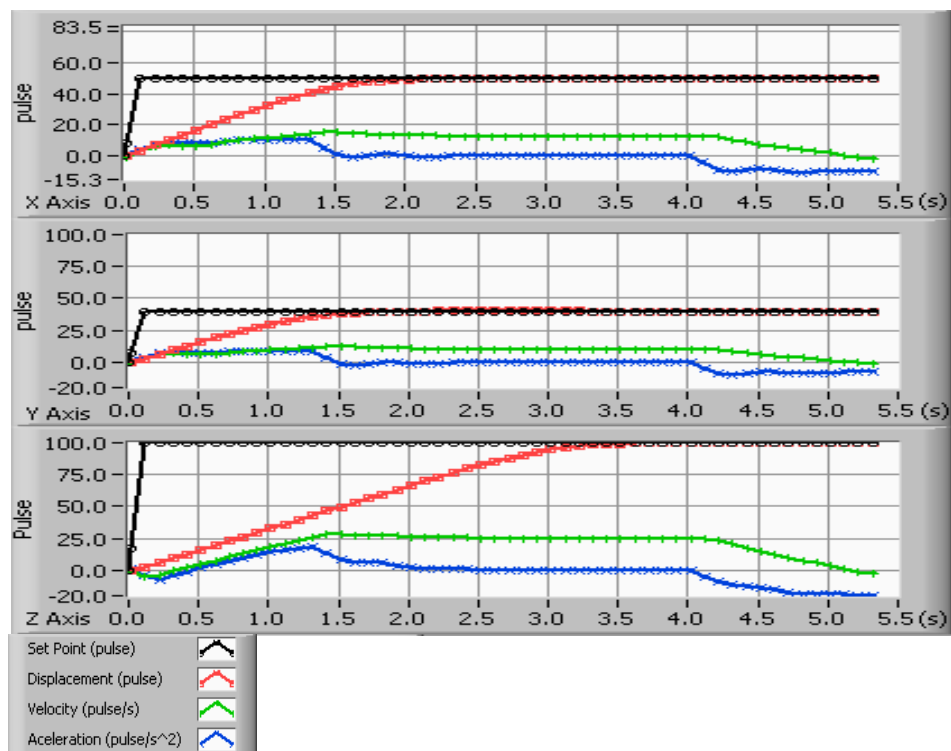
ภาพที่ 4-16 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม PID X=50 แกน Y=40 แกน Z=100

ตารางที่ 4-9 สมรรถนะของระบบควบคุม PID

Time Delay			Rise Time			Setting Time			Overshoot		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0.4	0.4	0.3	2.1	1.6	3.6	3.0	2.5	4.5	10%	10%	0%

จากภาพที่ 4-13 เป็นการทดลองควบคุมระยะทางการเคลื่อนที่ของแขนกล 3 แกนเข้าสู่จุดเป้าหมายที่กำหนด แกน X=50 แกน Y=40 แกน Z=100 โดยใช้การควบคุมแบบ PID เพิ่มขึ้นพบว่าระบบมีค่าหน่วงเวลา (Time Delay) ที่แกน X= 0.4 วินาที แกน Y= 0.4 วินาที แกน Z= 0.3 วินาที มีค่าเวลาไต่ระดับ (Rise Time) แกน X= 2.1 วินาที แกน Y= 3.5 วินาที แกน Z=3.6 วินาที และมีค่าเวลาคงตัว (Setting Time) แกน X= 3.0 วินาที แกน Y=2.5 วินาที แกน Z=4.5 วินาที การเกิดค่า Overshoot แกน X=10% แกน Y=10% แกน Z= 0%

4.6.3 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม Optimization PID แกน X=50 แกน Y=40 แกน Z=100



ภาพที่ 4-17 ผลการทดลองใช้ตัวควบคุม Optimization PID แกนX=50 แกนY=40 แกน Z=100

ตารางที่ 4-10 สมรรถนะของระบบควบคุม Optimization PID แกน X=50 แกน Y=40 แกน Z=100

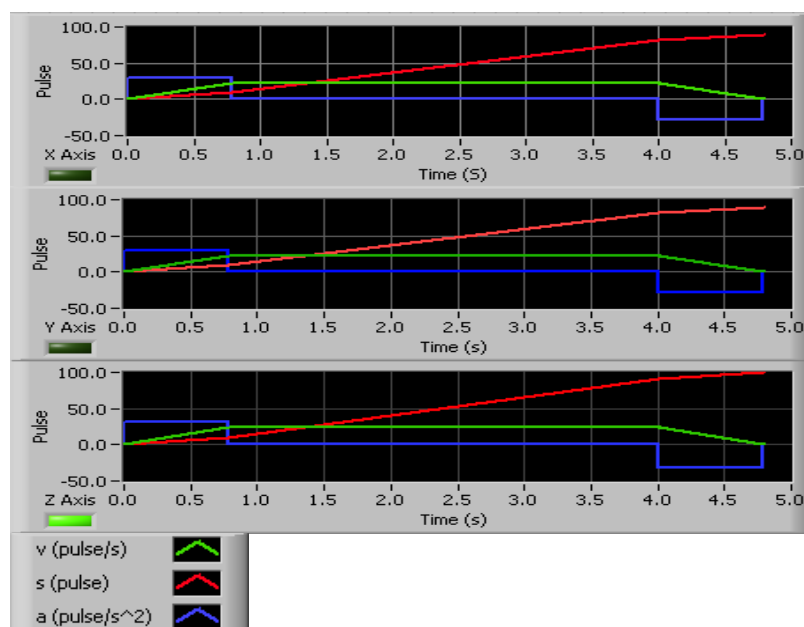
Time Delay			Rise Time			Setting Time			Overshoot		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0.5	0.5	0.5	1.5	1.3	3.5	2.0	1.7	3.5	0%	0%	0%

จากภาพที่ 4-14 เป็นการทดลองควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล 3 แกนเข้าสู่จุดเป้าหมายที่ตำแหน่ง แกน X=50 แกน Y=40 แกน Z=100 โดยใช้การควบคุมแบบ PID เพิ่มขึ้นพบว่าระบบมีค่าหน่วงเวลา (Time Delay) ที่แกน X= 0.5 วินาที แกน Y= 0.5 วินาที แกน Z= 0.5 วินาทีที่มีค่าเวลาได้ระดับ (Rise Time) แกน X= 1.5 วินาที แกน Y= 1.3 วินาที แกน Z=3.5 วินาทีและมีค่าเวลาคงตัว (Setting Time) แกน X= 2.0 วินาที แกน Y=1.7 วินาที แกน Z=3.5 วินาทีและโดยไม่มี Overshoot

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า Optimization PID ทำให้ระบบเข้าสู่ระดับอ้างอิงเร็วขึ้นและลดการ Overshoot ได้เมื่อเปรียบเทียบกับ PID แบบธรรมดาและถ้าเปรียบเทียบกับโดยไม่ใช้ PID จะทำเวลาที่เร็วกว่า

4.7 ผลการทดลองที่ 6

4.7.1 ผลการทดลองการจำลองด้วยโปรแกรมระยะเคลื่อนแกน X=70 แกนY=80 แกน Z=100



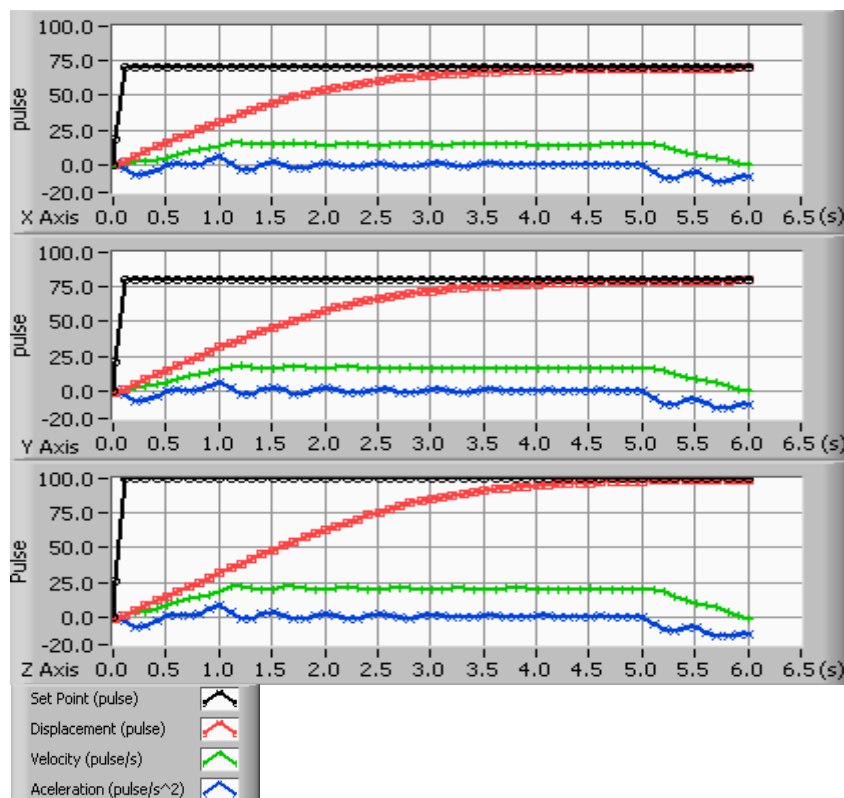
ภาพที่ 4-18 เป็นค่าไม่มี PID Control แกน X=70 แกนY=80 แกนZ=100

จากภาพที่ 4-18 เราให้แกน X=70 Y=80 Z=100 จะเห็นได้ว่าแกน X ความเร่งที่มีเส้นสีน้ำเงิน จะมีความค่าสูง 25 Pulse ให้ความเร็วเป็นเส้นสีเขียวมีการเคลื่อนที่ 25 Pulse ที่วินาที 1.25 จากนั้น ความเร่งมาอยู่ที่ 0 Pulse ไปจนถึงวินาที 3.6 เพราะว่าความเร็วคงที่จากนั้นความเร็วเส้นสีเขียวจะลดลงทำให้ความเร่งสีน้ำเงินจะมี Pulse มีค่าติดลบเพราะว่าเป็นความหน่วงถึงเวลาที่วินาที 4.8 ความเร็วจะอยู่ที่ 0 Pulse เพราะระยะทางได้กำหนดค่าไว้ทำให้ความเร่งและความเร็วอยู่ที่ 0 Pulse

แกน Y ความเร่งที่มีเส้นสีน้ำเงินจะมีความค่าสูง 25 Pulse ให้ความเร็วเป็นเส้นสีเขียวมีการเคลื่อนที่ 25 Pulse ที่วินาที 1.25 จากนั้นความเร่งมาอยู่ที่ 0 Pulse ไปจนถึงวินาที 3.6 เพราะว่าความเร็วคงที่จากนั้นความเร็วเส้นสีเขียวจะลดลงทำให้ความเร่งสีน้ำเงินจะมี Pulse มีค่าติดลบเพราะว่าเป็นความหน่วงถึงเวลาที่วินาที 4.8 ความเร็วจะอยู่ที่ 0 Pulse เพราะระยะทางได้กำหนดค่าไว้ทำให้ความเร่งและความเร็วอยู่ที่ 0 Pulse

แกน Z ความเร่งที่มีเส้นสีน้ำเงินจะมีความค่าสูง 25 Pulse ให้ความเร็วเป็นเส้นสีเขียวมีการเคลื่อนที่ 25 Pulse ที่วินาที 1.25 จากนั้นความเร่งมาอยู่ที่ 0 Pulse ไปจนถึงวินาที 4.0 เพราะว่าความเร็วคงที่จากนั้นความเร็วเส้นสีเขียวจะลดลงทำให้ความเร่งสีน้ำเงินจะมี Pulse มีค่าติดลบเพราะว่าเป็นความหน่วงถึงเวลาที่วินาที 5.2 ความเร็วจะอยู่ที่ 0 Pulse เพราะระยะทางได้กำหนดค่าไว้ทำให้ความเร่งและความเร็วอยู่ที่ 0 Pulse

4.7.2 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม PID แกน X=70 แกน Y=80 แกน Z=100



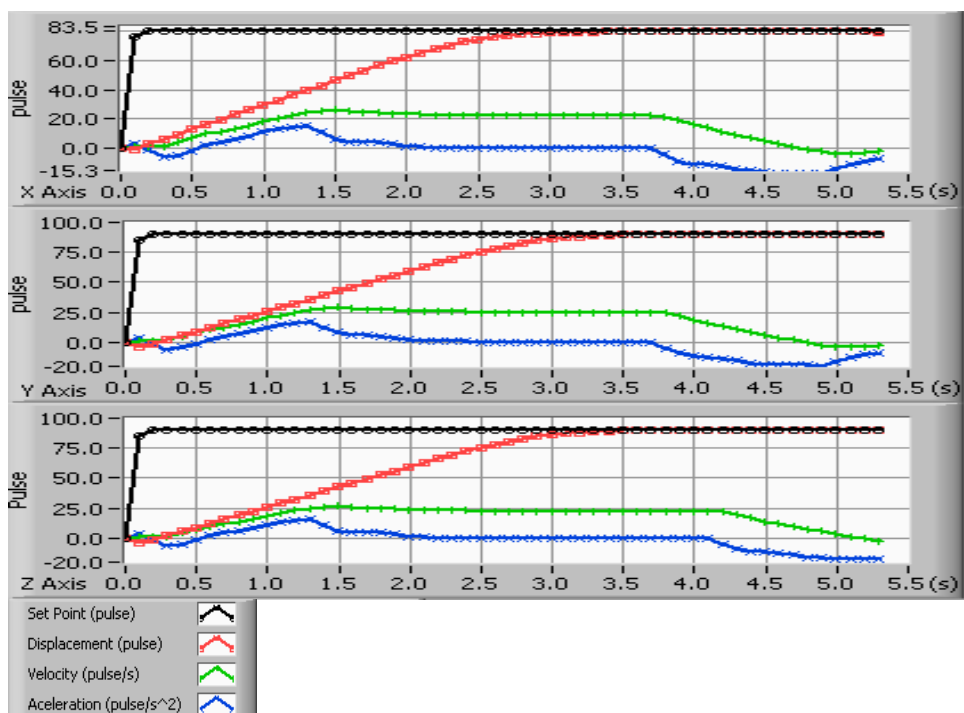
ภาพที่ 4-19 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม PID X=70 แกน Y=80 แกน Z=100

ตารางที่ 4-11 สมรรถนะของระบบควบคุม PID แกน X=70 แกน Y=80 แกน Z=100

Time Delay			Rise Time			Setting Time			Overshoot		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0.4	0.4	0.4	2.6	2.5	3.5	3.1	3.6	4.1	0%	0%	0%

จากภาพที่ 4-19 เป็นการทดลองควบคุมระยะทางการเคลื่อนที่ของแขนกล 3 แกนเข้าสู่จุดเป้าหมายที่กำหนด แกน X=50 แกน Y=40 แกน Z=100 โดยใช้การควบคุมแบบ PID เพิ่มขึ้นพบว่าระบบมีค่าหน่วยเวลา (Time Delay) ที่แกน X= 0.4 วินาที แกน Y= 0.4 วินาที แกน Z= 0.4 วินาที มีค่าเวลาไต่ระดับ (Rise Time) แกน X= 2.6 วินาที แกน Y= 2.5 วินาที แกน Z=3.5 วินาที และมีค่าเวลาคงตัว (Setting Time) แกน X= 3.1 วินาที แกน Y=3.6 วินาที แกน Z=4.1 วินาที การเกิดค่า Overshoot แกน X =0% แกน Y=0% แกน Z= 0%

4.7.3 ผลการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม Optimization PID แกน X=70 แกน Y=80 แกน Z=100



ภาพที่ 4-20 ผลการทดลองใช้ตัวควบคุม Optimization PID แกน X=50 แกน Y=100 แกน Z=100

ตารางที่ 4-12 สมรรถนะของระบบควบคุม Optimization PID แกน X=70 แกน Y=80 แกน Z=100

Time Delay			Rise Time			Setting Time			Overshoot		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0.3	0.3	0.3	2.4	2.5	2.5	2.7	3.1	3.2	0%	0%	0%

จากภาพที่ 4-14 เป็นการทดลองควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล 3 แกนเข้าสู่จุดเป้าหมายที่ตำแหน่ง แกน X=0, แกน Y=80, แกน Z=100 โดยใช้การควบคุมแบบ PID เพิ่มขึ้นพบว่าระบบมีค่าหน่วงเวลา (Time Delay) ที่แกน X= 0.53 วินาที แกน Y= 0.3 วินาที แกน Z= 0.3 วินาทีที่มีค่าเวลาใต้ระดับ (Rise Time) แกน X= 2.4 วินาที แกน Y= 2.5 วินาที แกน Z=2.5 วินาทีและมีค่าเวลาคงตัว (Setting Time) แกน X= 2.7วินาที แกน Y=3.1 วินาที แกน Z=3.2 วินาทีและโดยไม่มี Overshoot

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า Optimization PID ทำให้ระบบเข้าสู่ระดับอ้างอิงเร็วขึ้นและลดการ Overshoot ได้เมื่อเปรียบเทียบกับใช้ PID แบบธรรมดาและถ้าเปรียบเทียบกับโดยไม่ใช้ PID จะทำเวลาที่เร็วกว่า

ตารางที่ 4-13 การเปรียบเทียบของ Rise Time ของ ไม่มี PID,PID ธรรมดา,PID Optimization

Rise Time											
Set Point			ไม่มี PID			PID ธรรมดา			PID Optimization		
แกน X	แกน Y	แกน Z	แกน X	แกน Y	แกน Z	แกน X	แกน Y	แกน Z	แกน X	แกน Y	แกน Z
Pulse	Pulse	Pulse	วินาที	วินาที	วินาที	วินาที	วินาที	วินาที	วินาที	วินาที	วินาที
20	30	20	0	0	0	1.0	1.3	0.9	0.8	1.2	1.0
30	50	40	0	0	0	1.5	1.9	1.6	1.1	1.2	1.2
80	60	70	0	0	0	1.5	1.9	1.6	2.1	1.5	1.9
50	100	100	0	0	0	2.1	3.5	2.7	1.3	2.9	1.9
50	40	100	0	0	0	2.1	1.6	3.6	1.1	1.2	1.2
70	80	100	0	0	0	2.6	2.5	3.5	2.6	2.5	3.5

ตารางที่ 4-14 การเปรียบเทียบของ Setting Time ของ ไม่มี PID,PID ธรรมดา,PID Optimization

Setting Time											
Set Point			ไม่มี PID			PID ธรรมดา			PID Optimization		
แกน X	แกน Y	แกน Z	แกน X	แกน Y	แกน Z	แกน X	แกน Y	แกน Z	แกน X	แกน Y	แกน Z
Pulse	Pulse	Pulse	วินาที	วินาที	วินาที	วินาที	วินาที	วินาที	วินาที	วินาที	วินาที
20	30	20	2.4	2.4	2.4	1.9	1.8	1.8	0.8	1.2	1.0
30	50	40	3.25	3.25	3.25	1.5	2.1	2.0	1.3	1.7	1.4
80	60	70	4.4	4.4	4.4	2.8	2.0	2.2	2.3	1.9	2.2
50	100	100	5.3	5.3	5.3	1.5	2.1	2.0	2.1	3.5	2.2
50	40	100	5.2	5.2	5.2	3.0	2.5	4.5	1.7	3.5	2.0
70	80	100	4.7	4.7	4.7	3.1	3.6	4.1	2.7	3.1	3.2

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองได้ทำการทดสอบการเคลื่อนที่ตำแหน่งของแขนกลแบบคาร์ทีเซียนโดยมีการใช้ Optimization ในการเคลื่อนที่ของแขนกลเข้าสู่เป้าหมายที่กำหนดและในขั้นตอนการทดลองได้ทำการสร้างโปรแกรมควบคุมระบบจำลองขึ้นมาเพื่อตรวจสอบผลการเคลื่อนที่ทั้งการเคลื่อนที่แกน X แกน Y และแกน Z โดยในส่วน 3 แกนเพื่อให้การเคลื่อนที่ของแขนกลมีเส้นทางที่ถูกต้องและใช้เวลาน้อยที่สุดเพื่อการเคลื่อนที่รวดเร็วได้สร้างระบบการเคลื่อนที่แบบปรับค่าเพื่อให้โปรแกรมสามารถการเคลื่อนที่ของแต่ละมีความสัมพันธ์และสอดคล้องกันโดยการนำเอาค่าตำแหน่งของแต่ละแกนทำการคำนวณและประมวลผลหาค่าการขยายที่เหมาะสมก่อนที่จะส่งไปขับเคลื่อนมอเตอร์ต่อไป

ระบบการใช้ Optimization เป็นการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานในการเคลื่อนที่ของแขนกล จึงทำให้ผู้ใช้งานสามารถปรับแต่งเงื่อนไขของระบบเคลื่อนที่ได้โดยง่ายรวมทั้งการใช้ Optimization และจากการทดลองการควบคุมแขนกลแบบ 3 แกนด้วยวิธีการแยกควบคุมและแบบปรับค่าการขยายของสัญญาณเข้าด้วยตัวแปรคือระยะทางของตำแหน่งแต่ละแกนนำมาเพื่อทำการคำนวณและนำไปปรับค่าการขยายและนำไปควบคุมมอเตอร์พบว่าเคลื่อนที่แบบปรับอัตราขยายจะทำให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลมีเส้นทางที่เป็นเส้นตรงและสั้นและยังทำให้การเคลื่อนที่แต่ละแกนของแขนกลมีการเคลื่อนที่ได้ดีขึ้นโดยจะดูได้จากเส้นแสดงความเร่งความเร็วและระยะทางของแต่ละแกน

ผลการทดลองของการทำวิจัยพบว่าระบบการใช้ Optimization เป็นการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานในการเคลื่อนที่ของแขนกลในการเคลื่อนที่ไม่ใช่ PID และ PID ธรรมดาและ PID Optimization จากการทดลองจะเห็นได้ว่า Optimization PID ทำให้ระบบเข้าสู่ระดับอ้างอิงเร็วขึ้นและลดการ Overshoot ได้เมื่อเปรียบเทียบใช้ PID แบบธรรมดาและถ้าเปรียบเทียบโดยไม่ใช้ PID จะทำเวลาที่เร็วกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 โปรแกรม Labview ที่ใช้พัฒนาเป็นโปรแกรมที่เหมาะสมกับงานอุตสาหกรรมเนื่องจากมีส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานอย่างครบถ้วนแต่เนื่องจากค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับลิขสิทธิ์ค่อนข้างสูงอาจมีการพัฒนาระบบงานวิจัยบนระบบเปิด (Open Source) เช่น Linux เป็นต้น

5.2.2 เนื่องจากตัวเซนกลที่นำมาทดลองมีความผิดของแต่ละแกนแตกต่างกันอย่างมากจึงทำให้การควบคุมในแต่ละแกนแตกต่างกันอย่างมากจึงควรมีการปรับปรุงตัวของเซนกลให้มีลักษณะการเคลื่อนที่ใกล้เคียงกันเพื่อสะดวกในการออกแบบตัวควบคุม

เอกสารอ้างอิง

1. ณชล ไชยรัตน์. วิศวกรรมหุ่นยนต์. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2545.
2. สถาพร ลักษณะเจริญ. วิศวกรรมหุ่นยนต์. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2545.
3. Yoram Koren. Robotic For Engineers. Israel Institute of Technology. New York : McGraw-Hill Book Company, 1985.
4. Gary W. Johnson. Labview Graphical Programming Practical Applications in Instrumentation and Control. New York : McGraw-Hill, 1997.
5. Nesimi Ertugrul. Labview for Electric Circuits, Machines, Drives, and Laboratories. New York : Prentice Hall PTR, 2002.
6. Pfeiffer, F. and Johanni, R. "A concept for manipulator trajectory planning." IEEE Journal of Robotics and Automation. 3 (1987) : 115-123.
7. Chen, Y. Desrochers. "A Proof of The Structure The Minimum-Time Control Law of Robotic Manipulators Using a Hamiltonian Formulation." IEEE Trans Robotics and Automation. 6 (1990) : 388-393.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : นายธนกฤต ภัทรเกษวิทย์
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : การควบคุมการเคลื่อนที่เหมาะสมแบบพีไอดีสำหรับแขนกล
 สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ประวัติ

ประวัติส่วนตัวเป็นบุตรของนาย สุขวุฒิ ภัทรเกษวิทย์และนางกัลยา ภัทรเกษวิทย์ อาศัยอยู่บ้านเลขที่ 107 ถนนหมากแข้ง ตำบลหมากแข้ง อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี รหัสไปรษณีย์ 41000

ประวัติการศึกษาจบประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี ปีการศึกษา 2540 จบการวิชาชีพชั้นสูง สาขาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี ปีการศึกษา 2542 จบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ปีการศึกษา 2545

ประวัติการทำงานทำงานวิศวกรบริษัทไทยแอร์อินเจอร้เนียจำกัด ปี 2545-2546