



การควบคุมแบบย้อนกลับของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม  
ชนิดสามแกนหมุน

โดย

ชัยโรจน์ กุศลเกษิณี  
วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

โครงการวิจัย เลขที่ 104-IR-2520  
ทุนส่งเสริมการวิจัยวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
กรุงเทพฯ ๑

629.892  
ค 425 ก

พฤษภาคม ๒๕๒๑



สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์ไม่รับผิดชอบ  
ต่อผลเสียใด ๆ อันอาจเกิดจากการนำความคิดเห็นในเอกสาร  
ฉบับนี้ไปใช้ ความคิดเห็นที่ปรากฏในเอกสารเป็นความคิดเห็น  
ของผู้เขียนซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นความคิดเห็นของสถาบัน ฯ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



การควบคุมแบบย้อนกลับของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมชนิดสามแกนหมุน  
FEEDBACK CONTROL OF A THREE-AXIS INDUSTRIAL MANIPULATOR ARM

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ  
วุฒิ วศ.บ. (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย), M.S.M.E. (WISCONSIN)  
Ph.d. (WISCONSIN)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ  
วุฒิ วศ.บ. (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย), M.S.M.E. (GEORGIA TECH)  
Ph.d. (GEORGIA TECH)

โครงการวิจัยเลขที่ 104-IR-2529  
ทุนส่งเสริมการวิจัยวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
กรุงเทพฯ

พฤษภาคม 2531

สภานิติบัญญัติและคณะกรรมาธิการวิสามัญ -  
คณะรัฐมนตรี... คณะรัฐมนตรี... ๑๕๑  
มอบให้เหตุผลกลาง สภานิติบัญญัติ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
..... 14 / .....

สภานิติบัญญัติ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

๖๖๙.๖๖๖  
๕๕๖๕๖

28 ก.พ. 2532

0047688

การควบคุมแบบย้อนกลับของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมชนิดสามแกนหมุน  
FEEDBACK CONTROL OF A THREE-AXIS INDUSTRIAL MANIPULATOR ARM

---

บทคัดย่อ

การควบคุมตำแหน่งของปลายแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมเป็นหัวใจของการออกแบบระบบควบคุมทั้งหมด โดยจะพิจารณาการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนในลักษณะจุดต่อจุดหรือ Point-to-Point เป็นหลัก ระบบควบคุมแบบย้อนกลับหรือแบบปิดที่จะนำมาควบคุมการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมจะเป็นระบบควบคุมชนิด พี ไอ ดี (PID, Proportional-Integral-Derivative) การออกแบบระบบควบคุมนี้จะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่ได้ทำการปรับให้เป็นเชิงเส้นแล้ว (Linearization) และการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อก็อิสระ ไม่มีผลต่อกัน (Decoupling) ภายใต้งैนไขที่ว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อของแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมนั้นไม่เร็วจนเกินไป ซึ่งทำให้แรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเหวี่ยงและแรงคอลิโอลิส (Centrifugal Force and Coriolis Force) มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับแรงเฉื่อยของระบบ (Inertia Force of the System) หุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่สร้างขั้นนี้เป็นชนิดสามข้อต่อแบบโพลาร์โคออดิเนต (Polar Coordinate) ข้อต่อเป็นชนิดหมุน (Revolute Joint) แต่ละข้อต่อขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร โดยติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้วัดตำแหน่งของข้อต่อเป็นแบบ Potentiometer และอุปกรณ์ที่ใช้วัดความเร็วของการหมุนของมอเตอร์ (Tachometer) คอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับควบคุมเป็นไมโครคอมพิวเตอร์ชนิด 16 บิต โดยระบบควบคุมแบบปิดที่ออกแบบไว้จะอยู่ในรูปของโปรแกรมที่ทำงานอยู่บนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์นี้ เครื่องคอมพิวเตอร์นี้สามารถทราบถึงตำแหน่งและความเร็วของการเคลื่อนที่ของข้อต่อของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมโดยรับสัญญาณจากอุปกรณ์วัดตำแหน่งและอุปกรณ์วัดความเร็วซึ่งเป็นสัญญาณอนาลอก (analog) แล้วแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัล (digital) ก่อนที่จะส่งเข้าไปยังคอมพิวเตอร์



## FEEDBACK CONTROL OF A THREE-AXIS INDUSTRIAL MANIPULATOR ARM

---

### ABSTRACT

Position control of the manipulator arm tip is the major consideration of the control design system. The motion of the tool tip is point-to-point position control. PID (Proportional-Integral-Derivative) technique is used for designing of the feedback control. Linearized and decoupled mathematical model can be obtained under the assumption that each link will not move fast. So, the effects due to the centrifugal force and coriolis force can be neglected. The experimental robot is a three-joint polar coordinate manipulator arm. Each revolute joint is powered by a permanent magnet d.c. servomotor. The controller is implemented in the 16-bit microcomputer. At each joint, a potentiometer is used as the position sensor and a tachometer is used as the velocity sensor. Informations from the sensors are sent to microcomputer via microcomputer bus by converting them into the digital informations.



## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีส่วนหนึ่งก็ด้วยความร่วมมือจากนิสิตของห้องปฏิบัติการควบคุมอัตโนมัติ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่มีส่วนช่วยเหลือในด้านการทดลอง

อีกทั้งการวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย จากโครงการวิจัยเงินทุนคณะวิศวกรรมศาสตร์ ของฝ่ายวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ คณะผู้วิจัยก็ต้องขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

.....

X

สยามมหาวิทยาลัย  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	จ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการ ออกแบบระบบควบคุม .....	2
2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม ...	2
2.2 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรม แบบเชิงเส้น .....	8
2.3 เซอร์โวมอเตอร์กระแสตรง .....	9
2.4 การออกแบบระบบควบคุม .....	11
ขั้นตอนในการออกแบบระบบควบคุม .....	14
2.5 การจำลองแบบลักษณะการเคลื่อนที่ .....	19
3. การทดลองและผลของการทดลอง .....	22
3.1 การจำลองการเคลื่อนที่หุ่นยนต์อุตสาหกรรมบนเครื่อง คอมพิวเตอร์ .....	22
3.2 การเชื่อมโยงระบบแขนกลกับคอมพิวเตอร์ .....	27
3.3 รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบแขนกล ....	30
3.4 การทดสอบการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรม ..	32
4. สรุป .....	42
5. ภาคผนวก .....	43



สารบัญภาพ

			หน้า
รูปที่	1	แขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่สร้างขึ้นพร้อมส่วนประกอบ อื่น ๆ .....	3
รูปที่	2	ระบบเฟืองทดขยายแรงบิดมอเตอร์ .....	9
รูปที่	3	วงจรไฟฟ้าของมอเตอร์ .....	10
รูปที่	4	มอเตอร์บล็อกไดโอดแกรม .....	11
รูปที่	5	บล็อกไดโอดแกรมการควบคุม พี ไอ ดี กับมอเตอร์ของ แขนกล .....	12
รูปที่	6	บล็อกไดโอดแกรมของระบบควบคุม พี ไอ ดี ของมอเตอร์ ..	13
รูปที่	7	บล็อกไดโอดแกรมของระบบการควบคุมแบบ พี ไอ ดี ของมอเตอร์แกนฐาน .....	15
รูปที่	8	Bode Plot ของแกนข้อศอกของแขนกล .....	16
รูปที่	9	โพลพลอตของระบบควบคุมแกนข้อศอกของแขนกล .....	17
รูปที่	10	ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมของแขนกล สามแกน .....	19
รูปที่	11	แสดงแนวทางการเคลื่อนที่แบบตำแหน่งสู่ตำแหน่ง .....	20
รูปที่	12	การจำลองแบบหุ่นยนต์อุตสาหกรรม .....	23
รูปที่	13	โพลซาร์ทโปรแกรมกำหนดแนวทางการเคลื่อนที่ .....	24
รูปที่	14	โพลซาร์ทโปรแกรมควบคุมการเคลื่อนที่แบบป้อนกลับ ...	25
รูปที่	15	โพลซาร์ทโปรแกรมอินทิเกรตหาผลการเคลื่อนที่ .....	26
รูปที่	16	การเชื่อมโยงระบบควบคุมแขนกล .....	29
รูปที่	17	แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ในการทดสอบแขนกล .....	33
รูปที่	18	กราฟแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่แบบแกนเดียวของแกนฐาน ที่อัตราเร็ว 0.25 เรเดียน/วินาที <sup>2</sup> .....	34
รูปที่	19	กราฟแสดงความเร็วและแรงดันขับเคลื่อนของการเคลื่อนที่ แบบแกนเดียวของแกนฐานที่อัตราเร็ว 0.25 เรเดียน/วินาที <sup>2</sup> .....	35
รูปที่	20	ตารางแสดงผลการควบคุมแขนกลแบบเคลื่อนที่แกนเดียว..	36
รูปที่	21	กราฟแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกนฐานจากการ เคลื่อนที่แบบ 3 แกน .....	37
รูปที่	22	ตารางแสดงผลการควบคุมแขนกลแบบเคลื่อนที่พร้อมกันทั้ง	

		3 แกน .....	38
รูปที่ 23		ตารางแสดงผลการควบคุมแขนกลเมื่อมีการปรับค่าน้ำหนัก .....	39
รูปที่ 24		กราฟแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกนฐานจากแบบจำลองเมื่อยกน้ำหนัก 8 กก.....	40
รูปที่ 25		กราฟแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกนฐานจากการเคลื่อนที่พร้อมกันสามแกนเมื่อยกน้ำหนัก 3 กก.....	41

สถาบันวิจัยและพัฒนา  
 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล



## 1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้การนำเอาคอมพิวเตอร์มาควบคุมระบบกลไกต่าง ๆ ที่นำมาใช้กับกระบวนการผลิตนั้นเริ่มแพร่หลายมากขึ้น โดยเฉพาะประเทศอุตสาหกรรม จุดประสงค์ของการนำเอาคอมพิวเตอร์เข้ามาควบคุมนั้นก็ต้องการงานที่ละเอียด แม่นยำ มีการผิดพลาดน้อยที่สุด และสามารถผลิตในปริมาณมาก โดยให้คุณภาพของชิ้นงานที่ผลิตนั้นมีความสม่ำเสมอ

หุ่นยนต์อุตสาหกรรมเป็นตัวอย่างหนึ่งของการพัฒนาระบบกลไกที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ในต่างประเทศที่มีเทคโนโลยีสูงหรือประเทศอุตสาหกรรมต่าง ๆ นั้น ได้นำเอาหุ่นยนต์อุตสาหกรรมมาใช้ในกระบวนการผลิต ก็ด้วยเหตุผลที่ว่า ความแม่นยำของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมในการผลิตและประกอบชิ้นงานมีความแม่นยำสูง ทำให้ชิ้นงานที่ได้ออกมานั้นมีคุณภาพสูง ซึ่งในงานบางอย่างการทำงานด้วยมือไม่สามารถทำได้ละเอียดเท่า การทำงานในสภาพแวดล้อมที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน เช่นบริเวณที่มีความร้อนสูง บริเวณที่อากาศเป็นพิษ ต่าง ๆ เหล่านี้ ล้วนเป็นข้อพิจารณาในการที่จะนำหุ่นยนต์อุตสาหกรรมเข้ามาใช้แทนที่การทำงานของมนุษย์

ในการสร้างหุ่นยนต์อุตสาหกรรมนั้น ปัญหาที่ต้องคำนึงถึงให้มากก็คือปัญหาเนื่องมาจากความหยุ่นตัวของโครงสร้าง (Flexibility Structure) ของหุ่นยนต์ ผลกระทบเนื่องจากการหยุ่นตัวนั้นจะก่อให้เกิดปัญหาทางด้านการควบคุมได้ การแก้ปัญหานี้ก็โดยสร้างหุ่นยนต์ให้มีมวลมากเพื่อจะได้มีความทรงรูปสูง (Rigidity) ด้วยเหตุนี้หุ่นยนต์ในปัจจุบันจึงต้องให้กำลังขับเคลื่อนเพื่อเอาชนะมวลที่มากเกินไปความต้องการ ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานและมีรูปร่างเกะกะอยู่

จุดประสงค์ของโครงการวิจัยนี้ก็เพื่อที่จะพัฒนาระบบควบคุมแบบย้อนกลับหรือแบบปิด (Close-loop Control) ซึ่งสามารถที่จะควบคุมตำแหน่ง ทิศทาง และความเร็วของการเคลื่อนที่ในระบบแกนโพลาร์ (Polar Coordinate) การควบคุมนี้จะสั่งผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่กำหนดที่ควบคุมหุ่นยนต์นั้น แขนหุ่นยนต์ที่สร้างจะทำด้วยอลูมิเนียม เพราะต้องการให้น้ำหนักเบาในขณะที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วด้วย แต่ละข้อต่อเคลื่อนที่ด้วยแรงขับเคลื่อนจากมอเตอร์กระแสตรงโดยผ่านชุดเฟืองทดที่ต่อเข้ากับข้อต่อต่าง ๆ ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

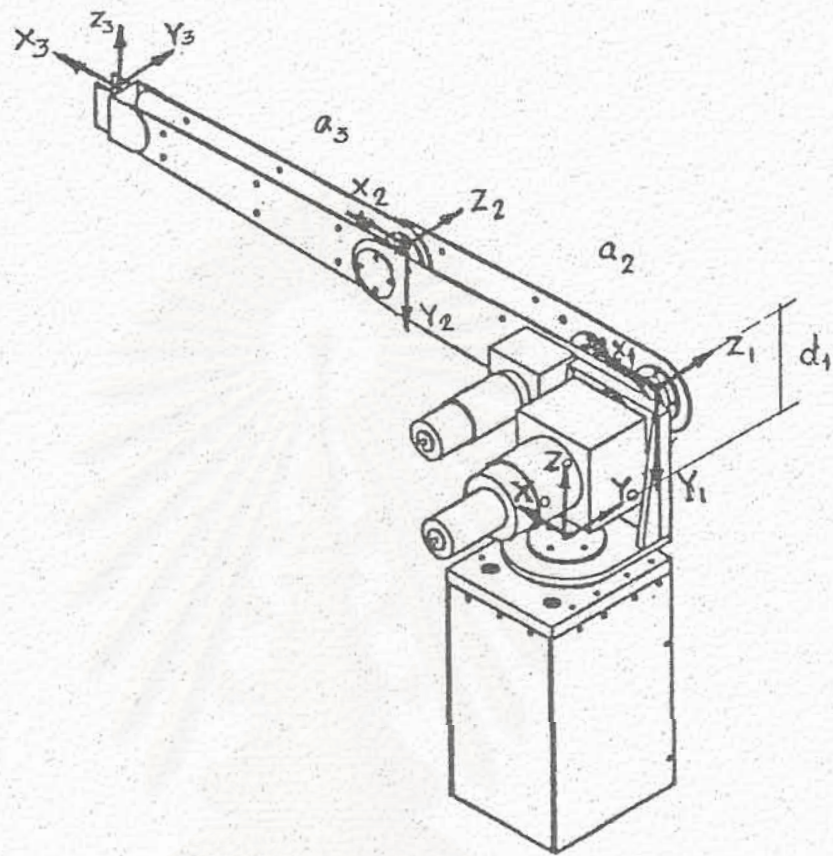
## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการออกแบบระบบควบคุม

### 2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

ในการออกแบบระบบควบคุมแบบปิดเพื่อนำมาควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่สร้างขึ้นนั้น สิ่งที่สำคัญและเป็นและขาดไม่ได้เลยก็คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Dynamic Model) ซึ่งใช้แทนระบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม การหาแบบจำลองที่ถูกต้องและเที่ยงตรงนั้นก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างกล่าวคือนับตั้งแต่การสร้างหุ่นยนต์ ถ้าฝีมือในการสร้างหุ่นยนต์นั้นดีพอประกอบกับอุปกรณ์ที่ใช้ก็มีมาตรฐานเพียงพอ ก็จะสามารถลดความยุ่งยากในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลงไปได้มาก ตัวประกอบที่ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีความยุ่งยากสลับซับซ้อนมากขึ้นก็คือ ความเสียดทานที่ข้อต่อต่าง ๆ, Backlash, ความหยุ่นตัวของโครงสร้าง (Flexibility Structure) ของหุ่นยนต์เอง เป็นต้น ถ้าสามารถขจัดตัวการเหล่านี้ได้ก็จะทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีความยุ่งยากน้อยลง แต่ก็ยังมีความสลับซับซ้อนอยู่เนื่องจากว่า หุ่นยนต์อุตสาหกรรมนั้นมีหลายข้อต่อ และในการเคลื่อนที่แต่ละครั้งข้อต่อต่าง ๆ อาจจะมีการเคลื่อนที่พร้อม ๆ กันด้วย จึงทำให้เกิดผลกระทบจากข้อต่อหนึ่ง ไปยังอีกข้อต่อหนึ่ง (Couple) ซึ่งผลกระทบนี้จะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่ ถ้าความเร็วในการเคลื่อนที่ไม่สูงมากผลกระทบนี้ก็จะมีน้อยลงและอาจจะละทิ้งได้ในการคิดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่ถ้าการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อสูงผลกระทบนี้ก็จะมีมากทำให้การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นต้องคำนึงถึงค่านี้อย่างยิ่ง การออกแบบระบบควบคุมที่ทำการศึกษาในที่นี้จะพิจารณาทั้งคู่ทั้งสองกรณี แต่เนื่องจากการควบคุมนี้ใช้เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุม การควบคุมที่ออกแบบโดยถือเอาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่คำนึงถึงผลกระทบระหว่างข้อต่อนั้นไม่สามารถใช้ควบคุมแบบ real time ได้ เพราะเหตุที่เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์นี้มีขีดจำกัดในการคิดคำนวณ ดังนั้นจึงใช้วิธีการออกแบบโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ดัดแปลงให้เป็นแบบจำลองเชิงเส้น (Linear Model) และเป็นแบบที่ไม่มีผลกระทบระหว่างแกน (Decouple) แต่ผลของการทดสอบกับระบบจริงก็ได้ผลดีพอสมควร ดังจะกล่าวต่อไป แต่จะทำการจำลองการเคลื่อนที่บนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์โดยให้แบบจำลองที่เป็นระบบจริงซึ่งเป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Model) และในแบบจำลองนี้ก็มีผลกระทบระหว่างแกน (Coupling) เมื่อมีการเคลื่อนที่ด้วย

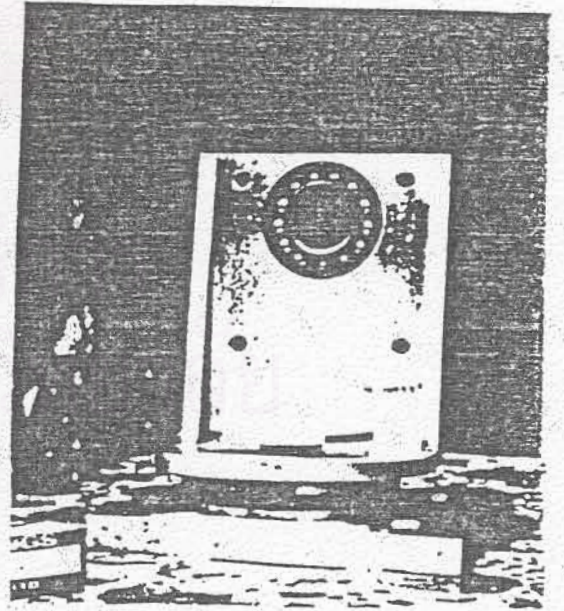
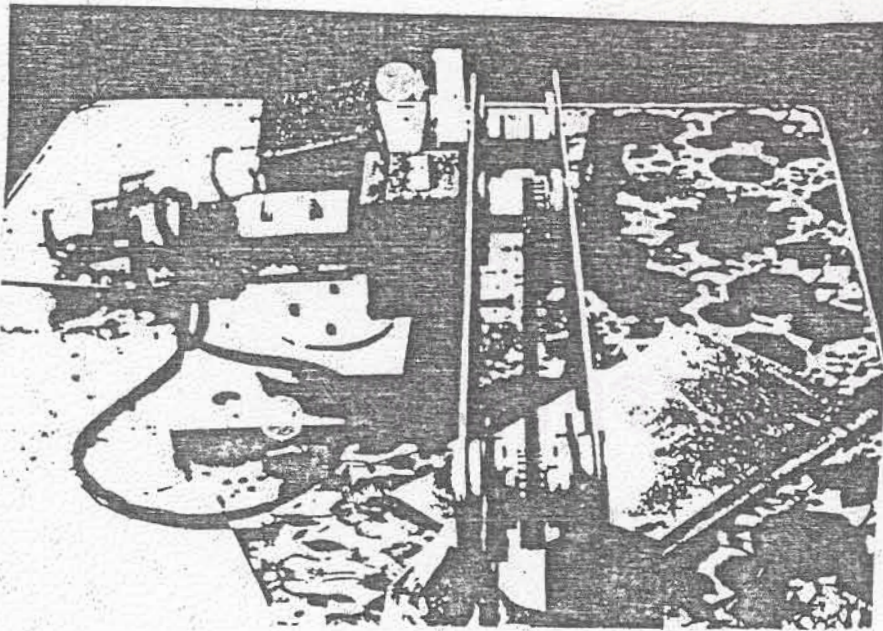
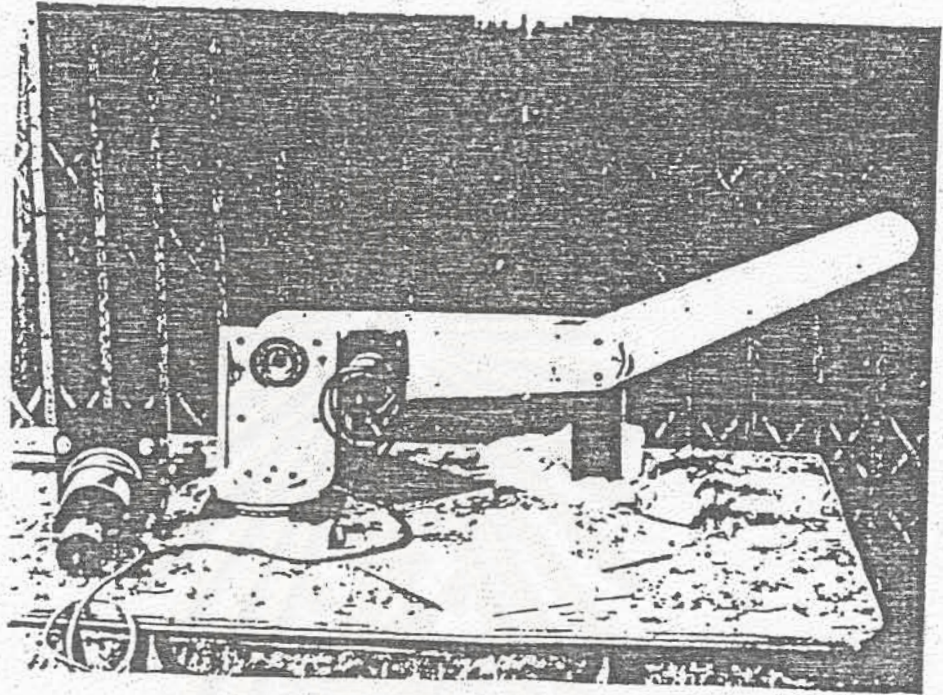
การควบคุมแบบปิดที่ศึกษานี้จะเป็นการควบคุมแบบปิดชนิด พี ไอ ดี (PID Proportional-Integral-Derivative) การออกแบบระบบควบคุมนี้จะสมมติว่าการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อนั้นไม่มีผลกระทบต่อกัน

รูปที่ 1 เป็นรูปแบบของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่ได้ทำการสร้างขึ้นเพื่อการศึกษาเป็นหุ่นยนต์อุตสาหกรรมชนิดสามข้อต่อแบบ Revolute Joint ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแส

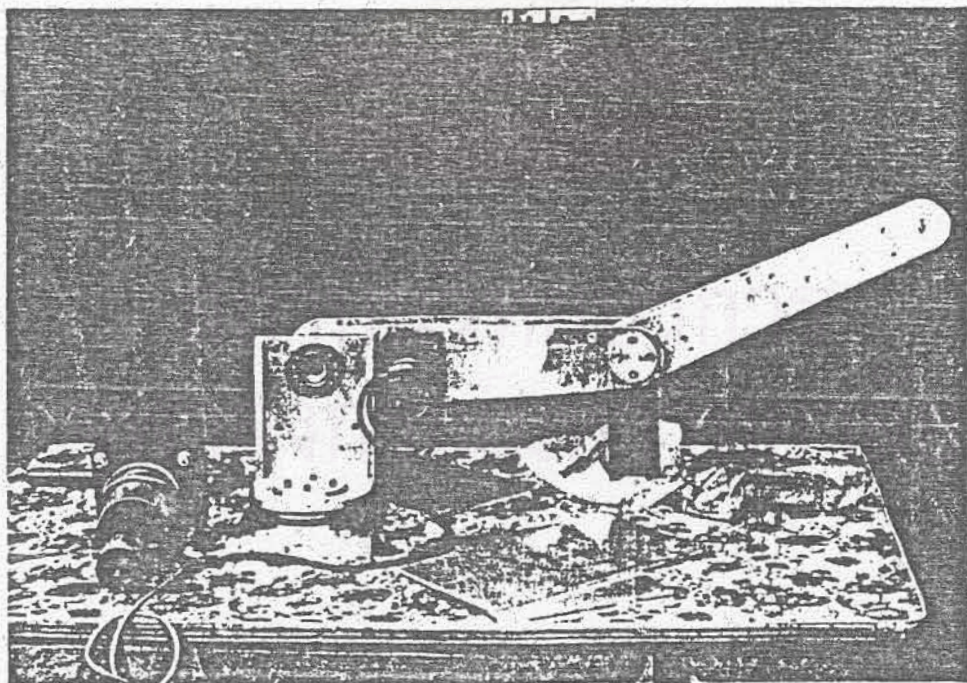
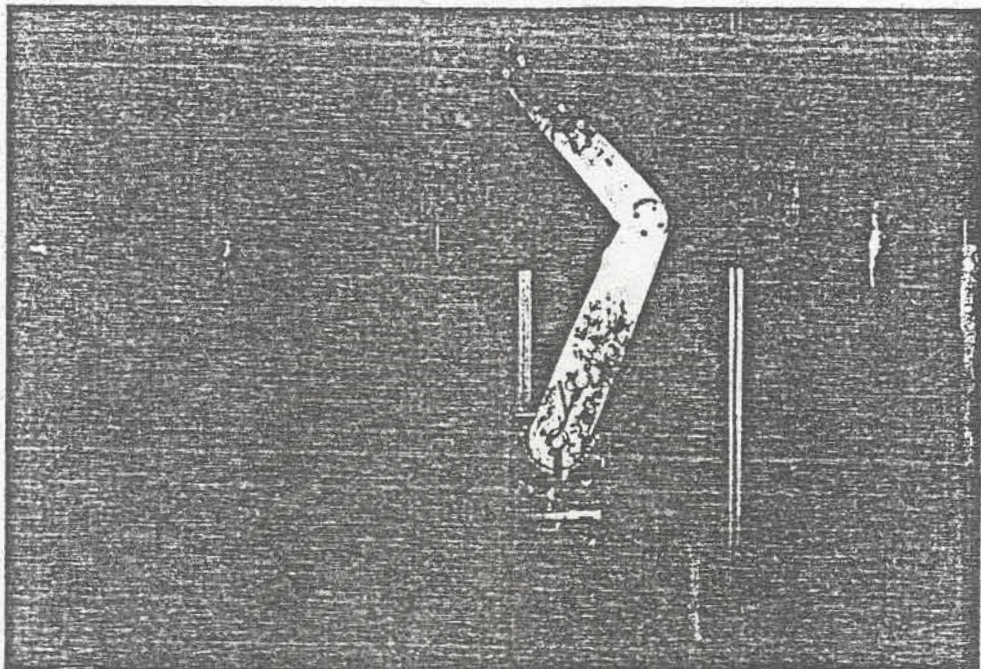


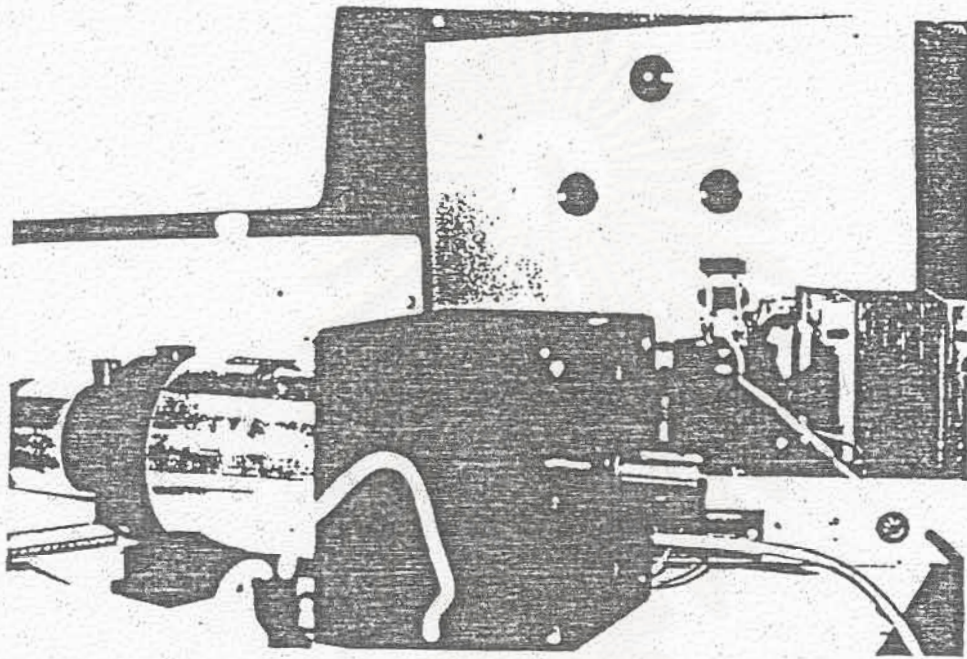
Joint	$\alpha_i$	$a_i$	$d_i$	$\cos\alpha_i$	$\sin\alpha_i$
1	-90	0.0	0.040	0	-1
2	0	0.40	-0.017	1	0
3	90	0.43	0.066	0	1

รูปที่ 1 . การตั้งแกนของ CUME ROBOT



รูปที่ ๑    แชนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่สร้างขึ้นพร้อมส่วนประกอบอื่น ๆ





รูปที่ 1 มอเตอร์วัด Tachometer และ Power Amplifier



แสดรงชนิดแม่เหล็กถาวร มอเตอร์นี้จะไปขับเคลื่อนแขนข้อต่อโดยผ่านชุดเฟืองทดซึ่งต่อ  
 เข้าระหว่างแกนมอเตอร์กับตัวแขน ตรงที่ข้อศอกหรือข้อต่อที่สามนั้นจะถูกขับเคลื่อนด้วย  
 มอเตอร์ซึ่งอยู่ใกล้กับปลายแขนที่หนึ่งหรือข้อต่อที่สองดังแสดงในรูป โดยมีสายพานต่อขึ้นไป  
 ขับอีกทอดหนึ่ง

เมื่อทราบว่าหุ่นยนต์มีรูปแบบดังแสดงไว้ในรูปที่ 1 ก็เริ่มทำการหาแบบจำลอง  
 ทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีการของ Lagrange's Equation เพื่อหาสมการการเคลื่อนที่  
 (Dynamics Equation) ซึ่งจะอยู่ในรูปของ Non-linear Differential  
 Equations ดังนี้คือ

$$F_1 = \sum_{j=1}^6 D_{1j} \dot{q}_j + I a_1 \dot{q}_1 + \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^6 D_{1jk} \dot{q}_j \dot{q}_k + D_1 \quad (1)$$

$$\text{เมื่อ } D_{1j} = \sum_{e=\max(i,j)}^6 \text{Trace} \left[ \frac{\partial T_e}{\partial \dot{q}_j} J_1^T \frac{\partial T_e}{\partial \dot{q}_i} \right]$$

$$D_{1jk} = \sum_{e=\max(i,j,k)}^6 \text{Trace} \left[ \frac{\partial^2 T_e}{\partial \dot{q}_j \partial \dot{q}_k} J_1^T \frac{\partial T_e}{\partial \dot{q}_i} \right]$$

$$D_1 = \sum_{e=1}^6 -m_p g^T \frac{\partial T_p}{\partial \dot{q}_1} r_p$$

$$J_1 = \begin{bmatrix} (-I_{xx} + I_{yy} + I_{zz})/2 & I_{ixy} & I_{ixz} & m_1 x_1 \\ I_{ixy} & (I_{xx} - I_{yy} + I_{zz})/2 & I_{iyz} & m_1 y_1 \\ I_{ixz} & I_{iyz} & (I_{xx} + I_{yy} - I_{zz})/2 & m_1 z_1 \\ m_1 x_1 & m_1 y_1 & m_1 z_1 & m_1 \end{bmatrix}$$

สมการที่ 1 นี้เป็นสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่มี n ลิงค์  
 (link) โดยที่  $D_{11}$  เป็นเทอมอินเนอร์เชีย (Inertia term) ของข้อต่อ i,  $D_{1j}$   
 เป็นผลกระทบของอินเนอร์เชียระหว่างข้อต่อ i และ j,  $D_{1jj}$  เป็นแรงเซนติฟูกัลที่ข้อต่อ  
 i เกิดจากความเร็วของข้อต่อ j,  $D_{1jk}$  เป็นแรงคอริโอลิสที่ข้อต่อ i เกิดจากความเร็ว  
 ของข้อต่อ j และข้อต่อ k และ  $D_1$  แทนแรงดึงดูดของโลกที่กระทำต่อข้อต่อ i การ  
 เคลื่อนที่ของลิงค์ของแขนกลที่ความเร็วต่ำ เทอมของแรงคอริโอลิสจะมีขนาดน้อยเมื่อเทียบ  
 กับแรงรวมของระบบ ความสัมพันธ์ไดนามิกตามวิธีของลากรางจ์ที่ได้นี้ยังไม่ได้รวมถึงผล  
 จากความฝืดของการเคลื่อนที่ และน้ำหนักที่แขนกลต้องชกในการทำงาน การหาความสัมพันธ์  
 ไดนามิกของแขนกลโดยตรงจากสมการที่ 1 สามารถทำได้โดยอาศัยการสร้างแกนให้  
 กับระบบแขน กลตามวิธีการของ Denavit & Hartenberg แล้วหาอนุพันธ์อันดับที่ 1

และ 2 ของทรานส์ฟอร์มเมตริกโดยตรงมาแทนลงในสมการที่ 1 เพื่อหา  $D_{1j}$ ,  $D_{1j}$  และ  $D_{1jk}$  ให้กับสมการที่ 1 เป็นวิธีการหาคำตอบแบบตรง ๆ ซึ่งต้องใช้เวลามากและมีโอกาสผิดพลาดได้ง่าย เมื่อพิจารณาการทำทรานส์โพสท์เมตริกและการหาอนุพันธ์ของทรานส์ฟอร์มเมตริก สามารถสร้างเมตริก Q มาช่วยให้การหาความสัมพันธ์ไดนามิกตามรูปแบบสมการที่ 1 ซึ่งทำได้สะดวกขึ้นและลดความผิดพลาดลงได้ โดยที่รายละเอียดและตัวอย่างการหาความสัมพันธ์ไดนามิกกับแขนกล 3 แกนของรูปที่ 1 ตามวิธีการสร้างเมตริก Q ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข. และได้ความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$F_1 = D_{11}\ddot{\theta}_1 + D_{21}\ddot{\theta}_2 + D_{31}\ddot{\theta}_3 + Ia_1\dot{\theta}_1 + D_{11} + D_{112}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + D_{113}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 + D_{122}\dot{\theta}_2^2 + D_{123}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 + D_{133}\dot{\theta}_3^2 \quad (2)$$

$$F_2 = D_{21}\ddot{\theta}_1 + D_{22}\ddot{\theta}_2 + D_{32}\ddot{\theta}_3 + Ia_2\dot{\theta}_2 + D_{22} + D_{223}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 + D_{233}\dot{\theta}_3^2 \quad (3)$$

$$F_3 = D_{31}\ddot{\theta}_1 + D_{32}\ddot{\theta}_2 + D_{33}\ddot{\theta}_3 + Ia_3\dot{\theta}_3 + D_{33} + D_{311}\dot{\theta}_1^2 + D_{322}\dot{\theta}_2^2 \quad (4)$$

ความสัมพันธ์ไดนามิกตามสมการที่ 2-4 ใช้คำนวณหาขนาดของทอร์คที่ใช้ขับเคลื่อนข้อต่อต่าง ๆ เพื่อทำให้แขนกลหมุนได้มุมหมุนที่ต้องการ, ความเร็ว และความเร่งตามกำหนด แต่ในทางกลับกันถ้าต้องการนำความสัมพันธ์ไดนามิกนี้ไปใช้ในการจำลองแบบแทนระบบด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์พบว่าสมการที่ได้ค่อนข้างยากมาก การแก้สมการอนุพันธ์อันดับที่สองควรทำโดยการกระจายสมการให้อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งแล้วใช้วิธีการนิวเมอริคัล อินทิเกรชัน (Numerical Integration) โดยอาศัยคอมพิวเตอร์มาช่วยคำนวณคำตอบ

## 2.2 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมแบบเชิงเส้น

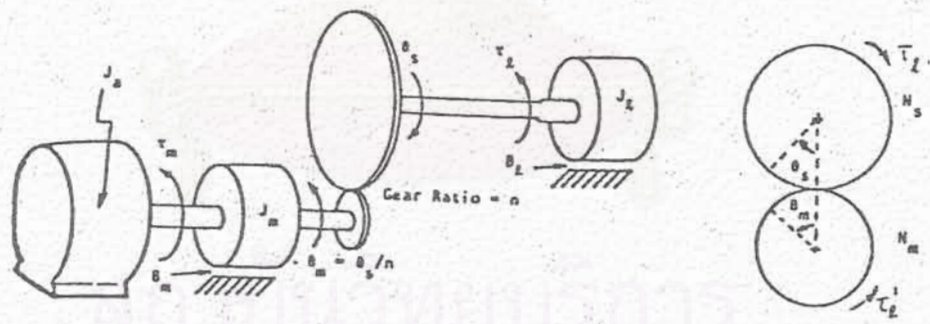
แบบจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมดังแสดงไว้ในสมการที่ 1 นั้นเป็นสมการไม่เชิงเส้นและมีความยุ่งยากสลบซับซ้อนมากไม่เหมาะสำหรับนำมาออกแบบระบบควบคุมแบบปิด เมื่อตั้งเกณฑ์ที่ว่า การเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์จะมีความเร็วไม่สูงนัก เทอมที่เป็นแรงเซนตริฟูกัล และ แรงคอริโอลิส ก็จะมีค่าน้อยมาก ประกอบกับสมมติฐานที่ว่ามวลของข้อต่อหนึ่งเมื่อมีการเคลื่อนที่จะมีผลกระทบน้อยกับการเคลื่อนที่ของมวลของอีกข้อต่อหนึ่ง ก็จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแต่ละข้อต่ออิสระต่อกันเหมือนกับการควบคุมแต่ละแขนแยกอิสระจากกันเลย แบบจำลองในกรณีนี้จึงค่อนข้างง่ายและใช้ในการออกแบบระบบควบคุมแบบปิดชนิด พี ไอ ดี นี้

ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ส่วนมาก เป็นการควบคุมชุดขับเคลื่อนให้เคลื่อนที่ไหลลื่นไปหยุดในตำแหน่งที่กำหนด และยึดตำแหน่งนี้ไว้จนกว่าจะได้รับคำสั่งบังคับการเคลื่อนที่ใหม่

หรือเป็นการควบคุมชุดขับเคลื่อนให้เคลื่อนที่ไหลไปตามระยะตำแหน่งที่กำหนดให้ โดยอาศัยระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (feed back control) ซึ่งสามารถรักษาความแม่นยำของการเคลื่อนที่ได้ดี เพราะมีการตรวจสอบผลการเคลื่อนที่กับคำสั่งบอกตำแหน่งของการเคลื่อนที่ สำหรับตัวขับเคลื่อนไหลคั้น จะเห็นว่าเซอร์โวมอเตอร์กระแสตรง (D.C. Servomotor) มีความเหมาะสมกับการขับเคลื่อนแกนของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็ก เพราะมีคุณสมบัติที่ดีในการบังคับความเร็ว มีความเป็นเชิงเส้นดีในช่วงการทำงานที่กว้าง ให้แรงบิด และมีประสิทธิภาพสูง

### 2.3 เซอร์โวมอเตอร์กระแสตรง (D.C. Servomotor)

เซอร์โวมอเตอร์กระแสตรง (ต่อไปนี้จะเรียกว่ามอเตอร์) ที่ใช้กับงานหุ่นยนต์ เป็นมอเตอร์ที่ถูกพัฒนาให้โพลาร์โมเมนต์ของอาเมเจอร์มีค่าน้อย มีสเตเตอร์เป็นชนิดแม่เหล็กถาวรที่มีขนาดเล็ก และการควบคุมมอเตอร์ควบคุมที่อาเมเจอร์ แรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้นมักถูกขยายกำลังเพิ่มขึ้นเท่ากับอัตราทดของชุดเฟืองทดเมื่อส่งไปถึงข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ แต่ชุดเฟืองทอนี้ก็จะทำให้ค่าโพลาร์โมเมนต์เฉื่อยของมอเตอร์เมื่อพิจารณาที่ข้อต่อของแขน มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นกำลังสองของอัตราทดของเฟืองทดด้วย



รูปที่ 2 ระบบเฟืองทดขยายแรงบิดมอเตอร์

จากรูปที่ 2 จะเห็นว่าระบบเฟืองทดรอบทำให้มุ่มหมุน ความเร็ว ความเร่ง และแรงบิด ด้านเพลามอเตอร์ ( $\theta_m, \dot{\theta}_m, \ddot{\theta}_m$ ) กับด้านเพลาก็ไปต่อไหลคั้น ( $\theta_s, \dot{\theta}_s, \ddot{\theta}_s$ ) มีค่าต่างกันตามอัตราทดของชุดเฟือง ( $n, n \leq 1$ ) ดังสมการที่ 5-6

$$\Theta_m = N_m / N_a ; \Theta_m = n \theta_m \quad (5)$$

$$T_1 = n T_1' \quad (6)$$

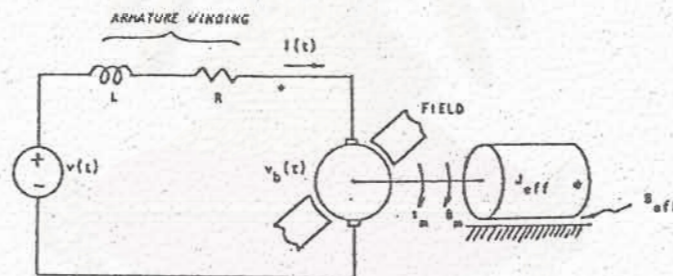
การคำนวณแรงบิดของมอเตอร์ ( $T_m$ ) เพื่อเคลื่อนที่โหลดจะอาศัยหลักการของ ดีอาเลมเบิร์ต torque = ( $J$ ) โดยที่แรงบิดของมอเตอร์ต้องมีค่ามากกว่าแรงเนื่องจากอินเนอร์เซียโหลดของระบบ ซึ่งประกอบด้วยอินเนอร์เซียของแกนหมุนของมอเตอร์ ( $J_m$ ) ชุดเฟืองทด ( $J_n$ ) และลิงค์ที่ต่อไประหว่าง ( $J_1$ ) กับ นอกจากนี้ก็ต้องรวมแรงเนื่องจากความเสียดทานแฉิมบั้ง (Viscous Damping) ของชุดเฟืองทด ( $B_m$ ) และลิงค์ที่ต่อไประหว่าง ( $B_1$ ) ดังสมการที่

$$T_m = (J_m + J_n + n^2 J_1) \ddot{\Theta}_m + (B_m + n^2 B_1) \dot{\Theta}_m \quad (7)$$

หรือ  
เมื่อ

$$T_m = J_{eff} \ddot{\Theta}_m + B_{eff} \dot{\Theta}_m$$

$$J_{eff} = (J_m + J_n + n^2 J_1)$$



รูปที่ 3 วงจรไฟฟ้าของมอเตอร์

จากรูปที่ 3 แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (back EMF,  $V_b(t)$ ) ของมอเตอร์ที่เกิดจากการหมุนขดลวดอาเมเจอร์ตัดสนามแม่เหล็ก คำนวณค่าได้ดังสมการที่ 8

$$V_b(t) = K_b \Theta_m(t) \quad (8)$$

โดยที่  $K_b$  คือค่าคงที่แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ จากกฎของเคอร์ซอผลความสัมพันธ์ของวงจรมอเตอร์เป็นดังสมการที่ 9

$$V(t) - V_b(t) = L(di(t)/dt) + Ri(t) \quad (9)$$

ถ้าลาปลาซทรานสฟอร์มจะได้ดังนี้

$$V(s) - K_b s \Theta_m(s) = (Ls + R)I(s) \quad (10)$$

แรงบิดที่สร้างจากมอเตอร์จะแปรตามกระแสของอาเมเจอร์ดังสมการที่ 11

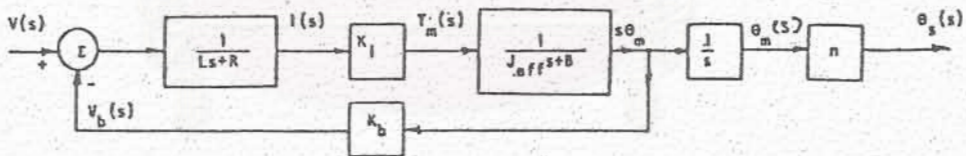
$$T_m(t) = K_t i(t) \quad (11)$$

หรือ

$$T_m(s) = K_t I(s)$$

โดยที่  $K_t$  คือค่าคงที่แรงบิดของมอเตอร์ (torque constant) ทรานสเฟอ์ฟังก์ชันของมอเตอร์หาได้โดยนำสมการที่ 7 และ 10 แทนค่าลงสมการที่ 11 แล้วจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ 12 ซึ่งนำไปเขียนบล็อกไดอแกรมได้ดังรูปที่ 4

$$I_m(s)/V_m(s) = K_t / s [LJ_{eff} s^2 + (RJ_{eff} + LB_{eff})s + (RB_{eff} + K_t K_b)] \quad (12)$$

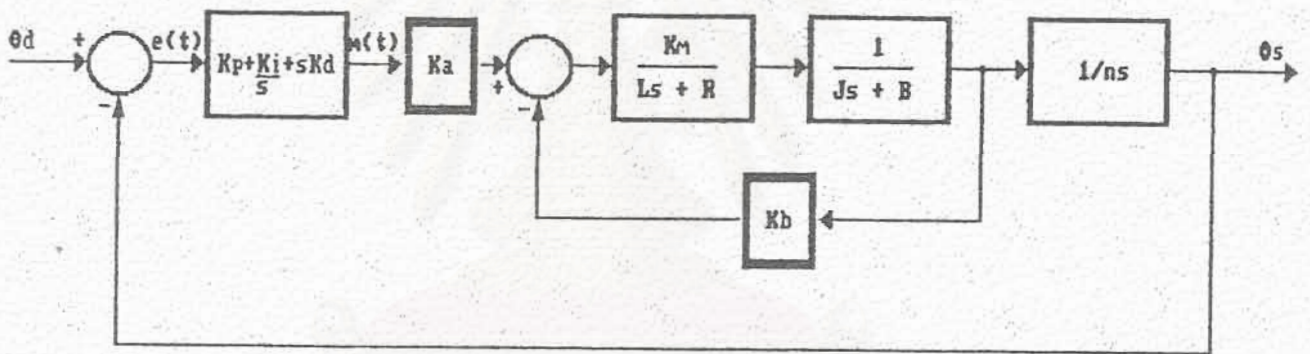


รูปที่ 4 มอเตอร์บล็อกไดอแกรม

## 2.4 การออกแบบระบบควบคุม

คุณลักษณะที่ต้องการของระบบควบคุมคือ 1. ต้องการให้ระบบมีความเที่ยงตรงที่สภาวะคงตัว (steady-state accuracy) เป็นที่น่าพอใจ 2. ให้ผลตอบสนองได้รวดเร็ว 3. มีการเรคคูละที่ตึกกล่าวคือสามารถปรับตัวได้ดีเมื่อมีสิ่งรบกวนต่อระบบ และ 4. ระบบจะต้องมีเสถียรภาพตลอดการเคลื่อนที่ เพื่อให้ระบบมีคุณลักษณะตามจุดมุ่งหมาย จึงเลือกใช้การควบคุมแบบ พี ไอ ดี จุดมุ่งหมายหลักของการออกแบบก็คือ ต้องการให้ระบบมีความคลาดเคลื่อนคงตัวน้อยที่สุด โดยทั่วไปแล้วความคลาดเคลื่อนคงตัวของระบบจะลดลงเมื่อ

เกน  $K_p$  มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมจะทำการเลือกค่า  $K_p$  ให้มีค่ามากที่สุด แต่เนื่องจากว่าค่า  $K_p$  นี้ถ้ามีค่ามากเกินไปแล้ว ในตอนที่สร้างจริงตัวแอมพลิไฟเออร์ (Amplifier) ก็ต้องมีค่าเกนสูงมาก ๆ ซึ่งอาจจะทำให้มีเสถียรภาพน้อยลง โดยทั่วไปแล้วการเลือกค่า  $K_p$  จะดูที่ค่าเกนมาร์จิ้น (gain margin) ของระบบเป็นส่วนใหญ่ ส่วนการเลือกค่า  $K_d$  และ  $K_i$  ก็จะคำนึงถึงค่าเฟสมาร์จิ้น (phase margin) เป็นหลัก เมื่อรวมทั้งค่า  $K_p$ ,  $K_d$  และ  $K_i$  เข้าไปด้วยกันในระบบควบคุม ก็จะทำให้ระบบมีคุณลักษณะที่ดีครบ 4 ประการข้างต้น การเพิ่ม  $K_d$  และ  $K_i$  เข้าไปในระบบควบคุมนั้นจะเป็นการทำให้ระบบมีเสถียรภาพที่ดีขึ้น ในขณะที่เดียวกันก็ไม่ทำให้ความถี่ของตรงของระบบด้อยลงไป จากรูปที่ 5 นำมาจัดบล็อกไดอแกรมของระบบแล้วเขียนใหม่ โดยจัดให้ตัวควบคุม พี ไอ ดี อยู่ในลักษณะของคาโนนิคัล (Canonical Relization form) ได้ดังรูปที่ 6

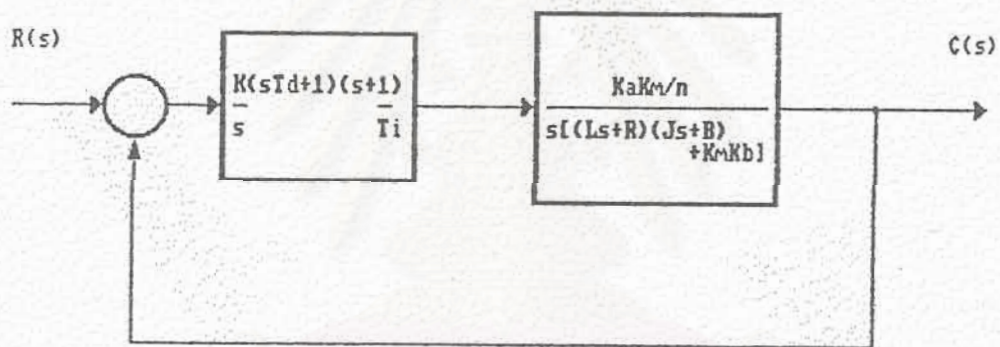


รูปที่ 5 บล็อกไดอแกรมการควบคุม พี ไอ ดี กับมอเตอร์ของแกนกล

โดยที่

- $m(t)$  = สัญญาณควบคุมที่ได้จากตัวควบคุมพี ไอ ดี ที่เวลา  $t$
- $e(t)$  = ค่าสัญญาณแตกต่างระหว่างจุดอ้างอิงกับค่าที่วัดได้ที่เวลา  $t$
- $K_p$  = ค่าคงที่ของตัวควบคุมแบบ พี
- $K_i$  = ค่าคงที่ของตัวควบคุมแบบ ไอ
- $K_d$  = ค่าคงที่ของตัวควบคุมแบบ ดี
- $K_m$  = อัตราขยายของเพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์
- $K_{TR}$  = ค่าคงที่แรงบิดมอเตอร์
- $K_b$  = ค่าคงที่แรงดันย้อนกลับ

- L = ค่าอินดักแทนซ์ของมอเตอร์
- R = ค่าความต้านทานของมอเตอร์
- J = โมเมนต์แรงเฉื่อยของมอเตอร์และโหลด
- B = สัมประสิทธิ์วิสคอสแดมป์ของมอเตอร์และโหลด
- N = อัตราทดของชุดเฟืองทด



รูปที่ 6 บล็อกไดอแกรมของระบบควบคุม พี ไอ ดี ของมอเตอร์

จากบล็อกของตัวควบคุมในรูปที่ 6 กำหนดให้

$$K_p = K(1 + T_d/T_i) \quad (13)$$

$$K_i = K/T_i \quad (14)$$

$$K_d = K \cdot T_d \quad (15)$$

### ขั้นตอนในการออกแบบระบบควบคุม

1. พล็อตกราฟโบดี (Bode) ค่าการตอบสนองความถี่แบบเปิดระบบมอเตอร์กับโหลด เพื่อหาคอนเนอร์ฟรี้ควেনซี (corner frequency)
2. เลือกค่า  $1/T_d$  ให้มีค่าใกล้เคียงกับคอนเนอร์ฟรี้ควেনซีของระบบมอเตอร์ในข้อ 1
3. เลือกค่า  $1/T_1$  ให้มีค่าน้อยกว่า  $1/T_d$  ประมาณ 20 เท่า
4. พล็อตกราฟโบดี (Bode) ค่าการตอบสนองความถี่แบบเปิดของตัวควบคุมและของทั้งระบบ เพื่อพิจารณาเฟสมาร์จิน (Phase Margin) และเกนมาร์จิน (Gain Margin) โดยเฟสมาร์จินของทั้งระบบควรมีค่ามากกว่า 45 องศาขึ้นไป เพื่อให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพพอสมควร
5. การปรับค่าเฟสมาร์จินรวมของทั้งระบบตามข้อ 4 ปรับจากค่า  $T_1$  หรือ  $T_d$  ได้ แต่ควรปรับที่  $T_1$  เพื่อให้  $1/T_d$  ยังคงอยู่บริเวณคอนเนอร์ฟรี้ควেনซีเช่นเดิม
6. จากรูปกราฟโบดี (Bode) ให้เลือกค่า  $K_p$  เพื่อให้ระบบมีค่าเกนมาร์จินที่พอประมาณ
7. ตรวจสอบเสถียรภาพของระบบจากโพลของสมการคาร์แรกเตอร์วิสติก (Pole of Characteristic equation)
8. ทดสอบค่าตัวควบคุม พี ไอ ดี ที่ได้ตามสมการที่ 13-15 กับระบบจริง
9. การปรับปรุงเสถียรภาพของระบบให้ดีขึ้น ทำโดยปรับค่าเฟสมาร์จินของระบบตามข้อ 4 ให้มีค่าเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 6 การออกแบบเลือกค่าตัวควบคุมของมอเตอร์แกนข้อศอกตามขั้นตอน 9 ข้อข้างต้นนั้นจำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบ ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

$K_a$	=	4	โวลต์/โวลต์
$K_m$	=	0.0551	นิวตันเมตร/แอมป์
$K_b$	=	0.0554	โวลต์/(เรเดียน/วินาที)
$n$	=	100	
$R$	=	1.1	โอห์ม
$L$	=	23	มิลลิเฮนรี
$B$	=	$6.74 \times 10^{-6}$	กิโลกรัมเมตร <sup>2</sup> /วินาที

โมเมนต์ของแรงเฉื่อยด้านเพลามอเตอร์หาได้จาก

$$J = J_m + (1/n^2)J_{max}$$

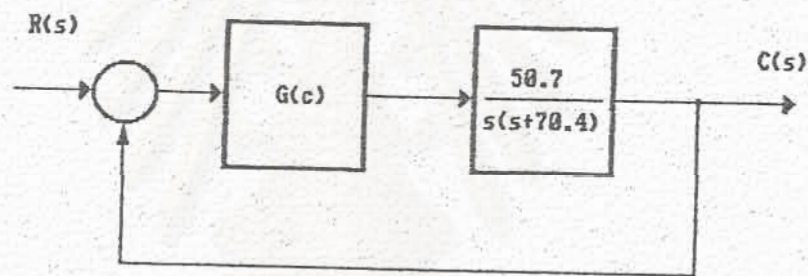


โดยที่

$$\begin{aligned} J_m &= \text{โมเมนต์แรงเฉื่อยของมอเตอร์} &= 3.88 \times 10^{-5} & \text{กิโลกรัมเมตร}^2 \\ J_{max} &= \text{โมเมนต์แรงเฉื่อยของแกนหมุน} &= 0.074 & \text{กิโลกรัมเมตร}^2 \end{aligned}$$

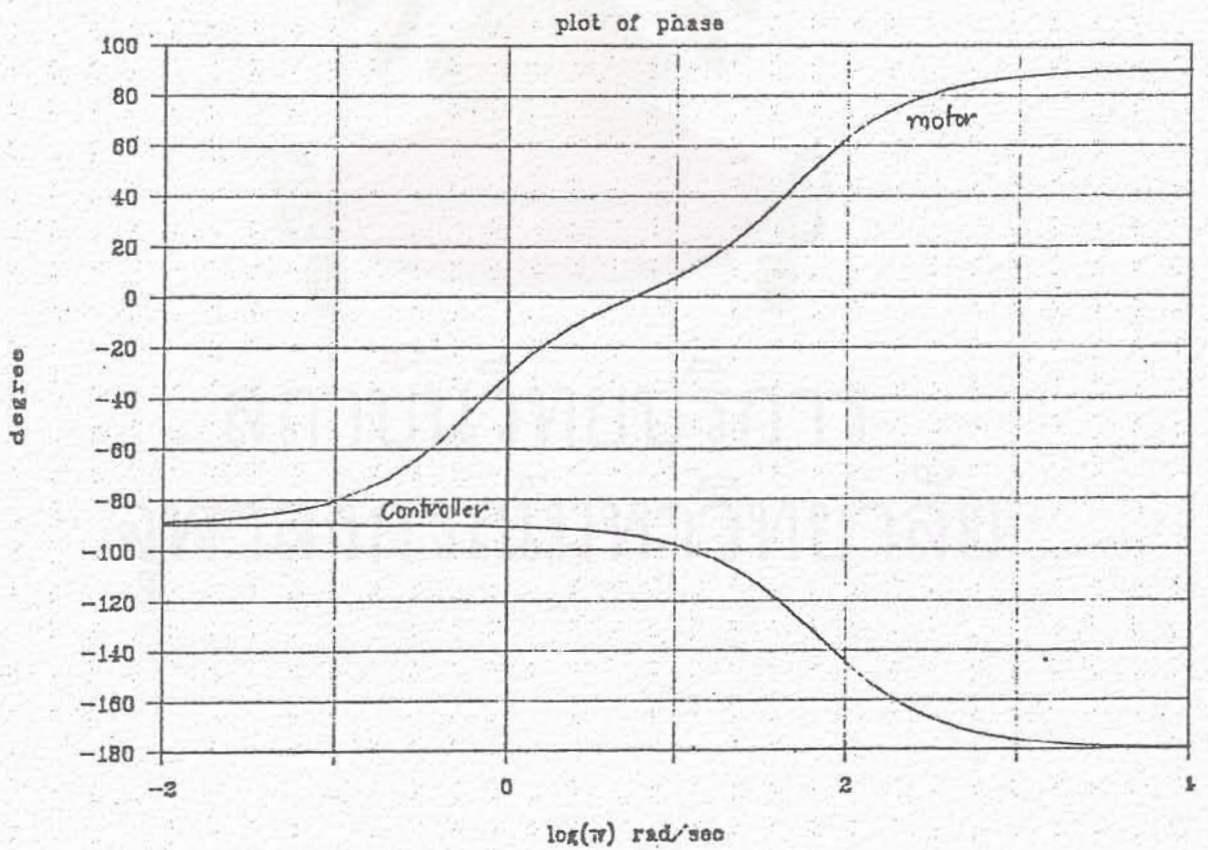
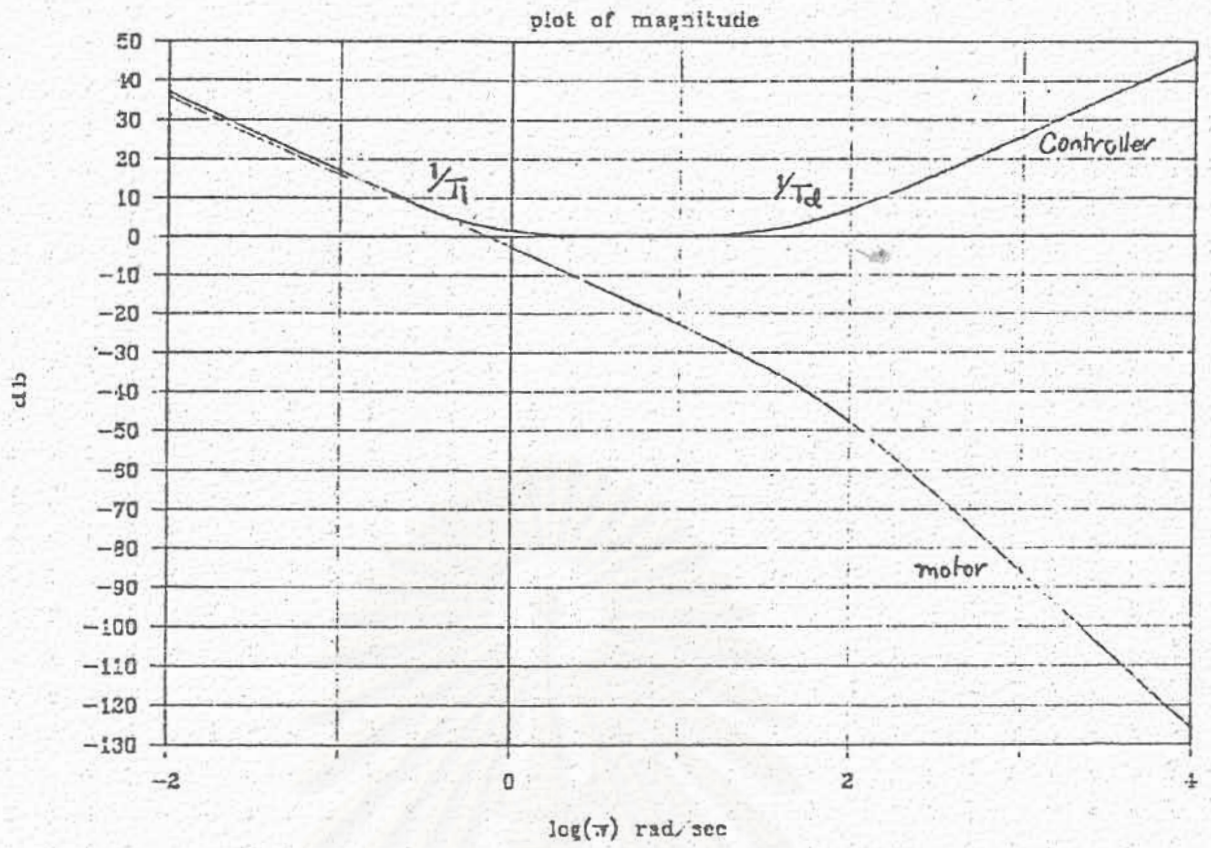
$$\begin{aligned} J &= 3.88 \times 10^{-5} + 0.074/100^2 \\ &= 3.95 \times 10^{-5} && \text{กิโลกรัมเมตร}^2 \end{aligned}$$

แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบ โดยให้ค่าอินดักแตนซ์ของมอเตอร์มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความต้านทานของขดลวดของมอเตอร์ จะได้บล็อกไดอแกรมดังรูปที่ 7

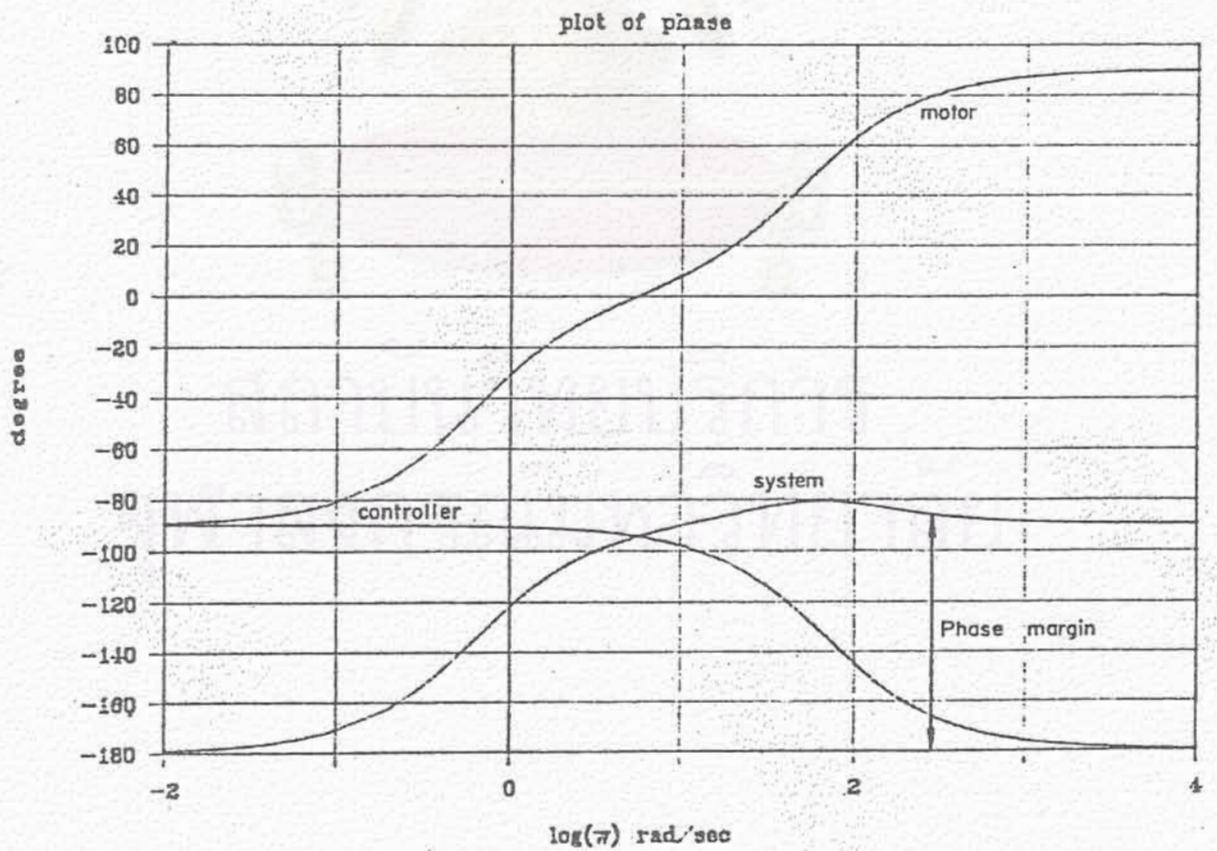
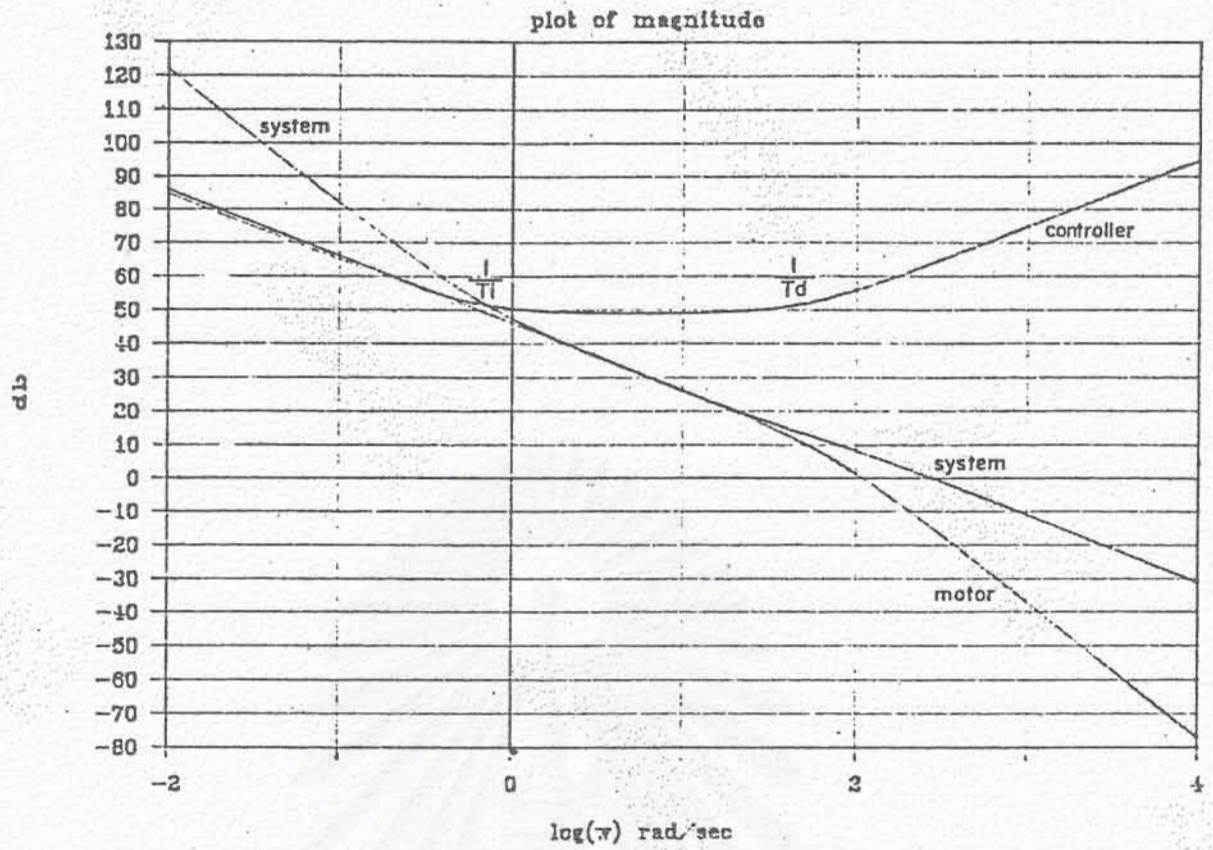


รูปที่ 7 บล็อกไดอแกรมของระบบการควบคุมแบบ พี ไอ ดี ของมอเตอร์แกนฐาน

การหาค่า  $K_p$  และ  $K_d$  จะพิจารณาจาก การตอบสนองความถี่ (frequency response) ของ ทรานส์เฟอว์ฟังก์ชันลูปเปิด (open loop transfer function) ของระบบ  $G(s)$  และของระบบควบคุมพี ไอ ดี ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 Bode Plot ของกนที่ต่ออกของนชนก



รูปที่ 9 โพลพลอตของระบบควบคุมแกนข้อศอกของแขนกล

จากรูปที่ 8 พบว่าการตอบสนองความถี่เปิด (open loop frequency response) ของระบบควบคุมแบบ พี ไอ ดี มีคอนเนอร์ฟรีควอนซ์ที่  $1/T_1$  และ  $1/T_2$  และมีมุมเฟส (Phase angle) อยู่ระหว่าง  $-90$  ถึง  $90$  องศา จากที่กล่าวมาแล้วว่าการออกแบบจะเลือกให้  $1/T_2$  มีค่าใกล้เคียงกับคอนเนอร์ฟรีควอนซ์ของระบบและระบบควรมีเฟสมาร์จินไม่น้อยกว่า  $45$  องศา ดังนั้นจากรูป 9 เลือกค่า  $1/T_2$  ให้เท่ากับ  $50$  เรเดียน/วินาที และ  $1/T_1$  เท่ากับ  $0.825$  ซึ่งให้ค่าของเฟสมาร์จินของทั้งระบบมีค่า  $90$  องศา เกนมาร์จินเป็น  $-8$  ซึ่งหมายความว่าค่าเกนมาร์จินสามารถเลือกให้มีค่าสูงได้ แต่ก็ต้องคำนึงถึงตอนสร้างจริงดังที่กล่าวมาแล้ว ฉะนั้นจึงเลือกค่า  $K_p$  เพื่อให้โพล (pole) ของระบบอยู่ทางด้านซ้ายมือของแกนจินตภาพ (Imaginary Axis) ของเอสเพลน (S-Plane) ในขณะเดียวกันก็เลือกให้การตอบสนองของระบบเป็นชนิด Overdamp นั่นก็คือ poles ทั้งหมดอยู่บน Real Axis ทางด้านซ้ายมือของ S-Plane เมื่อตรวจสอบค่าโพล (poles) ของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของระบบ จะได้ค่าโพล (pole) ที่  $-85.151$  ,  $-21.1$  และ  $-0.3387$  เมื่อค่า  $K$  มีค่าประมาณ  $280$  ซึ่งแสดงว่าระบบมีเสถียรภาพและมีการตอบสนอง (Response) เป็นแบบโอเวอร์แดมป์ (Overdamp)

จากสมการที่ 13-15 แทนค่า  $T_2$  และ  $T_1$  จะได้ค่าเกน  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  ดังนี้

$$\begin{aligned} K_p &= 280.5 \\ K_i &= 173.1 \\ K_d &= 5.5 \end{aligned}$$

จากรูปที่ 6 กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของมอเตอร์แกนหัวไหล่นี้ได้ดังนี้

$K_m$	=	12	โวลต์/โวลต์
$K_m$	=	0.191	นิวตันเมตร/แอมป์
$K_b$	=	0.191	โวลต์/(เรเดียน/วินาที)
$n$	=	90	
$R$	=	1.8	โอห์ม
$B$	=	$4.58 \times 10^{-5}$	กิโลกรัมเมตร <sup>2</sup> /วินาที
$J$	=	$3.49 \times 10^{-4}$	กิโลกรัมเมตร <sup>2</sup> /วินาที
$G(s)$	=	$40.54/s(s+58.23)$	
$K$	=	576	

เลือก  $T_2$ ,  $T_1$  ให้มีค่าเท่ากับ  $0.02$  และ  $2$  ซึ่งจะทำให้ระบบมีเฟสมาร์จิน  $70$  องศา และได้ค่าเกนดังนี้



$$\begin{aligned}
 K_p &= 581.8 \\
 K_i &= 288 \\
 K_d &= 11.5
 \end{aligned}$$

และในทำนองเดียวกันได้ค่าเกนของแกนฐานเป็น

$$\begin{aligned}
 K_p &= 323.6 \\
 K_i &= 174 \\
 K_d &= 6.2
 \end{aligned}$$

จากรายละเอียดการออกแบบข้างต้นสามารถสรุปผลการเลือกค่าตัวควบคุมของแขนกลทั้ง 3 แกนได้ดังตารางรูปที่ 10

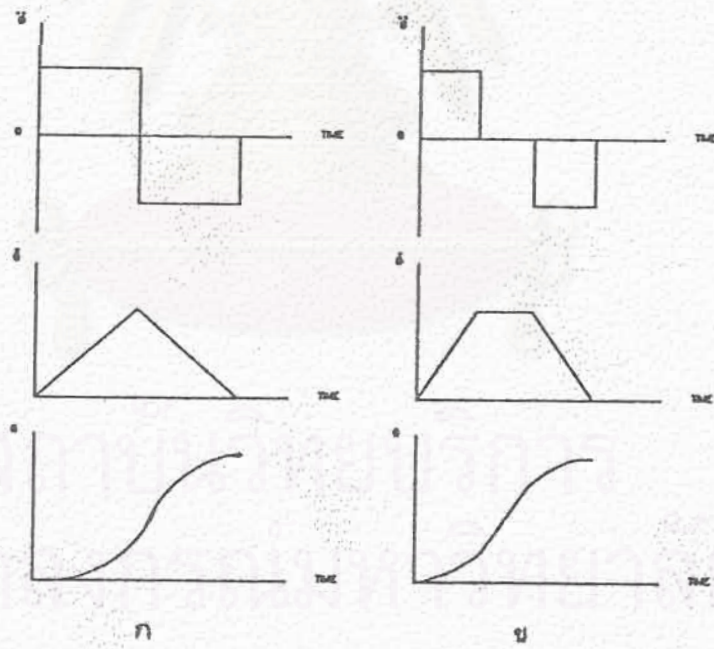
	แกนฐาน	แกนหัวไหล่	แกนข้อศอก
I design (Kg.m <sup>2</sup> )	1.80	2.40	0.15
J design (motor side)	$3.94 \times 10^{-4}$	$3.57 \times 10^{-4}$	$3.95 \times 10^{-5}$
e <sub>des</sub> (design) rad	0.005	0.005	0.005
Phase margin	90	70	90
System pole	-101.71, -42.4	-75.41, -51.42	-85.15, -21.1
	-0.075	-0.441	-0.338
K <sub>p</sub>	323.6	581.8	280.5
K <sub>i</sub>	174	288	173.1
K <sub>d</sub>	6.2	11.5	5.5

รูปที่ 10 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมของแขนกลสามแกน

## 2.5 การจำลองแบบลักษณะการเคลื่อนที่

เมื่อแขนกลทำงานปลายแขนกลจะเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย โดยที่แนวทางการเคลื่อนที่ระหว่างทางจนถึงจุดเป้าหมายจะเป็นอย่างไร ขึ้นอยู่กับชนิดของงานที่ทำ เช่น การเชื่อมแบบเชื่อมจุด ก็กับการเชื่อมแบบต่อเนื่อง จะมีลักษณะการเคลื่อนที่ต่างกัน การพิจารณาแนวทางการเคลื่อนที่ก็แบ่งได้สองแบบคือ 1. การเคลื่อนที่แบบตำแหน่งสู่ตำแหน่ง (Point to Point) สนใจเฉพาะตำแหน่งเริ่มต้นกับตำแหน่งของจุดเป้าหมาย ไม่กำหนดแนวทาง แต่ถึงระยะทางที่สั้นที่สุด, ความเร็ว และความเร่งของการเคลื่อนที่ระหว่างทางก่อนถึงจุดเป้าหมาย และ 2. การเคลื่อนที่แบบควบคุมต่อเนื่อง (Continuous Path) การเคลื่อนที่แบบนี้จะมีแนวทางการเคลื่อนที่, ความเร็วและความเร่งของการเคลื่อนที่ตามวิถีทางที่ถูกกำหนดให้ตั้งแต่ตำแหน่งเริ่มต้นถึงตำแหน่งสิ้นสุด

โดยในที่นี้ขอก้าวถึงเฉพาะแบบที่มีการเคลื่อนที่แบบตำแหน่งสู่ตำแหน่ง (point to point) ซึ่งปลายแขนกลและแต่ละข้อต่อมีอิสระในแนวทางการเคลื่อนที่ก่อนถึงเป้าหมาย การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ที่ต้องพิจารณาทั้งตำแหน่งหรือระยะทาง ความเร็ว และความเร่งของการเคลื่อนที่ สำหรับแขนกลแล้วข้อกำหนดขีดจำกัดของการเคลื่อนที่มีด้วยกันสามประการคือ ความเร็วสูงสุด ความเร่งสูงสุด และขอบเขตการเคลื่อนที่ การเคลื่อนที่ของปลายแขนกลแบบตำแหน่งสู่ตำแหน่ง แนวทางการเคลื่อนที่ของแต่ละลิงค์ตามรูปที่ 11.ก เป็นการเคลื่อนที่ที่ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ และใช้เวลาถึงจุดเป้าหมายสั้นที่สุด แต่ถ้าระยะการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น ความเร็วสูงสุดหรือปลายขอบแหลมของสามเหลี่ยมความเร็วจะมีค่ามากขึ้น และถ้าขนาดเพิ่มเกินขอบเขตสูงสุดของความเร็วที่กำหนดหรือเกินความเร็วสูงสุดของมอเตอร์ แนวทางการเคลื่อนที่ตามรูปที่ 11.ข จะเป็นแนวทางการเคลื่อนที่ที่มีการใช้พลังงานและเวลาอย่างมีประสิทธิภาพเช่นกัน การหาระยะการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นถึงตำแหน่งของจุดเป้าหมายของแขนกลอาศัย อินเวอร์สไคเนมาติก (Inverse Kinematic) เปลี่ยนตำแหน่งบนระบบแกนตั้งจากอ้างอิงเป็นมุมหมุนของแต่ละลิงค์ แล้วจึงสร้างแนวทางการเคลื่อนที่บนรูปแบบของมุมหมุนของแต่ละลิงค์



รูปที่ 11 แสดงแนวทางการเคลื่อนที่แบบตำแหน่งสู่ตำแหน่ง

การกำหนดแนวทางการเคลื่อนที่ เป็นการกำหนดตำแหน่ง, ความเร็ว และความเร่งที่เวลาใด ๆ พิจารณาจากรูปที่ 11.ก ระยะการเคลื่อนที่  $\Theta$  ใช้เวลาการเคลื่อนที่  $T$  ที่เวลา  $T/2$  ความเร็วของการเคลื่อนที่เป็น  $2\Theta/T$  และที่เวลา  $T/2$  นี้ความเร่งของการเคลื่อนที่เป็น  $4\Theta/T^2$  ซึ่งเป็นความเร็วและความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนที่ครั้งนี้ ด้วยกราฟความเร็วและความเร่งตามรูป พิจารณาระบบแกนกลที่มีความเร็วและความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนที่  $V_m, A_m$  ตามลำดับ กำหนดให้แกนกลเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็ว  $A_m$  ตามกราฟความเร่งรูปที่ 11.ก ซึ่งจะใช้เวลาในการเคลื่อนที่  $T_a$  นำระยะการเคลื่อนที่ และเวลาที่ใช้  $T_a$  มาหาความเร็วของยอดสามเหลี่ยม ถ้าระยะการเคลื่อนที่ไม่มาก ความเร็วของยอดสามเหลี่ยมยังไม่เกิน  $V_m$  แนวทางการเคลื่อนที่จะเป็นตามรูปที่ 11.ก เมื่อระยะการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นทำให้ความเร็วของยอดสามเหลี่ยมมีค่ามากขึ้น ถ้ามีค่าเกิน  $V_m$  แนวทางการเคลื่อนที่ก็จะเป็นตามรูปที่ 11.ข หรือจะพิจารณาการกำหนดแนวทางการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับเวลา ภายได้ขีดจำกัดความเร็ว  $V_m$  และความเร่ง  $A_m$  พบว่า  $T_a = (4\Theta/A_m)^{1/2}$  และ  $T_v = 2\Theta/V_m$  ถ้า  $T_v$  น้อยกว่าหรือเท่ากับ  $T_a$  แนวทางการเคลื่อนที่จะเป็นตามรูปที่ 11.ก แต่ถ้า  $T_v$  มากกว่า  $T_a$  แนวทางการเคลื่อนที่จะเป็นตามรูปที่ 11.ข ความสัมพันธ์ของเวลากับตำแหน่ง, ความเร็ว และความเร่งของแนวทางการเคลื่อนที่ทั้งสองแบบ หาได้โดยพิจารณาจากรูป 11.ก การเคลื่อนที่เป็นแบบความเร่งคงที่ แล้วอินทิเกรตหาความเร็ว และระยะการเคลื่อนที่ได้

$$\begin{aligned} \Theta &= a & 0 \leq t \leq T/2 \\ &= -a & T/2 \leq t \leq T \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \dot{\Theta} &= at & 0 \leq t \leq T/2 \\ &= a(T-t) & T/2 \leq t \leq T \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\Theta} &= at^2/2 & 0 \leq t \leq T/2 \\ &= a(Tt - t^2/2 - T^2/4) & T/2 \leq t \leq T \end{aligned} \quad (18)$$

ในทำนองเดียวกันสามารถหาความสัมพันธ์ของแนวทางการเคลื่อนที่ตามรูปที่ 11.ข ได้

$$\begin{aligned} \Theta &= a & 0 \leq t \leq t_1 \\ &= 0 & t_1 \leq t \leq t_2 \\ &= -a & t_2 \leq t \leq T \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \dot{\Theta} &= at & 0 \leq t \leq t_1 \\ &= V_m & t_1 \leq t \leq t_2 \\ &= a(T-t) & t_2 \leq t \leq T \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned}
\ddot{\theta} &= at^2/2 & 0 \leq t \leq t_1 \\
&= \theta_1 + V_m(t-t_1) & t_1 \leq t \leq t_2 \\
&= a[(T-t_2+t_1)(t-t_2+t_1) - (t-t_2+t_1)^2/2 - \\
&\quad (T-t_2+t_1)^2/4 + (\theta_2 - \theta_1)] & t_2 \leq t \leq T
\end{aligned} \tag{21}$$

การอธิบายความสัมพันธ์ของแนวการเคลื่อนที่ตามสมการ 16-21 นำไปเขียนเป็นโปรแกรมสร้างเป็นสัญญาณอ้างอิงป้อนเข้าให้ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดของโปรแกรมต่อไป

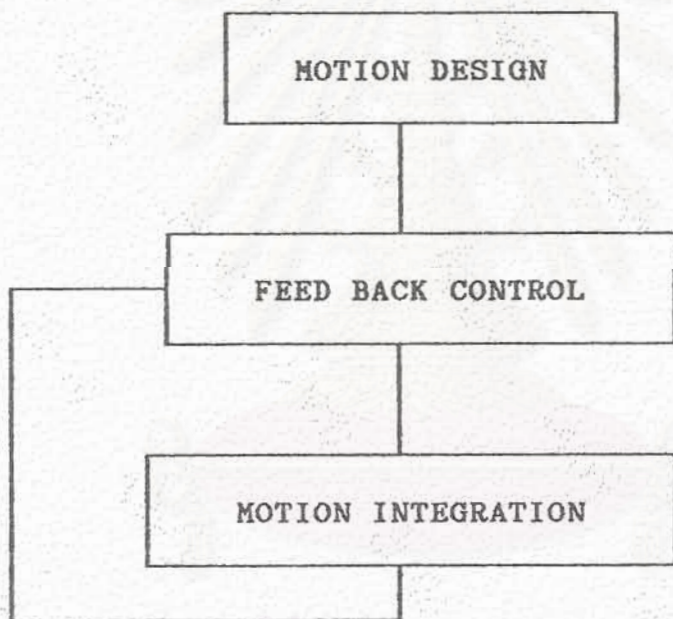
### 3. การทดลองและผลของการทดลอง

การทดสอบนี้จะทำการทดสอบโดยการสร้างแบบจำลองลงบนคอมพิวเตอร์และศึกษาถึงผลของระบบควบคุมที่สร้างขึ้น เมื่อได้ผลจากแบบจำลองนี้แล้ว ก็จะมีการสร้างแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมและทำการทดสอบกับแขนหุ่นยนต์ที่สร้างขึ้นนี้

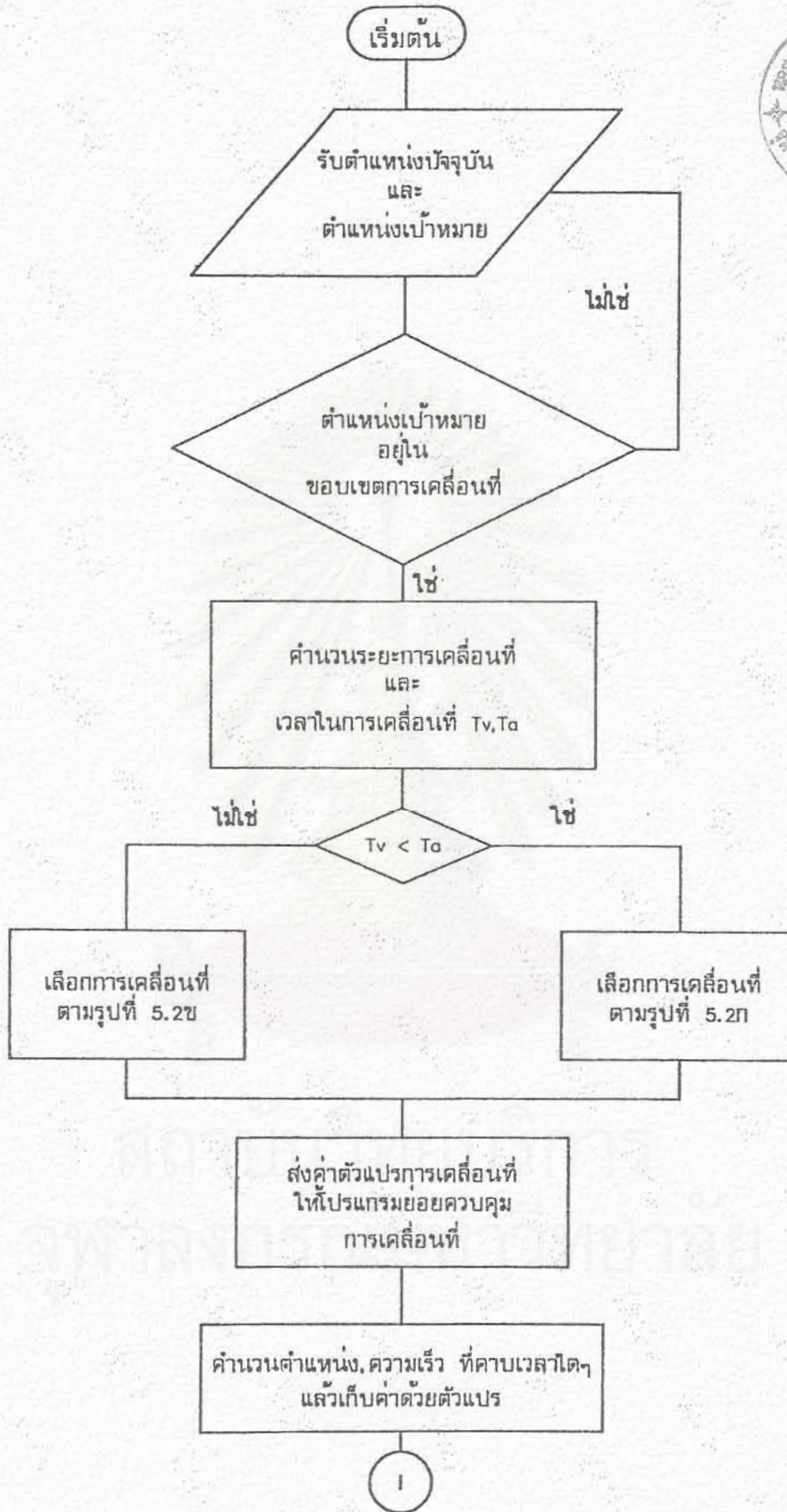
#### 3.1 การจำลองการเคลื่อนที่หุ่นยนต์อุตสาหกรรมบนเครื่องคอมพิวเตอร์

การจำลองแบบด้วยคณิตศาสตร์แทนการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมหรือระบบแขนกล 3 แกนทั้งระบบ ต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของทั้งสามส่วนที่ได้กล่าวแล้ว มาสร้างความสัมพันธ์ดังรูปที่ 12 การคำนวณผลการเคลื่อนที่ต้องอาศัยคอมพิวเตอร์ โดยมีไฟล์ชาร์ทการคำนวณดังรูปที่ 13-15 โปรแกรมย่อยทั้งหมดถูกเรียกใช้จากโปรแกรมหลักที่มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการคำนวณ ซึ่งการใช้โปรแกรมย่อยแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

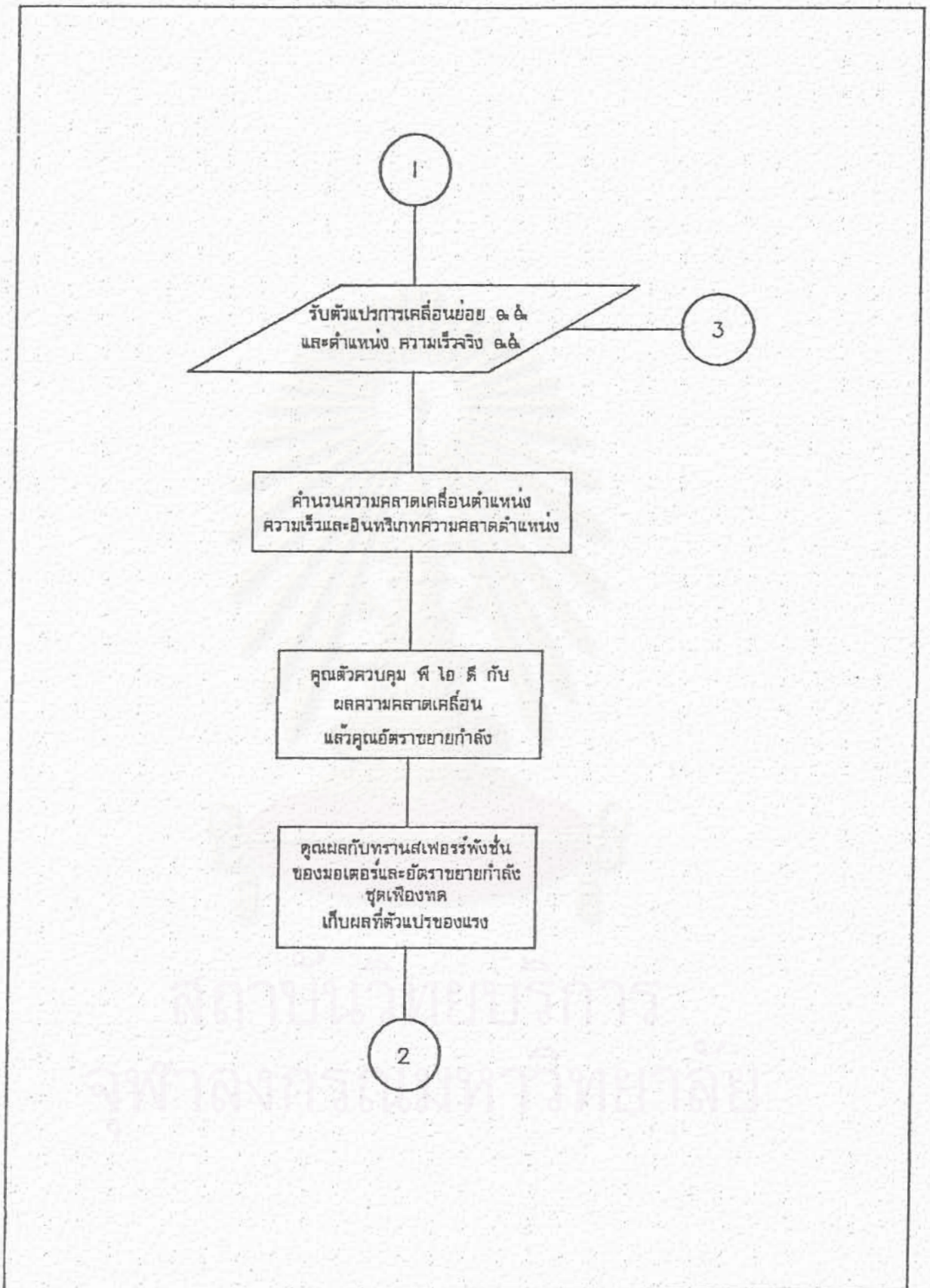




รูป 12 การจำลองแบบหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

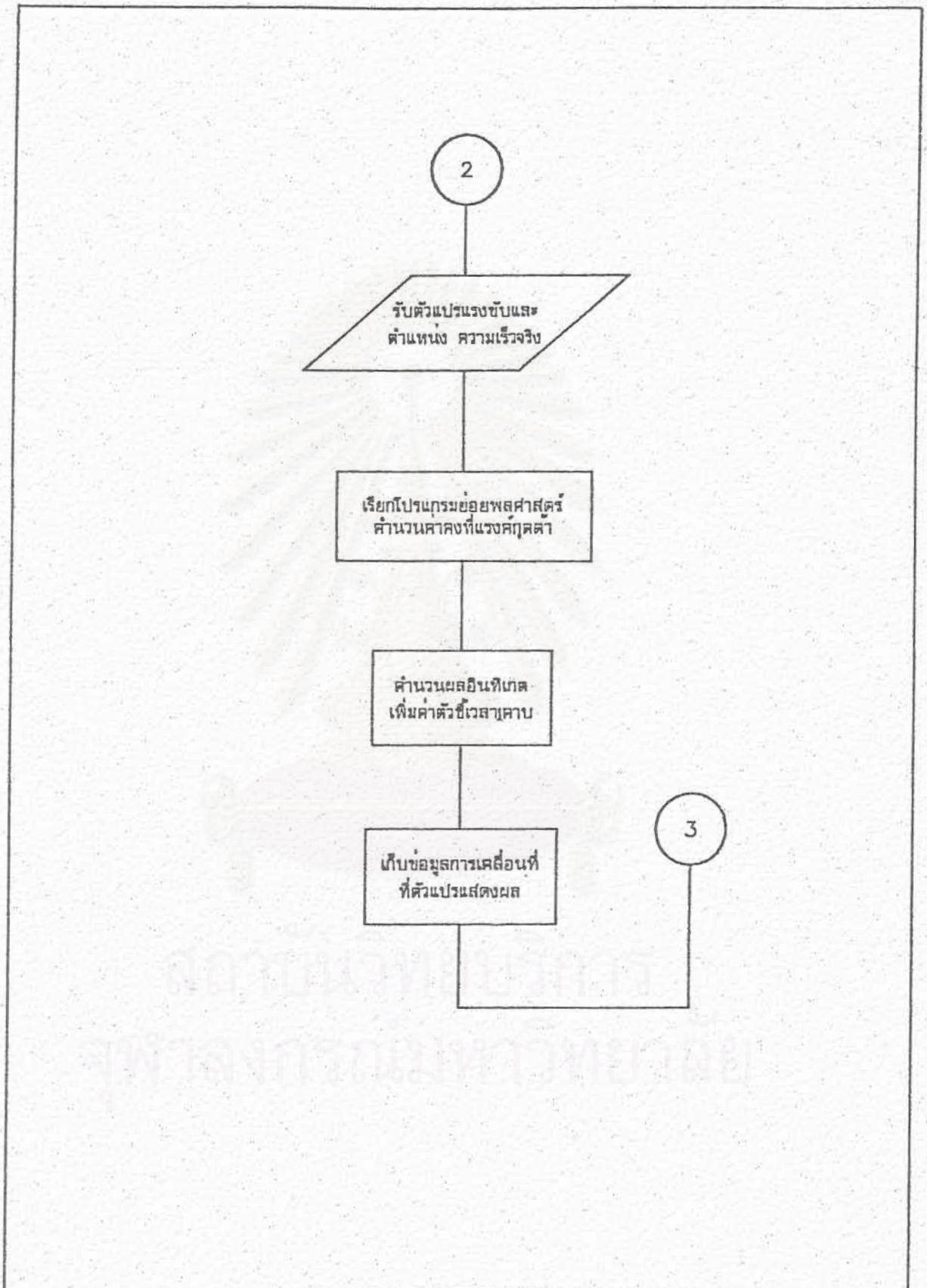


รูปที่ 13 โฟลว์ชาร์ตโปรแกรมกำหนดแนวทางการเคลื่อนที่



รูปที่ 14

ไฟล์ชาร์ตโปรแกรมควบคุมการเคลื่อนที่แบบป้อนกลับ



รูปที่ 15

โพลซาร์ทโปรแกรมอินทิเกรตหาผลการเคลื่อนที่

1. โปรแกรมย่อยกำหนดแนวทางการเคลื่อนที่ (Motion Design) เป็นส่วนสร้างข้อมูลการเคลื่อนที่ ณ คาบใดระหว่างตำแหน่งเริ่มต้นถึงตำแหน่งเป้าหมายการเคลื่อนที่ของลิงค์ทั้งสามให้กราฟความเร็วเป็นรูปสามเหลี่ยมดังได้กล่าวมาแล้ว หรือกล่าวได้ว่าโปรแกรมย่อยส่วนนี้เป็นการสร้างสัญญาณอ้างอิงอินพุทให้ระบบควบคุม โปรแกรมย่อยนี้เรียกใช้โดยมีรูปแบบเป็น  $ref(zs, zf, nl)$  โดยที่  $zs, zf$  เป็นออร์เรย์อินพุทของตำแหน่งเริ่มต้น และตำแหน่งเป้าหมายของลิงค์ 1-3 ตามลำดับ สำหรับค่าตามเวลาส่งข้อมูล (smp) ความเร่งสูงสุด (amx) และความเร็วสูงสุด (vmx) สามารถกำหนดและเปลี่ยนค่าได้จากโปรแกรมหลัก เพื่อใช้สำหรับคำนวณข้อมูลการเคลื่อนที่ทั้งหมดแล้วนำไปเก็บไว้ด้วยออร์เรย์อินพุทของโปรแกรมหลักโดยมีตัวแปร  $nl$  เก็บค่าจำนวนออร์เรย์ทั้งหมดส่งเป็นเอาต์พุท รายละเอียดโปรแกรมดูจากภาคผนวก จ. และไฟล์ซาร์ทดูจากรูปที่ 13

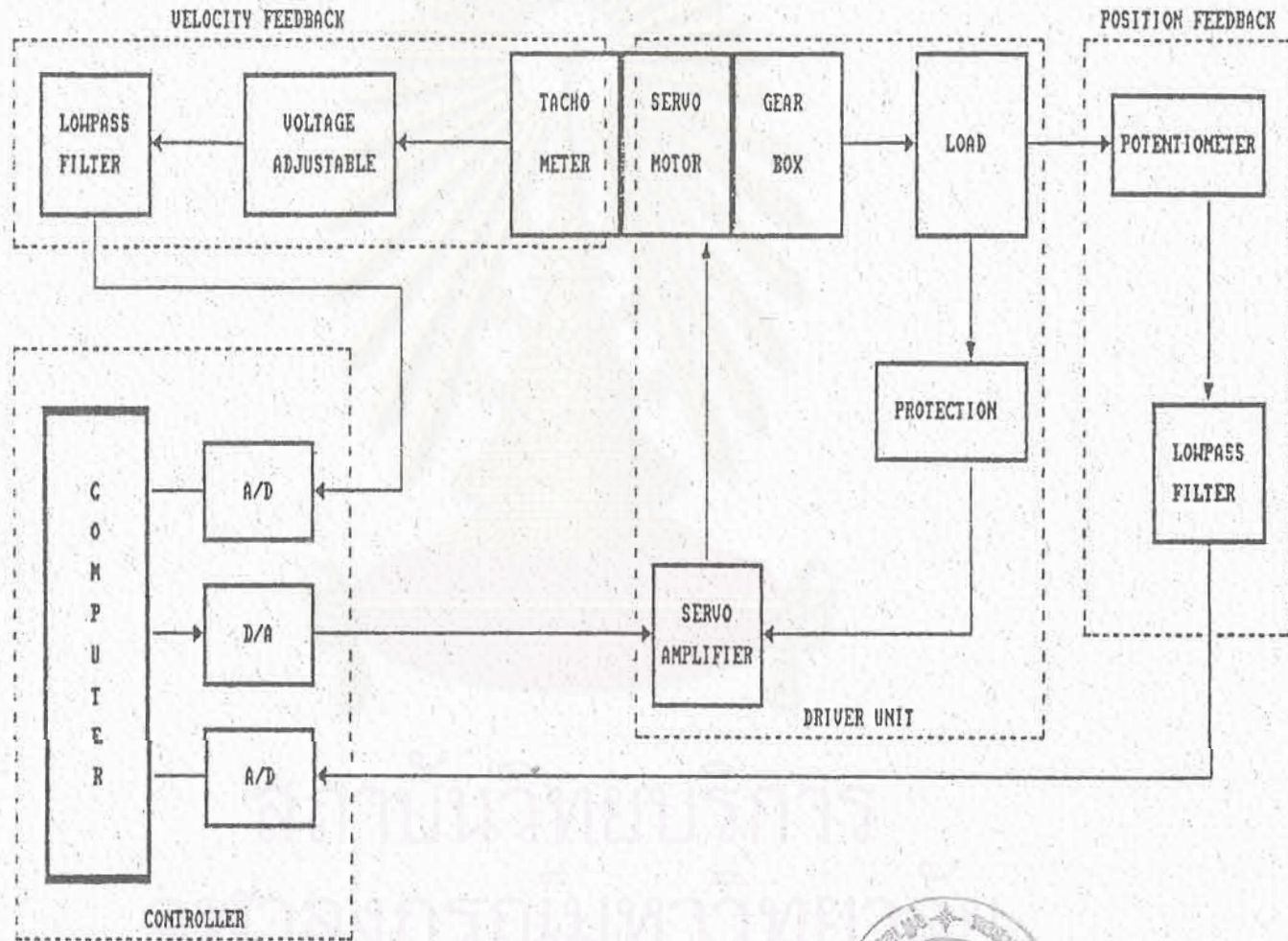
2. โปรแกรมย่อยควบคุมการเคลื่อนที่แบบป้อนกลับ (Feedback Control) เป็นส่วนคำนวณขนาดของแรงที่ส่งออกไปควบคุมการเคลื่อนที่ของลิงค์ทั้งสาม ซึ่งมีรูปแบบการเรียกใช้เป็นการเรียกใช้  $ctrl-sim(chk)$  โดยที่  $chk$  เป็นอินพุทบอกจำนวนของข้อมูลการเคลื่อนที่ของลิงค์ สำหรับค่าคงที่ที่ถูกกำหนดให้เฉพาะลิงค์ในโปรแกรมย่อยนี้คือ ค่าคงที่อัตราขยาย และทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของมอเตอร์แทนด้วย  $km$  ค่าคงที่อัตราทดกำลังและประสิทธิภาพการทดกำลังแทนด้วย  $n$  ส่วนค่าคงที่ของตัวควบคุม  $kp, kj, kd$  สามารถกำหนดและเปลี่ยนค่าได้จากโปรแกรมหลักและข้อมูลของแรงที่คำนวณได้ถูกเก็บด้วยออร์เรย์ของโปรแกรมหลัก รายละเอียดโปรแกรมดูจากภาคผนวก จ. ไฟล์ซาร์ทดูจากรูปที่ 14

3. โปรแกรมย่อยอินทิเกรตหาผลการเคลื่อนที่ (Motion integration) เป็นการอินทิเกรตทางนิวเมอริคัลด้วยวิธีรุ่งกุดต้า โดยแยกส่วนของฟังก์ชันที่ต้องการอินทิเกรต หรือแบบจำลองพลศาสตร์ของแขนกลเป็นโปรแกรมย่อยจากโปรแกรมย่อยอินทิเกรต ซึ่งมีรูปแบบของการเรียกใช้เป็นการเรียกใช้  $romech(nofe, x, y, f)$  โดยที่  $nofe$  บอกจำนวนของสมการอนุพันธ์อันดับที่ 1  $x$  เป็นเวลาใดๆ  $y$  เป็นตัวแปรอนุพันธ์  $h$  เป็นค่าของคาบเวลาของการส่งสัญญาณควบคุมและ  $f$  เป็นขนาดของแรงที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ การคำนวณของโปรแกรมย่อยนี้จะเรียกโปรแกรมย่อยฟังก์ชันด้วยรูปแบบ  $fcn(nofe, xfen, yfen, ydot, f)$  โดยที่  $yfen$  เป็นค่าปัจจุบันของอนุพันธ์  $ydot$  เป็นค่าของอนุพันธ์ที่เวลาเพิ่มขึ้น 1 คาบหรือผลการเคลื่อนที่เมื่อมีแรง  $F$  มากกระทำต่อลิงค์ ซึ่งจะเป็ตำแหน่งปัจจุบันของคาบเวลาต่อมา รายละเอียดโปรแกรมดูจากภาคผนวก จ. ไฟล์ซาร์ทดูจากรูปที่ 15

### 3.2 การเชื่อมโยงระบบแขนกลกับคอมพิวเตอร์

ระบบแขนกลที่ใช้สำหรับการทดลองนี้สามารถแยกออกได้เป็น 2 ส่วนคือ 1. ส่วนกลไกประกอบด้วย โครงสร้างของแขนกลทั้งสามแกน มอเตอร์ขับเคลื่อน และชุด

เพื่อลดความเร็วและขยายแรงบิด 2. ส่วนควบคุมประกอบด้วย คอมพิวเตอร์  
อุปกรณ์แปลงสัญญาณดิจิทัลให้เป็นสัญญาณอนาลอก ทรานสดิวเซอร์วัดสัญญาณตำแหน่งและ  
ความเร็วเพื่อป้อนกลับไปสู่ระบบควบคุม และอุปกรณ์ขยายสัญญาณควบคุม ซึ่งมีการเชื่อม  
โยงกันดังรูปที่ 16 โดยที่การควบคุมเริ่มจากคอมพิวเตอร์รับคำสั่งเป้าหมายการเคลื่อนที่นำ  
มาสร้างอนุกรมสัญญาณอ้างอิงซึ่งใช้เป็นสัญญาณคำสั่งตำแหน่ง สัญญาณอ้างอิงที่สร้างไว้นี้จะ  
นำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณที่วัดตำแหน่งจริงของข้อต่อที่รับกลับผ่านทาง A/D (Analog  
to Digital Converter) เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมส่งที่จะส่งผ่านทาง D/A  
(Digital to Analog Converter) ไปเข้าสู่ชุดขยายสัญญาณ (Servo amplify)  
สัญญาณที่ออกจากชุดขยายสัญญาณนี้จะถูกส่งต่อไปขับเคลื่อนมอเตอร์เพื่อหมุนกลไกของแขนกล  
เป็นอย่างนี้เรื่อยไปจนถึงเป้าหมายที่ต้องการ ขณะที่ข้อต่อต่าง ๆ ของแขนกลหมุนนั้นตำแหน่ง  
ขณะใดขณะหนึ่งก็สามารถ รู้ได้โดยอ่านค่าที่ตัวเซ็นเซอร์ที่วัดตำแหน่งและความ  
เร็ว สัญญาณของชุดป้อนกลับนี้จะส่งผ่านชุดกรองสัญญาณรบกวนก่อนที่จะส่งกลับเข้า A/D  
นอกจากนี้ แขนกลได้ติดตั้งสวิทช์หยุด (Limit Switches) การทำงานของชุดขยายสัญญาณขับ  
เคลื่อนมอเตอร์ เพื่อป้องกันไม่ให้แกนแขนกลเคลื่อนที่เกินขอบเขตจนได้รับความเสียหาย  
ในรูปที่แสดงข้างต้นนั้นเป็นการเชื่อมโยงแขนกลแกนเดียวกับระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์  
ส่วนแขนกลที่ใช้ในการทดสอบจะมี 3 แกน ใช้คอมพิวเตอร์เพียงชุดเดียวควบคุม แต่ใช้  
อุปกรณ์อื่น ๆ ดังรูปเป็นจำนวน 3 ชุดเมื่อเป็นระบบเต็ม ทั้งสามข้อต่อจะเคลื่อนที่ไปด้วย  
แรงบิดที่ส่งออกจากชุดขยายสัญญาณ โดยที่แรงบิดนี้จะเปลี่ยนไปตามเวลาในการสุ่ม  
(sampling rate) โดยจะปฏิบัติตามขั้นตอนการควบคุมของแขนกลแกนเดียว จนกระทั่ง  
แขนของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งซึ่งส่งควบคุมโดยสัญญาณอนุกรมที่สร้างขั้นนั้น ในช่วง  
เวลาการสุ่มนั้นคอมพิวเตอร์จะทำการคำนวณ แรงบิดทั้งสามของแต่ละข้อต่อ เมื่อได้แรงบิด  
แล้วจึงส่งออกไปยังชุดขยายสัญญาณที่เดียว โดยผ่านชุดแปลงสัญญาณจาก D/A



### 3.3 รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบแขนกล

1. แขนกล เป็นแขนกลแบบแกนหมุนสามแกนที่สร้างจากอลูมิเนียม โดยมีโครงสร้างตั้งแบบในภาคผนวก ก. และมีขอบเขตการหมุนของข้อต่อฐาน (waist) หัวไหล่ (shoulder) และข้อศอก (elbow) เป็นมุมหมุน 180, 165 และ 145 องศาตามลำดับ

2. มอเตอร์ ใช้เซอร์โวมอเตอร์กระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร มีชุดเฟืองทดและทาคิเมตรประกอบสำเร็จ ติดตั้งตรงตำแหน่งข้อต่อฐาน หัวไหล่ และข้อศอกใช้มอเตอร์รุ่น E652-MG, E652-MG และ E586-MG ของบริษัท ElectroCraft มีอัตราทดเฟือง 1:90, 1:90 และ 1:100 ตามลำดับ สำหรับพารามิเตอร์อื่นของมอเตอร์ดูรายละเอียดได้จากภาคผนวก ก.

3. ทาคิเมตร เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วการหมุนของมอเตอร์โดยให้ผลออกมาเป็นค่าแรงดันที่แปรโดยตรงกับความเร็วตามสมการที่ 22

$$V_{tac} = K_t R_p \omega \quad (22)$$

ค่าคงที่  $K_t$  ของทาคิเมตรดูจากรายละเอียดของมอเตอร์ในภาคผนวก ก. ซึ่งที่ความเร็วสูงสุดของการเคลื่อนที่แขนกล ทาคิเมตรทั้ง 3 ชุดให้แรงดันไม่เกิน #80 โวลต์

4. ตัวลดแรงดัน เป็นอุปกรณ์ลดแรงดันสูงที่วัดได้จากทาคิเมตรให้อยู่ในช่วงแรงดัน 0 ถึง 9 โวลต์เพื่อให้เหมาะสมกับแรงดันอินพุทของอนาลอกดิจิตอลคอนเวอร์เตอร์ ตัวลดแรงดันที่ใช้สำหรับแกนฐาน หัวไหล่ และข้อศอกมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 23, 24 และ 25 ตามลำดับ

$$V_{out1} = -0.5817V_{tac1} + 4.515 \quad (23)$$

$$V_{out2} = -0.05304V_{tac2} + 4.495 \quad (24)$$

$$V_{out3} = -0.0532V_{tac3} + 4.525 \quad (25)$$

5. โปเทนทิโอมิเตอร์ เป็นเครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเชิงกล มีลักษณะเป็นตัวต้านทานไฟฟ้าแบบปรับค่าได้ โดยจะป้อนแรงดันคงที่ +9 โวลต์ที่ปลายข้างที่อยู่กับที่ แรงดันเอาต์พุทที่ปลายของส่วนที่เคลื่อนที่ของโปเทนทิโอมิเตอร์ จะแปรผันโดยตรงกับตำแหน่งของการเคลื่อนที่และจะมีค่าไม่เกินแรงดันที่ป้อนเข้าไป ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันออกกับมุมของแกนฐานหัวไหล่ และข้อศอกของแขนกลหาได้ดังสมการที่ 26, 27 และ 28 ตามลำดับ

$$\text{degree} = 36.1446 V_{out} + -63.9759 \quad (26)$$



$$\text{degree} = -36.1050 V_{out} + 237.57 \quad (27)$$

$$\text{degree} = -36.3408 V_{out} + 284.18 \quad (28)$$

6. ตัวกรองความถี่สูง เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กรองสัญญาณรบกวนความถี่สูงที่ปนมากับสัญญาณป้อนกลับ จะต่ออยู่ระหว่างอุปกรณ์สร้างสัญญาณป้อนกลับกับขอนาลอกดิจิทัลคอนเวอร์เตอร์

7. ลิเนียร์เพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์ เป็นอุปกรณ์ขยายสัญญาณควบคุมที่เป็นแรงดันและกระแส เพื่อส่งไปขับเคลื่อนมอเตอร์ ลิเนียร์เพาเวอร์แอมพลิไฟร์ที่ใช้ทุกตัวสามารถรับแรงดันทางด้านอินพุต #9 โวลต์ และจะให้แรงดันทางด้านเอาต์พุต #36 โวลต์ 2 ชุด #120 โวลต์ 1 ชุดความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับแรงดันเอาต์พุต เป็นดังสมการที่ 29, 30 และ 31

$$V_{out1} = 4.022 V_{in1} + 0.026 \quad (29)$$

$$V_{out2} = 12.78 V_{in2} - 6.48 \quad (30)$$

$$V_{out3} = 3.49 V_{in3} + 0.51 \quad (31)$$

8. ดิจิตอลอนาลอกคาร์ด เป็นชุดแปลงสัญญาณระหว่างสัญญาณอนาลอกกับสัญญาณดิจิทัลเพื่อการทำงานร่วมกันได้ระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ขับเคลื่อนและอุปกรณ์ตรวจวัดอื่น ๆ โดยที่คาร์ดประกอบด้วย

1. ชุดแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาลอก มี 1 ช่อง ทำหน้าที่แปลงสัญญาณดิจิทัล 12 บิตเป็นสัญญาณแรงดันอนาลอก -9 ถึง +9 โวลต์ มีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขับออก  $V_{out}$  กับข้อมูลดิจิทัลดังสมการที่ 32

$$V_{out} = 0.004334D - 8.924 \quad (32)$$

2. ชุดแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลมี 16 ช่อง ทำหน้าที่แปลงสัญญาณอนาลอก 0 ถึง 9 โวลต์เป็นสัญญาณดิจิทัล 12 บิต มีความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลดิจิทัลกับแรงดันอินพุต ดังสมการที่ 33

$$V_{in} = 460.856D + 4.26 \quad (33)$$

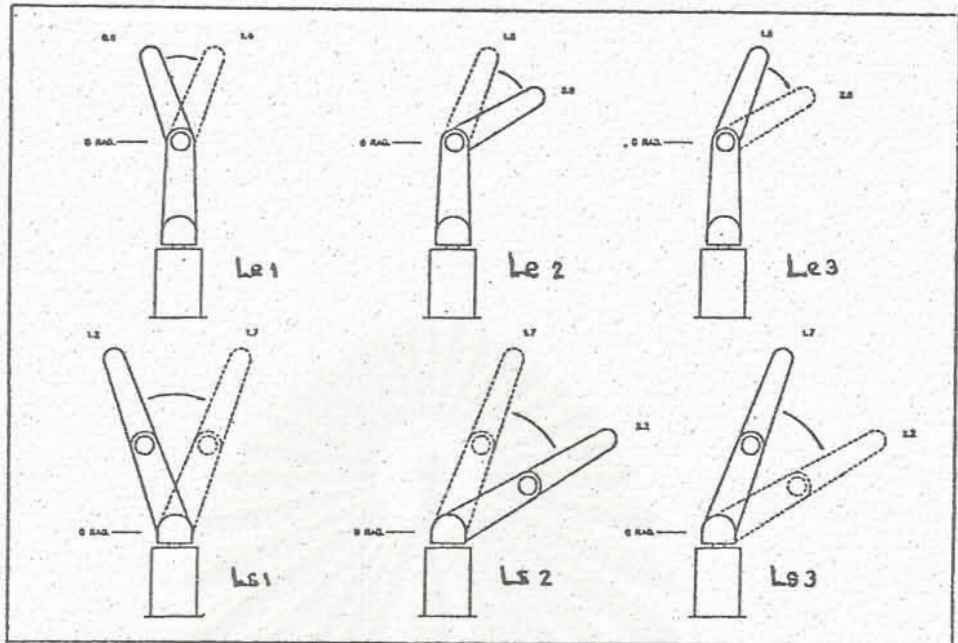
9. ชุดแยกสัญญาณและรักษาระดับแรงดัน เป็นอุปกรณ์แยกสัญญาณอินพุต 1 ช่อง ให้เป็นสัญญาณเอาต์พุต 3 ช่อง การทำงานใช้สัญญาณลอจิกเลือกสภาวะให้สัญญาณเอาต์พุต ช่วงใดช่วงหนึ่งมีแรงดันตามสัญญาณอินพุตแล้วใช้สัญญาณลอจิกควบคุมให้ช่องทางนั้นกลับสู่สภาวะรักษาระดับแรงดันเอาต์พุต

10. คอมพิวเตอร์ ใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ 16 บิต (IBM compatible) ทำงานที่ความถี่สัญญาณนาฬิกา 8 เมกกะเฮิรตซ์ (MHz) มีอุปกรณ์ช่วยประมวลผลทางคณิตศาสตร์ (math-coprocessor, Intel 8087)

### 3.4 การทดสอบการเคลื่อนที่ของขนท่อนยนต์อุตสาหกรรม

การทดสอบขนท่อนตามโครงการนี้ ก็เพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพของการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการควบคุม สิ่งที่จะแสดงถึงประสิทธิภาพในการทำงานของระบบขนท่อนได้มี 2 ประการคือ 1. ความสามารถในการเคลื่อนที่ หมายถึงการเคลื่อนที่และหยุดในตำแหน่งที่ต้องการ ได้อย่างแม่นยำของขนท่อน โดยมีความเร็วและอัตราเร่งของการเคลื่อนที่ที่เหมาะสม โดยไม่เกิดการสั่น (oscillate) 2. ความสามารถในการรับภาระน้ำหนักสิ่งของที่ต้องเคลื่อนย้ายไปด้วย ตัวแปรค่าในการทดสอบมี 3 ตัวคือ อัตราเร่งของการเคลื่อนที่, มุมของการเคลื่อนที่ และ ภาระจากน้ำหนักในการเคลื่อนที่ไปด้วย จะเห็นว่าการเคลื่อนที่ของขนท่อนนั้นเป็นการเคลื่อนที่ในแนวราบ ผลกระทบเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลกจึงไม่มีผลโดยตรงกับการเคลื่อนที่ การทดสอบจะทดสอบในช่วงการเคลื่อนที่เพียงช่วงเดียว ส่วนแกนหัวไหล่และแกนข้อศอกจะเห็นว่าความโน้มถ่วงของโลกจะมีผลโดยตรงกับแรงบิดที่ใช้ขับเคลื่อนข้อต่อ โดยจะเป็นการเพิ่มหรือลดภาระให้ระบบ ดังนั้นการทดสอบจึงจะให้มีการเคลื่อนที่ 3 ลักษณะดังแสดงในรูปที่ 17

1. เคลื่อนที่ผ่านแนวตั้ง
2. เคลื่อนที่ในทิศทางด้านแรงโน้มถ่วงเข้าหาแนวตั้ง
3. เคลื่อนที่จากแนวตั้งไปในทิศทางด้านแรงโน้มถ่วงโลก



รูปที่ 17 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ในการทดสอบแขนกล

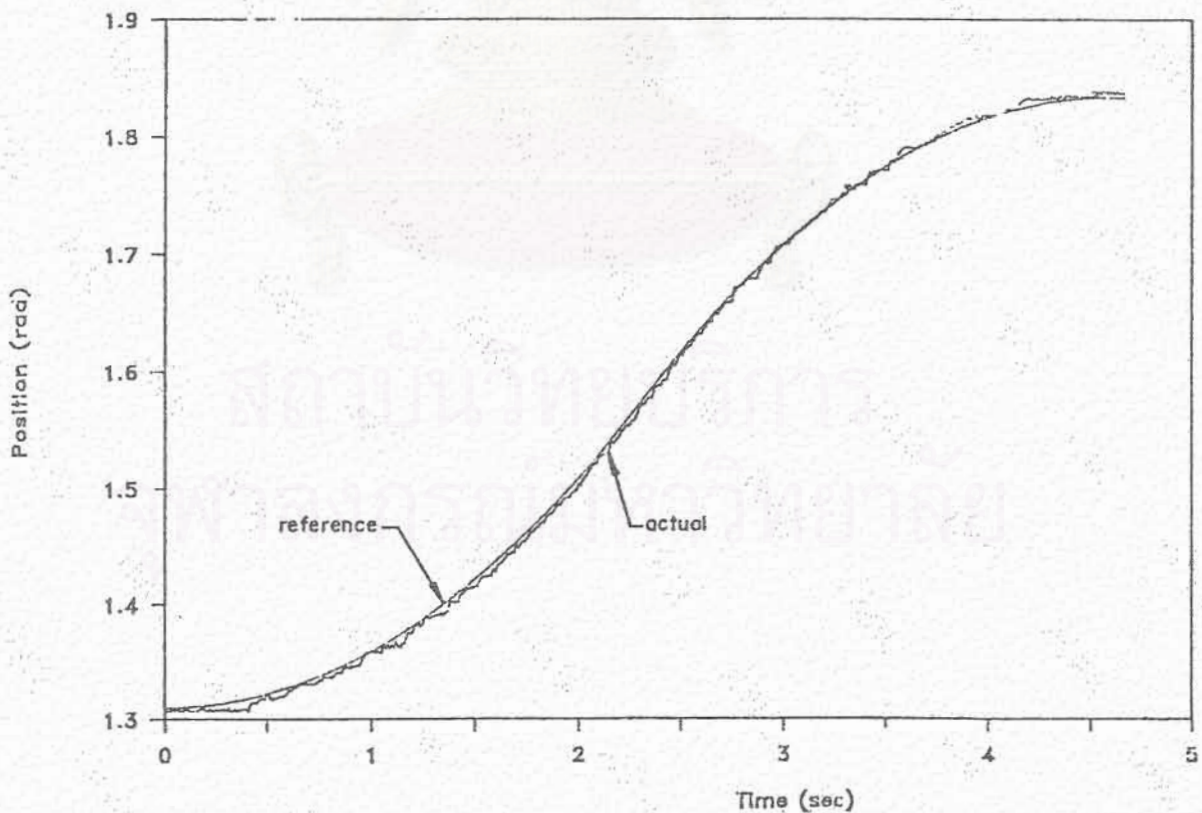
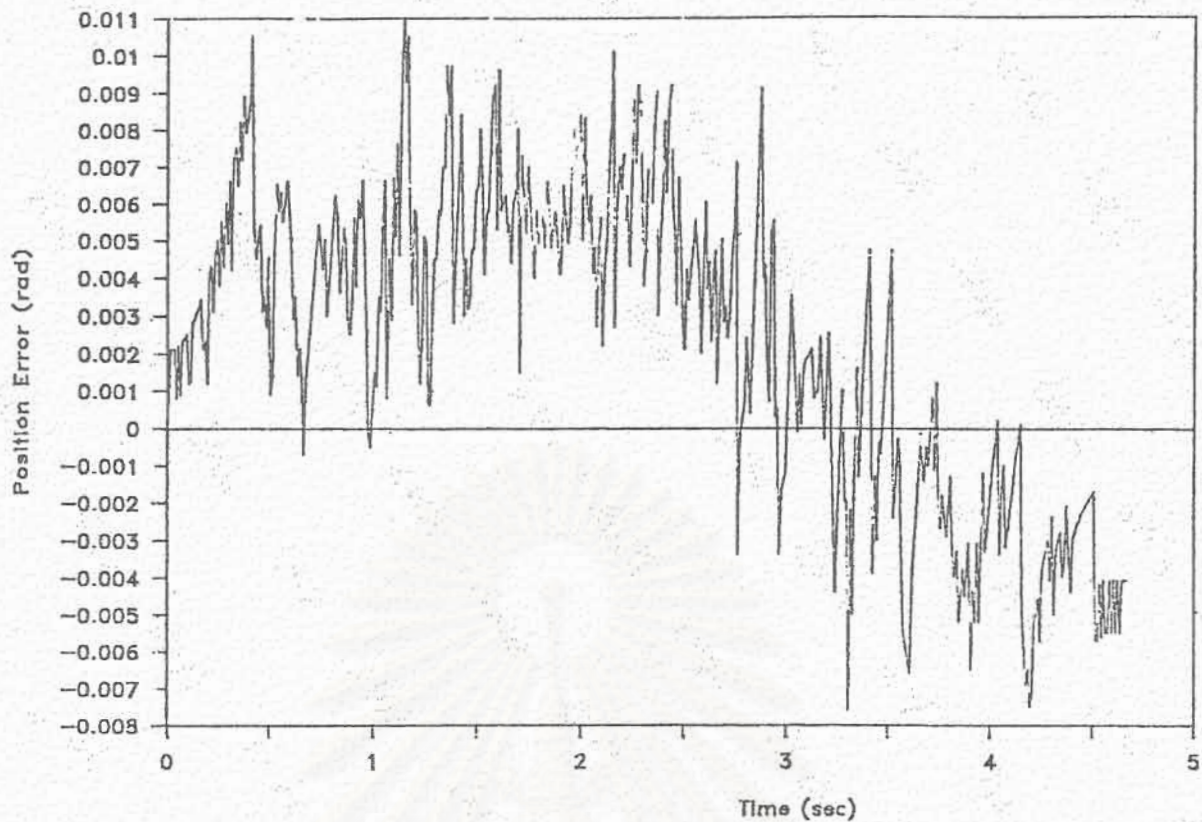
ในการทดสอบจะเก็บผลของตำแหน่ง และความเร็วที่เกิดขึ้นจริง นำมาเปรียบเทียบกับจุดอ้างอิงที่กำหนด เพื่อค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง ในการทดสอบตัวควบคุมของแกนต่าง ๆ มีค่าดังนี้

แกนฐาน	$K_p = 323.6$	, $K_i = 174$	, $K_d = 6.2$
แกนหัวไหล่	$K_p = 581.8$	, $K_i = 288$	, $K_d = 11.5$
แกนข้อศอก	$K_p = 280.5$	, $K_i = 173$	, $K_d = 5.5$

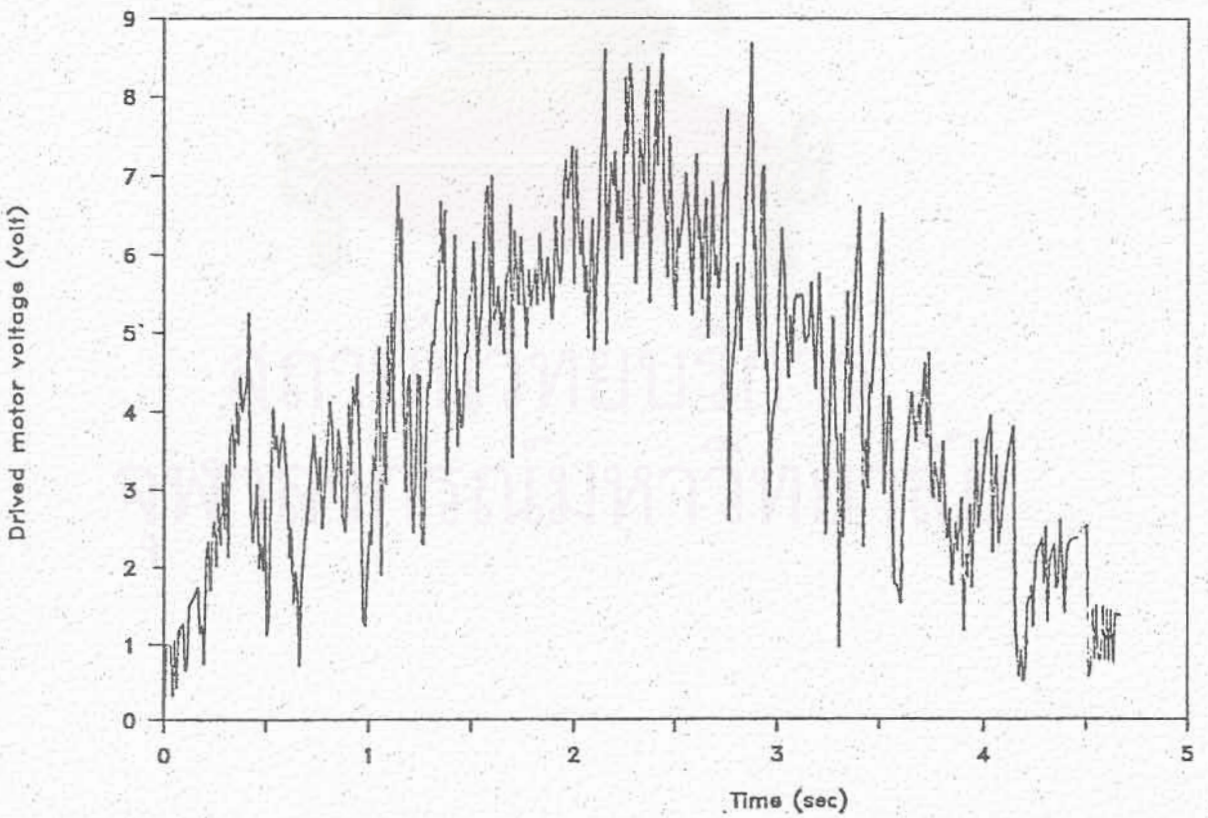
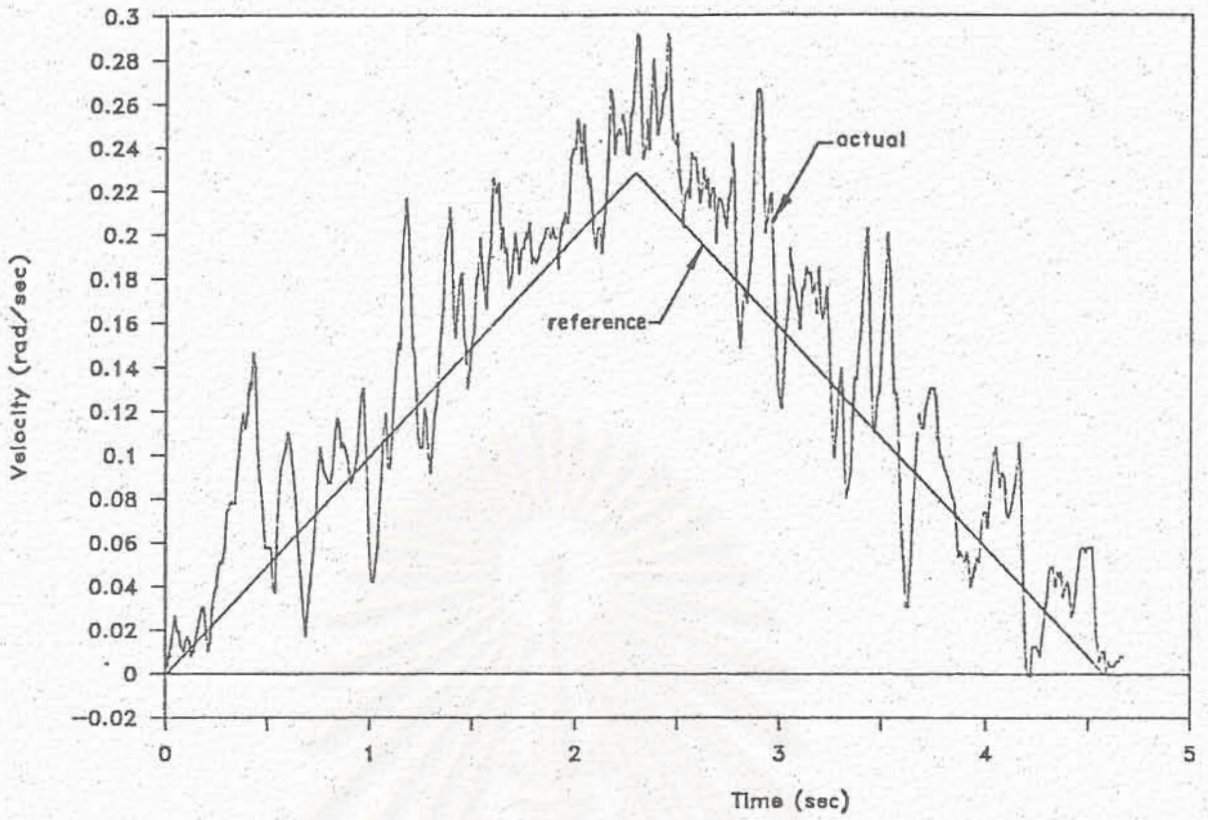
ใช้คาบเวลาในการสุ่มค่า 10 มิลลิวินาที ได้ผลการทดลองดังนี้

1. การทดลองกับตัวแปรการเคลื่อนที่ เป็นการแสดงผลความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งของการเคลื่อนที่ที่อัตราเร่ง 0.1, 0.25, 0.5 และ 1 เรเดียน/วินาที<sup>2</sup> มีความเร็วสูงสุดของการเคลื่อนที่ไม่เกิน 0.5 เรเดียน/วินาที<sup>2</sup> และมีตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งเป้าหมายดังกล่าวข้างต้น โดยได้ทำการทดลองควบคุมแขนกลเป็น 2 ลักษณะคือ

1.1 ทดสอบด้วยการควบคุมแขนกลให้มีการเคลื่อนที่เพียงครั้งละ 1 แกน ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 18, 19 และ 20 จากรูปที่ 18 เป็นกราฟแสดงผลการเคลื่อนที่ของแกนฐานที่อัตราเร่ง 0.25 เรเดียน/วินาที<sup>2</sup> ความเร็วเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ 0.16 เรเดียน/วินาที และมีความคลาดเคลื่อนสูงสุด 0.11 เรเดียน โดยมีการแสดงความเร็วของการเคลื่อนที่จริงและแรงดันที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์แขนกล ดังรูปที่ 19 จะเห็น



รูปที่ 18 กราฟแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่แบบแกนนเดียวของแกนฐาน  
ที่อัตราเร่ง  $0.25$  เรเดียน/วินาที<sup>2</sup>



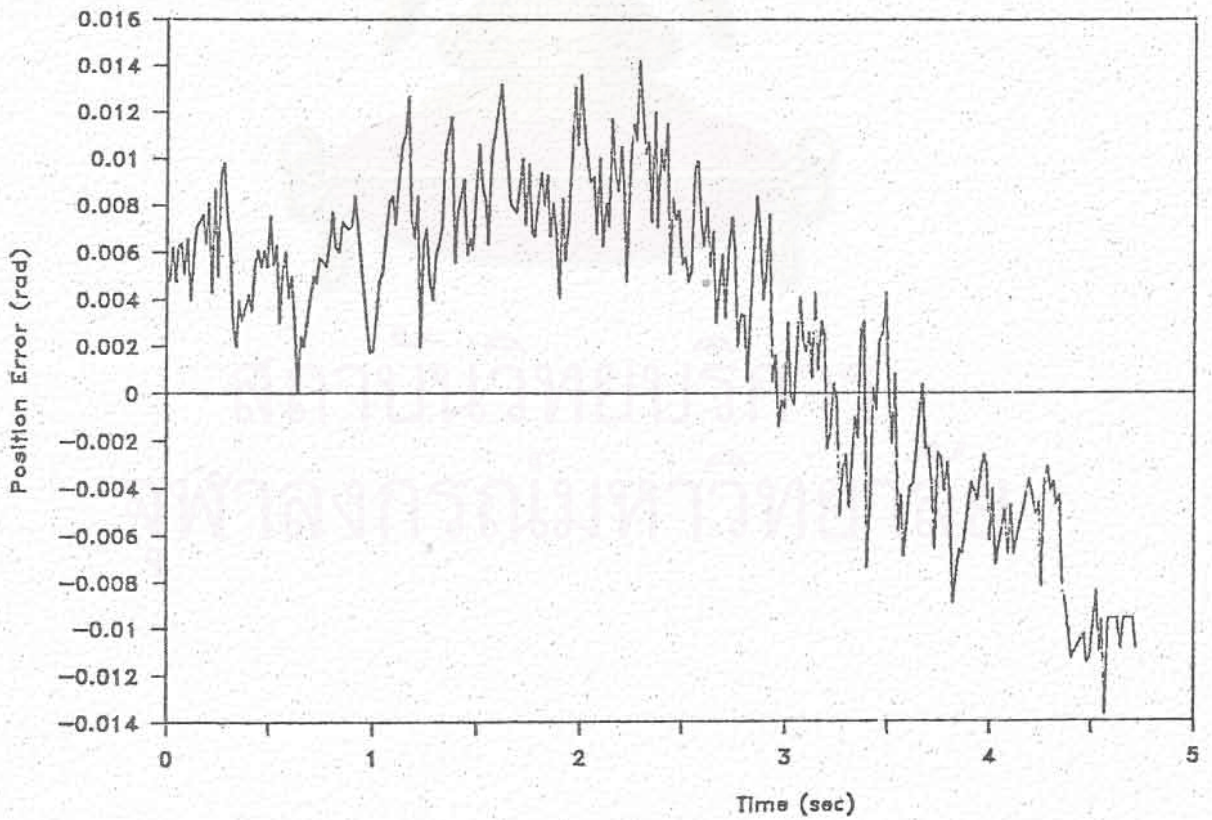
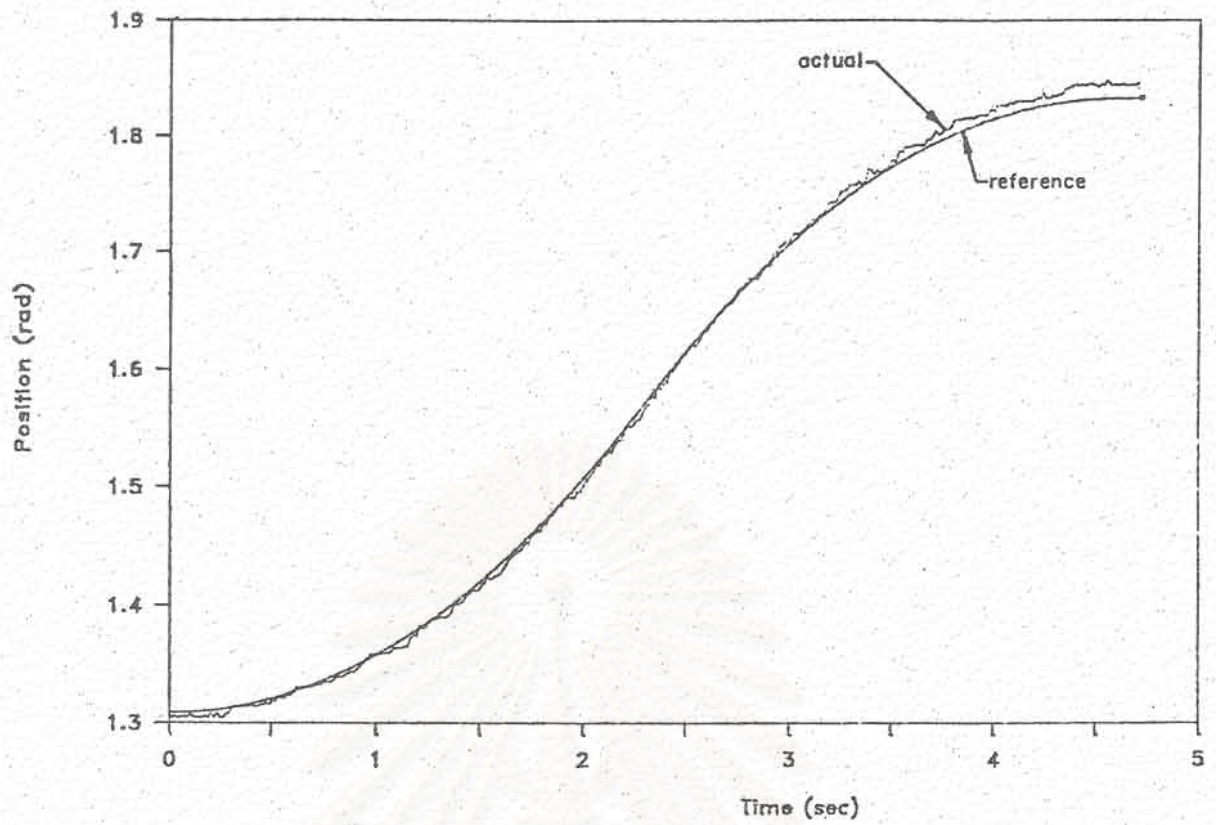
รูปที่ 19 กราฟแสดงความเร็วและแรงดันขับเคลื่อนของการเคลื่อนที่แบบแกนเดียวของแกนฐานที่อัตราเร่ง  $0.25 \text{ เรเดียน/วินาที}^2$

ได้ว่าในช่วงแรกของการเคลื่อนที่ความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มขึ้นตลอดเพราะในช่วงแรกของการเคลื่อนที่มอเตอร์จะถูกต้านจากสแตติกฟริคชัน หลังจากนั้นความคลาดเคลื่อนจะลดลงจนช่วงสุดท้ายของการเคลื่อนที่เมื่อตำแหน่งอ้างอิงมีค่าคงที่ จะได้เห็นว่าความคลาดเคลื่อนคงตัวของระบบมีค่าประมาณ 0.005 เป็นไปตามข้อกำหนดในการออกแบบเลือกค่าเกน เมื่อระบบเคลื่อนที่ด้วยความเร่งสูงขึ้น กราฟแสดงการเคลื่อนที่จริงของตำแหน่งและความเร็วมีกราฟที่เรียบขึ้นแต่จะให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงขึ้น ซึ่งอาจทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้ สำหรับรายละเอียดความคลาดเคลื่อนสูงสุดของการเคลื่อนที่ของแขนกลที่มุมการเคลื่อนที่ต่างๆแสดงดังตารางในรูปที่ 20

อัตรา เร่ง	ค่าความผิดพลาดสูงสุดของการเคลื่อนที่ (เรเดียน)						
	แกนฐาน		แกนหัวไหล่		แกนข้อศอก		
	$1s_1$	$1s_2$	$1s_3$	$1e_1$	$1e_2$	$1e_3$	
เร่ง	(1.3-1.8)	(1.2-1.7)	(2.2-1.7)	(1.7-2.2)	(0.9-1.4)	(2.0-1.5)	(1.5-2.0)
0.1	0.010	0.012	-0.015	0.011	0.010	0.010	0.010
.25	0.011	0.016	-0.020	0.014	0.012	0.010	0.012
.50	0.020	0.024	-0.025	0.025	0.018	0.014	0.016
1.0	0.025	0.025	-0.030	0.025	0.022	0.018	0.020

\* ช่วงของการเคลื่อนที่ (จาก-ถึง) เรเดียน

รูปที่ 20 ตารางแสดงผลการควบคุมแขนกลแบบเคลื่อนที่แกนเดียว



รูปที่ 21 กราฟแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกนฐานจากการเคลื่อนที่แบบ 3 แกน

จากตารางในรูปที่ 20 เห็นได้ว่าที่อัตราเร่งในการเคลื่อนที่ต่ำๆจะมีความผิดพลาดของตำแหน่งน้อยกว่าที่อัตราเร่งสูงกว่า เนื่องจากการเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร่งสูงทำให้ความเร็วของการเคลื่อนที่สูงขึ้นด้วย ทำให้ผลกระทบจากแรงคอริโอลิสและแรงเซนตริฟิวลมีขนาดมากขึ้น และการเคลื่อนที่ของแกนหัวไหล่ที่อัตราเร่งเดียวกัน การเคลื่อนที่ผ่านแนวตั้งแบบ  $1s_1$  จะมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดของตำแหน่งน้อยกว่าการเคลื่อนที่แบบ  $1s_2$  และ  $1s_3$  เนื่องจากการเคลื่อนที่ 2 แบบหลังนั้น แกนของแขนกลจะได้รับผลกระทบโดยตรงจากแรงโน้มถ่วงของโลก การเคลื่อนที่แบบ  $1s_2$  มีความผิดพลาดเป็นลบหมายถึงการเคลื่อนที่จริงมีตำแหน่งนำตำแหน่งอ้างอิง ทั้งนี้เป็นเพราะระบบควบคุมที่ใช้ในการควบคุมมีค่าเกนของตัวควบคุมคงที่ ซึ่งจะใช้ควบคุมระบบได้ดีในช่วงที่ระบบมีค่าภาระใกล้เคียงกับภาระที่กำหนดในการคำนวณตอนออกแบบค่าเกน ค่าเกนที่ใช้ในการทดลองนี้ได้ออกแบบที่ภาระปานกลาง ดังนั้นการนำค่าเกนนี้ไปควบคุมระบบที่มีอัตราเร่งการเคลื่อนที่สูงหรือภาระสูงก็จะให้ผลการเคลื่อนที่ที่ผิดพลาดเพิ่มตามด้วย

1.2 การทดสอบด้วยการควบคุมแขนกลให้มีการเคลื่อนที่พร้อมกันทั้ง 3 แกนจะทดสอบที่อัตราเร่งการเคลื่อนที่ 0.25 เรเดียน/วินาที<sup>2</sup> ณ ช่วงการเคลื่อนที่ต่างๆของแขนกลและได้ผลการทดลองจากรูปที่ 21 และดังตารางรูปที่ 22 จากกราฟรูปที่ 21 แสดงผลการเคลื่อนที่ของแกนฐานที่อัตราเร่ง 0.25 เรเดียน/วินาที<sup>2</sup> ความเร็วเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ 0.16 เรเดียน/วินาที<sup>2</sup> ในขณะที่มีการเคลื่อนที่ของแกนหัวไหล่แบบ  $1s_1$  และการเคลื่อนที่ของแกนข้อศอกแบบ  $1e_1$  มีผลความผิดพลาดของตำแหน่งสูงสุด 0.014 เรเดียนสำหรับรายละเอียดความคลาดเคลื่อนสูงสุดของการเคลื่อนที่ของแขนกลที่มุมการเคลื่อนที่ต่างๆแสดงดังตารางในรูปที่ 22

แกนฐาน	ค่าความผิดพลาดสูงสุดของการเคลื่อนที่ (เรเดียน)						
	แกนหัวไหล่			แกนข้อศอก			
	$1s_1$	$1s_2$	$1s_3$	$1e_1$	$1e_2$	$1e_3$	
	(1.3-1.8) <sup>*</sup>	(1.2-1.7)	(2.2-1.7)	(1.7-2.2)	(0.9-1.4)	(2.0-1.5)	(1.5-2.0)
0.014	0.012			0.012			
0.020		0.016		0.012			
-0.020			0.010	0.010			
-0.018			0.012		0.013		
-0.020			0.014				-0.013
* 0.001	0.002			0.001			
** 0.001			0.002				0.001

\* ช่วงของการเคลื่อนที่ (จาก-ถึง) เรเดียน  
 \*\* ผลการทดสอบกับแบบจำลอง

รูปที่ 22 ตารางแสดงผลการควบคุมแขนกลแบบเคลื่อนที่พร้อมกันทั้ง 3 แกน



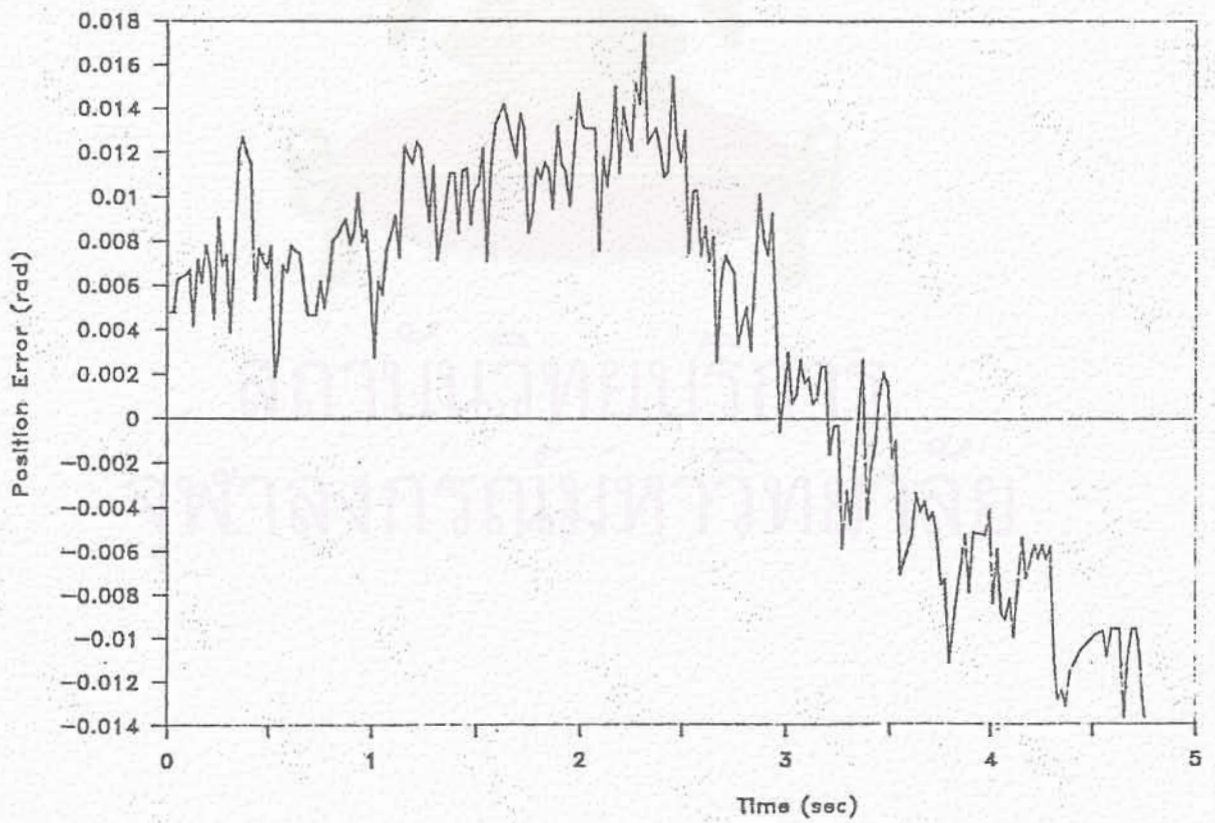
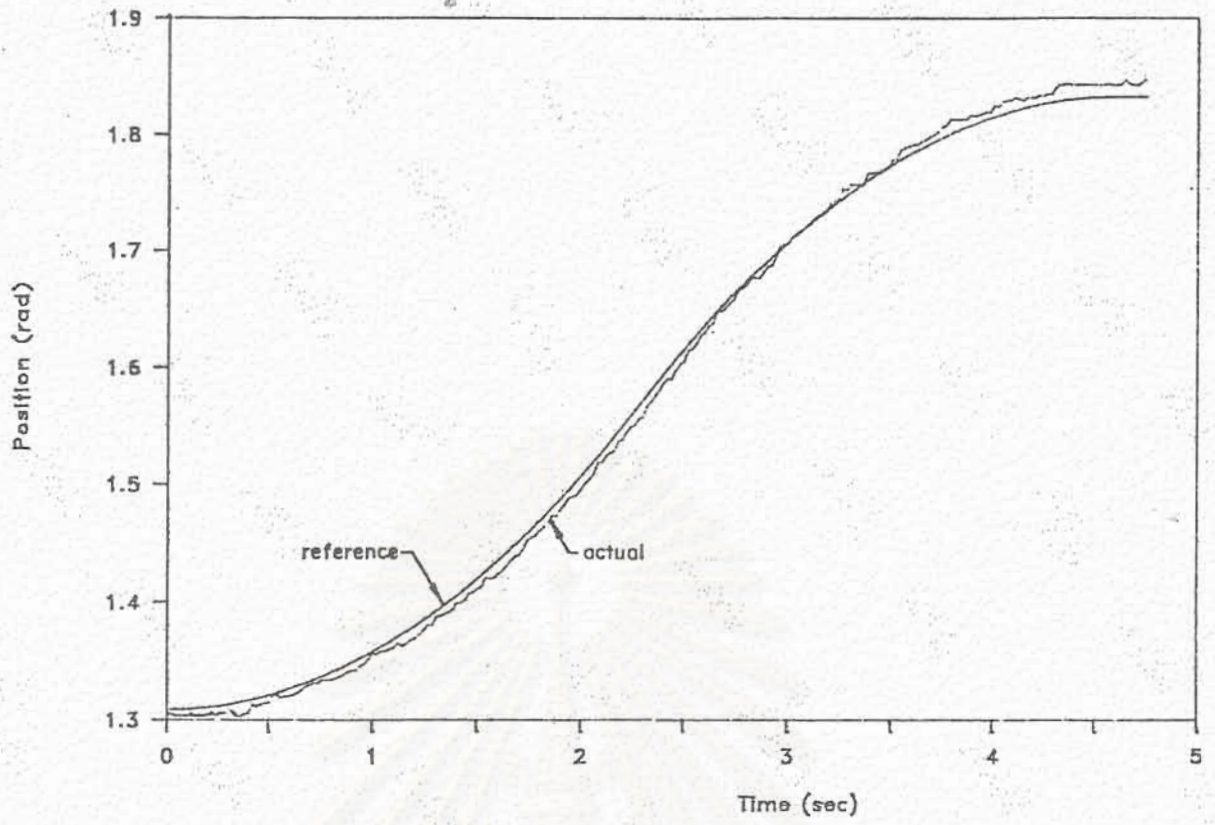
จากตารางรูปที่ 22 จะเห็นว่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่มีค่าสูงกว่าการเคลื่อนที่แบบแกนเดียว ทั้งนี้เพราะการเคลื่อนที่แบบนี้จะมีผลการรบกวนจากแรงภายนอกเนื่องจากความเร็วในการเคลื่อนที่ของแกนที่ต่อกัน การทดสอบด้วยวิธีนี้ผลการทดสอบกับแบบจำลองที่ได้แสดงไว้ในตารางมีความผิดพลาดน้อยมาก เนื่องจากในแบบจำลองไม่มีผลความคลาดเคลื่อนจากแบบแลชของชุดเฟืองทด

2. การทดสอบกับตัวแปรน้ำหนัก ทดสอบที่อัตราเร่งการเคลื่อนที่ 0.25 เหวเดียน/วินาที<sup>2</sup> ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกนหัวไหล่เป็นแบบ  $1s_1$  การเคลื่อนที่ของแกนข้อศอกเป็นแบบ  $1e_1$  ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 23, 24 และ 25

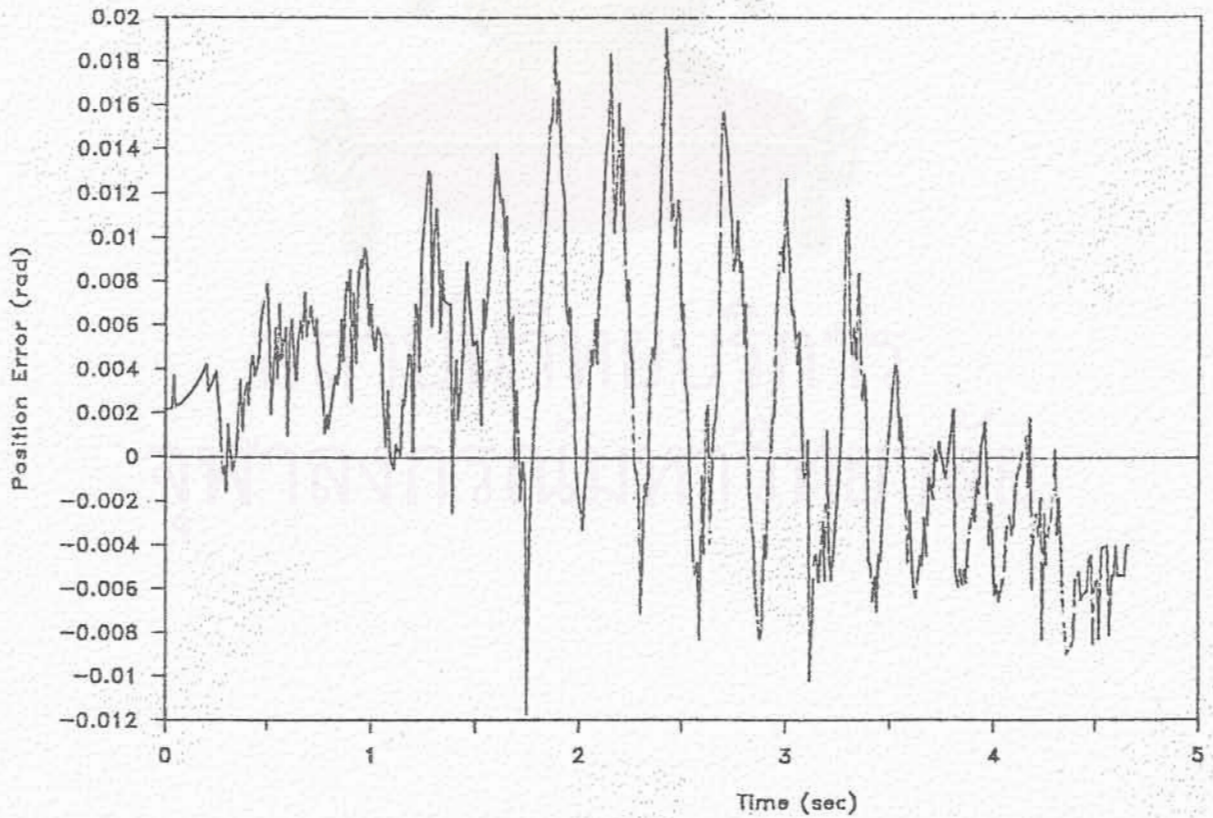
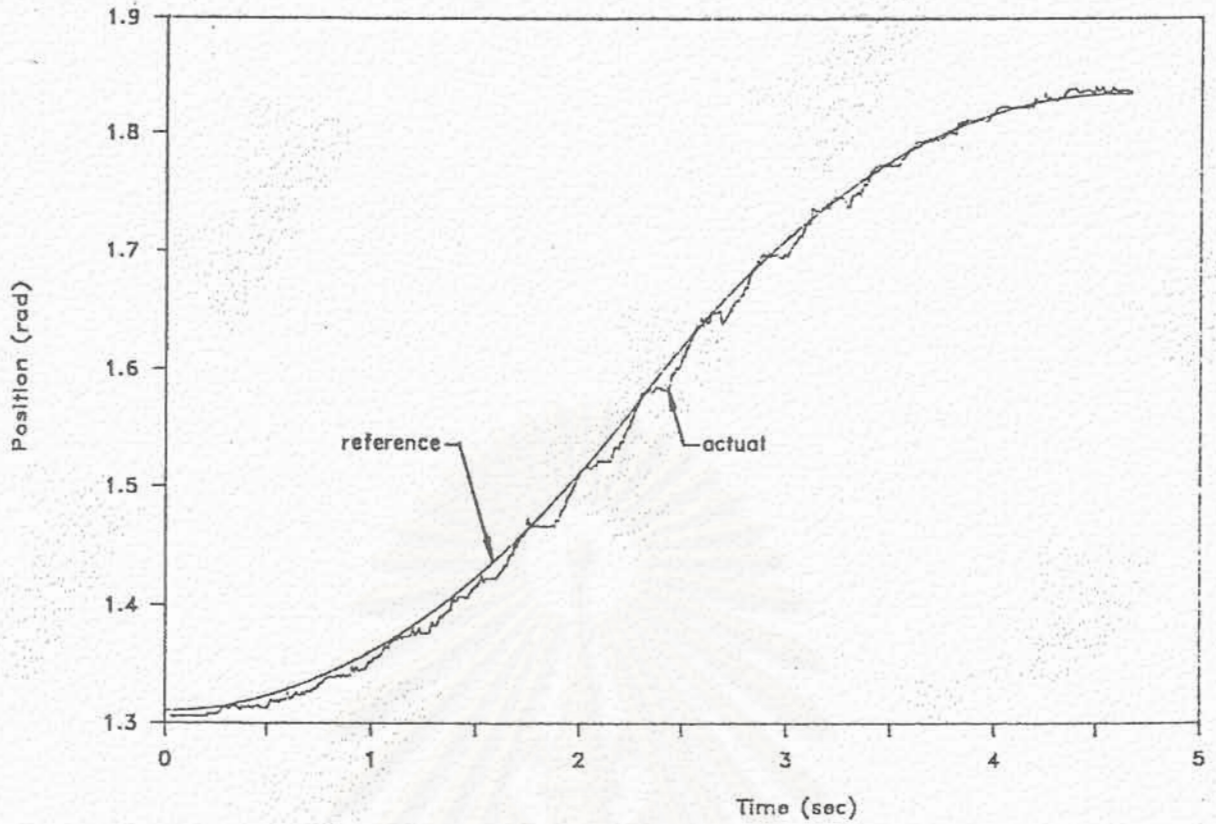
น้ำหนัก (กก.)	ค่าความผิดพลาดสูงสุดของการเคลื่อนที่ (เวเดียน)		
	แกนฐาน	แกนหัวไหล่ $1s_1$	แกนข้อศอก $1e_1$
1	0.014	-0.016	-0.010
2	-0.020	-0.020	-0.018
3	0.020	-0.020	-0.020
* 8	0.017	0.018	-0.012

\* ผลการทดสอบกับแบบจำลอง

รูปที่ 23 ตารางแสดงผลการควบคุมแขนกลเมื่อมีการปรับค่าน้ำหนัก



รูปที่ 24 กราฟแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกนฐาน จากแบบจำลองเมื่อยกน้ำหนัก 8 กก.



รูปที่ 25 กราฟแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกนฐานจากการเคลื่อนที่พร้อมกันสามแกนเมื่อยกน้ำหนัก 3 กก.

จากตารางรูปที่ 23 จะเห็นว่า การทดลองกับแบบจำลองระบบสามารถยกน้ำหนักได้ถึง 8 กก. โดยมีความผิดพลาดของตำแหน่งไม่ถึง 0.02 เซนติเมตร มีลักษณะการเคลื่อนที่ดัง กราฟรูปที่ 24 แต่การทดลองกับระบบจริง ระบบสามารถยกน้ำหนักได้เพียง 3 กก. แกนฐานของระบบมีการสั่นเล็กน้อย ดังลักษณะการเคลื่อนที่ที่แสดงในกราฟรูปที่ 25 จึง ต้องหยุดการทดลองที่ค่านี้ จากกราฟรูปที่ 25 จะเห็นว่าระบบเกิดการสั่นมากที่ช่วงเวลา 1.5-3.5 วินาที เป็นช่วงที่ความเร็วของการเคลื่อนที่มีค่าสูงสุด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลกระทบจากแรงเสียดทานและคอริโอลิส

#### 4. สรุป

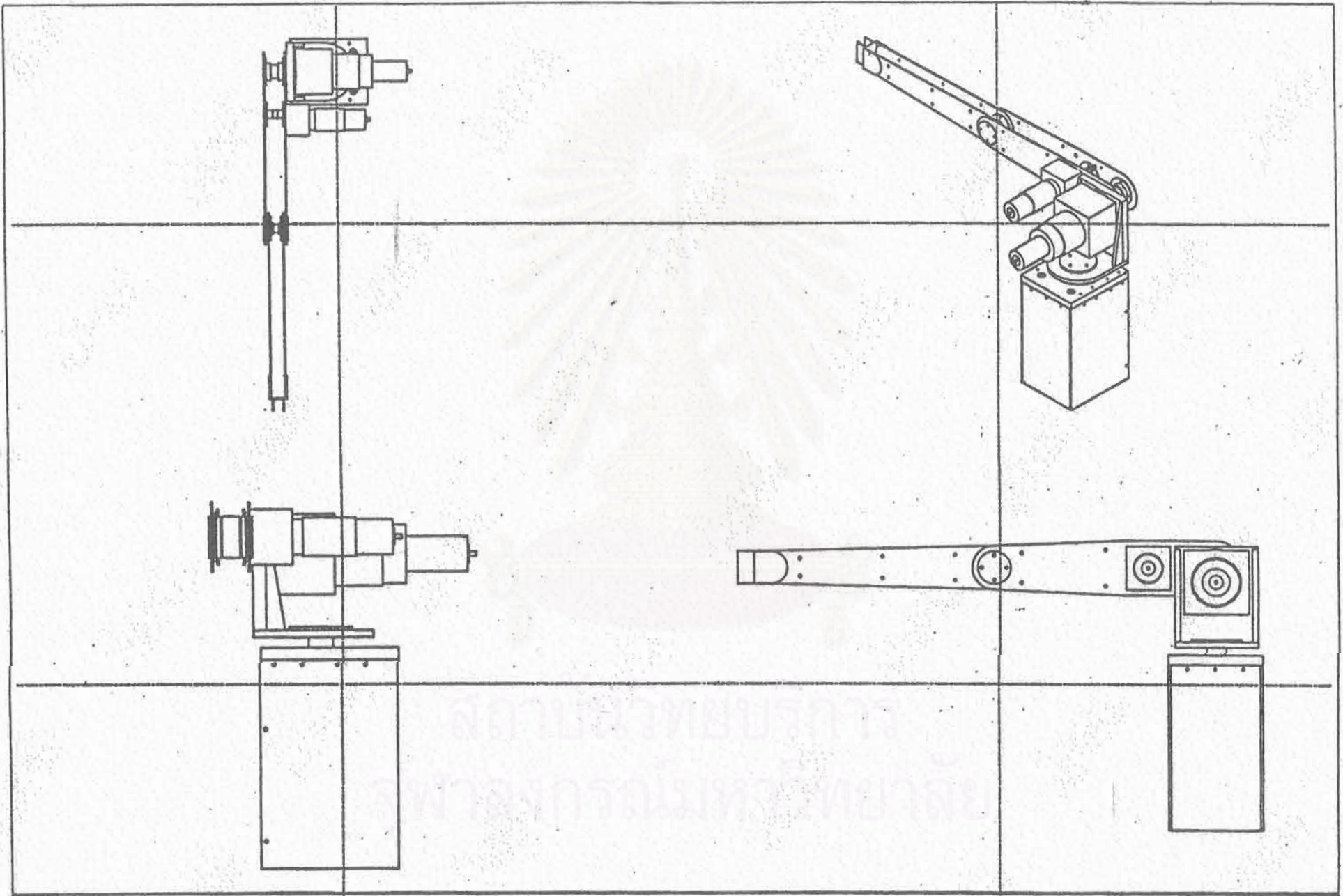
การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการออกแบบระบบควบคุมแบบย้อนกลับหรือแบบปิดการหุ่นยนต์อุตสาหกรรม โดยการออกแบบระบบควบคุมได้ใช้วิธีการออกแบบเป็น พี โอล ดี โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นสมการเชิงเส้น และเป็นระบบที่ไม่มีผลกระทบระหว่างข้อต่อเมื่อมีการเคลื่อนที่ ภายใต้เงื่อนไขที่ว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ไม่สูงเกินไปนัก ซึ่งได้ผลเป็นที่น่าพอใจ ปัญหาของความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่อยู่ที่อุปกรณ์ต่าง ๆ มากกว่าเช่น ชุดเฟืองทดที่ใช้มีค่า backlash มากพอสมควรซึ่งทำให้สมการการเคลื่อนที่เป็นสมการแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งทำให้ยากต่อการควบคุมตำแหน่งให้แม่นยำมากกว่านี้ อุปกรณ์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับไดนักชุดขาสัญญานที่ควบคุมมอเตอร์กระแสตรง ซึ่งตัดแปลงมาจากเครื่องขยาสเลียงธรรมดาที่หาซื้อได้ตามท้องตลาด ความเป็นเชิงเส้นของชุดขาสัญญานนี้ก็มีช่วงจำกัด ถ้าอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้มีมาตรฐานกว่านี้ก็เชื่อว่าการควบคุมจะเป็นไปได้ดียิ่งขึ้น ในกรณีที่หุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่เร็วมากระบบควบคุมแบบนี้อาจจะไม่เหมาะ เพราะจะมีผลกระทบระหว่างข้อต่อมากเมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่สูง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการออกแบบระบบควบคุมก็ต้องรวมผลกระทบนี้เข้าไปด้วยเพื่อให้มีความแม่นยำมากขึ้น กรณีที่โหลดเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ก็เป็นอีกอย่างหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงเพราะการออกแบบนี้ออกแบบโดยให้โหลดมีค่าคงที่ แต่เนื่องจากว่าระบบควบคุมนี้มีความไวในช่วงหนึ่งที่สามารถปรับเมื่อมีโหลดเปลี่ยนแปลง ถ้าโหลดเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง ระบบควบคุมที่จะใช้ก็ต้องเป็นระบบควบคุมขั้นสูงขึ้นไปกว่านี้เป็นระบบควบคุมชนิดปรับในตัวหรือ Adaptive Control เป็นต้น

ภาคผนวก ก.

รายละเอียดของมอเตอร์และแบบโครงสร้างของแกนกล

มอเตอร์ที่ใช้ในโครงการวิทยานิพนธ์นี้ เป็นมอเตอร์กระแสตรงของบริษัท Electro Craft Model 586-022-113 และ Model 652-02-112 ด้านท้ายของมอเตอร์มีทาโคมิเตอร์ ด้านเพลามอเตอร์มีชุดเฟืองทดที่มีอัตราทด 100:1 และ 90:1 สำหรับรายละเอียดต่างๆ ของมอเตอร์ แสดงดังตารางต่อไปนี้

SPECIFICATIONS			MODELS	
			E652-MG 0652-02-XXX	E586-MG
Rated Voltage	$V_r$	V	120	36
NO-LOAD SPEED at $V_r$	$N_0$	rpm	3750	6200
MAX. RATED I at STALL	$I_r$	A	4.4	4.6
STALL TORQUE at $I_r$	$T_0$	oz-in	100	29
MAX. PULSE CURRENT	$I_{pk}$	A	25.0	24.0
TORQUE CONSTANT	$K_t$	oz-in/A	27	7.8
VOLTAGE CONSTANT	$K_e$	volts/krpm	20	5.8
TERMINAL RESISTANCE	$R_t$	$\Omega$ at 25°C	1.8	1.1
Armature Mom. Inertia	$J_m$	oz-in-s <sup>2</sup>	$3.2 \times 10^{-2}$	$5.5 \times 10^{-3}$
Rotational Loss Constant	$K_d$	oz-in/krpm	0.68	0.10
Static Friction Torque	$T_f$	oz-in	7.0	3.0
Thermal Resistance Arm./Amb.	$R_{th}$	°C/W	2.8	5.0
ARMATURE INDUCTANCE	$L_a$	mH	6.7	2.3
ELECTRICAL Time Constant	$\tau_e$	ms	3.7	2.1
MECHANICAL Time Constant	$\tau_m$	ms	10.0	14.0
TACH. Voltage Gradient	$K_g$	V/krpm	21.0	14.2
TACH. Terminal Resistance	$R_g$	$\Omega$ at 25°C	800	720
TACH. Armature Inductance	$L_g$	mH	255	138
TACH. Load Resistance (optimum)	$R_l$	$\Omega$	10.000	5000
Ripple Amplitude		%pk-pk	5.0	5.0
LINEARITY		%	0.2	0.2
Temperature Coefficient		%/°C	-0.05	-0.05



ภาคผนวก ข.

Q-Matrix Lagrangian formulation

การหาความสัมพันธ์ไดนามิกตามวิธีลากรางจ์ มีการหาอนุพันธ์ของทราเนสฟอร์มเมตริก และหาทราเนสโพสของเมตริกบ้อยๆ เพื่อลดความยุ่งยากในการหาความสัมพันธ์ และสะดวกต่อการคำนวณหาคำตอบด้วยคอมพิวเตอร์จึงได้มีการสร้างเมตริก Q ขึ้น โดยมีรายละเอียดและขั้นตอนทั้งหมดตามวิธีการ Q เมตริก รายละเอียดในตารางที่ 1-3 และมีวิธีการนำไปใช้แสดงดังตัวอย่าง

TABLE I  
MANIPULATOR KINEMATICS

Coordinates	
$N$	Number of degrees-of-freedom (DOF).
$X_i, Y_i, Z_i$	Right cartesian axes defining the $i$ th coordinate frame (at the $i$ th link).
$r_i$	Position four-vector of a point on line $i$ , in the $i$ th coordinate frame: $r_i = [r_{ix}, r_{iy}, r_{iz}, 1]^T$ .
Kinematic Link Parameters	
$\theta_i$	Angle <sup>a</sup> between links $(i-1)$ and $i$ ; $\theta_i$ is the joint coordinate if joint $i$ is revolute.
$\Delta_i$	Distance <sup>a</sup> between links $(i-1)$ and $i$ ; $\Delta_i$ is the joint coordinate if joint $i$ is prismatic.
$a_i$	Length <sup>a</sup> of link $i$ ; $a_i = 0$ if joint $i$ is prismatic.
$\alpha_i$	Twist <sup>a</sup> of link $i$ .
Homogeneous Transformations	
$A_i$	Homogeneous $(4 \times 4)$ coordinate transformation matrix, from the $i$ th coordinate frame to the $(i-1)$ st coordinate frame; $A_i$ , which is defined completely by the four kinematic link parameters $(\theta_i, \Delta_i, a_i$ and $\alpha_i)$ , is
	$A_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\cos(\alpha_i) \sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i) \sin(\theta_i) & a_i \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\alpha_i) \cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i) \cos(\theta_i) & a_i \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & \Delta_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$
${}^p T_k$	Homogeneous $(4 \times 4)$ coordinate transformation matrix from the $k$ th coordinate frame to the $p$ th coordinate frame; ${}^p T_k$ is calculate according to
	${}^p T_k = A_{p+1} A_{p+2} \cdots A_{k-1} A_k, \quad \text{for } 0 \leq p < k \leq N \quad (2)$
	and
	${}^p T_p \triangleq I.$
${}^0 T_N$	Forward solution (i.e., homogeneous $(4 \times 4)$ coordinate transformation matrix) from the end-effector ( $N$ th) coordinate frame to the base (zeroth) coordinate frame.

<sup>a</sup>Angle, distance, length, and twist follow the definitions in [21].

TABLE II  
MANIPULATOR DYNAMICS



Dynamic Link Parameters	
$J_i$	Pseudo-inertia ( $4 \times 4$ ) matrix of link $i$ : $J_i = \int_{\text{link } i} [r_i r_i^T] dm_i$ .
$\bar{r}_i$	Center of mass four-vector of link $i$ , in the $i$ th coordinate frame: $\bar{r}_i = [\bar{r}_{ix}, \bar{r}_{iy}, \bar{r}_{iz}, 1]^T$ .
$m_i$	Mass of link $i$ .
Gravity Vector	
$g$	Gravity four-vector in the base coordinate frame: $g = [g_x, g_y, g_z, 0]^T$ .
Differential Kinematics	
${}^p U_{ki}$	First partial-derivative ( $4 \times 4$ ) matrix of ${}^p T_k$ with respect to $q_i$ ; ${}^p U_{ki}$ is calculated according to
	${}^p U_{ki} = \frac{\partial {}^p T_k}{\partial q_i} = {}^p T_{(i-1)} Q_i^{(i-1)} T_k, \quad \text{for } 0 \leq p < i \leq k \leq N. \quad (3)$
${}^p U_{kjm}$	Second partial-derivative ( $4 \times 4$ ) matrix of ${}^p T_k$ with respect to $q_j$ and $q_m$ ; ${}^p U_{kjm}$ (which equals ${}^p U_{kmj}$ ) is calculated according to
	${}^p U_{kjm} = \frac{\partial^2 {}^p T_k}{\partial q_j \partial q_m} = {}^p T_{(j-1)} Q_j^{(j-1)} T_{(m-1)} Q_m^{(m-1)} T_k, \quad \text{for } 0 \leq p < j < m \leq k \leq N. \quad (4)$
$Q_i$	Bejczy constant ( $4 \times 4$ ) $Q$ -matrix for joint $i$ :
	$Q_i = Q_R = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{for a revolute } i \text{th joint, and}$
	$Q_i = Q_P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{for a prismatic } i \text{th joint.}$

TABLE III  
DYNAMIC ROBOT MODEL

	$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = F(t) \quad (5a)$
	$\sum_{j=1}^N d_{ij} \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \dot{q}_j c_{jk}(i) \dot{q}_k + G_i = F_i(t), \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, N. \quad (5b)$
Joint Coordinates	
$q_i(q_i, \dot{q}_i)$	Generalized joint coordinate (velocity, acceleration) of joint $i$ : $q_i = \theta_i$ if joint $i$ is revolute; and $q_i = d_i$ if joint $i$ is prismatic.
$q(\dot{q}, \ddot{q})$	Generalized joint coordinate (velocity, acceleration) $N$ -vector.
Parameters	
$C(q, \dot{q})$	Centrifugal and Coriolis force $N$ -vector with elements
	$C_i = \dot{q}^T C(i) \dot{q}. \quad (6)$
$C(i)$	Coupling ( $N \times N$ ) matrix for joint $i$ with elements
	$c_{jk}(i) = \sum_{m=\max(i, j, k)}^N \text{Tr}({}^p U_{mj} J_m {}^p U_{mi}^T), \quad \text{where } p \triangleq \min(i, j, k) - 1. \quad (7)$
$D(q)$	Inertial coefficient ( $N \times N$ ) matrix with elements
	$d_{ij} = \sum_{k=\max(i, j)}^N \text{Tr}({}^p U_{kj} J_k {}^p U_{ki}^T), \quad \text{where } p \triangleq \min(i, j) - 1. \quad (8)$
$G(q)$	Gravitational force $N$ -vector with elements
	$G_i = - \sum_{k=i}^N m_k g^{TO} U_{ki} \bar{r}_k. \quad (9)$
$F(t)$	Generalized external joint force $N$ -vector with elements $F_i(t)$



ตัวอย่างการหาไดนามิกโมเดลของแขนกล

โดยวิธี

Q-matrix Lagrangian formulation

จากสมการที่ 1

$${}^0T_1 = A_1 = \begin{vmatrix} C_1 & 0 & -S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & C_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad \dots 10$$

$${}^1T_2 = A_2 = \begin{vmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & a_2 C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & a_2 S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad \dots 11$$

$${}^2T_3 = A_3 = \begin{vmatrix} C_3 & 0 & S_3 & a_3 C_3 \\ S_3 & 0 & -C_3 & a_3 S_3 \\ 0 & 1 & 0 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad \dots 12$$

เมื่อ  $S_i = \sin \theta_i$        $S_{i,j} = \sin(\theta_i + \theta_j)$   
 $C_i = \cos \theta_i$        $C_{i,j} = \cos(\theta_i + \theta_j)$

จากตารางที่ 2 Pseudo-inertia matrix คือ

$$J_1 = \begin{vmatrix} -I_{1xx} + I_{1yy} + I_{1zz} & I_{1xy} & I_{1xz} & m_1 x_1 \\ I_{1xy} & I_{1xx} - I_{1yy} + I_{1zz} & I_{1yz} & m_1 y_1 \\ I_{1xz} & I_{1yz} & I_{1xx} + I_{1yy} - I_{1zz} & m_1 z_1 \\ m_1 x_1 & m_1 y_1 & m_1 z_1 & m_1 \end{vmatrix}$$

หรือ  $J_1 = \begin{vmatrix} J_{1xx} & I_{1xy} & I_{1xz} & m_1 x_1 \\ I_{1xy} & J_{1yy} & I_{1yz} & m_1 y_1 \\ I_{1xz} & I_{1yz} & J_{1zz} & m_1 z_1 \\ m_1 x_1 & m_1 y_1 & m_1 z_1 & m_1 \end{vmatrix} \quad \dots 13$

และ Q-Matrix คือ

$$Q_1 = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

...14

จากสมการที่ 8 หาสัมประสิทธิ์แรงเฉื่อยได้

$$D_{i,j} = \sum \text{Tr}({}^p U_{n,j} J_n {}^p U_{n,i}^T) \quad p = \min(i,j)-1$$

$$D_{1,1} = \text{Tr}({}^0 U_{1,1} J_1 {}^0 U_{1,1}^T) + \text{Tr}({}^0 U_{2,2} J_2 {}^0 U_{2,2}^T) + \text{Tr}({}^0 U_{3,3} J_3 {}^0 U_{3,3}^T)$$

$$D_{1,2} = \text{Tr}({}^0 U_{2,2} J_2 {}^0 U_{2,1}^T) + \text{Tr}({}^0 U_{3,3} J_3 {}^0 U_{3,1}^T)$$

$$D_{1,3} = \text{Tr}({}^0 U_{3,3} J_3 {}^0 U_{3,1}^T)$$

$$D_{2,2} = \text{Tr}({}^2 U_{2,2} J_2 {}^2 U_{2,2}^T)$$

$$D_{2,1} = \text{Tr}({}^0 U_{2,1} J_2 {}^0 U_{2,2}^T) + \text{Tr}({}^0 U_{3,1} J_3 {}^0 U_{3,2}^T)$$

$$= D_{1,2}$$

$$D_{2,2} = \text{Tr}({}^1 U_{2,2} J_2 {}^1 U_{2,2}^T) + \text{Tr}({}^1 U_{3,3} J_3 {}^1 U_{3,3}^T)$$

$$D_{2,3} = \text{Tr}({}^1 U_{3,3} J_3 {}^1 U_{3,2}^T)$$

$$D_{3,1} = \text{Tr}({}^0 U_{3,1} J_3 {}^0 U_{3,2}^T)$$

$$= D_{1,2}$$

$$D_{3,2} = \text{Tr}({}^1 U_{3,2} J_3 {}^1 U_{3,3}^T)$$

$$= D_{2,3}$$

$$D_{3,3} = \text{Tr}({}^2 U_{3,3} J_3 {}^2 U_{3,3}^T)$$

การหา  $D_{1,2}$

จากสมการที่ 2 หา  ${}^p T_n$  ได้

$${}^0 T_2 = A_1 A_2 = \begin{vmatrix} C_1 C_2 & -C_1 S_2 & -S_1 & a_2 C_1 C_2 \\ S_1 C_2 & -S_1 S_2 & C_1 & a_2 S_1 C_2 \\ -S_2 & -C_2 & 0 & -a_2 S_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad \dots 15$$

$${}^0 T_3 = A_1 A_2 A_3 = \begin{vmatrix} C_1 C_{23} & -S_1 & C_1 S_{23} & a_3 C_1 C_{23} + a_2 C_1 C_2 - d_3 S_1 \\ S_1 C_{23} & C_1 & S_1 S_{23} & a_3 S_1 C_{23} + a_2 S_1 C_2 + d_3 C_1 \\ -S_{23} & 0 & C_{23} & -a_3 S_{23} - a_2 S_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad \dots 16$$

จากสมการที่ 3 หา  ${}^0U_{21}$  ได้

$${}^0U_{21} = {}^0T_0 Q_1 {}^0T_2$$

$${}^0U_{21} = \begin{vmatrix} -S_1 C_{22} & -C_1 & -S_1 S_{22} & -a_2 S_1 C_{22} - a_2 S_1 C_2 - d_2 C_1 \\ C_1 C_{22} & -S_1 & C_1 S_{22} & a_2 C_1 C_{22} + a_2 C_1 C_2 - d_2 S_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \dots 17$$

$${}^0U_{21}^T = \begin{vmatrix} -S_1 C_{22} & C_1 C_{22} & 0 & 0 \\ -C_1 & -S_1 & 0 & 0 \\ -S_1 S_{22} & C_1 S_{22} & 0 & 0 \\ -a_2 S_1 C_{22} - a_2 S_1 C_2 - d_2 C_1 & a_2 C_1 C_{22} + a_2 C_1 C_2 - d_2 S_1 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

$${}^0U_{22} = {}^0T_2 Q_1 {}^2T_3$$

$${}^0U_{22} = \begin{vmatrix} -C_1 S_{22} & 0 & C_1 C_{22} & -a_2 C_1 S_{22} \\ -S_1 S_{22} & 0 & S_1 C_{22} & -a_2 S_1 S_{22} \\ -C_{22} & 0 & -S_{22} & -a_2 C_{22} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \dots 18$$

$$J_2 {}^0U_{21}^T =$$

$$\begin{vmatrix} [-J_{222} S_1 C_{22} - I_{222} C_1 - I_{222} S_1 S_{22} - m_x (a_2 S_1 C_{22} + a_2 S_1 C_2 + d_2 C_1)] \\ [-I_{222} S_1 C_{22} - J_{222} C_1 - I_{222} S_1 S_{22} - m_y (a_2 S_1 C_{22} + a_2 S_1 C_2 + d_2 C_1)] \\ [-I_{222} S_1 C_{22} - I_{222} C_1 - J_{222} S_1 S_{22} - m_z (a_2 S_1 C_{22} + a_2 S_1 C_2 + d_2 C_1)] \\ [-m_{222} S_1 C_{22} - m_{222} C_1 - m_{222} z S_1 S_{22} - m_{222} (a_2 S_1 C_{22} + a_2 S_1 C_2 + d_2 C_1)] \\ [-J_{222} C_1 C_{22} - I_{222} S_1 - I_{222} C_1 S_{22} - m_x (a_2 C_1 C_{22} + a_2 C_1 C_2 + d_2 S_1)] & 0 & 0 \\ [-I_{222} C_1 C_{22} - J_{222} S_1 - I_{222} C_1 S_{22} - m_y (a_2 C_1 C_{22} + a_2 C_1 C_2 + d_2 S_1)] & 0 & 0 \\ [-I_{222} C_1 C_{22} - I_{222} S_1 - J_{222} C_1 S_{22} - m_z (a_2 C_1 C_{22} + a_2 C_1 C_2 + d_2 S_1)] & 0 & 0 \\ [-m_{222} C_1 C_{22} - m_{222} S_1 - m_{222} C_1 S_{22} - m_{222} (a_2 C_1 C_{22} + a_2 C_1 C_2 + d_2 S_1)] & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

$$\text{Tr}({}^0U_{22} J_2 {}^0U_{21}^T) = I_{222} S_{22} + m_x d_2 S_{22} - I_{222} C_{22} - m_z d_2 C_{22} + m_y a_2 S_{22} + m_d a_2 S_{22} \dots 19$$

$$D_{12} = I_{222} S_{22} - I_{222} C_{22} - m_d (x_2 S_{22} - z_2 C_{22}) + m_a a_2 S_{22} (y_2 + d_2)$$

ในทำนองเดียวกันหา  $D_{11} - D_{22}$  ได้

$$D_{11} = I_{111} + I_{222} S_2 S_2 + I_{222} C_2 C_2 + m_2 a_2 C_2 (2x_2 C_2 - 2y_2 S_2 + a_2 C_2) + I_{222} S_2 S_{22} + I_{222} C_2 C_{22} + m_2 (a_2 C_{22} + a_2 C_2) (a_2 C_{22} + a_2 C_2 + 2x_2 C_{22} + 2z_2 S_{22}) + m_d d_2 (2y_2 + d_2)$$

$$D_{12} = m_2 z_2 a_2 S_2 + m_2 d_2 (x_2 S_2 - z_2 C_2) + m_2 (y_2 + d_2) (a_2 S_2 + a_2 S_2)$$

$$D_{13} = I_{2xy} S_2 - I_{2yx} C_2 - m_2 d_2 (x_2 S_2 - z_2 C_2) + m_2 a_2 S_2 (y_2 + d_2)$$

$$D_{21} = D_{12}$$

$$D_{22} = I_{2xx} + m_2 a_2 (a_2 + 2x_2) + I_{2yy} + 2m_2 (a_2 C_2 + a_2) (a_2 + x_2) + 2m_2 z_2 a_2 S_2$$

$$D_{23} = I_{2yz} + m_2 a_2 (x_2 C_2 + a_2 C_2 + z_2 S_2) + m_2 a_2 (2x_2 + a_2)$$

$$D_{31} = D_{13}$$

$$D_{32} = D_{23}$$

$$D_{33} = I_{2zz} + m_2 a_2 (a_2 + 2x_2)$$

จากสมการที่ 7 หาสัมประสิทธิ์แรงคอรีโวลิสและเซนทิฟิวเกิลได้

$$D_{ijk} = c_{ijk}(i) = \sum \text{Tr}({}^p U_{mjk} J_m {}^p U_{m1}^T) \quad ip = \min(ijk) - 1$$

$${}^p U_{mjk} = {}^p T_{(j-1)} Q_j^{(j-1)} T_{(m-1)} Q_m^{(m-1)} T_k \quad 0 < p < j < k < m < N$$

$$D_{111} = \text{Tr}({}^0 U_{111} J_1 {}^0 U_{11}^T) + \text{Tr}({}^0 U_{211} J_2 {}^0 U_{21}^T) + \text{Tr}({}^0 U_{311} J_3 {}^0 U_{31}^T)$$

$$D_{112} = \text{Tr}({}^0 U_{212} J_2 {}^0 U_{21}^T) + \text{Tr}({}^0 U_{312} J_3 {}^0 U_{31}^T)$$

$$D_{113} = \text{Tr}({}^0 U_{313} J_3 {}^0 U_{31}^T)$$

$$D_{121} = \text{Tr}({}^0 U_{221} J_2 {}^0 U_{21}^T) + \text{Tr}({}^0 U_{321} J_3 {}^0 U_{31}^T) = 0$$

$$D_{122} = \text{Tr}({}^0 U_{222} J_2 {}^0 U_{21}^T) + \text{Tr}({}^0 U_{322} J_3 {}^0 U_{31}^T)$$

$$D_{123} = \text{Tr}({}^0 U_{323} J_3 {}^0 U_{31}^T)$$

$$D_{131} = \text{Tr}({}^0 U_{331} J_3 {}^0 U_{31}^T) = 0$$

$$D_{132} = \text{Tr}({}^0 U_{332} J_3 {}^0 U_{31}^T) = 0$$

$$D_{133} = \text{Tr}({}^0 U_{333} J_3 {}^0 U_{31}^T)$$

$$D_{211} = \text{Tr}({}^0 U_{211} J_2 {}^0 U_{22}^T) + \text{Tr}({}^0 U_{311} J_3 {}^0 U_{32}^T)$$

$$D_{212} = \text{Tr}({}^0 U_{212} J_2 {}^0 U_{22}^T) + \text{Tr}({}^0 U_{312} J_3 {}^0 U_{32}^T)$$

$$D_{213} = \text{Tr}({}^0 U_{313} J_3 {}^0 U_{32}^T)$$

$$D_{221} = \text{Tr}({}^0 U_{221} J_2 {}^0 U_{22}^T) + \text{Tr}({}^0 U_{321} J_3 {}^0 U_{32}^T) = 0$$

$$D_{222} = \text{Tr}({}^0 U_{222} J_2 {}^0 U_{22}^T) + \text{Tr}({}^0 U_{322} J_3 {}^0 U_{32}^T)$$

$$D_{223} = \text{Tr}({}^0 U_{323} J_3 {}^0 U_{32}^T)$$

$$D_{231} = \text{Tr}({}^0 U_{331} J_3 {}^0 U_{32}^T) = 0$$

$$D_{232} = \text{Tr}({}^0 U_{332} J_3 {}^0 U_{32}^T) = 0$$

$$D_{233} = \text{Tr}({}^0 U_{333} J_3 {}^0 U_{32}^T)$$

$$D_{311} = \text{Tr}({}^0 U_{311} J_3 {}^0 U_{33}^T)$$

$$\begin{aligned}
D_{112} &= \text{Tr}\{{}^0U_{112} J {}^0U_{22}^T\} \\
D_{113} &= \text{Tr}\{{}^0U_{113} J {}^0U_{22}^T\} \\
D_{221} &= \text{Tr}\{{}^0U_{221} J {}^0U_{33}^T\} = 0 \\
D_{222} &= \text{Tr}\{{}^1U_{222} J {}^1U_{33}^T\} \\
D_{223} &= \text{Tr}\{{}^1U_{223} J {}^1U_{33}^T\} \\
D_{331} &= \text{Tr}\{{}^0U_{331} J {}^0U_{22}^T\} = 0 \\
D_{332} &= \text{Tr}\{{}^1U_{332} J {}^1U_{22}^T\} = 0 \\
D_{333} &= \text{Tr}\{{}^2U_{333} J {}^2U_{33}^T\}
\end{aligned}$$



การหา  $D_{113}$

จากสมการที่ 4 หา  ${}^0U_{kjm}$  ได้

$$\begin{aligned}
{}^0U_{113} &= {}^0T_{01} {}^0T_{12} {}^2T_{23} \\
&= \begin{bmatrix} S_1 S_{23} & 0 & -S_1 C_{23} & -a_3 S_1 S_{23} \\ -C_1 S_{23} & 0 & C_1 C_{23} & a_3 C_1 S_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \dots 20
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Tr}\{{}^0U_{113} J {}^0U_{31}^T\} &= (I_{3xx} - I_{3zz}) S_{23} C_{23} - I_{3xx} (S_{23}^2 - C_{23}^2) + \\
&\quad m_3 (a_3 C_{23} + a_2 C_2) (z_3 C_{23} - x_3 S_{23} - a_3 S_{23}) - \\
&\quad m_3 a_3 S_{23} (x_3 C_{23} + z_3 S_{23}) \\
&= D_{113}
\end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกันหา  $D_{111} - D_{333}$  ได้

$$D_{111} = 0$$

$$\begin{aligned}
D_{112} &= (I_{2xx} - I_{2yy}) S_2 C_2 + (m_2 y_2 a_2) (S_2^2 - C_2^2) - m_2 a_2 S_2 C_2 (2x_2 + a_2) \\
&\quad + (I_{2xx} - I_{2zz}) S_2 C_2 - m_2 (x_2 C_2 + z_2 S_2) (a_2 S_2 + a_3 S_{23}) \\
&\quad + m_2 (a_2 C_2 + a_3 C_{23}) (z_2 C_2 - x_2 S_2 - a_2 S_2 - a_3 S_{23})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D_{113} &= (I_{3xx} - I_{3zz}) S_{23} C_{23} - m_3 a_3 S_{23} (x_3 C_{23} + z_3 S_{23}) \\
&\quad + m_3 (a_2 C_2 + a_3 C_{23}) (z_3 C_{23} - x_3 S_{23} - a_3 S_{23})
\end{aligned}$$

$$D_{122} = m_2 z_2 a_2 C_2 + m_2 d_2 (x_2 C_2 + z_2 S_2) + m_2 (y_2 + d_2) (a_2 C_2 + a_3 C_{23})$$

$$D_{123} = m_2 d_2 (x_2 C_2 + z_2 S_2) + m_2 a_2 C_2 (y_2 + d_2)$$

$$D_{133} = D_{123}$$

$$D_{211} = -D_{112}$$

$$D_{223} = -m_3 a_2 (a_3 S_3 + x_3 S_3 - z_3 C_3)$$

$$D_{233} = D_{223}$$

ภาคผนวก ค

การจำลองแบบของแขนกลด้วยแบบจำลองไดนามิก

จากสมการของลากรางจ์ในภาคผนวก ข. มีรูปแบบทั่วไปเป็น

$$F_1 = \sum D_{1j} \dot{\theta}_j + I a_1 \dot{\theta}_1 + \sum \sum D_{1jk} \theta_j \dot{\theta}_k + D_1 \quad \dots \text{ค-1}$$

$$\text{กำหนดให้ } x_1 = \theta_1 \quad x_2 = \dot{\theta}_2 \quad x_3 = \theta_3 \quad \dots \text{ค-2}$$

$$x_2 = \dot{x}_1 \quad x_4 = \dot{x}_3 \quad x_6 = \dot{x}_5 \quad \dots \text{ค-3}$$

แทนสมการ(ค-2), (ค-3)ลงในสมการ ข.21-23 ได้

$$F_1 = D_{11} x_2 + D_{21} x_4 + D_{31} x_6 + I a_1 x_2 + D_1 + D_{112} x_2 x_4 + D_{113} x_2 x_6 + D_{122} x_4^2 + D_{123} x_4 x_6 + D_{133} x_6^2 \quad \dots \text{ค-4}$$

$$F_2 = D_{21} x_2 + D_{22} x_4 + D_{23} x_6 + I a_2 x_4 + D_2 + D_{223} x_4 x_6 + D_{233} x_6^2 \quad \dots \text{ค-5}$$

$$F_3 = D_{31} x_2 + D_{32} x_4 + D_{33} x_6 + I a_3 x_6 + D_3 + D_{311} x_2^2 + D_{322} x_4^2 \quad \dots \text{ค-6}$$

การจำลองแบบต้องการให้สมการมีรูปแบบเป็น  $\dot{x} = f(x, u, t)$  หรือ  $\dot{x} = A(t)x + B(t)u$  โดยที่  $u$  เป็นฟังก์ชันของแรงที่กระทำต่อระบบจึงสามารถจัดรูปสมการได้ดังนี้

(ค-4)  $\times D_{22}$

$$D_{22} F_1 = (D_{22} D_{11} + D_{22} I a_1) x_2 + D_{22} D_{21} x_4 + D_{22} D_{31} x_6 + D_{22} D_1 + D_{22} D_{112} x_2 x_4 + D_{22} D_{113} x_2 x_6 + D_{22} D_{122} x_4^2 + D_{22} D_{123} x_4 x_6 + D_{22} D_{133} x_6^2 \quad \dots \text{ค-7}$$

(ค-6)  $\times D_{21}$

$$D_{21} F_3 = D_{21} D_{31} x_2 + D_{21} D_{32} x_4 + (D_{21} D_{33} + D_{21} I a_3) x_6 + D_{21} D_3 + D_{21} D_{311} x_2^2 + D_{21} D_{322} x_4^2 \quad \dots \text{ค-8}$$

(ค-7)-(ค-8)

$$D_{22} F_1 - D_{21} F_3 = (D_{22} D_{11} - D_{22} I a_1 - D_{21} D_{31}) x_2 + (D_{22} D_{21} - D_{21} D_{32} - D_{21} I a_2) x_4 + D_{22} D_{31} - D_{21} D_{33} - D_{21} D_{311} x_2^2 + D_{22} D_{112} x_2 x_4 + D_{22} D_{113} x_2 x_6 + (D_{22} D_{122} - D_{21} D_{322}) x_4^2 + D_{22} D_{123} x_4 x_6 + D_{22} D_{133} x_6^2 \quad \dots \text{ค-9}$$

หรือเขียนใหม่ได้

$$D_{22} F_1 - D_{21} F_3 = -Bx_2 + Mx_4 + D_{22} D_{31} - D_{21} D_{33} - D_{21} D_{311} x_2^2 + D_{22} D_{112} x_2 x_4 + D_{22} D_{113} x_2 x_6 + Sx_4^2 + D_{22} D_{123} x_4 x_6 + D_{22} D_{133} x_6^2 \quad \dots \text{ค-10}$$

$$B = D_{22} D_{11} - D_{22} I a_1 - D_{21} D_{31}$$

$$M = D_{22} D_{21} - D_{21} D_{32} - D_{21} I a_2$$

$$S = D_{22} D_{122} - D_{21} D_{322}$$

$$D_{311} = -D_{113}$$

$$D_{322} = -D_{223}$$

$$D_{212} = D_{213} = D_{222} = D_{312} = D_{313} = D_{322} = D_{333} = 0$$

จากสมการที่ 9 หาแรงโน้มถ่วงที่กำกับลิงค์ได้

$$D_1 = G_1 = -\sum m_k g^{TO} U_{k1} r_k$$

$$D_1 = m_1 g^{TO} U_{11} r_1 + m_2 g^{TO} U_{21} r_2 + m_3 g^{TO} U_{31} r_3$$

$$D_2 = m_2 g^{TO} U_{22} r_2 + m_3 g^{TO} U_{32} r_3$$

$$D_3 = m_3 g^{TO} U_{33} r_3$$



การหา  $D_2$

$$g^T = [0 \ 0 \ -g \ 0]$$

$$g^{TO} U_{33} = [gC_{23} \ 0 \ gS_{23} \ ga_3 C_{23}]$$

$$D_2 = -m_3 g(C_{23}(x_3 + a_3) + z_3 S_{23})$$

ในทำนองเดียวกันหา  $D_1 - D_2$  ได้

$$D_2 = m_2 g(C_2(-x_2 - a_2) + y_2 S_2) - m_3 g((x_3 + a_3)C_{23} + z_3 S_{23} + a_3 C_2)$$

$$D_1 = 0$$

จาก  $D_1, D_{1j}, D_{1jk}$  นำมาหาแรงรวมที่ทำให้ลิงค์ด้วยความเร็ว  $\theta$  ความเร่ง  $\ddot{\theta}$  ตำแหน่ง  $\theta$  ได้

$$F_1 = D_{11} \theta + D_{21} \ddot{\theta} + D_{31} \theta^2 + I a_1 \theta + D_{11} \theta + D_{112} \theta \theta + D_{113} \theta \theta + D_{122} \theta^2 + D_{123} \theta \theta + D_{133} \theta^2 \quad \dots 21$$

$$F_2 = D_{21} \theta + D_{22} \ddot{\theta} + D_{23} \theta^2 + I a_2 \theta + D_{22} \theta \theta + D_{233} \theta^2 \quad \dots 22$$

$$F_3 = D_{31} \theta + D_{32} \ddot{\theta} + D_{33} \theta^2 + I a_3 \theta + D_{33} \theta^2 + D_{333} \theta^2 \quad \dots 23$$

(ค-5) x D<sub>22</sub>

$$D_{22} F_2 = D_{22} D_{21} x_2 + (D_{22} D_{22} + D_{22} I a_2) x_4 + D_{22} D_{22} x_6 + D_{22} D_{22} + D_{22} D_{211} x_{22} + D_{22} D_{223} x_4 x_6 + D_{22} D_{223} x_{62} \quad \dots \text{ค-11}$$

(ค-6) x (D<sub>22</sub> + I a<sub>2</sub>)

$$(D_{22} + I a_2) F_2 = D_{21} (D_{22} + I a_2) x_2 + D_{22} (D_{22} + I a_2) x_4 + (D_{22} D_{22} + D_{22} I a_2 + D_{22} I a_2 + I a_2 I a_2) x_6 + (D_{22} + I a_2) D_{22} + (D_{22} D_{211} + I a_2 D_{211}) x_{22} + (D_{22} D_{222} + I a_2 D_{222}) x_{42} \quad \dots \text{ค-12}$$

(ค-11)-(ค-12)

$$D_{22} F_2 - (D_{22} + I a_2) F_2 = -A x_2 + C x_6 + D_{22} D_{22} - (D_{22} + I a_2) D_{22} + E x_{22} + L x_{42} + D_{22} D_{223} x_4 x_6 + D_{22} D_{223} x_{62} \quad \dots \text{ค-13}$$

$$A = D_{21} D_{22} + D_{21} I a_2 - D_{22} D_{21}$$

$$C = D_{22} D_{22} - D_{22} D_{22} - D_{22} I a_2 - D_{22} I a_2 - I a_2 I a_2$$

$$E = D_{22} D_{211} - D_{22} D_{211} - I a_2 D_{211}$$

$$L = -D_{22} D_{222} - I a_2 D_{222}$$

(ค-10) x C

$$D_{22} C F_1 - D_{21} C F_2 = -B C x_2 + M C x_6 + D_{22} C D_{21} - D_{21} C D_{22} - D_{21} D_{211} C x_{22} + D_{22} D_{211} C x_4 x_6 + D_{22} D_{211} C x_6 x_4 + S C x_{42} + D_{22} D_{212} C x_4 x_6 + D_{22} D_{212} C x_{62} \quad \dots \text{ค-14}$$

(ค-13) x M

$$D_{22} M F_1 - (D_{22} + I a_2) M F_2 = -A M x_2 + M C x_6 + D_{22} M D_{21} - (D_{22} + I a_2) M D_{22} + E M x_{22} + L M x_{42} + D_{22} D_{223} M x_4 x_6 + D_{22} D_{223} M x_{62} \quad \dots \text{ค-15}$$

(ค-14)-(ค-15)

$$D_{22} C F_1 - D_{21} M F_2 + [(D_{22} + I a_2) M - D_{21} C] F_2 = (A M - B C) x_2 + D_{22} C D_{21} - D_{22} M D_{22} + [(D_{22} + I a_2) M - D_{21} C] D_{22} - (D_{21} D_{211} C - E M) x_{22} + D_{22} D_{211} C x_4 x_6 + D_{22} D_{211} C x_6 x_4 + (S C - L M) x_{42} + (D_{22} D_{212} C - D_{22} D_{223} M) x_4 x_6 + (D_{22} D_{212} C - D_{22} D_{223} M) x_{62} \quad \dots \text{ค-16}$$

จัดรูปใหม่ได้

$$x_2 = V A_2 x_2^2 + V B_2 x_4 x_6 + V C_2 x_4 x_6 + V D_2 x_4^2 + V E_2 x_4 x_6 + V F_2 x_6^2 + U A_2 (F_1 - D_{21}) + U B_2 (F_2 - D_{22}) + U C_2 (F_2 - D_{22}) \quad \dots \text{ค-17}$$

$$V H_2 = A M - B C$$

$$U A_2 = D_{22} C / V H_2$$

$$V A_2 = (D_{21} D_{211} C - E M) / V H_2$$

$$U B_2 = -D_{22} M / V H_2$$

$$V B_2 = -D_{22} D_{211} C / V H_2$$

$$U C_2 = -[(D_{22} + I a_2) M - D_{21} C] / V H_2$$



$$VC_2 = -D_{22} D_{112} C / VH_2$$

$$VD_2 = -(SC-LM) / VH_2$$

$$VE_2 = -(D_{22} D_{122} C - D_{22} D_{222} M) / VH_2$$

$$VF_2 = -(D_{22} D_{132} C - D_{22} D_{232} M) / VH_2$$

$$(A-5) \times D_{21}$$

$$D_{21} F_2 = D_{21} D_{212} x_2 + (D_{22} D_{211} + D_{21} I a_2) x_4 + D_{22} D_{212} x_6 + D_{21} D_{212} + D_{21} D_{211} x_{22} + D_{21} D_{222} x_4 x_6 + D_{21} D_{232} x_{62} \quad \dots A-18$$

$$(A-7)-(A-18)$$

$$D_{22} F_1 - D_{21} F_2 = -Bx_2 - Ax_4 + D_{22} D_{211} - D_{21} D_{222} - D_{21} D_{211} x_{22} + D_{22} D_{212} x_4 x_6 + D_{22} D_{112} x_2 x_4 + D_{22} D_{122} x_4 x_6 + Px_4 x_6 + Qx_{62} \quad \dots A-19$$

$$P = D_{22} D_{122} - D_{21} D_{222}$$

$$Q = D_{22} D_{132} - D_{21} D_{232}$$

$$(A-5) \times (D_{22} + I a_2)$$

$$(D_{22} + I a_2) F_2 = (D_{22} + I a_2) D_{212} x_2 + (D_{22} D_{222} + D_{22} I a_2 + D_{22} I a_2 + I a_2 I a_2) x_4 + (D_{22} + I a_2) D_{222} x_6 + (D_{22} + I a_2) D_{211} x_{22} + (D_{22} + I a_2) D_{222} x_4 x_6 + (D_{22} + I a_2) D_{232} x_{62} \quad \dots A-20$$

$$(A-6) \times D_{22}$$

$$D_{22} F_2 = D_{22} D_{212} x_2 + D_{22} D_{222} x_4 + (D_{22} + I a_2) D_{222} x_6 + D_{22} D_{222} + D_{22} D_{211} x_{22} + D_{22} D_{222} x_4 x_6 \quad \dots A-21$$

$$(A-20)-(A-21)$$

$$(D_{22} + I a_2) F_2 - D_{22} F_2 = -Mx_2 - Cx_4 + (D_{22} + I a_2) D_{222} - D_{22} D_{222} + Rx_2 - D_{22} D_{222} x_{22} + Tx_4 x_6 + O x_{62} \quad \dots A-22$$

$$R = D_{22} D_{211} + D_{211} I a_2 - D_{22} D_{211}$$

$$T = D_{22} D_{222} + D_{222} I a_2$$

$$O = D_{22} D_{232} + D_{232} I a_2$$

$$(A-19) \times M$$

$$D_{22} M F_1 - D_{21} M F_2 = -BMx_2 - AMx_4 + D_{22} MD_{211} - D_{21} MD_{222} - D_{21} D_{211} Mx_{22} + D_{22} D_{112} Mx_2 x_4 + D_{22} D_{122} Mx_4 x_6 + D_{22} D_{122} Mx_{42} + PMx_4 x_6 + QMx_{62} \quad \dots A-23$$

$$(A-22) \times B$$

$$(D_{22} + I a_2) B F_2 - D_{22} B F_2 = -BMx_2 - CBx_4 + (D_{22} + I a_2) BD_{222} - D_{22} BD_{222} + RBx_{22} - D_{22} D_{222} Bx_{42} + TBx_4 x_6 + OBx_{62} \quad \dots A-24$$

(ค-23)-(ค-24) แล้วจัดสมการในทำนองเดียวกับสมการ (ค-16), (ค-17)

$$x_A = VA_A x_2^2 + VB_A x_2 x_4 + VC_A x_2 x_6 + VD_A x_4^2 + VE_A x_4 x_6 + VF_A x_6^2 + UA_A (F_1 - D_1) + UB_A (F_2 - D_2) + UC_A (F_3 - D_3) \quad \dots \text{ค-25}$$

$$\begin{aligned} VH_A &= BC - AM & UA_A &= D_{22} M / VH_A \\ VA_A &= (D_{21} D_{211} M - RB) / VH_A & UB_A &= -[(D_{22} + I a_2) + D_{21} M] / VH_A \\ VB_A &= -D_{22} D_{112} M / VH_A & UC_A &= D_{22} B / VH_A \\ VC_A &= -D_{22} D_{113} M / VH_A \\ VD_A &= -(D_{22} D_{122} M + D_{22} D_{222} B) / VH_A \\ VE_A &= -(PM - TB) / VH_A \\ VF_A &= (OB - QM) / VH_A \end{aligned}$$



(ค-10) x A

$$\begin{aligned} D_{22} A F_1 - D_{21} A F_2 &= -ABx_2 + MAx_4 + D_{22} AD_1 - D_{21} AD_2 - D_{21} D_{211} Ax_{22} + \\ &D_{22} D_{112} Ax_2 x_4 + D_{22} D_{113} Ax_2 x_6 + SAx_{42} + \\ &D_{22} D_{122} Ax_4 x_6 + D_{22} D_{222} Ax_{62} \quad \dots \text{ค-26} \end{aligned}$$

(ค-13) x B

$$\begin{aligned} D_{22} B F_2 - (D_{22} + I a_2) B F_3 &= -ABx_2 + CBx_4 + D_{22} BD_2 - (D_{22} + I a_2) BD_3 + EBx_{22} + \\ &LBx_{42} + D_{22} D_{222} Bx_4 x_6 + D_{22} D_{223} Bx_{62} \quad \dots \text{ค-27} \end{aligned}$$

(ค-26)-(ค-27) แล้วจัดสมการในทำนองเดียวกับสมการ (ค-16), (ค-17)

$$x_B = VA_B x_2^2 + VB_B x_2 x_4 + VC_B x_2 x_6 + VD_B x_4^2 + VE_B x_4 x_6 + VF_B x_6^2 + UA_B (F_1 - D_1) + UB_B (F_2 - D_2) + UC_B (F_3 - D_3) \quad \dots \text{ค-28}$$

$$\begin{aligned} VH_B &= MA - BC & UA_B &= D_{22} A / VH_B \\ VA_B &= (D_{21} D_{211} A - EB) / VH_B & UB_B &= -D_{22} B / VH_B \\ VB_B &= -D_{22} D_{112} A / VH_B & UC_B &= [(D_{22} + I a_2) B - D_{21} A] / VH_B \\ VC_B &= -D_{22} D_{113} A / VH_B \\ VD_B &= -(SA + LB) / VH_B \\ VE_B &= -(D_{22} D_{222} B - D_{22} D_{122} A) / VH_B \\ VF_B &= -(D_{22} D_{223} B - D_{22} D_{123} A) / VH_B \end{aligned}$$

จากสมการ(ค-3), (ค-18), (ค-29) และ(ค-33) จะ ได้ความสัมพันธ์ของ dynamic Model เป็นสมการ non-linear ของอนุพันธ์อันดับที่ 1 ที่มีความซับซ้อน ดังนั้นการหาคำตอบให้กับสมการเหล่านี้จะอาศัยคอมพิวเตอร์เข้าช่วยในการอินทิเกรตด้วยวิธีทาง numerical ซึ่งได้แสดงวิธีการของ Runge-Kutta ไว้ในภาคผนวก ง.

ภาคผนวก ง.

Runge-Kutta Method

Fifth-order Runge-kutta method เป็นวิธีการทาง numerical ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการหาคำตอบให้กับสมการอนุพันธ์ เพราะว่าวิธีนี้สามารถหาคำตอบได้โดยอาศัยข้อมูล ณ ตำแหน่งเริ่มต้นหรือตำแหน่งปัจจุบันเพื่อหาคำตอบของตำแหน่งต่อไป ไม่ต้องการข้อมูลของตำแหน่งก่อนหน้า(Self-start) หรือหาค่า  $y_{i+1}$  ได้เมื่อทราบค่าของ  $y_i$  โดยหาคำตอบทีละลำดับขั้น(single step)ซึ่งทำให้ง่ายต่อการเขียนโปรแกรมคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ แต่ก็มีข้อเสียที่ต้องหาคำตอบตามความสัมพันธ์ของฟังก์ชัน  $f(x,y)$  ในทุกๆ ครั้ง เพื่อจะได้คำตอบของขั้นต่อไป ซึ่งทำให้ต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก แต่ถ้าเวลาไม่ใช่สิ่งสำคัญมากแล้ววิธีนี้เป็นวิธีที่ดีมีรูปแบบดังสมการ 1 และ 2

$$\begin{aligned}
 y &= f(x,y) && \dots 1 \\
 y_{i+1} &= y_i + 1/90(7k_1 + 32k_2 + 12k_3 + 32k_4 + 7k_5) && \dots 2 \\
 \text{เมื่อ} \quad k_1 &= (h)f(x_i, y_i) \\
 k_2 &= (h)f(x_i + h/4, y_i + k_1/4) \\
 k_3 &= (h)f(x_i + h/4, y_i + k_1/8 + k_2/8) \\
 k_4 &= (h)f(x_i + h/2, y_i + k_2/2 + k_3) \\
 k_5 &= (h)f(x_i + 3h/4, y_i + 3k_1/16 + 9k_4/16) \\
 k_6 &= (h)f(x_i + h, y_i + (3k_1 + 2k_2 + 12k_3 + 12k_4 + 8k_5)/7)
 \end{aligned}$$

$h$  เป็นช่วงของการเพิ่มค่าของ  $x$  (step size)

การคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์สามารถเขียนเป็นโปรแกรมย่อยด้วยภาษา C ได้

ภาคผนวก จ.

### รายละเอียดโปรแกรม

โปรแกรมทั้งหมดเขียนด้วยภาษา C โดยใช้คอมไพเลอร์ ของบริษัทคอมพิวเตอร์  
อินโนเวชั่น จำกัด Optimizing C86 เวอร์ชัน 2.20J ซึ่งมีรายละเอียดของโปรแกรกดังต่อไปนี้

#### โปรแกรมการจำลองแบบระบบหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

```
/* program simulation 14:50:15 11/14/1987 */
#include "stdio.h"
float smp,vmx,amx,Kp[3],Ki[3],Kd[3],data[500][16];
main()
{
int chk,i;
chk = 0;
do {
edit_gain(&chk);
ctrl_sim(&chk);
graph_menu(chk);
crt_mode(2);
puts(" DO YOU WANT TEST CONTINUE ? ");
do { i = key_getc();
} while(i != 5497 && i != 12654);
chk = 1;
} while(i != 12654);
crt_mode(2);
puts(" good bye ! ");
}

/****** generate reference signal *****/
refsnl (zs,zf,nl)
float zs[3],zf[3];
int *nl;
{
extern float smp,amx,vmx,sqrt(),fabs(),data[][16];
float ttovm,ztovm,dz[3],Tam[3],Tvm[3],tt[3],Tofm,tts[3],
tmv[3],zvc[3],tvc[3],time,tme;
int i,l,md[3];
crt_srcp(1,64,0);
puts(" No. ref. ");
Tofm = 0;
ttovm = 0;
```

```

        /* find dz,dt start to vmax */
while (amx*ttovm < vmax)
    { ztovm = amx*ttovm*ttovm/2.0;
      ttovm += 0.001;
    };
for (i = 0; i < 3; i++)
    {
    dz[i] = fabs(zf[i]-zs[i]);
    Tam[i] = 4.0*dz[i]/amx;
    Tam[i] = sqrt(Tam[i]);
    Tvm[i] = 2.0*dz[i]/vmax;
    /**** set condition to mode of motion *****/
    if (Tvm[i] <= Tam[i])
        {
        md[i] = 1;
        tt[i] = Tam[i];
        tmv[i] = tt[i]/2.0;
        zvc[i] = tvv[i] = 0;
        }
    else
        {
        md[i] = 0;
        tt[i] = ttovm*2.0+(dz[i]-2.0*ztovm)/vmax;
        tmv[i] = vmax/amx;
        ztovm = amx*tmv[i]*tmv[i]/2.0;
        zvc[i] = dz[i]-2.0*ztovm;
        tvv[i] = zvc[i]/vmax;
        };
    /**** find time of motion *****/
    if (Tofm < tt[i])
        Tofm = tt[i];
    };

    /**** create input.ref file *****/
time = 0;  l = 0;
while (time <= Tofm+5.0*smp)
    {
    for(i = 0; i < 3; i++)
        {
        if (time <= tmv[i])
            {
            if (zs[i] <= zf[i])
                {
                data[l][i+1] = zs[i]+amx*time*time/2.0;
                data[l][i+7] = amx*time;
                }
            else
                {
                data[l][i+1] = zs[i]-amx*time*time/2.0;
                data[l][i+7] = -amx*time;
                };
            }
        }
    else if (time <= tmv[i]+tvv[i] && md[i] == 0)
        {
        if (zs[i] <= zf[i])
            {
            data[l][i+1] = zs[i]+((time-tmv[i])*vmax+ztovm);
            data[l][i+7] = vmax;
            }
            else

```

```

    {
        data[1][i+1] = zs[i]-((time-tmv[i])*vmx+ztovm);
        data[1][i+7] = -vmx;
    };
}
else if (time <= tt[i])
{
    tts[i] = tt[i]-tvc[i];
    tme = time-tvc[i];
    if (zs[i] <= zf[i])
    {
        data[1][i+1] = zs[i]+(amx*(tts[i]*tme-
            tme*tme/2.0-tts[i]*tts[i]/4.0)+zvc[i]);
        data[1][i+7] = amx*(tts[i]-tme);
    }
    else
    {
        tts[i] = tt[i]-tvc[i];
        tme = time-tvc[i];
        data[1][i+1] = zs[i]-(amx*(tts[i]*tme-
            tme*tme/2.0-tts[i]*tts[i]/4.0)+zvc[i]);
        data[1][i+7] = -amx*(tts[i]-tme);
    };
}
else
{
    data[1][i+1] = zf[i];
    data[1][i+7] = 0.0;
};
}; /* end of for */
crt_srcp(1,74,0);
printf(" %4d ",l);
time += smp; l += 1;
}; /* end of while */
*nl = l-1;
}

```

```

/* control loop with P I D controller */
float ca[4],sa[4],d[4],a[4],xb[4],yb[4];
float Ixx[4],Iyy[4],Izz[4],Ixy[4],Ixz[4];
float zb[4],ms[4],Iyz[4],Jzz[4];
float m1,motr,Ia1,Ia2,Ia3;

```

```

ctrl_sim(chk)
int *chk;

```

```

{

```

```

extern float smp,vmx,amx,Kp[],Ki[],Kd[],data[][16];
float pi = 3.1415927;
int i,l,lnk,nl,n[3];
float zs[3],f[4],time,err[3],itgerr[3],Km[3],xact[7];

```

```

    /* spec. of motor */
    n[0] = 90; n[1] = 90; n[2] = 100;
    Km[0] = 0.0741; Km[1] = 0.0741; Km[2] = 0.05; /*

```

```

    nl = *chk;
    itgerr[0]=itgerr[1]=itgerr[2]=0;
    time = 0; l = 0;

```

```

for(l=0;l<3;l++)
{ xact[2*l+1] = data[0][l+1];
  xact[2*l+2] = data[0][l+7];
}
/** control loop **/
for(l=0;l<=n1-1;l++) /* No. of cycle */
{ crt_srcp(1,74,0);
  printf(" %4d ",l);
  data[1][0] = time;
  for(lnk=0;lnk<3;lnk++)
  {
    err[lnk]=data[1+1][lnk+1]-data[1][lnk+4];
    itgerr[lnk] += smp*err[lnk];
    f[lnk+1] = Kp[lnk]*err[lnk]+Ki[lnk]*itgerr[lnk]+
              Kd[lnk]*data[1][lnk
    f[lnk+1] = Km[lnk]*f[lnk+1]*n[lnk]/2.0; /* assume
    data[1][lnk+13] = f[lnk+1];
  } /* end of each link */
  xact[0] = 0;   f[0] = 0;
  romech(6,&time,xact,smp,f);
  for(lnk=0;lnk<3;lnk++)
  { data[1+1][lnk+4] = xact[2*lnk+1];
    data[1+1][lnk+10] = xact[2*lnk+2];
  }
} /* end of control loop */
data[n1][0] = time;
for(lnk=0;lnk<3;lnk++)
  zs[lnk] = data[n1][lnk+4]*57.2957795;
crt_srcp(18,31,0);
printf("%7.2f",zs[0]);
crt_srcp(18,46,0);
printf("%7.2f",zs[1]);
crt_srcp(18,61,0);
printf("%7.2f",zs[2]);
putchar('\007');

crt_srcp(22,25,0);
puts(" PRESS ANY KEY TO CONTINUE ");
i = key_getc();
}

/***** Runge-Kutta sixth-order *****/
#define NofE 6

romech (nofe,x,y,h,f)

int nofe;
float *x,y[],f[],h;

{
  int i;
  float k1[NofE+1],k2[NofE+1],k3[NofE+1],k4[NofE+1],xfcn;
  float k5[NofE+1],k6[NofE+1],ydot[NofE+1],yfcn[NofE+1];

  k1[0] = k2[0] = k3[0] = 0;
  k4[0] = k5[0] = k6[0] = 0;
  ydot[0] = yfcn[0] = 0;
  for (i = 1; i < nofe+1; i++)
    yfcn[i]=y[i];
  xfcn=*x;
  fcn (nofe,&xfcn,yfcn,ydot,f);
}

```

```

for (i = 1; i < nofe+1; i++)
    k1[i]=h*ydot[i];
for (i = 1; i < nofe+1; i++)
    yfcn[i]=y[i]+k1[i]/4.0;
    xfcn=*x+h/4.0;
    fcn (nofe,&xfcn,yfcn,ydot,f);
for (i = 1; i < nofe+1; i++)
    k2[i] = h*ydot[i];
for (i = 1; i < nofe+1; i++)
    yfcn[i]=y[i]+k1[i]/8.0+k2[i]/8.0;
    xfcn=*x+h/4.0;
    fcn (nofe,&xfcn,yfcn,ydot,f);
for (i = 1; i < nofe+1; i++)
    k3[i]=h*ydot[i];
for (i = 1; i < nofe+1; i++)
    yfcn[i]=y[i]-k2[i]/2.0+k3[i];
    xfcn=*x+h/2.0;
    fcn (nofe,&xfcn,yfcn,ydot,f);
for (i = 1; i < nofe+1; i++)
    k4[i]=h*ydot[i];
for (i = 1; i < nofe+1; i++)
    yfcn[i]=y[i]+k1[i]*3.0/16.0+k4[i]*9.0/16.0;
    xfcn=*x+h*0.75;
    fcn (nofe,&xfcn,yfcn,ydot,f);
for (i = 1; i < nofe+1; i++)
    k5[i]=h*ydot[i];
for (i = 1; i < nofe+1; i++)
    yfcn[i]=y[i]-(k1[i]*3.0+k2[i]*2.0+k3[i]*12.0-
        k4[i]*12.0+k5[i]*8.0)/7.0;
    xfcn=*x+h;
    fcn (nofe,&xfcn,yfcn,ydot,f);
for (i = 1; i < nofe+1; i++)
    k6[i]=h*ydot[i];
for (i = 1; i < nofe+1; i++)
    y[i]=y[i]+(7.0*k1[i]+32.0*k3[i]+12.0*k4[i]+32.0*k5[i]
        +7.0*k6[i])/90.0;
    *x=*x+h;
}

/* complex form of fcn() */

#define ROW 4
#define CLM 4
#define N 3

fcn (nofe,time,xfcn,xdot,f)
int nofe;
float *time,xfcn[],xdot[],f[];

{
extern int fclose();
extern float sin(),cos();
extern float ca[N+1],sa[N+1],d[N+1],a[N+1],xb[N+1],yb[N+1];
extern float Ixx[N+1],Iyy[N+1],Izz[N+1],Ixy[N+1],Ixz[N+1];
extern float zb[N+1],ms[N+1],Iyz[N+1],Jzz[N+1];
extern float m1,motr,Ia1,Ia2,Ia3;
float A[N][ROW][CLM],T[N][N+1][ROW][CLM],g;
float TQ[N][N][ROW][CLM],Q[ROW][CLM],sz[N+1],cz[N+1];

```



```

float U[N][N+1][N+1][ROW][CLM],D[N+1][N+1];
float UC[N][N+1][N+1][N+1][ROW][CLM];
float J[N+1][ROW][CLM],JU[N][N+1][N+1][ROW][CLM],rtr;
float R[N+1][ROW],gUR,G[N+1],C[N+1][N+1][N+1],gU[ROW];
float xbn[N+1],ybn[N+1],zbn[N+1],Jxx[N+1],Jyy[N+1];
float ha[N+1][N+1],la[N+1][N+1],pa[N+1][N+1],qa[N+1][N+1];
float VF[N+1][N+1][N+1],UF[N+1][N+1],wa,wb,wc,wm;
int i,j,k,l,p,m,maxij,minij,maxijk,minijk;
FILE *spc;

```

```

    /**** open file for read data ****/
spc = NULL;
if (*time == 0)
    { if ((spc=fopen("spec.dat","r"))==NULL)
        { printf("cannot open spec.dat \n");
          exit(1);
        }
    }
for (i=1; i < N+1; i++)    /**** read sin(alpha) ****/
    fscanf(spc," %f",&sa[i]);
for (i=1; i < N+1; i++)    /**** read cos(alpha) ****/
    fscanf(spc," %f",&ca[i]);
for (i=1; i < N+1; i++)    /**** read d(i) ****/
    fscanf(spc," %f",&d[i]);
for (i=1; i < N+1; i++)    /**** read a(i) ****/
    fscanf(spc," %f",&a[i]);
for (i=1; i < N+1; i++)    /**** read mass(i) ****/
    fscanf(spc," %f",&ms[i]);
for (i=1; i < N+1; i++)    /**** read CG.of x-axis ****/
    fscanf(spc," %f",&xb[i]);
for (i=1; i < N+1; i++)    /**** read CG.of y-axis ****/
    fscanf(spc," %f",&yb[i]);
for (i=1; i < N+1; i++)    /**** read CG.of z-axis ****/
    fscanf(spc," %f",&zb[i]);
for (i=1; i < N+1; i++)    /**** read Ixx ****/
    fscanf(spc," %f",&Ixx[i]);
for (i=1; i < N+1; i++)    /**** read Iyy ****/
    fscanf(spc," %f",&Iyy[i]);
for (i=1; i < N+1; i++)    /**** read Izz ****/
    fscanf(spc," %f",&Izz[i]);
fscanf(spc,"%f %f %f",&Ia1,&Ia2,&Ia3); /* gear inertia */
fscanf(spc,"%f %f",&motr,&m1); /* motor mass payload */

```

```

    /**** move cg. for payload ****/
xbn[3] = ms[3]*xb[3]/(ms[3]+m1);
ybn[3] = ms[3]*yb[3]/(ms[3]+m1);
zbn[3] = ms[3]*zb[3]/(ms[3]+m1);
Ixx[3]=Ixx[3]+ms[3]*((ybn[3]-yb[3])*(ybn[3]-yb[3])+(zbn[3]-zb[3])*(zbn[3]-zb[3]))+m1*(ybn[3]*ybn[3]+zbn[3]*zbn[3]);
Iyy[3]=Iyy[3]+ms[3]*((xbn[3]-xb[3])*(xbn[3]-xb[3])+(zbn[3]-zb[3])*(zbn[3]-zb[3]))+m1*(xbn[3]*xbn[3]+zbn[3]*zbn[3]);
Izz[3]=Izz[3]+ms[3]*((xbn[3]-xb[3])*(xbn[3]-xb[3])+(ybn[3]-yb[3])*(ybn[3]-yb[3]))+m1*(xbn[3]*xbn[3]+ybn[3]*ybn[3]);
ms[3] = ms[3]+m1;
xb[3] = xbn[3];
yb[3] = ybn[3];
zb[3] = zbn[3];

```



```

    /**** move cg. for motor mass ****/
    xbn[2] = ms[2]*xb[2]/(ms[2]+motr);
    ybn[2] = ms[2]*yb[2]/(ms[2]+motr);
    zbn[2] = ms[2]*zb[2]/(ms[2]+motr);
    Ixx[2]=Ixx[2]+ms[2]*((ybn[2]-yb[2])*(ybn[2]-yb[2])+(zbn[2]-zb[2])*(zbn[2]-zb[2]))+motr*(ybn[2]*ybn[2]+zbn[2]*zbn[2]);
    Iyy[2]=Iyy[2]+ms[2]*((xbn[2]-xb[2])*(xbn[2]-xb[2])+(zbn[2]-zb[2])*(zbn[2]-zb[2]))+motr*(xbn[2]*xbn[2]+zbn[2]*zbn[2]);
    Izz[2]=Izz[2]+ms[2]*((xbn[2]-xb[2])*(xbn[2]-xb[2])+(ybn[2]-yb[2])*(ybn[2]-yb[2]))+motr*(xbn[2]*xbn[2]+ybn[2]*ybn[2]);
    ms[2] = ms[2]+motr;
    xb[2] = xbn[2];
    yb[2] = ybn[2];
    zb[2] = zbn[2];
    for (i=1; i<N+1; i++)
    { Jxx[i] = (-Ixx[i]+Iyy[i]+Izz[i])/2.0;
      Jyy[i] = (Ixx[i]-Iyy[i]+Izz[i])/2.0;
      Jzz[i] = (Ixx[i]+Iyy[i]-Izz[i])/2.0;
      Ixy[i] = Ixz[i] = Iyz[i] = 0;
    };
    } /* if time for open */
    if(spc) fclose(spc);
    /***** assemble g(1,4) *****/
    g = 9.81;
    /***** assemble A-matrices *****/
    /*** A[0] = A1 ***/
    for(i = 1; i < N+1; i++)
    { sz[i] = sin(xfcn[2*i-1]); cz[i] = cos(xfcn[2*i-1]);
      A[i-1][0][0] = cz[i]; A[i-1][0][1] = -ca[i]*sz[i];
      A[i-1][0][2] = sa[i]*sz[i]; A[i-1][0][3] = a[i]*cz[i];
      A[i-1][1][0] = sz[i]; A[i-1][1][1] = ca[i]*cz[i];
      A[i-1][1][2] = -sa[i]*cz[i]; A[i-1][1][3] = a[i]*sz[i];
      A[i-1][2][0] = 0; A[i-1][2][1] = sa[i];
      A[i-1][2][2] = ca[i]; A[i-1][2][3] = d[i];
      A[i-1][3][0] = A[i-1][3][1] = A[i-1][3][2] = 0;
      A[i-1][3][3] = 1;
    };
    /***** assemble r1(4) *****/
    for (i = 1; i < N+1; i++)
    { R[i][0] = xb[i]; R[i][1] = yb[i];
      R[i][2] = zb[i]; R[i][3] = 1;
    };
    /***** assemble J-matrix *****/
    for (i = 1; i < N+1; i++)
    {
      J[i][0][0] = Jxx[i]; J[i][0][1] = J[i][1][0] = Ixy[i];
      J[i][1][1] = Jyy[i]; J[i][0][2] = J[i][2][0] = Ixz[i];
      J[i][2][2] = Jzz[i]; J[i][1][2] = J[i][2][1] = Iyz[i];
      J[i][3][3] = ms[i];
      J[i][0][3] = J[i][3][0] = ms[i]*xb[i];
      J[i][1][3] = J[i][3][1] = ms[i]*yb[i];
      J[i][2][3] = J[i][3][2] = ms[i]*zb[i];
    };
    /***** assemble I-matrix *****/
    for (k = 0; k < N; k++)
    { for (i = 0; i < 4; i++)
      { for (j = 0; j < 4; j++)
        { if (i == j)
          T[k][k][i][j] = 1;
        };
      };
    };

```

```

        else
            T[k][k][i][j] = 0;
    };
};

/***** assemble Q-matrix *****/
for (i = 0; i < 4; i++)
    { for (j = 0; j < 4; j++)
        if (i == 0 && j == 1)
            Q[i][j] = -1;
        else { if (i == 1 && j == 0)
            Q[i][j] = 1;
            else
                Q[i][j] = 0;
        };
    };

/***** compute T-matrices *****/
for (p = 0; p < N; p++)
    { for (k = p; k < N; k++)
        Mtxmul (T[p][k], A[k], 4, 4, 4, T[p][k+1]);
    };

/***** compute Uij-matrices *****/
for (p = 0; p < N; p++)
    { for (i = p; i < N; i++)
        Mtxmul (T[p][i], Q, 4, 4, 4, TQ[p][i]);
    };

for (p = 0; p < N; p++)
    { for (i = p+1; i < N+1; i++)
        { for (k = i; k < N+1; k++)
            Mtxmul (TQ[p][i-1], T[i-1][k], 4, 4, 4, U[p][k][i]);
        };
    };

/***** compute Uijk-matrices *****/
for (p = 0; p < N; p++)
    { for (j = p+1; j < N+1; j++)
        { for (m = j; m < N+1; m++)
            { for (k = m; k < N+1; k++)
                {
                    Mtxmul (TQ[p][j-1], U[j-1][k][m], 4, 4, 4, UC[p][k][j][m]);
                    if (j != m)
                        for (i=0; i<ROW; i++)
                            for (l=0; l<CLM; l++)
                                UC[p][k][m][j][i][l] = UC[p][k][j][m][i][l];
                };
            };
        };
    };

/***** compute Dij *****/
for (p = 0; p < N; p++)
    { for (i = p+1; i < N+1; i++)
        { for (k = i; k < N+1; k++)
            { Tsp (U[p][k][i]);
              Mtxmul (J[k], U[p][k][i], 4, 4, 4, JU[p][k][i]);
              Tsp (U[p][k][i]);
            };
        };
    };

for (i = 0; i < N+1; i++)
    for (j = 0; j < N+1; j++)
        D[i][j] = 0;

```

```

for (i = 1; i < N+1; i++)
  { for (j = i; j < N+1; j++)
    { rtr = 0;
      if (i < j) { maxij = j;
                  minij = i; }
      else { maxij = i;
             minij = j; };
      for (k = maxij; k < N+1; k++)
        { p = minij-1;
          Trace (U[p][k][j],JU[p][k][i],4,4,&rtr);
          D[i][j] += rtr;
        };
      D[j][i] = D[i][j];
    };
  };

  /***** compute Dijk *****/
for (i = 0; i < N+1; i++)
  for (j = 0; j < N+1; j++)
    for (k = 0; k < N+1; k++)
      C[i][j][k] = 0;
for (i = 1; i < N+1; i++)
  { for (j = i; j < N+1; j++)
    { for (k = j; k < N+1; k++)
      { rtr = 0;
        if (i < j) { maxij = j;
                    minij = i; }
        else { maxij = i;
               minij = j; };
        if (maxij < k) maxijk = k;
        else maxijk = maxij;
        if (minij < k) minijk = minij;
        else minijk = k;
        for (m = maxijk; m < N+1; m++)
          { p = minijk-1;
            Trace (UC[p][m][j][k],JU[p][m][i],4,4,&rtr);
            C[i][j][k] += rtr;
          };
        C[i][k][j] = C[i][j][k];
      };
    };
  };

  /***** compute Gi *****/
for (i=0; i<N+1; i++)
  G[i] = 0;
for (i = 1; i < N+1; i++)
  { gUR = 0;
    for (k = i; k < N+1; k++)
      { for (j = 0; j < ROW; j++)
        {
          gU[j] = g*U[0][k][i][2][j];
          gUR += gU[j]*R[k][j];
        };
      G[i] += -ms[k]*gUR;
    };
  };

  /**** creat function xdot = f(xfcn,time) ****/
wa = D[3][1]*D[2][2]+D[3][1]*Ia2-D[3][2]*D[2][1];
wb = D[3][1]*D[2][1]-D[3][2]*D[1][1]-D[3][2]*Ia1;
wc = D[3][2]*D[3][2]-D[3][3]*D[2][2]-D[2][2]*Ia3
     -D[3][3]*Ia2-Ia2*Ia3;
wm = D[3][2]*D[3][1]-D[3][3]*D[2][1]-D[2][1]*Ia3;

```

```

for (i=1; i<N+1; i++)
  for (j=i; j<N+1; j++)
    {ha[i][j] = D[3][2]*C[1][i][j]-D[2][1]*C[3][i][j];
      if (i != j)
        ha[i][j] = 2.0*ha[i][j];
    };

for (i=1; i<N+1; i++)
  for (j=i; j<N+1; j++)
    {
      la[i][j] = D[3][2]*C[2][i][j]-(D[2][2]+Ia2)*C[3][i][j];
      if (i != j)
        la[i][j] = 2.0*la[i][j];
    };

for (i=1; i<N+1; i++)
  for (j=i; j<N+1; j++)
    {pa[i][j] = D[3][2]*C[1][i][j]-D[3][1]*C[2][i][j];
      if (i != j)
        pa[i][j] = 2.0*pa[i][j];
    };

for (i=1; i<N+1; i++)
  for (j=i; j<N+1; j++)
    {
      qa[i][j] = (D[3][3]+Ia3)*C[2][i][j]-D[3][2]*C[3][i][j];
      if (i != j)
        qa[i][j] = 2.0*qa[i][j];
    };

VF[1][0][0] = wa*wm-wb*wc;
for(i=1; i<N+1; i++)
  for(j=i; j<N+1; j++)
    VF[1][i][j] = (ha[i][j]*wc-la[i][j]*wm)/VF[1][0][0];
    UF[1][1] = D[3][2]*wc/VF[1][0][0];
    UF[1][2] = -D[3][2]*wm/VF[1][0][0];
    UF[1][3] = ((D[2][2]+Ia2)*wm-D[2][1]*wc)/VF[1][0][0];

VF[2][0][0] = wb*wc-wa*wm;
for (i=1; i<N+1; i++)
  for (j=i; j<N+1; j++)
    VF[2][i][j] = (pa[i][j]*wm-qa[i][j]*wb)/VF[2][0][0];
    UF[2][1] = D[3][2]*wm/VF[2][0][0];
    UF[2][2] = -((D[3][3]+Ia3)*wb+D[3][1]*wm)/VF[2][0][0];
    UF[2][3] = D[3][2]*wb/VF[2][0][0];

VF[3][0][0] = wa*wm-wb*wc;
for (i=1; i<N+1; i++)
  for (j=i; j<N+1; j++)
    VF[3][i][j] = (ha[i][j]*wa-la[i][j]*wb)/VF[3][0][0];
    UF[3][1] = D[3][2]*wa/VF[3][0][0];
    UF[3][2] = -D[3][2]*wb/VF[3][0][0];
    UF[3][3] = ((D[2][2]+Ia2)*wb-D[2][1]*wa)/VF[3][0][0];

for (k=1; k<N+1; k++)
  { xdot[2*k-1] = 0;
    xdot[2*k] = 0;
    for (i=1; i<N+1; i++)
      { xdot[2*k] += UF[k][i]*(f[i]-G[i]);
        for (j=i; j<N+1; j++)

```

```

        xdot[2*k] += VF[k][i][j]*xfcn[2*i]*xfcn[2*j];
    };
        xdot[2*k-1] = xfcn[2*k];
    };
}

    /***** Transpose a(m,n)t *****/
Tsp (a)

float a[][CLM];

{
    int i,j;
    float temp[ROW][CLM];

    for (i = 0; i < CLM; i++)
        { for (j = 0; j < ROW; j++)
            temp[i][j] = a[j][i];
        };
    for (i = 0; i < CLM; i++)
        { for (j = 0; j < ROW; j++)
            a[i][j] = temp[j][i];
        };
}

    /***** a(m,n)*b(n,j) = c(m,j) *****/
Mtxmul (a,b,m,n,j,c)

int m, n, j;
float a[][CLM], b[][CLM], c[][CLM];

{
    int clu, row, l;
    float cij;

    for (clu = 0; clu < j ; clu++)
        { for (row = 0; row < m; row++)
            { cij = 0;
              for (l = 0; l < n; l++)
                  cij += a[row][l]*b[l][clu];
              c[row][clu] = cij;
            };
        };
}

    /***** Tr[a(m,n)*b(n,m)] = tr *****/
Trace (a,b,m,n,tr)

int m, n;
float a[][CLM], b[][CLM], *tr;

{
    int row, l;
    float cij;

    *tr = 0;
    for (row = 0; row < m; row++)
        { cij = 0;
          for (l = 0; l < n; l++)
              cij += a[row][l]*b[l][row];
          *tr += cij;
        };
}

```



# โปรแกรมการควบคุมระบบหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

```
/* model control 11:10:07 11/9/1987 */

#include "stdio.h"

float smp,vmx,amx,Kp[3],Ki[3],Kd[3],data[500][19],zeta[6].

main()
{
int chk,i;
extern float smp,vmx,amx,Kp[],Ki[],Kd[],data[][19],zeta[];
float pos[3];

chk = 1;
smp = .01;      vmx = 0.5;      amx = 0.25;
Kp[0] = 315;   Kp[1] = 585;   Kp[2] = 275;
Ki[0] = 145;   Ki[1] = 275;   Ki[2] = 125;
Kd[0] = 3;     Kd[1] = 7;     Kd[2] = 2;
zeta[0] = zeta[3] = 90;  zeta[1] = zeta[4] = 85;
zeta[2] = zeta[5] = 70;
printf("Enter maxout[0..2] :");
scanf(" %f %f %f",&maxout[0],&maxout[1],&maxout[2]);
do { zero();
edit_gain(&chk);
crt_srcp(22,25,0);
printf(" MOVE ARM TO START POSITION ");
for(i=0;i<3;i++)
pos[i] = data[0][i+1];
go_desire(pos);
crt_srcp(22,25,0);
printf(" MOVE ARM WITH THE PROGRAM ");
control(&chk);
crt_srcp(22,25,0);
printf(" MOVE ARM TO HOME POSITION ");
pos[0] = 1.571;  pos[1] = 1.4835;  pos[2] = 1.2217;
go_desire(pos);
graph_menu(chk);
zero();
crt_mode(2);
puts(" DO YOU WANT TEST CONTINUE ? ");
do { i = key_getc();
} while(i != 5497 && i != 12654);
chk = 1;
} while(i != 12654);
crt_mode(2);
puts(" good bye ! ");
}
```

```

edit_gain(chck)

int *chck;

{

extern float smp,vmx,amx,Kp[],Ki[],Kd[],zeta[];
float zs[3],zf[3],val[13];
unsigned int pvlu;
int chk,nl,lnk,i,ii,iii;

chk = *chck;
crt_mode(2);
block2(0,0,23,79);
crt_srcp(1,20,0);
puts(" Test manipulator arm by PID controller ");
crt_srcp(4,10,0);
puts(" Moving data ");
crt_srcp(4,24,0);
puts(" vmx : ");
crt_srcp(4,31,0);
if(chk==0) scanf(" %f",&vmx);
crt_srcp(4,31,0);
printf("%7.2f",vmx);
crt_srcp(4,39,0);
puts(" amx : ");
crt_srcp(4,46,0);
if(chk==0) scanf(" %f",&amx);
crt_srcp(4,46,0);
printf("%7.2f",amx);
crt_srcp(4,54,0);
puts(" smp : ");
crt_srcp(4,61,0);
if(chk==0) scanf(" %f",&smp);
crt_srcp(4,61,0);
if(chk!=0) smp = smp*1000;
printf("%7.2f",smp);
crt_srcp(7,25,0);
puts(" PID controller gain ");
crt_srcp(9,10,0);
puts(" Waist ");
crt_srcp(10,10,0);
puts(" Shoulder ");
crt_srcp(11,10,0);
puts(" Elbow ");
for(lnk=0;lnk<3;lnk++)
{
crt_srcp(9+lnk,25,0);
puts(" Kp : ");
crt_srcp(9+lnk,31,0);
if(chk==0) scanf(" %f",&Kp[lnk]);
crt_srcp(9+lnk,31,0);
printf("%7.2f",Kp[lnk]);
crt_srcp(9+lnk,40,0);
puts(" Ki : ");
crt_srcp(9+lnk,46,0);
if(chk==0) scanf(" %f",&Ki[lnk]);
crt_srcp(9+lnk,46,0);
printf("%7.2f",Ki[lnk]);
crt_srcp(9+lnk,55,0);
}
}

```





```

puts(" Kd : ");
crt_srcp(9+lnk,61,0);
if(chk==0) scanf(" %f ",&Kd[lnk]);
crt_srcp(9+lnk,61,0);
printf("%7.2f",Kd[lnk]);
}
crt_srcp(22,4,0);
printf(" Use      move cursor to change data      PRESS
crt_srcp(22,9,0);
printf("%c %c ",'\033','\032');
val[0] = 0;
for(lnk=0;lnk<3;lnk++)
{ i = 4+lnk; ii = 5+lnk; iii = 6+lnk;
  val[i+2*lnk] = Kp[lnk];  val[iii+2*lnk] = Ki[lnk];
  val[iii+2*lnk] = Kd[lnk];
} val[1] = vmx; val[2] = amx; val[3] = smp;
adj_data(val,1);
for(lnk=0;lnk<3;lnk++)
{ i = 4+lnk; ii = 5+lnk; iii = 6+lnk;
  Kp[lnk] = val[i+2*lnk];  Ki[lnk] = val[iii+2*lnk];
  Kd[lnk] = val[iii+2*lnk];
} vmx = val[1]; amx = val[2]; smp = val[3];
smp = smp/1000;
crt_srcp(22,4,0);
printf("

crt_srcp(22,25,0);
puts(" INPUT POSITION TO MOVE ARM ");
putchar('\007');
crt_srcp(14,25,0);
puts(" Position of motion (deg) ");
crt_srcp(16,10,0);
puts(" Move from ");
crt_srcp(17,10,0);
puts("      To ");
crt_srcp(18,10,0);
puts("      Stop at ");
for(lnk=0;lnk<3;lnk++)
{
  crt_srcp(16+lnk,25,0);
  puts(" wa : ");
  crt_srcp(16+lnk,31,0);
  if(lnk==0) printf(" (>0) ");
  if(lnk==1) printf(" (<180) ");
  crt_srcp(16+lnk,40,0);
  puts(" sh : ");
  crt_srcp(16+lnk,46,0);
  if(lnk==0) printf(" (>0) ");
  if(lnk==1) printf(" (<165) ");
  crt_srcp(16+lnk,55,0);
  puts(" el : ");
  crt_srcp(16+lnk,61,0);
  if(lnk==0) printf(" (>0) ");
  if(lnk==1) printf(" (<145) ");
}
crt_srcp(16,31,0);
if(chk==0) scanf(" %f ",&zeta[0]);
if(zeta[0]<0 || zeta[0]>180) { putchar('\007'); zeta[0]
crt_srcp(16,31,0);
printf("%7.2f",zeta[0]);
crt_srcp(16,46,0);

```

```

if(chk==0) scanf(" %f",&zeta[1]);
if(zeta[1]<0 || zeta[1]>165)
    { putchar('\007'); zeta[1] = 85; }
crt_srcp(16,46,0);
printf("%7.2f",zeta[1]);
crt_srcp(16,61,0);
if(chk==0) scanf(" %f",&zeta[2]);
if(zeta[2]<0 || zeta[2]>145)
    { putchar('\007'); zeta[2] = 75; }
crt_srcp(16,61,0);
printf("%7.2f",zeta[2]);
crt_srcp(17,31,0);
if(chk==0) scanf(" %f",&zeta[3]);
if(zeta[3]<0 || zeta[3]>180)
    { putchar('\007'); zeta[3] = zeta[0]; }
crt_srcp(17,31,0);
printf("%7.2f",zeta[3]);
crt_srcp(17,46,0);
if(chk==0) scanf(" %f",&zeta[4]);
if(zeta[4]<0 || zeta[4]>165)
    { putchar('\007'); zeta[4] = zeta[1]; }
crt_srcp(17,46,0);
printf("%7.2f",zeta[4]);
crt_srcp(17,61,0);
if(chk==0) scanf(" %f",&zeta[5]);
if(zeta[5]<0 || zeta[5]>165)
    { putchar('\007'); zeta[5] = zeta[2]; }
crt_srcp(17,61,0);
printf("%7.2f",zeta[5]);
crt_srcp(22,4,0);
printf(" Use      move cursor to change data      PRESS
crt_srcp(22,9,0);
printf("%c %c ",'\033','\032');
for(lnk=0;lnk<6;lnk++)
    val[1+lnk] = zeta[lnk];
adj_data(val,2);
for(lnk=0;lnk<6;lnk++)
    zeta[lnk] = val[lnk+1];
    /* generate input singal */
for (lnk=0;lnk<3;lnk++)
    {
        zs[lnk] = zeta[lnk]*0.017453292; /* rad */
        zf[lnk] = zeta[lnk+3]*0.017453292;
    }
crt_srcp(22,4,0);
printf("
crt_srcp(22,25,0);
puts("      Creating Referance      ");
    refsnl (zs,zf,&n1);
    *chck = n1;
    putchar('\007');
crt_srcp(22,25,0);
puts(" PRESS ANY KEY TO MOVE ARM ");
i = key_getc();
putchar('\007');
}

adj_data(value,sec)
int sec;
float value[];

```

```

{
extern key_getc();
extern double atof();
int    j,check,dachk,i,index,point,sect;
char   s_data[15];
double temp,old_temp,val[13];

sect = sec;
for(j=1;j<13;j++)
    val[j] = value[j];
point = 0;
index = 1;
i = 0;
cursor_pos(index,sect);
s_data[i] = '\0';
old_temp = temp = val[index];
do
{
    check = key_getc();
    switch(check)
    {
        case 19200 : /* left arrow */
            if (i==0)
                val[index] = temp = old_temp ;
            cursor_pos(index,sect);
            printf("%7.2f",temp);
            if (index == 1 && sect == 1)    index = 13;
            if (index == 1 && sect == 2)    index = 7;
            index--;
            old_temp = temp = val[index];
            cursor_pos(index,sect);
            point = i = 0;
            break;
        case 19712 : /* right arrow */
            if (i==0)
                val[index] = temp = old_temp ;
            cursor_pos(index,sect);
            printf("%7.2f",temp);
            if (index == 12 && sect == 1)    index = 0;
            if (index == 6 && sect == 2)    index = 0;
            index++;
            old_temp = temp = val[index];
            cursor_pos(index,sect);
            point = i = 0;
            break;
        case 7181 : /* Return */
            if (i==0)
                val[index] = temp = old_temp ;
            cursor_pos(index,sect);
            printf("%7.2f",temp);
            cursor_pos(index,sect);
            old_temp = temp;
            point = i = 0;
            break;
    }
    dachk = check << 8;
    dachk = dachk >> 8;
    if (dachk <=57 && dachk >=48 ;; dachk == 46)
    {
        if (i == 0)

```

```

        {
        printf(" ");
        cursor_pos(index,sect);
        }
        s_data[i] = dachk;
        s_data[i+1] = '\0';
        printf("%c",s_data[i]);
        if (point > 0) point++;
        i++;
        temp = atof(s_data);
        val[index] = temp;
    }

    } while(check != 14624); /* Space */
    for(j=1;j<13;j++)
        value[j] = val[j];
}

cursor_pos(index,sect)
int index,sect;
{
    int r,c,i,j,chk,idx,sec;

    if (sect == 1)
    {
        if(index>0 && index<4) r = 4;
        if(index>3 && index<7) r = 9;
        if(index>6 && index<10) r = 10;
        if(index>9 && index<13) r = 11;
        for(j=1;j<=3;j++)
            { chk = j;
              for(i=1;i<=4;i++)
                  { if(index == chk) c = 16+15*j;
                    chk += 3;
                  }
            }
    }
    else
    { if(index>0 && index<4) r = 16;
      if(index>3 && index<7) r = 17;
      if(index == 1 || index == 4) c = 31;
      if(index == 2 || index == 5) c = 46;
      if(index == 3 || index == 6) c = 61;
    }
    crt_srcp(r,c,0);
}

control(chk)
int *chk;
{

extern float fabs(),smp,vmx,amx,Kp[3],Ki[3],Kd[3],data[];
float pi = 3.1415927;
unsigned int pvlv,vvlu,dtoa,selc;
int dl,dly,i,l,lnk,nl,n[3],reset;
float zs[3],zf[3],time,verr[3],err[3],itgerr[3],opvo,Km[3]

zero();

```

```

nl = *chk; dly = (smp-8.355)/0.022 ;
itgerr[0]=itgerr[1]=itgerr[2]=0;
time = 0; l = 0; reset = 1;
  /** control loop **/
for (l=0;l<nl;l++) /* No. of cycle */
{ data[l][0] = time;
  for(dl=0;dl<=dly;dl++); /* for delay */
  for (lnk=0;lnk<3;lnk++)
  {
    in(13+lnk,&pvl); /* read actual position (rad) */
    if(lnk == 0) data[l][4] = 0.001369*pvl-1.110758 ;
    if(lnk == 1) data[l][5] = 4.140573-0.001367*pvl ;
    if(lnk == 2) data[l][6] = 4.954108-0.001376*pvl ;
    in(0+lnk,&vvl); /* read actual velocity (rad/sec)
    if(lnk == 0) data[l][10] = 0.002268*vvl-4.766;
    if(lnk == 1) data[l][11] = 0.002268*vvl-4.714;
    if(lnk == 2) data[l][12] = 0.002751*vvl-6.000;
    verr[lnk]=data[l+1][lnk+7]-data[l][lnk+10];
    err[lnk]=data[l+1][lnk+1]-data[l][lnk+4];
    itgerr[lnk] += smp*err[lnk];
    if(data[l+1][lnk+1] == data[l][lnk+1] && reset == 1)
      { itgerr[lnk] = 0; reset = 0; }
    data[l][lnk+13]=Kp[lnk]*err[lnk]+Ki[lnk]*itgerr[lnk]
      +Kd[lnk]*verr[lnk];
    opvo = data[l][lnk+13];
    if(lnk == 1) dtoa = opvo*57.365913+2057.54; /* amp
    if(lnk == 0) dtoa = opvo*69.209770+2053.23; /* amp
    if(lnk == 2) dtoa = opvo*69.209770+2053.23; /* amp
    if(dtoa < 0) dtoa = 5;
    if(dtoa > 4095) dtoa = 4090;
    selc = 4 >> 2-lnk ;
    out(selc,dtoa);
  } /* end of each link */
  time += smp;
} /* end of control loop */
zero();
putchar('\007');
  /** read stop position (a/d ch13-15) **/
  in(13,&pvl); /* waist */
  zs[0] = 0.078429*pvl-63.641750 ;
  in(14,&pvl); /* shoulder */
  zs[1] = 237.237335-0.078343*pvl ;
  in(15,&pvl); /* elbow */
  zs[2] = 283.849487-0.078855*pvl ;
  crt_srcp(18,31,0);
  printf("%7.2f",zs[0]);
  crt_srcp(18,46,0);
  printf("%7.2f",zs[1]);
  crt_srcp(18,61,0);
  printf("%7.2f",zs[2]);
data[nl][0] = time;
data[nl][4] = zs[0]*pi/180;
data[nl][5] = zs[1]*pi/180;
data[nl][6] = zs[2]*pi/180;
data[nl][10] = data[nl][11] = data[nl][12] = 0;
hold_sh();
zero();
putchar('\007');
crt_srcp(22,25,0);
puts(" PRESS ANY KEY TO CONTINUE ");
i = key_getc();
}

```

```

    /* a/d in routine */
    in (chnl,value)
    unsigned int chnl,*value;

{
    unsigned int i,a,b,c;

    outportb(635,0); /* clear A/D register */
    outportb(632,chnl); /* select A/D channel */

    for (i=1;i<=7;i++)
        a = inportb(636);
    for (i=1;i<=7;i++)
        a = inportb(637);

    b =inportb(634);
    c =inportb(633);

    a = b << 12;
    b = a >> 4;
    *value = b+c;
}

    /* d/a out routine */
    out (lnkslc,value)
    unsigned int lnkslc,value;

{
    unsigned int i,a,b,c;

    b = value >> 8 ;
    a = value << 8 ;
    c = a >> 8 ;
    outportb(638,c); /* d/a out */
    outportb(639,b);
    outportb(638,c);
    outportb(639,b);
    outportb(888,lnkslc); /* link selected */
    for(i=0;i<=10;i++);
    outportb(888,0);
}

    /* exit routine */
    zero()

{
    unsigned int lnk,dtoa,selc;

    for(lnk=0;lnk<3;lnk++)
    {
        if(lnk == 0) dtoa = 2053; /* amp 40/2 w */
        if(lnk == 1) dtoa = 2057; /* amp 150 w */
        if(lnk == 2) dtoa = 2053; /* amp 40 w */
        selc = 4 >> 2-lnk ;
        out(selc,dtoa);
    }
    hold_sh();
}

```

```

hold_sh()
{
extern float fabs(),cos();
unsigned int pvlv,dtoa,selc;
int i;
float zs[3],opvo,c2,c23,d2,hv;
    /* read actual position (rad) */
    in(14,&pvlv);    zs[1] = 4.14057-0.001367*pvlv ;
    in(15,&pvlv);    zs[2] = 4.95411-0.001376*pvlv;
    c2 = cos(-0.1308997-zs[1]);
    c23 = cos(-zs[1]+1.05-zs[2]);
    d2 = 9.3187*c2+1.34456*c23;
    opvo = d2/2.5;
    dtoa = opvo*19.036495+2028.65; /* amp2 sw 120 */
    if(dtoa < 0 !! dtoa > 4095) zero();
    selc = 2 ;
    out(selc,dtoa);
}

go_desire(zd)
float zd[];
{
extern int key_scan();
extern float fabs(),vmx,Kp[],Ki[],Kd[],maxout[];
float zt[3],mvo[3],err[3],itgerr[3],opvo,vel[3],oldp[3],verr
unsigned int pvlv,dtoa,selc;
int lnk,chk;
float smp = 0.015;

    itgerr[0] = itgerr[1] = itgerr[2] = 0;
    do {
        for (lnk=0;lnk<3;lnk++)
        {
            in(13+lnk,&pvlv); /* read actual position (rad) */
            if(lnk == 0) zt[0] = 0.001369*pvlv-1.110758 ;
            if(lnk == 1) zt[1] = 4.140573-0.001367*pvlv ;
            if(lnk == 2) zt[2] = 4.954108-0.001376*pvlv ;
            vel[lnk] = (zt[lnk]-oldp[lnk])/smp;
            oldp[lnk] = zt[lnk];
            verr[lnk] = 0-vel[lnk];
            err[lnk]=zd[lnk]-zt[lnk];
            if(fabs(err[lnk])>0.05) itgerr[lnk] = 0;
            itgerr[lnk] += smp*err[lnk];
            mvo[lnk]=Kp[lnk]*err[lnk]+Ki[lnk]*itgerr[lnk]+Kd[lnk]*verr
            if(mvo[lnk]>0 && mvo[lnk]>maxout[lnk])
                mvo[lnk] = maxout[lnk];
            if(mvo[lnk]<0 && mvo[lnk]<-1.0*maxout[lnk])
                mvo[lnk] = -1.0*maxout[lnk];
            opvo = mvo[lnk];
            if(lnk == 0) dtoa = opvo*69.209770+2053.23; /* amp
            if(lnk == 1) dtoa = opvo*57.365913+2057.54; /* amp
            if(lnk == 2) dtoa = opvo*69.209770+2053.23; /* amp
            if(dtoa < 0 !! dtoa > 4095) zero();
            selc = 4 >> 2-lnk ;
            out(selc,dtoa);
        } /* end of each link */
        chk = key_scan();
        if(chk != -1) { err[0] = err[1] = err[2] = 0; }
    }while(fabs(err[0])>0.001 !! fabs(err[1])>0.001
        !! fabs(err[2])>0.001);
}

```

จากรายละเอียดของโปรแกรมทั้งหมดที่แสดงข้างต้น ตัวแปรที่สำคัญและความหมายของตัวแปรมีดังต่อไปนี้

smp : sampling period  
vmx : maximum velocity  
amx : maximum acceleration  
Kp[0] : proportional gain of waist  
Ki[1] : integral gain of shoulder  
Kd[2] : delivative gain of elbow  
data[][1]

i = 0 : time  
i = 1-3 : reference position  
i = 4-6 : actual position  
i = 7-9 : reference velocity  
i = 10-12 : actual velocity  
i = 13-15 : drived torque

