



รายงานผลการวิจัย
ศูนย์วิจัยรัชกาลที่๗เฉลิมโกษา

๔๐๑

การออกแบบและควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรมชนิด ๓ ข้อต่อ
ที่มีการเคลื่อนที่แบบทิกคาลาก

ไทย

จพ
วท 15
010439

วิทย์ อิงภากรณ์
วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

TM
00-01-20

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทุนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานผลการวิจัย



การออกแบบและควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรมชนิด 3 ข้อต่อ
ที่มีการเคลื่อนที่แบบพิกัดฉาก

โดย

ศ.ดร.วริทธิ์ อึ้งภากรณ์

ผ.ศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

พฤษภาคม 2535

19761697

23 มิ.ย. 2545

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีส่วนหนึ่งก็ด้วยความร่วมมือจากนิสิตของห้องปฏิบัติการควบคุม
อัตโนมัติ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่มีส่วนช่วยเหลือใน
การปรับปรุงระบบฮาร์ดแวร์ของตัวแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมนี้

การวิจัยครั้งนี้งบประมาณส่วนหนึ่งได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากโครงการรัชดาภิเษกสมโภช
ของฝ่ายวิจัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ คณะผู้วิจัยก็ต้องขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์-
มหาวิทยาลัย ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เลขหมู่	กพ ๑๑๕
เลขทะเบียน	๐๑๐๔๓๙
วัน,เดือน,ปี	๒๕๓๗.๒.๔๔

ชื่อโครงการวิจัย: การออกแบบและควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรมชนิด 3 ข้อต่อที่มีการเคลื่อนที่แบบพิกัดฉาก

ชื่อผู้วิจัย: ศ.ดร.วิริทธิ์ อิงภากรณ์ และ ผ.ศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

เดือนและปีที่วิจัยเสร็จ: กุมภาพันธ์ 2535.

บทคัดย่อ

หุ่นยนต์อุตสาหกรรมชนิดสามข้อต่อที่มีการเคลื่อนที่แบบพิกัดฉากนี้ควบคุมด้วยเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ ระบบขับเคลื่อนเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร ใช้เครื่องขยายกำลังสัญญาณ (Power amplifier) เป็นตัวจ่ายพลังงาน โดยระบบควบคุมการเคลื่อนที่จะเป็นแบบปิด เครื่องขยายกำลังสัญญาณ (Power amplifier) นั้น จะใช้ต่อเป็นแบบควบคุมกระแส (Current amplifier) และแบบควบคุมแรงดัน (Voltage amplifier)

จากผลการวิเคราะห์และทดลองเปรียบเทียบระบบควบคุมในแบบที่ใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมกระแส (Current amplifier) และแบบที่ใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมแรงดัน (Voltage amplifier) นั้น จะได้ว่าการควบคุมแบบที่ใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมแรงดัน (Voltage amplifier) นั้นระบบควบคุมจะใช้แบบพี (P, Proportional control) ก็เพียงพอ ทั้งนี้เนื่องจากว่าในวงจรถ่วงของเครื่องขยายสัญญาณ (amplifier) นั้น ภายในลูปภายใน (Innerloop) จะมีการบ่อนสัญญาณวัดความเร็วของการหมุนของมอเตอร์กลับสู่วงจรถ่วงของเครื่องขยายสัญญาณ (amplifier) และถ้าระบบควบคุมใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมกระแส (Current amplifier) ระบบควบคุมแบบพีดี (PD, Proportional plus Derivative) ก็มีความเหมาะสมเพียงพอ และเนื่องจากแกนที่สามของแขนหุ่นยนต์นี้มีความไม่เป็นเชิงเส้นอยู่อันเนื่องมาจากความเสียดทานและแบ็คแลช (backlash) การจะลดผลกระทบอันเนื่องมาจากความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearity) นี้ก็อาจจะทำได้โดยการเพิ่มค่าเกนของสัญญาณ บ่อนกลับ (feedback gain) ของความเร็ว (Velocity) ในลูปภายใน (innerloop) ของตัวขยายสัญญาณ (amplifier) ให้สูงเพียงพอ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Project Title: Design and Control of a Three Axis Cartesian Coordinate

Name of the Investigators: Prof. Dr. Variddhi Ungbhakorn and
Assist Dr. Viboon Sangveraphunsiri

Year: February, 1992.

ABSTRACT

A Microcomputer is used for controlling the 3-axis cartesian type robot manipulator arm. The actuator system consists of permanent magnet DC servomotor with power amplifier. The closeloop controller is implemented with both a Current amplifier and a Voltage amplifier.

From the analysis and the experiments, the comparison between the control with the Current amplifier and Voltage amplifier indicated that proportional control is adequate for the control with voltage amplifier because of the velocity feedback compensation in the innerloop of the amplifier. The proportional plus derivative is adequate for the control with the current amplifier. The nonlinearity effects of the third axis caused by the friction and the backlash in the transmission system can be reduced by using the sufficiently high velocity feedback gain.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ii
กิตติกรรมประกาศ	iii
สารบัญ	iv
สารบัญภาพ	v
1) บทนำ	1
2) รายละเอียดของตัวหุ่นยนต์อุตสาหกรรมชนิด 3 ข้อต่อแบบพิกัดฉากและพื้นฐานของระบบควบคุม	1
2.1) ส่วนประกอบหลักของแขนหุ่นยนต์และพื้นฐานระบบควบคุม	1
2.2) ตัวควบคุม	5
2.3) เพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์	5
2.4) ฟีดแบ็คทรานสดิวเซอร์ (Feedback Transduce)	5
2.5) มอเตอร์กระแสตรงและภาระ (DC Motor and Load)	6
2.6) สรุปผลการทดลองการขับเคลื่อนของแกนที่หนึ่งและแกนที่สอง	7
3) การออกแบบระบบขับเคลื่อนแกนที่สาม	15
4) ระบบมอเตอร์และเครื่องขยาย (Motor and Amplifier)	16
4.1 การทำงานของเครื่องขยายแบบควบคุมแรงดัน (Voltage amplifier control)	17
4.2 การทำงานของเครื่องขยายแบบควบคุมกระแส (Current Amplifier control)	18
4.3 เซอร์โวแอมพลิไฟเออร์แบบเพาล์กวิตโมดูลেশัน (Pulse Width Modulation, PWM)	20
4.4 เปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างการควบคุมการเคลื่อนที่โดยใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมกระแสและเครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมแรงดัน	22
5) การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องขยายสัญญาณ (Amplifier), มอเตอร์และภาระ	27
5.1 เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมแรงดัน กับ มอเตอร์ และภาระ	27
5.2 เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมกระแส กับ มอเตอร์ และภาระ	32
5.3 เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมกระแส กับมอเตอร์และภาระ โดยมีสัญญาณความเร็วย้อนกลับ (Velocity feedback) รวมอยู่ด้วย	33
6) ลูปของระบบควบคุม (Control loop) โดยใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมกระแส	36
7) ลูปของระบบควบคุม (Control loop) โดยใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมแรงดัน	38
8) แบบจำลองการทำงานของระบบพลศาสตร์และระบบควบคุม	40
(Control and Dynamic Systems Simulation)	
8.1 การจำลองการทำงานของระบบควบคุมที่ใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมแรงดัน	40
8.2 การจำลองการทำงานของระบบควบคุมที่ใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมกระแส	40
9) ผลการทดลอง	47
10) สรุปผลการวิจัย	55
หนังสืออ้างอิง	56
ภาคผนวก	57

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1	หุ่นยนต์อุตสาหกรรมชนิดสามข้อต่อแบบพิกัดฉาก.	1
รูปที่ 2.2	รายละเอียดของแขนหุ่นยนต์แบบพิกัดฉากที่สร้างขึ้น.	2
รูปที่ 2.3	ระบบส่งกำลังของแกนที่สาม.	3
รูปที่ 2.4	บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุม.	4
รูปที่ 2.5	ฮาร์ดแวร์ของระบบควบคุมหรือController ซึ่งเป็นเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์.	3
รูปที่ 2.6	ลิเนียร์เซอร์โวแอมป์ไฟเออร์ที่ใช้กับแกนที่สาม.	6
รูปที่ 2.7	พิดแบ็คทรานสดิวเซอร์ ก)เทคโคมิเตอร์ ข)เอ็นโค้ดเดอร์.	6
รูปที่ 2.8	บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมการขับเคลื่อนของแกนที่หนึ่งและสอง.	8
รูปที่ 2.9	แสดงลักษณะของแนวทางการเคลื่อนที่เป็นวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง ใช้สำหรับการทดสอบหาค่าความแม่นยำ.	8
รูปที่ 2.10	ตารางแสดงผลการทดสอบความแม่นยำในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง ที่ความเร็วตามแนวทางการเคลื่อนที่ต่าง ๆ.	10
รูปที่ 2.11	กราฟแสดงตำแหน่งที่ได้จากการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของแกนที่หนึ่งและแกนที่สอง ความเร็ว 0.005 m/s.	11
รูปที่ 2.12	กราฟแสดงความเร็วที่ได้จากการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของแกนที่หนึ่งและแกนที่สอง ที่ความเร็ว 0.005 m/s.	12
รูปที่ 3.1	ส่วนประกอบของระบบขับเคลื่อนแกนที่สาม.	13
รูปที่ 3.2	ชุดขับเคลื่อนแกนที่สาม.	14
รูปที่ 4.1	บล็อกไดอะแกรมของระบบมอเตอร์และแอมป์ไฟเออร์.	18
รูปที่ 4.2 ก	บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์กระแสตรง.	19
รูปที่ 4.2 ข	บล็อกไดอะแกรมของระบบมอเตอร์และเครื่องขยายสัญญาณกระแส.	19
รูปที่ 4.3	บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมที่แสดงส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้น.	21
รูปที่ 4.4	บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมที่ประกอบด้วยมอเตอร์, Current Amplifier และ Nonlinear.	21
รูปที่ 4.5	ระบบควบคุมการทำงานมอเตอร์กระแสตรงด้วยการควบคุมกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์.	23
รูปที่ 4.6	ระบบควบคุมการทำงานมอเตอร์กระแสตรงด้วยการควบคุมแรงดันไฟฟ้า.	23
รูปที่ 4.7	โปรไฟล์ความเร็วแบบแบง-แบง สำหรับการควบคุมแบบจุดต่อจุด. (Bang-Bang velocity for point to point control)	24
รูปที่ 4.8	โปรไฟล์ความเร็วที่ประกอบด้วยช่วงความเร็วคงที่. (Velocity profile with dwell period)	24
รูปที่ 5.1	Motor with Voltage amplifier ความสัมพันธ์ระหว่างขนาด (magnitude) และความถี่, เฟส (Phase)และความถี่, โคฮีเรนซ์ (Coherence function).	28

รูปที่ 5.2	Motor with Current amplifier ความสัมพันธ์ระหว่างขนาด (magnitude) และความถี่, เฟส (Phase)และความถี่, โคเฮียเรนซ์ (Coherence function)	30
รูปที่ 5.3	Motor with current amplifier and Innerloop velocity feedback ความสัมพันธ์ระหว่างขนาด (magnitude) และความถี่, เฟส (Phase)และความถี่, โคเฮียเรนซ์ (Coherence function)	34
รูปที่ 6.1	บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมโดยใช้เครื่องขยายสัญญาณกระแส	36
รูปที่ 7.1	บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมโดยใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมแรงดัน	38
รูปที่ 8.1	ผลการจำลองการเคลื่อนที่โดยใช้ $K_c=100$	41
รูปที่ 8.2	ผลการจำลองการเคลื่อนที่โดยใช้ $K_c=300$	42
รูปที่ 8.3	ผลการจำลองการเคลื่อนที่โดยใช้ $K_c=800$	43
รูปที่ 8.4	ผลการจำลองการเคลื่อนที่โดยใช้ $K_p=300$ และ $K_d=1$	44
รูปที่ 8.5	ผลการจำลองการเคลื่อนที่โดยใช้ $K_p=300$ และ $K_d=20$	45
รูปที่ 8.6	ผลการจำลองการเคลื่อนที่โดยใช้ $K_p=800$ และ $K_d=1$	46
รูปที่ 9.1	บล็อกไดอะแกรมของระบบที่ใช้ในการทดลอง	47
รูปที่ 9.2	เอาร์ทพุทจากการทดลองโดยใช้ค่า $K_p=10000$	48
รูปที่ 9.3	เอาร์ทพุทจากการทดลองโดยใช้ค่า $K_p=11000$	49
รูปที่ 9.4	เอาร์ทพุทจากการทดลองโดยใช้ค่า $K_p=5000$	50
รูปที่ 9.5	เอาร์ทพุทจากการทดลองโดยใช้ค่า $K_p=3500$ และ $K_d=1$	51
รูปที่ 9.6	เอาร์ทพุทจากการทดลองโดยใช้ค่า $K_p=4500$ และ $K_d=3$	52
รูปที่ 9.7	เอาร์ทพุทจากการทดลองโดยใช้ค่า $K_p=6000$ และ $K_d=3$	53

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



การออกแบบและควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรมชนิด 3 ข้อต่อ ที่มีการเคลื่อนที่แบบพิกัดฉาก

DESIGN AND CONTROL OF A THREE AXIS CARTESIAN COORDIATE

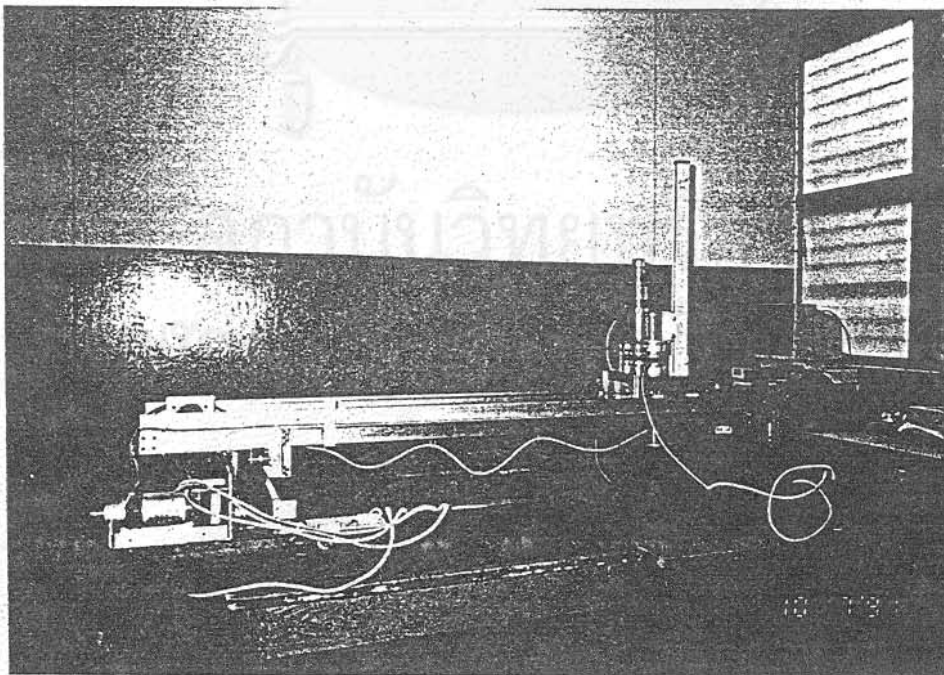
1. บทนำ

หัวข้อการวิจัยนี้เป็นหัวข้อการวิจัยที่ต่อเนื่องมาจากการวิจัยเรื่อง "การออกแบบและควบคุมโต๊ะตัดแผ่นเหล็กด้วยเปลวไฟ ที่ควบคุมด้วยเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์" โดยการวิจัยนี้ได้ตัดแปลงตัวโต๊ะตัดแผ่นเหล็กเพื่อให้ตัวแขนของโต๊ะนั้นสามารถเคลื่อนที่ในแนวแกนตั้งหรือแกน z ได้ การขับเคลื่อนของแกนที่สามนี้จะใช้มอเตอร์กระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet DC Motor) ในการขับเคลื่อน ดังนั้นจึงต้องมีกลไกที่จะสามารถเปลี่ยนการเคลื่อนที่แบบหมุน (Rotaty Motion) ให้เป็นการเคลื่อนที่แนวเส้นตรง (Linear Motion) การวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างกลไกนี้ด้วย แต่เนื่องจากกลไกนี้มีแรงเสียดทานและมีแบ็คแลช (backlash) ซึ่งจะทำให้การควบคุมไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Control) ดังนั้นจึงจะได้มาศึกษาถึงผลลัพธ์ต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของแขนที่สามนี้

2. รายละเอียดของตัวหุ่นยนต์อุตสาหกรรมชนิด 3 ข้อต่อแบบพิกัดฉากและพื้นฐานของระบบควบคุม

2.1 ส่วนประกอบหลักของแขนหุ่นยนต์และพื้นฐานระบบควบคุม

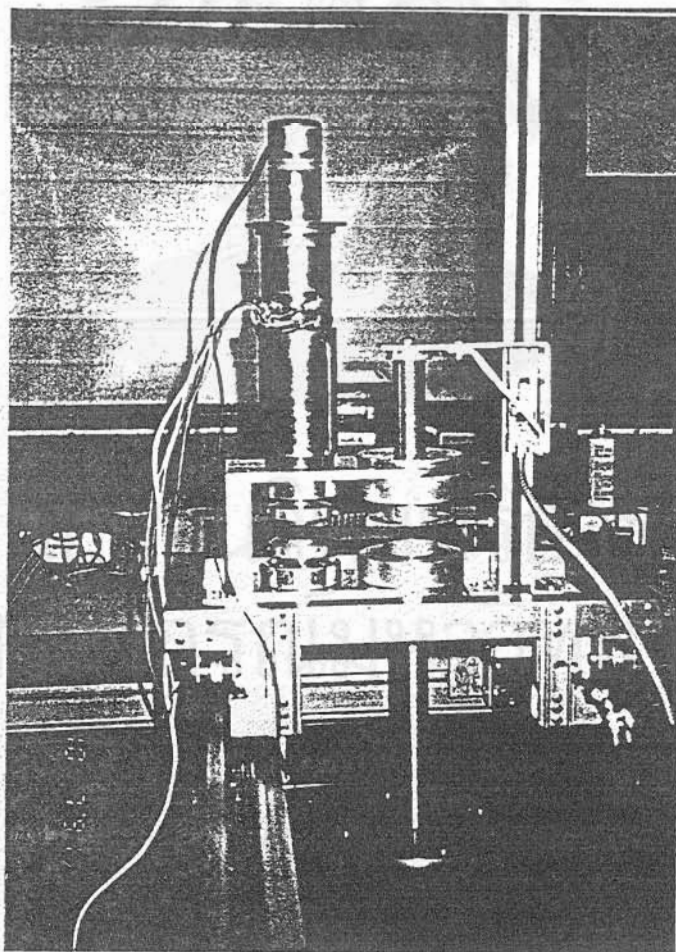
เพื่อความสมบูรณ์และความต่อเนื่องในตัวของรายงานการวิจัยนี้ จึงจะได้กล่าวถึงรายละเอียดบางส่วนที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ของโต๊ะตัดแผ่นเหล็กด้วยเปลวไฟ และการตัดแปลงสำหรับพัฒนาหุ่นยนต์อุตสาหกรรมชนิด 3 ข้อต่อแบบพิกัดฉาก



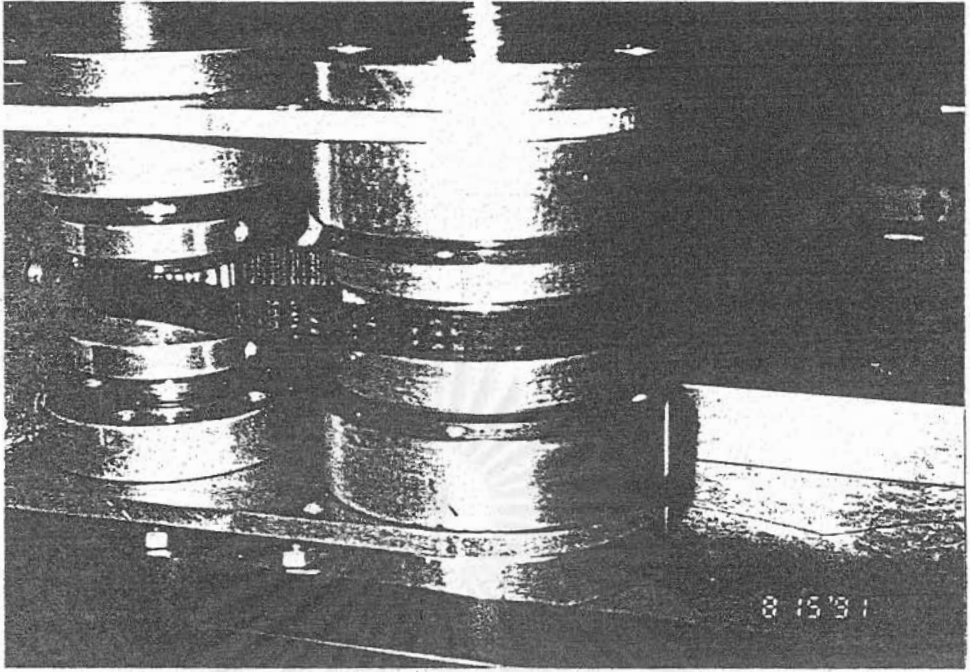
รูปที่ 2.1 หุ่นยนต์อุตสาหกรรมชนิดสามข้อต่อแบบพิกัดฉาก

โต๊ะตัดแผ่นเหล็กที่ได้ออกแบบไว้แล้วนั้นเป็นแทนโต๊ะที่มีการเคลื่อนที่ในระนาบสองทิศทางตั้งฉากซึ่งกันและกันดังแสดงในรูปที่ 2.1 การเคลื่อนที่ในแต่ละทิศทางนั้นจะมีรางเป็นตัวบังคับให้การเคลื่อนที่นั้นมีแนวถูกต้องตามต้องการ โดยล้อของแทนแต่ละแทนซึ่งทำด้วยลูกปืนจะวิ่งเกาะไปบนรางซึ่งทำด้วยอลูมิเนียม การขับเคลื่อนนั้นจะใช้ระบบล้อยานพาน โดยใช้มอเตอร์กระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร (Electrocraft E586/Tachometer installed) เป็นตัวขับเคลื่อน ที่แกนของมอเตอร์จะมีชุดเฟืองทดที่มีอัตราทดรอบ 1:90 ต่ออยู่ และเอาที่พุทของชุดเฟืองทปกนี้ก็จะต่ออยู่กับพูลเลย์ (pulley) ที่ตัวพูลเลย์ (pulley) นี้จะมีสลิงพันอยู่โดยต่อไปถึงฐานแทนโต๊ะที่เคลื่อนที่ สลิ่งนี้จะเป็นตัวส่งกำลังจากมอเตอร์กระแสตรงไปยังฐานแทนเพื่อให้แทนนั้นเคลื่อนที่ไปบนราง ระบบขับเคลื่อนทั้งสองแกนคือแกน X และแกน Y มีลักษณะเช่นเดียวกัน นอกจากนั้นก็ติดตั้งอุปกรณ์วัดตำแหน่งและความเร็วของการเคลื่อนที่ อุปกรณ์วัดตำแหน่งและความเร็วนี้จะเป็นตัวป้อนข้อมูลกลับไปสู่คอมพิวเตอร์สำหรับใช้ในระบบควบคุมแบบปิด ดังแสดงในรูปที่ 2.2

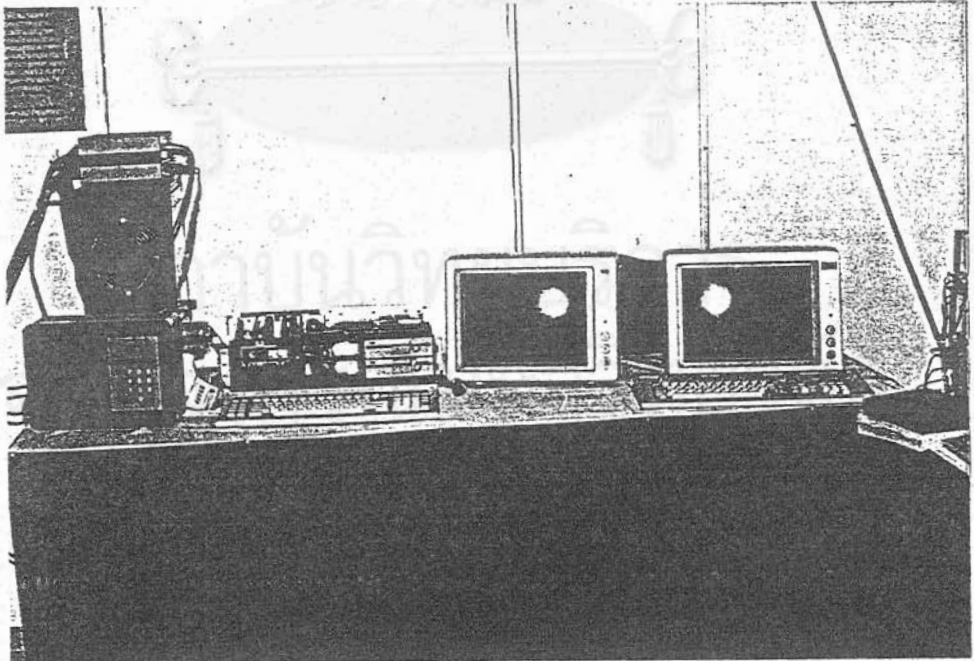
การเคลื่อนที่ของแขนที่สามนั้นก็ใช้มอเตอร์กระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวรเช่นเดียวกัน (Electrocraft E588/Tachometer installed) แต่เป็นคนละรุ่นกับอีกสองแกนที่กล่าวมาแล้ว สำหรับมอเตอร์ขับเคลื่อนของแขนที่สามนี้ จะไม่มีชุดเฟืองทดต่ออยู่ที่แกนของมอเตอร์ และระบบส่งกำลังนั้นก็ไม่ใช่ระบบล้อยานพานแบบแกนที่หนึ่งและสองดังที่กล่าวมาแล้ว การขับเคลื่อนของแกนที่สามนี้จะใช้ระบบสกรูกำลัง (Power Screw) แทน



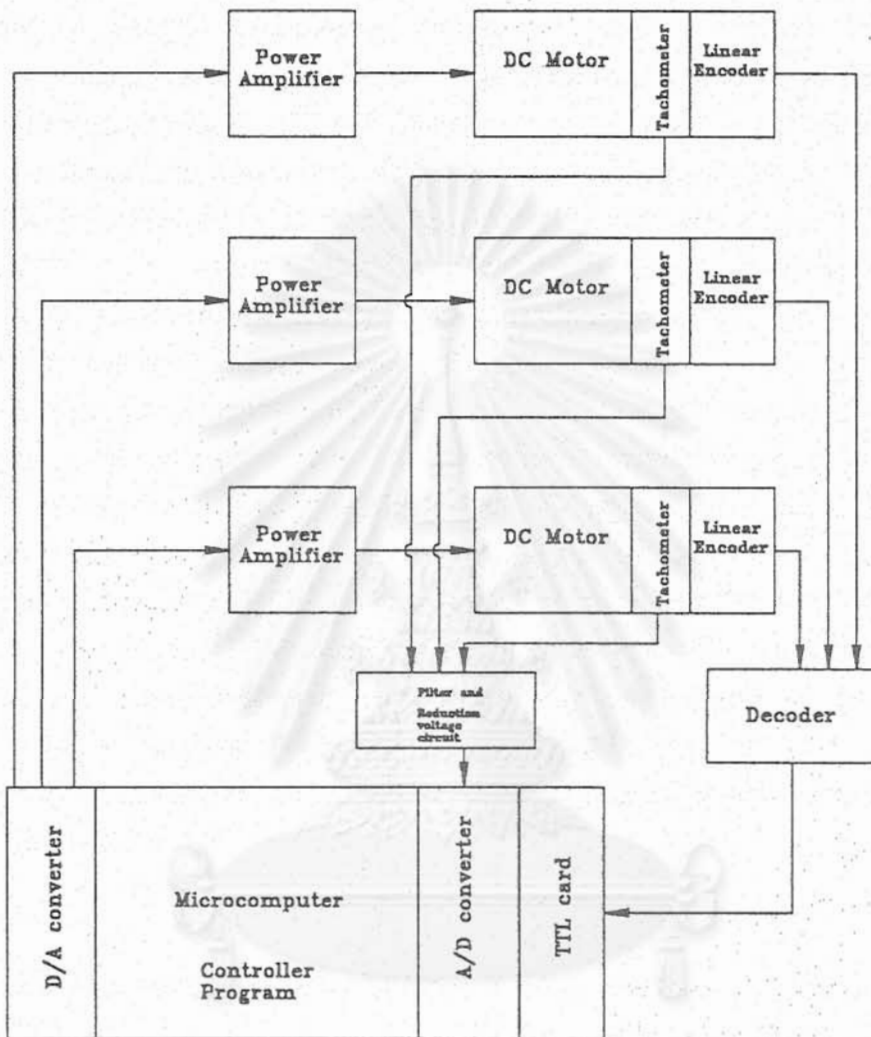
รูปที่ 2.2 รูปรายละเอียดของแขนหุ่นยนต์ชนิดพิกัดฉากที่สร้างขึ้น



รูปที่ 2.3 ระบบส่งกำลังของแกนที่สาม



รูปที่ 2.5 ฮาร์ดแวร์ของระบบควบคุม



รูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดของการออกแบบต่อไปในภายหลัง มอเตอร์จะส่งกำลังไปยังสกรูกำลัง (Power Screw) โดยผ่านสายพานทามมิ่ง (Timing Belt) และที่แกนที่สามนี้จะติดตั้งชุดวัดตำแหน่งซึ่งเป็นลิเนียร์เอ็นโคดเดอร์ (Linear Encoder) ที่ต่อกับตัวสกรูกำลัง (Power Screw) และชุดวัดความเร็วการหมุนของมอเตอร์ ซึ่งติดตั้งที่แกนของมอเตอร์โดยตรง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.3

จากรูปที่ 2.4 แสดงบล็อกไดอะแกรมของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมชนิด 3 ข้อต่อแบบพิกัดฉาก การทำงานของระบบจะถูกควบคุมโดยเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ โดยจะเริ่มต้นจากการอ่านค่าตำแหน่งและความเร็วของแต่ละแกน การวัดตำแหน่งจะใช้อปติคัลลิเนียร์เอ็นโคดเดอร์ (Optical Linear Encoder) ที่ติดตั้งกับระบบแต่ละแกน โดยตัวอปติคัลลิเนียร์เอ็นโคดเดอร์จะให้สัญญาณผ่านวงจรถอดรหัส (Decoder) และวงจรรับนับ (Counter) ให้สัญญาณตำแหน่งเป็นรหัสไบนารี (Binary Code) และส่งผ่านเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์โดยผ่านแผงวงจร ที.ที.แอล (TTL Card) ส่วนการวัดความเร็วจะใช้ทาคโอมิเตอร์ (Tachometer) ซึ่งติดตั้งกับตัวมอเตอร์ สัญญาณที่ได้จากทาคโอมิเตอร์เป็นสัญญาณแรงดันที่แปรตามความเร็วของมอเตอร์ สัญญาณแรงดันนี้จะถูกส่งผ่านตัวลดแรงดันและตัวกรองความถี่สูง (lowpass filter) เพื่อปรับความดันให้อยู่ในช่วง ± 10 Volts ก่อนจะส่งผ่านเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์โดยผ่านอานาล็อก/ดิจิตอลคอนเวอร์เตอร์ (Analog/Digital Converter)

หลังจากอ่านค่าตำแหน่งและความเร็ว ตัวควบคุมจะนำค่าที่อ่านได้ไปเปรียบเทียบกับจุดอ้างอิงจุดแรกทีคำนวณเก็บไว้ (รายละเอียดจะกล่าวต่อไป) เพื่อทำการคำนวณค่าสัญญาณควบคุมที่จะส่งไปควบคุมมอเตอร์ของแต่ละแกน เมื่อคำนวณหาค่าสัญญาณควบคุมได้แล้วก็ทำการส่งสัญญาณควบคุมผ่านดิจิตอล/อานาล็อกคอนเวอร์เตอร์ (Digital/Analog Converter) ไปยังตัวแยกสัญญาณและรักษาระดับแรงดัน (Sample & Hold) เพื่อส่งต่อออกนอกเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ไปยังตัวแอมพลิไฟเออร์ ซึ่งจะขยายกำลังของสัญญาณให้สูงขึ้นก่อนจะส่งไปยังมอเตอร์อีกทอดหนึ่ง จากมอเตอร์กำลังจะถูกส่งผ่านเฟืองทดและผ่านสลิงที่ต่ออยู่เพื่อขับเคลื่อนแขนของแกนที่หนึ่งและแกนที่สอง ส่วนแกนที่สามนั้นมอเตอร์จะส่งกำลังโดยผ่าน Timing Belt ไปยังชุด Power Screw จากนั้นก็จะมี การอ่านค่าตำแหน่งและความเร็วมาเปรียบเทียบกับจุดอ้างอิงจุดต่อไป แล้วดำเนินการตามขั้นตอนข้างต้นจนครบจุดอ้างอิงที่ได้ทำการคำนวณไว้

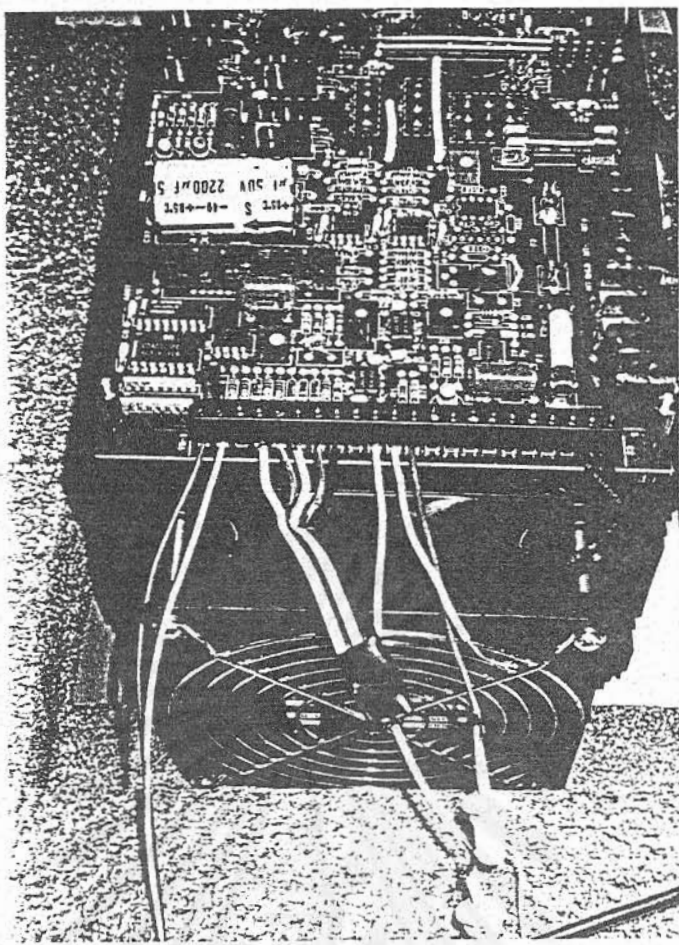
2.2 ตัวควบคุม

ตัวควบคุมนี้เป็นตัวควบคุมสัญญาณที่ใช้ควบคุมมอเตอร์กระแสดตรงและภาระ (load) แบ่งเป็น 2 แบบคือตัวควบคุมที่ให้สัญญาณควบคุมเป็นสัญญาณอานาล็อก เราเรียกว่าตัวควบคุมแบบอานาล็อก (Analog Controller) และตัวควบคุมที่ให้สัญญาณควบคุมเป็นสัญญาณดิจิตอล (Digital Controller) สำหรับโครงการวิจัยนี้จะใช้ตัวควบคุมที่ประกอบด้วยเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ของ ALR 20CSX หน่วยความจำ 2 Mbyte โดยเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์นี้จะติดตั้งชุดรับและส่งสัญญาณจากภายนอก (Analog/Digital, Digital/Analog Converter) เพื่อรับสัญญาณที่ส่งมาจาก Transducer และส่งสัญญาณไปยังชุดขับแอมพลิไฟเออร์ การออกแบบระบบควบคุมจะใช้วิธีการของการออกแบบแบบอานาล็อก (Analog Design) ดังแสดงในรูปที่ 2.5

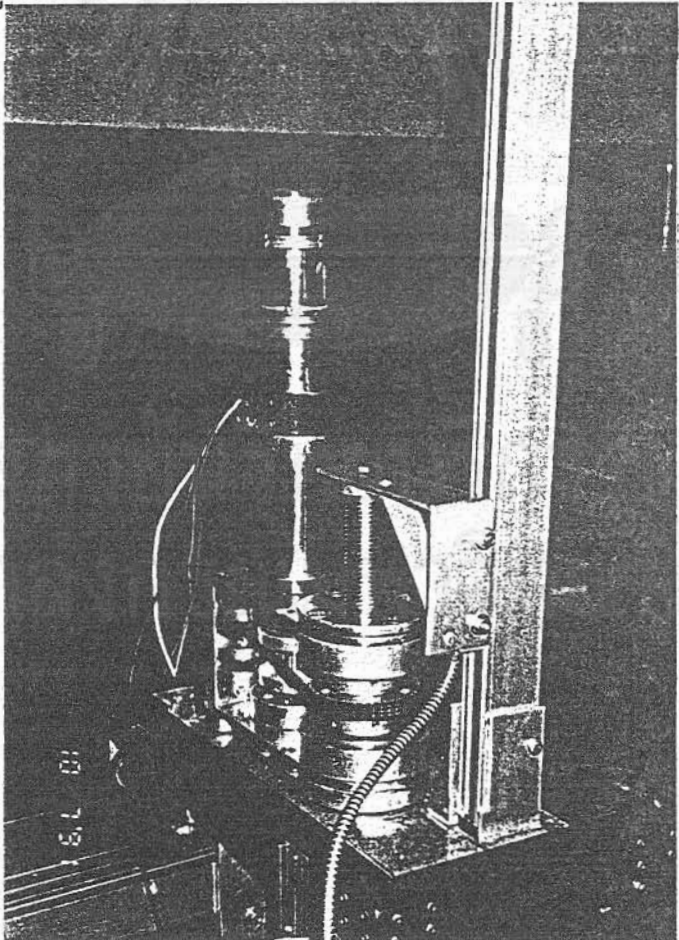
2.3 เพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์ (Power Amplifier)

เพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์เป็นส่วนประกอบของระบบที่อยู่ระหว่างตัวควบคุมกับมอเตอร์กระแสดตรงและภาระหน้าที่ของเพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์คือปรับปรุงและขยายสัญญาณที่ได้จากตัวควบคุมหรือคอมพิวเตอร์ให้เหมาะสมก่อนที่จะป้อนให้มอเตอร์ เพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์แบ่งเป็น 2 แบบคือลิเนียร์เพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์ (Linear Power Amplifier) ซึ่งใช้กับงานที่ต้องการกำลังไม่สูงมาก และแบบเพาล์วิดโมดูเลชัน (Pulse Width





รูปที่ 2.6 ลิเนียร์เซอร์โวแอมพลิไฟเออร์ ที่ใช้กับแกนที่สาม



รูปที่ 2.7 ฟิตแม็คทรานสดิวเซอร์ ก) เทคโคมิเตอร์ ข) เอ็นโค้ดเดอร์

Modulation Amplifier) ซึ่งใช้สำหรับงานที่ต้องการกำลังสูง สำหรับสองแกนแรกนั้นจะเป็นแบบลิเนียร์เพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์ (Linear Power Amplifier) ส่วนแกนที่สามนั้นจะเป็นแบบลิเนียร์เซอร์โวแอมพลิไฟเออร์ (Linear servo Amplifier) ซึ่งมีอัตราส่งกำลังมากกว่า 300 วัตต์ ดังรูปที่ 2.6

2.4 พีดแบ็คทรานสดิวเซอร์ (Feedback Transducer)

พีดแบ็คทรานสดิวเซอร์เป็นส่วนประกอบของระบบที่รับรู้สัญญาณเอาต์พุตที่ต้องการป้อนกลับไปเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง พีดแบ็คทรานสดิวเซอร์แบ่งเป็น 2 แบบคืออนาลอกทรานสดิวเซอร์ ซึ่งให้สัญญาณป้อนกลับเป็นสัญญาณอนาลอก เช่นแทคโอมิเตอร์ (Tachometer) ส่วนอีกแบบคือแบบดิจิตอลทรานสดิวเซอร์ เช่น ออปติคัลเอ็นโคเดอร์ (Optical Encoder) ดังแสดงในรูปที่ 2.7

2.5 มอเตอร์กระแสตรงและภาระ (D.C. Motor and Load)

มอเตอร์กระแสตรงและภาระเป็นส่วนที่ถูกควบคุมหรือส่วนที่ออกแรงทำงาน มอเตอร์ที่ใช้จะเป็นมอเตอร์กระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet DC Motor) โดยสองแกนแรกจะใช้มอเตอร์ Electrocraft E586 ซึ่งให้กำลังงานสูงสุดได้ประมาณ 90 watts ส่วนแกนที่สามนั้นจะใช้มอเตอร์ Electrocraft E588 ซึ่งจะให้กำลังได้สูงเกินกว่า 200 watts รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้กับแกนสองแกนแรก สามารถดูได้จากหนังสืออ้างอิงที่ (1) ได้

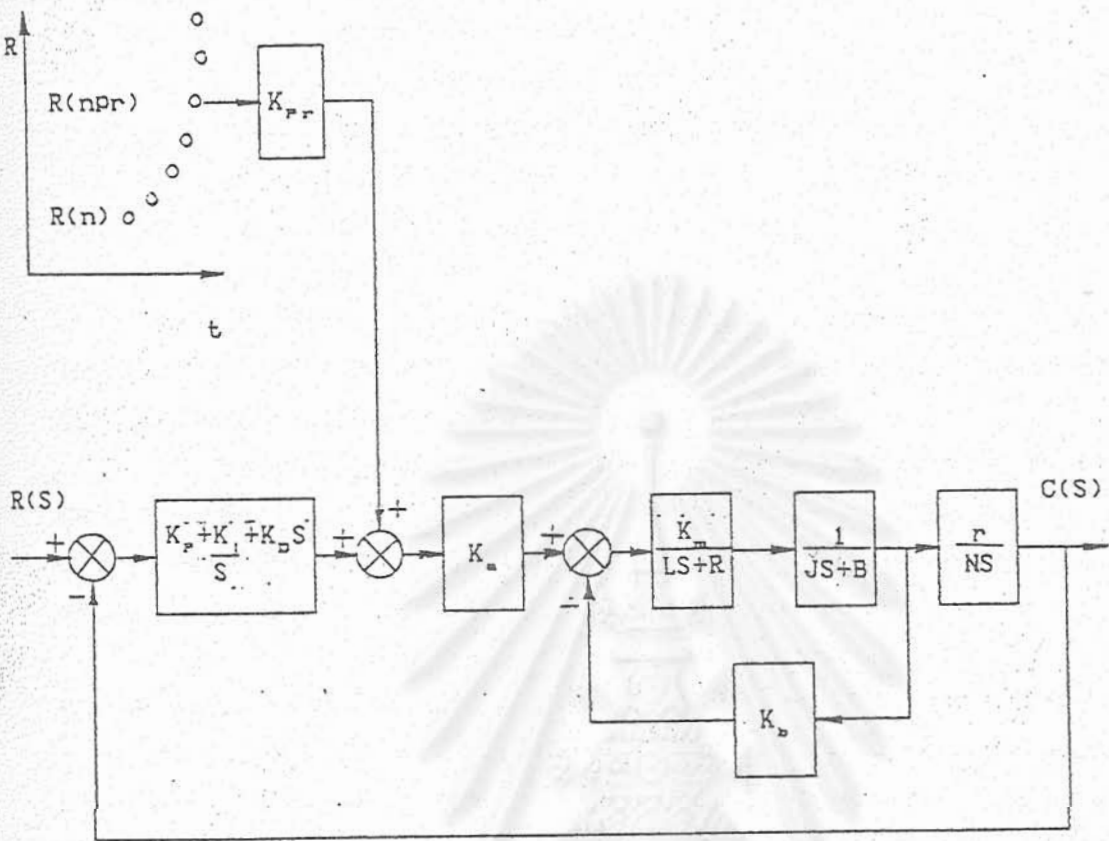
2.6 สรุปผลการทดลองการขับเคลื่อนของแกนที่หนึ่งและแกนที่สอง

ระบบการควบคุมการเคลื่อนที่ของแกนที่หนึ่งและแกนที่สองนั้นจะใช้การควบคุมแบบพี.ไอ.ดี.พี (Proportional, Derivative, Integral plus Preview, PIDP) ซึ่งเป็นกรนำเอาสัญญาณควบคุมแบบพีริวิวมาใช้เพื่อช่วยลดค่าความผิดพลาดเมื่อการเคลื่อนที่มีการเปลี่ยนทิศทางหรือแนวการเคลื่อนที่มีการหักมุม รูป 2.8 เป็นรูปบล็อกไดอะแกรมที่แสดงถึงระบบควบคุมแบบบี ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการที่แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตกับค่าสัญญาณต่าง ๆ ดังนี้คือ

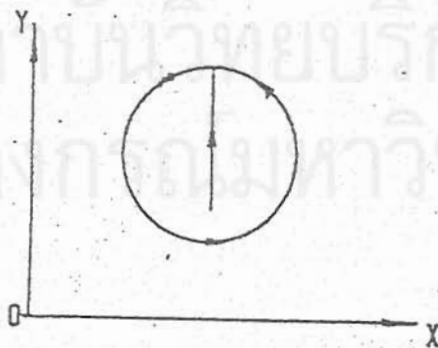
$$m(t) = K_p * e(t) * K_i * \int_0^t e(t) dt + K_d * \dot{e}(t) + K_{pr} * [R(n + npr) - C(n)] \quad (2.1)$$

โดยกำหนดให้

- $m(t)$ = สัญญาณควบคุมที่ได้จากตัวควบคุมแบบ พี.ไอ.ดี.พี ที่เวลา t
- $e(t)$ = ค่าสัญญาณแตกต่างระหว่างจุดอ้างอิงกับค่าที่วัดได้ที่เวลา t
- $R(n)$ = จุดอ้างอิงที่เวลา $t = n * \Delta t$
- $C(n)$ = ค่าตำแหน่งที่วัดได้ที่เวลา $t = n * \Delta t$
- npr = จุดอ้างอิงที่มองไปล่วงหน้าที่ยกกับจุดอ้างอิงที่เวลา $t = n * \Delta t$
- K_p = ค่าเกน พี
- K_i = ค่าเกน ไอ
- K_d = ค่าเกน ดี
- K_{pr} = ค่าเกนพีริวิว
- K_a = อัตราขยายของเพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์



รูปที่ 2.8 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมการขับเคลื่อนของแกนที่หนึ่งและสอง



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะของแนวทางการเคลื่อนที่เป็นวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง ใช้สำหรับการทดสอบหาความแม่นยำ

$K m$	=	ค่าคงที่แรงบิดของมอเตอร์
L	=	ค่าอินดักแตนซ์ของมอเตอร์
R	=	ค่าความต้านทานของมอเตอร์
J	=	ค่าโมเมนต์ของแรงเฉื่อยของมอเตอร์และภาระ
B	=	สัมประสิทธิ์ของวิสกอสแดมปีงของมอเตอร์และภาระ
r	=	รัศมีของล้อสายพาน
N	=	อัตราทดของชุดเฟืองทด

รายละเอียดของการออกแบบระบบควบคุมสามารถศึกษาได้จากเอกสารอ้างอิงที่ (1) ซึ่งได้กล่าวไว้แล้ว โดยละเอียด ในที่นี้จะนำเสนอสรุปเฉพาะผลการทดลองเท่านั้น รายละเอียดของอุปกรณ์จำเป็นที่ใช้ในการทดลองระบบขับเคลื่อนของแกนที่หนึ่งและสองก็สามารถศึกษาได้จากเอกสารอ้างอิงดังกล่าว

ผลการทดลองนี้จะแสดงเฉพาะการเคลื่อนที่ของปลายแขนตามแนวทางเดินที่เป็นวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.9 โดยจะเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ที่ความเร็วต่างกันคือที่ความเร็ว 0.005 m/s, 0.015 m/s และที่ความเร็ว 0.025 m/s รูปที่ 2.10 เป็นตารางแสดงเปรียบเทียบซึ่งแสดงผลของค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วของแกน x และแกน y

จากตารางในรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าที่ความเร็วตามแนวการเคลื่อนที่ค่าต่ำ ๆ จะมีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและค่าความผิดพลาดของความเร็วที่น้อยกว่าค่าความผิดพลาดที่ความเร็วตามแนวแกนการเคลื่อนที่ที่มีค่าสูง ทั้งนี้เพราะระบบควบคุมที่ใช้ในการควบคุมมีลักษณะเป็นแบบ point to point ดังนั้นค่าเกนของสัญญาณควบคุมที่หาได้จะใช้ได้ดีที่ความเร็วช่วงหนึ่ง ซึ่งการออกแบบเราได้ออกแบบหาค่าเกนที่ช่วงความเร็วต่ำ ดังนั้นถ้าเรานำค่าเกนของสัญญาณควบคุมที่หาได้ไปใช้ควบคุมความเร็วการเคลื่อนที่ที่มีค่าสูงขึ้นค่าความผิดพลาดก็จะมีค่าสูงขึ้น

จากรูปที่ 2.11 และ 2.12 เป็นกราฟแสดงผลการทดสอบการเคลื่อนที่เป็นรูปวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางโดยให้ความเร็วในการเคลื่อนที่เท่ากับ 0.005 m/s จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดของตำแหน่งจะเกิดขึ้นในช่วงแรกของการเคลื่อนที่และช่วงที่มีการเคลื่อนที่กลับทิศทาง โดยเฉพาะในช่วงที่มีการเคลื่อนที่กลับทิศทางจะมีความผิดพลาดสูงสุด ซึ่งสาเหตุมาจากในช่วงที่มีการกลับทิศทาง ระบบจะผ่านช่วงแบ็คแลช (backlash) ของชุดเฟืองทดซึ่งเป็นช่วงที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) โดยที่ชุดเฟืองทดของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนระบบในแนวแกน x มีช่วงของแบ็คแลชเท่ากับ 0.32 มิลลิเมตร ส่วนชุดเฟืองทดของมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนระบบในแนวแกน y มีช่วงของแบ็คแลชเท่ากับ 0.35 มิลลิเมตร ซึ่งจะสังเกตได้จากกราฟในรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าจุดที่มีการเปลี่ยนโค้งของจุดอ้างอิง ค่าตำแหน่งของระบบที่เกิดขึ้นจริงจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงขนานกับแนวเวลา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าช่วงดังกล่าวระบบไม่มีการเคลื่อนที่ เพราะผ่านช่วงแบ็คแลชของชุดเฟืองทด

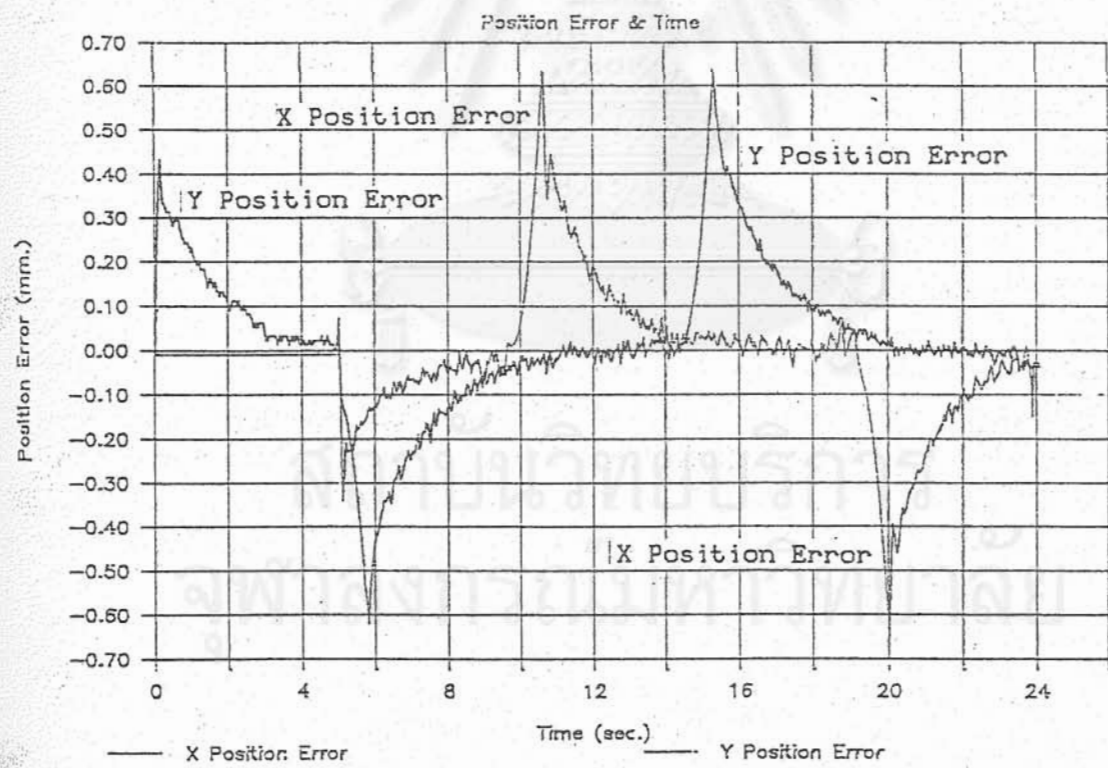
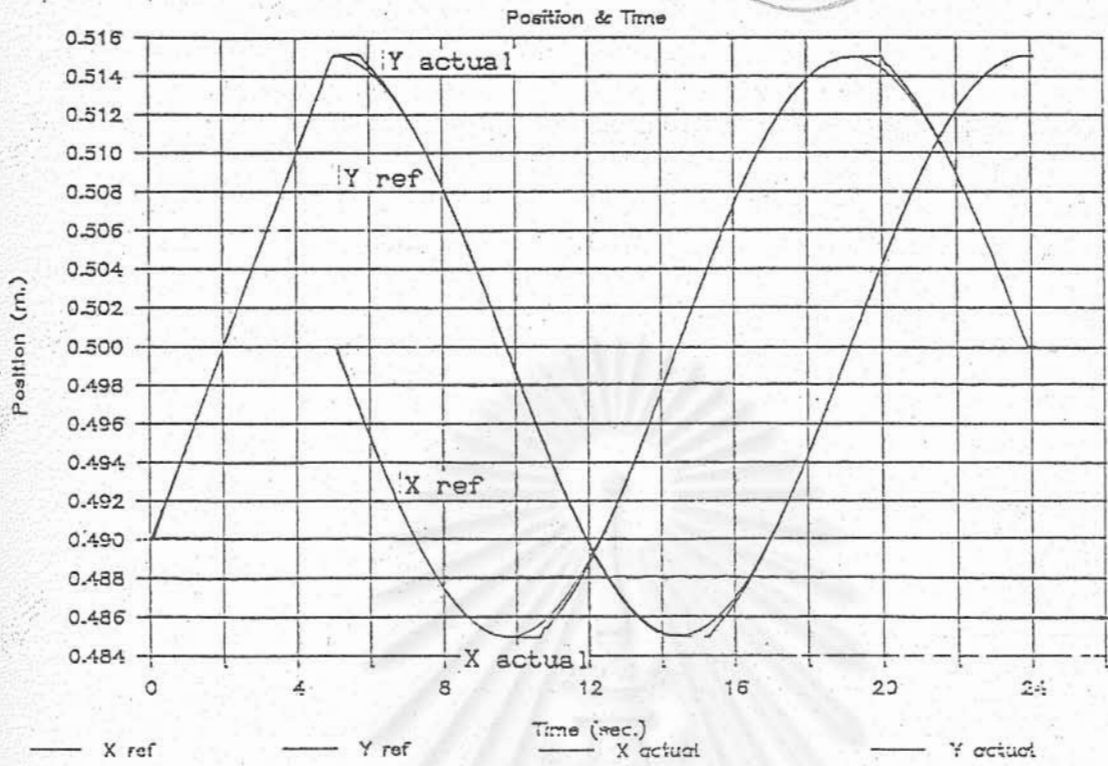
จากรูปที่ 2.12 เป็นกราฟแสดงผลของความเร็วของแต่ละแกน และผลของความเร็วตามแนวการเคลื่อนที่ และค่าผิดพลาดของความเร็วตามแนวการเคลื่อนที่ ซึ่งจะเห็นได้ว่าจุดที่ความเร็วมีค่าผิดพลาดมากคือจุดที่มีการเปลี่ยนทิศทางในการเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นผลมาจากความผิดพลาดของตำแหน่ง ทั้งนี้เพราะในการออกแบบระบบควบคุมความเร็ว ความถูกต้องของความเร็วจะขึ้นอยู่กับความถูกต้องของตำแหน่ง

ความเร็วตามแนว การเคลื่อนที่ (m/sec)	ค่าความผิดพลาดสูงสุด* ของตำแหน่ง (mm)		ค่าความผิดพลาดสูงสุด* ของความเร็วตามแนว การเคลื่อนที่ (m/sec)
	แกน x	แกน y	
0.005	0.65	0.65	0.0028
0.015	0.70	0.76	0.0061
0.025	0.71	0.83	0.0072

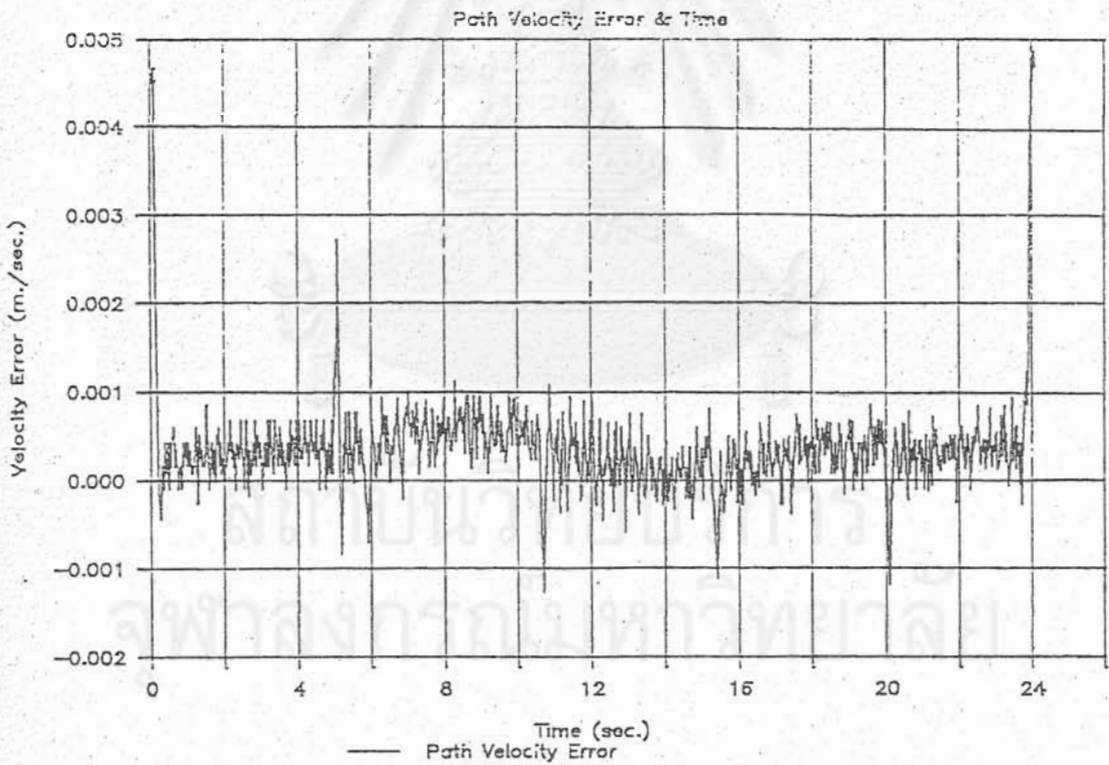
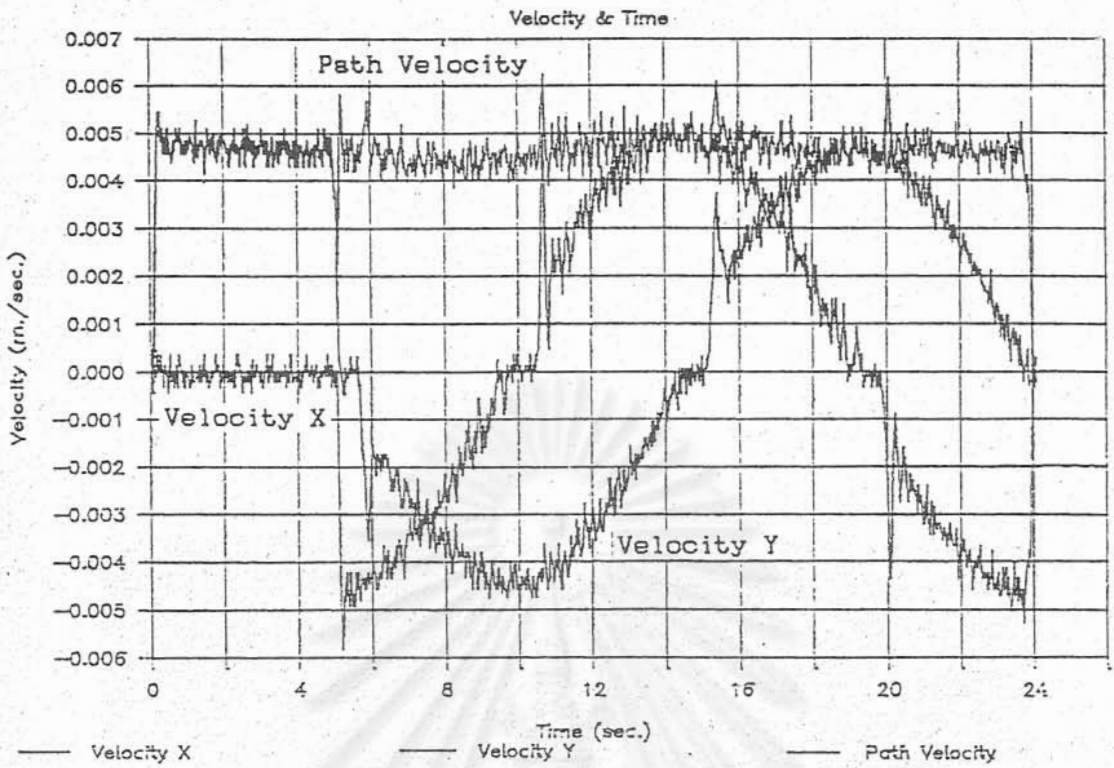
*ค่าผิดพลาดในช่วงเริ่มต้นของการเคลื่อนที่และ
ในช่วงที่มีการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่

รูปที่ 2.10 ตารางแสดงผลการทดสอบความแม่นยำในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมที่มีเส้น
ผ่านศูนย์กลางที่ความเร็วตามแนวการเคลื่อนที่ต่าง ๆ

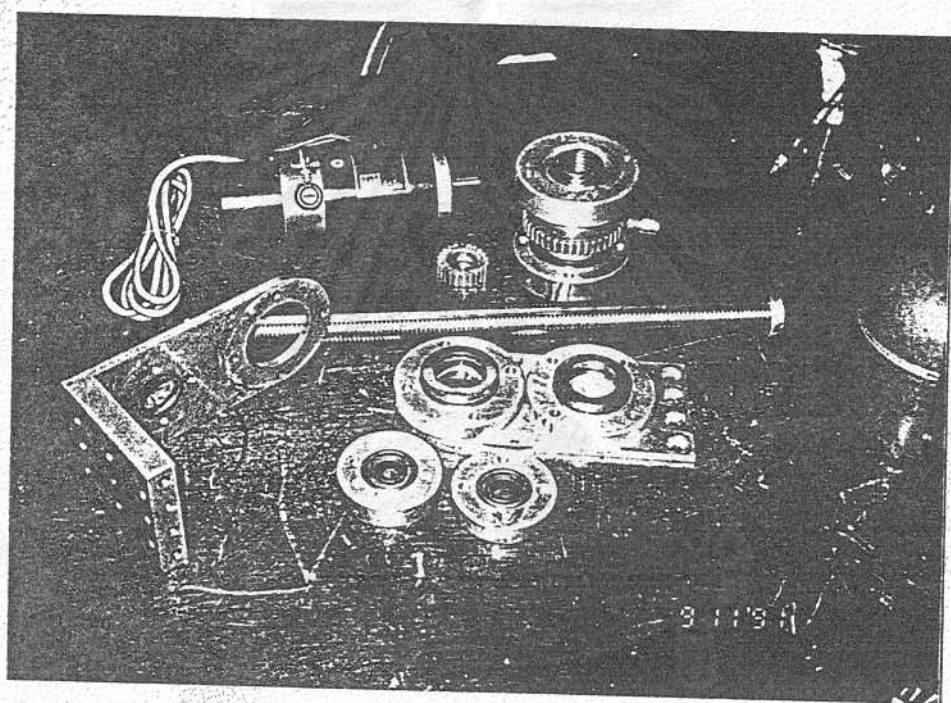
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



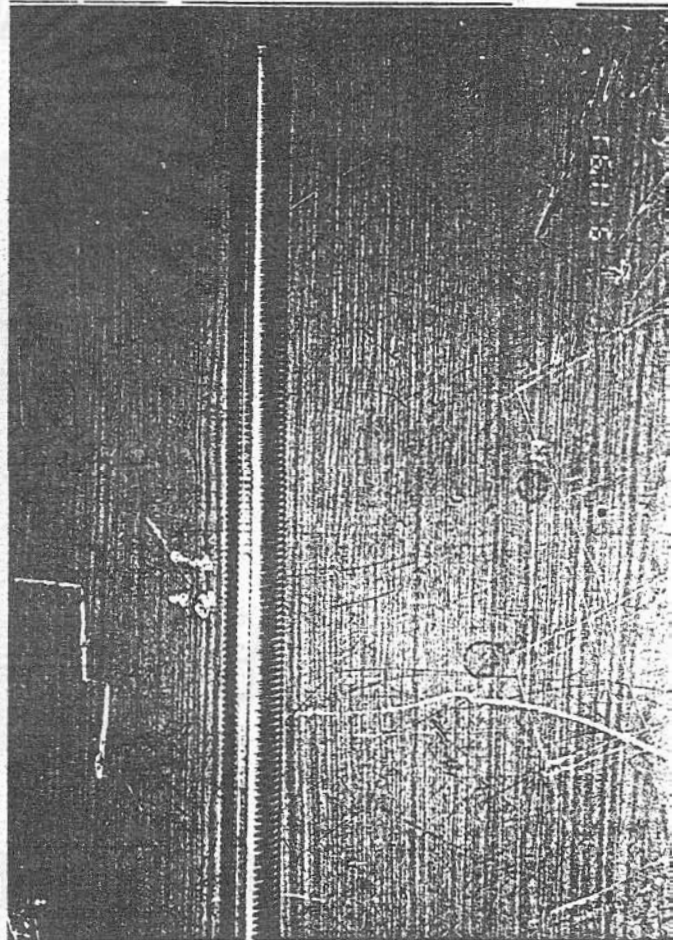
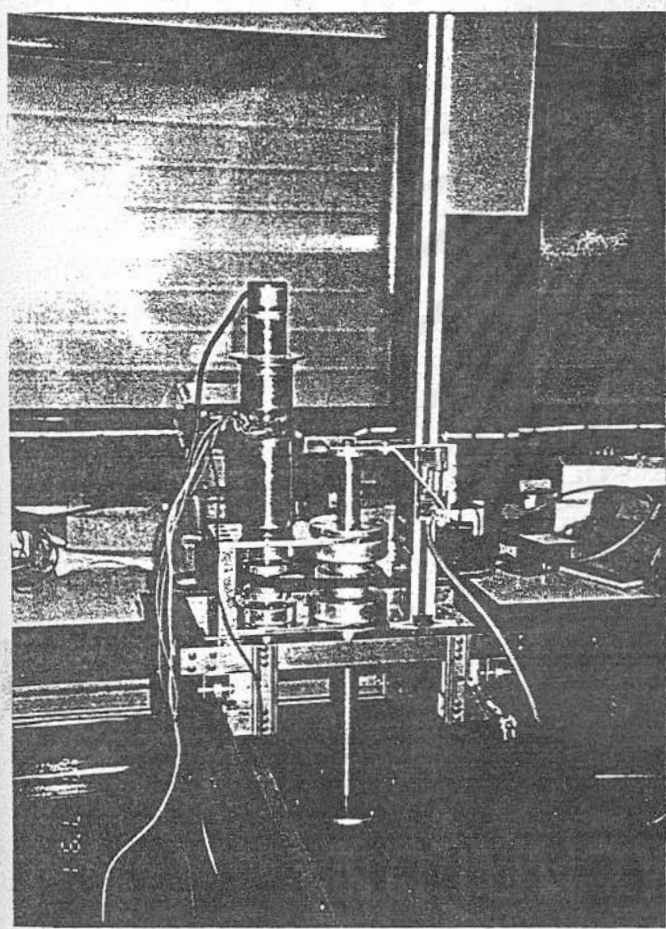
รูปที่ 2.11 กราฟแสดงตำแหน่งที่ได้จากการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของแกนที่หนึ่งและแกนที่สอง ความเร็ว 0.005 m/s



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงความเร็วที่ได้จากการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของแกนที่หนึ่งและแกนที่สอง
ที่ความเร็ว 0.005 m/s



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของระบบขับเคลื่อนแกนที่สาม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.2 ชุดขับเคลื่อนแกนที่สาม

3. การออกแบบระบบขับเคลื่อนแกนที่สาม

ระบบขับเคลื่อนแกนที่สามนี้ จะเป็นระบบขับเคลื่อนแบบสกรูกำลัง (Power Screw) หรือบางครั้งอาจจะเรียกว่า ลิเนียร์แอกชูเอเตอร์ (Linear Actuator) หรือ ทรานสเลชันสกรู (Translation Screws) ซึ่งจะใช้เปลี่ยนการเคลื่อนที่ แบบหมุน (Rotary Motion) ไปเป็นการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงที่มีความเร็วต่ำ (Slow Linear Motion) จุดประสงค์หลักของการใช้สกรูกำลัง Power Screw นี้ก็เพื่อต้องการให้มีกำลังในการยกขึ้นและลงสูง ซึ่งเป็นหลักการเดียวกันกับระบบแม่แรงยกรถนั้นเอง ปัจจุบันนี้ระบบขับเคลื่อนที่ใช้เปลี่ยนการเคลื่อนที่แบบหมุน (Rotary Motion) ไปเป็นการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง (Linear Motion) ที่นิยมใช้คือแบบบอลสกรู (Ball Screw) แต่ราคาค่อนข้างแพงมาก การวิจัยนี้จึงได้ออกแบบและสร้างขึ้นเอง ดังแสดงในรูปที่ 3.1

รูปที่ 3.1 แสดงถึงชิ้นส่วนประกอบต่าง ๆ ของแกนที่สาม และรูปที่ 3.2 เป็นรูปหลังจากประกอบเข้าด้วยกันแล้ว แรงบิดที่ต้องการในการยกของสามารถหาได้จากสมการ [หนังสืออ้างอิง (2)] ซึ่งเขียนได้ดังนี้คือ

ช่วงขึ้น

$$T = \frac{Wd_m}{2} \frac{f\pi d_m + L \cos \alpha_n}{\pi d_m \cos \alpha_n + fL} \quad (3.1a)$$

ช่วงลง

$$T = \frac{Wd_m}{2} \frac{f\pi d_m - L \cos \alpha_n}{\pi d_m \cos \alpha_n - fL} \quad (3.1b)$$

โดยที่

T = แรงบิด

W = น้ำหนักที่ต้องการยก

d_m = mean diameter

d_o = outside diameter

d_i = inside diameter

f = coefficient of friction

L = lead

α_n = thread angle measured in the normal plane

และสกรูจะล็อกโดยไม่เคลื่อนที่ลงมาเอง (self locking) ก็ต่อเมื่อ

$$f \geq \frac{L \cos \alpha_n}{\pi d_m} \quad (3.2)$$

ส่วนประสิทธิภาพของชุดขับเคลื่อนแบบ Power Screw นั้นสามารถหาได้จากสมการดังนี้คือ [หนังสืออ้างอิง (2)]

$$e = \frac{L \pi d_m \cos \alpha_n - fL}{\pi d_m \pi f d_m + L \cos \alpha_n} \quad (3.3)$$

ระบบขับเคลื่อนแบบสกรูกำลัง (Power Screw) นี้ได้โดยใช้ความเร็วของมอเตอร์อยู่ที่ 3000 rpm และความเร็วในการยกขึ้นลงมีค่าเท่ากับ 300 mm/sec

ดังนั้นระยะ lead (L) จะต้องมีค่าเท่ากับ $(300 \text{ mm/sec}) \cdot (60/3000 \text{ rps}) = 6 \text{ mm}$.

ให้ $d_i = 22 \text{ mm}$. $d_o = 24 \text{ mm}$.

ดังนั้น $d_m = 23 \text{ mm}$.

แรงบิดที่ต้องการยกของหนัก $W \text{ kg}$ ขึ้น โดยให้ค่า $f = 0.1$ จากสมการ (3.1a) จะคำนวณแรงบิดมีค่าเท่ากับ

$$T = 2.08223e10^{-2}W \quad \text{N-m}$$

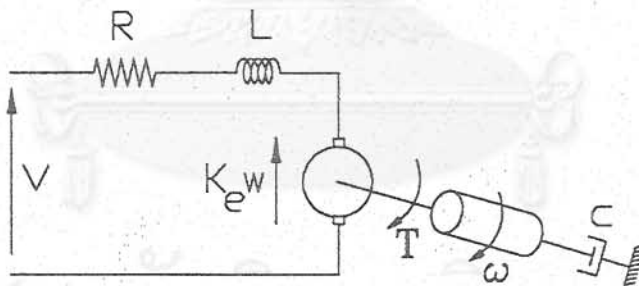
และแรงบิดตอนช่วงลง คำนวณได้จากสมการ 3.1b

$$T = 1.8979e10^{-3}W \quad \text{N-m}$$

ประสิทธิภาพของสกรูกำลัง (Power Screw) นี้จะมีค่าประมาณ 45%

4. ระบบมอเตอร์และเครื่องขยาย (Motor and Amplifier)

ตามที่กล่าวมาแล้วนั้น มอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนนี้จะเป็นมอเตอร์กระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet D.C.Motor) การควบคุมมอเตอร์เป็นชนิด armature control ซึ่งมีสมการที่แทนการทำงานของตัวมอเตอร์ดังนี้



$$v_a - K_e \omega = L \frac{di}{dt} + i \quad (4.1)$$

$$T_m = K_t i \quad (4.2)$$

$$T_m = J \dot{\omega} + c \omega \quad (4.3)$$

โดยที่

$$\begin{aligned}V_a &= \text{Input voltage (armature voltage)} \\i &= \text{Armature current} \\K_e &= \text{Back e.m.f. constant} \\K_t &= \text{Torque constant} \\T_m &= \text{Motor torque} \\\omega &= \text{Angular Velocity} \\&= \text{Angular Position}\end{aligned}$$

และสมการการเคลื่อนที่ของมอเตอร์สามารถเขียนอยู่ในรูปของทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer function) ได้ดังนี้คือ

$$G_m = \frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{K_t}{(Ls + R)(Js + c) + K_e K_t} \quad (4.4)$$

ในกรณีที่ค่าความเหนี่ยวนำ (inductance) ของมอเตอร์มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความต้านทาน (resistance) ของมอเตอร์และความพิตวิสกอส (viscous friction) ก็มีค่าน้อยด้วย เราจะได้สมการทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer function) ของมอเตอร์ดังนี้คือ

$$G_m(s) = \frac{\frac{K_t}{(Rc + K_e K_t)}}{\frac{RJ}{(Rc + K_e K_t)}s + 1} \quad (4.5)$$

$$G_m(s) = \frac{K}{\tau_m s + 1} \quad (4.6)$$

$$\tau_m = \text{mechanical time constant}$$

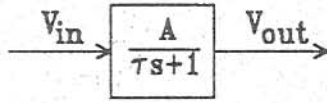
ส่วนเครื่องขยายหรือ Amplifier นั้น จะเป็นชนิด PWM (Pulse Width Modulation) ซึ่งมีอัตราการสวิตช์ไม่น้อยกว่า 20 kHz. การควบคุมการทำงานของเครื่องขยายนั้นสามารถทำได้สองแบบด้วยกันคือ

- 1) แบบควบคุมแรงดัน (Voltage amplifier control)
- 2) แบบควบคุมกระแส (Current amplifier control)

ซึ่งเครื่องขยายสัญญาณ (amplifier) ที่ใช้ในการทดลองนี้สามารถปรับให้เป็นแบบควบคุมแรงดัน (Voltage amplifier control) หรือแบบควบคุมกระแส (Current amplifier control) ก็ได้

4.1 การทำงานของเครื่องขยายแบบควบคุมแรงดัน (Voltage amplifier control)

การทำงานของเครื่องขยายแบบควบคุมแรงดัน (Voltage amplifier control) นั้นส่วนใหญ่แล้วนิยมใช้กันมากในกรณีที่ต้องการควบคุมความเร็วแต่อย่างเดียว เครื่องขยายสัญญาณแบบนี้จะได้สัญญาณออกเป็นสัญญาณ voltage ที่มีขนาดเป็นสัดส่วนกับสัญญาณแรงดันขาเข้าดังแสดงในบล็อกไดอะแกรม (block diagram) ข้างล่างนี้



และสมการทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer function) ของเครื่องขยายแบบควบคุมแรงดัน (Voltage amplifier) ก็สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A}{\tau_a s + 1} \quad (4.7)$$

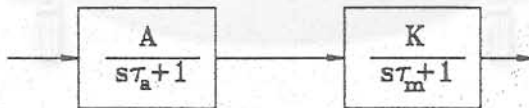
โดยที่

τ_a = amplifier time constant

A = D.C. gain

ดังนั้นสมการรวมของมอเตอร์และเครื่องขยายแบบควบคุมแรงดัน (voltage amplifier) จึงสามารถแสดงในบล็อกไดอะแกรม(Block diagram) ดังรูปที่ 4.1 และสมการทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer function) รวมคือ

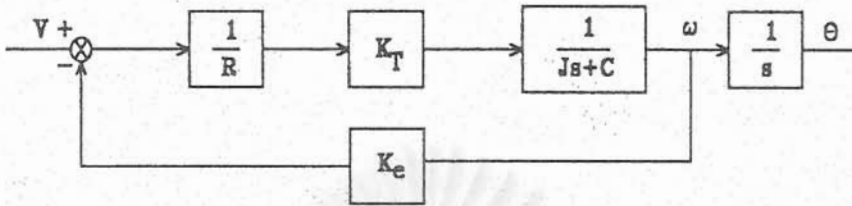
$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{A}{(\tau_a + 1)} \frac{K}{(\tau_m + 1)} \quad (4.8)$$



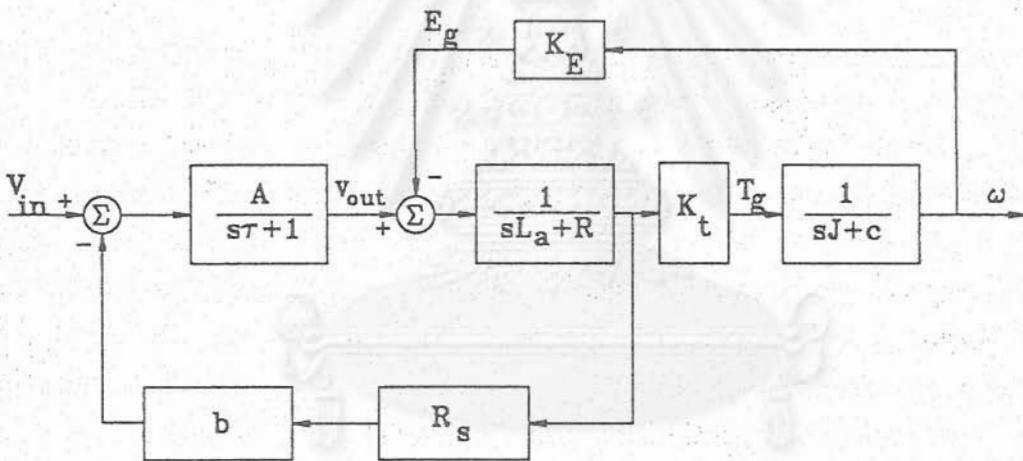
รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบมอเตอร์และแอมพลิไฟเออร์

4.2 การทำงานของเครื่องขยายแบบควบคุมกระแส (Current Amplifier)

เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมกระแส (Current Amplifier) นั้นปัจจุบันนี้เป็นที่นิยมใช้ในระบบควบคุมการเคลื่อนที่ โดยเฉพาะการควบคุมในงานหุ่นยนต์อุตสาหกรรม ทั้งนี้เนื่องมาจากว่าในเครื่องขยายแบบควบคุมกระแส (Current Amplifier) นี้จะมีการ feedback ค่ากระแสที่ส่งเข้าไปยังขดลวดอาร์เมเจอร์ (armature coil) สัญญาณกระแสนี้ จะนำมาปรับเป็นค่าแรงดัน แล้วนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันขาเข้า ซึ่งจะทำให้เราสามารถผลิตกระแสเป็นสัดส่วนกับคำสั่งแรงดัน (voltage command) ดังแสดงในบล็อกไดอะแกรมข้างล่าง



รูปที่ 4.2 ก บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์กระแสตรง



รูปที่ 4.2ข บล็อกไดอะแกรมของระบบมอเตอร์และเครื่องขยายสัญญาณกระแส (Current Amplifier)

$$\frac{\omega(s)}{V_{in}(s)} = \frac{\frac{A}{(\tau_a s + 1)} \frac{1}{(Ls + R)} \frac{K_t}{(Js + c)}}{1 + \frac{A}{(\tau_a s + 1)} \frac{1}{(Ls + R)} R_s b + \frac{1}{(Ls + r)} \frac{K_t K_e}{(Js + c)}} \quad (4.9)$$

$$\frac{\omega(s)}{V_{in}(s)} = \frac{AK_t}{(\tau_a s + 1)(Ls + R) + AR_s b(\tau_s + c) + K_e K_t (\tau_a s + 1)} \quad (4.10)$$

$b = 0$ voltage amplifier + motor

$b > 0$ current amplifier + motor

การควบคุมโดยใช้เครื่องขยายในแบบควบคุมกระแส (current amplifier) ทำให้เราสามารถควบคุมกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ (armature) ของมอเตอร์ไม่ให้เกิดค่ากระแสสูงสุดที่มอเตอร์จะรับได้ และในขณะเดียวกันการตอบสนองต่อคำสั่งควบคุมก็จะเร็วกว่าด้วย รูปที่ 4.2 เป็นรูปบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมที่รวมมอเตอร์และตัวขยายสัญญาณ (amplifier) เข้าด้วยกัน จากรูปจะเห็นว่า ถ้าค่า b มีค่าเป็นศูนย์ ระบบควบคุมก็จะเป็นแบบควบคุมแรงดัน (voltage amplifier) เหมือนดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

4.3 เซอร์โวแอมพลิไฟเออร์ (Servo Amplifier) แบบเพอร์สิวติวโมดูเลชัน (Pulse Width Modulation) (PWM)

เครื่องขยายสัญญาณแบบเพอร์สิวติวโมดูเลชัน (Pulse Width Modulation Amplifier) เป็นสวิตช์ซึ่งแอมพลิไฟเออร์ (Switching Amplifier) ที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากในปัจจุบันนี้พาวเวอร์ทรานซิสเตอร์ (Power Transistors) ที่มีขายอยู่ในท้องตลาดมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง และสามารถทนทานต่ออัตราการสวิตช์ (switch) ที่ค่อนข้างสูงได้ อัตราการสวิตช์ (switch) นี้อาจจะสูงเป็น MHz ก็เป็นได้ ทำให้เป็นไปได้ที่สร้างสวิตช์ซึ่งแอมพลิไฟเออร์ (switching amplifier) ที่ใช้สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม (square wave) ที่มีความถี่ในช่วง 50 KHz เป็นตัวกำหนดการสวิตช์ (switch) จึงทำให้สามารถนำไปใช้งานกับระบบควบคุมในช่วงความถี่ (bandwidth) สูงเป็น KHz ได้ แต่อย่างไรก็ตาม ในช่วงการทำงานแต่ละรอบของ PWM amplifier จะมีความล่าช้า (delay) อยู่ระหว่างการสวิตช์ (switch) ซึ่งจะทำให้ระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) การจะลดผลที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) เนื่องจากความล่าช้า (delay) สามารถทำได้โดยการใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback control) เข้าช่วย

รูปที่ 4.3 เป็นบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) โดยมีการป้อนสัญญาณขาออกกลับเข้าไปเปรียบเทียบกับสัญญาณควบคุม เพื่อต้องการทำให้ผลเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) ลดน้อยลง จากรูปเราจะได้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันรวม (overall transfer function) คือ

$$\frac{V_m}{V_{in}} = \frac{N(e)}{(1 + F(s)N(e))} \quad (4.11)$$

ถ้าเกนของระบบเปิด (openloop gain) มีค่าสูงมากเพียงพอ จะทำให้ $F(s)N(e) \gg 1$ ดังนั้นเราจะได้ว่า

$$\frac{V_m}{V_{in}} = \frac{1}{F(s)} \quad (4.12)$$

ถ้าพิจารณาความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearity) นี้รวมเข้าไปกับระบบควบคุมที่ใช้การควบคุมกระแส (current amplifier) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.4 ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับบล็อกไดอะแกรมของระบบขยายสัญญาณ (amplifier) กับมอเตอร์ (motor) ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ในที่นี้ $N(e)$ ก็คือเคสทรายบิงฟังก์ชัน (Describing Function) ซึ่งจะแทนความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearity) ในระบบควบคุมของตัวขยายสัญญาณ (amplifier) จากบล็อกไดอะแกรมที่แสดงไว้นี้สามารถหาทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer function) ได้ดังนี้คือ

$$\frac{\omega(s)}{V_{in}(s)} = \frac{N(e) \frac{1}{(Ls + R)} \frac{K_t}{Js}}{1 + N(e) \frac{1}{(Ls + R)} a + \frac{1}{(Ls + R)} \frac{K_t K_e}{Js}} \quad (4.13)$$

หรือ

$$\frac{\omega(s)}{V_{in}(s)} = \frac{N(e) K_t}{(Ls + R) sJ + N(e) a sJ + K_t K_e} \quad (4.14)$$

ถ้าค่าเกนของแอมพลิไฟเออร์ (amplifier gain) มีค่ามาก นั่นก็หมายความว่า $N(e)$ มีค่ามากด้วย เราจะได้ว่า

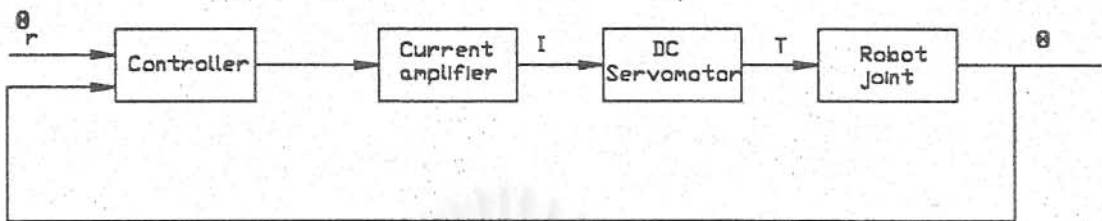
$$\lim_{N(e) \rightarrow \infty} \frac{\omega(s)}{V_{in}} = \frac{K_t}{asJ} \quad (4.15)$$

ค่า a ที่ปรากฏอยู่ในสมการนี้อาจจะไม่ใช่ค่าคงที่ก็ได้ แต่อาจจะเป็นสมการทรานสเฟอร์ฟังก์ชันในรูปของตัวแปร s (laplace) จะเห็นว่าค่าโพล (poles) ทั้งหมดของ $a(s)$ นั้นจะเป็นซีโร (zero) ของสมการทรานสเฟอร์ฟังก์ชันรวมทั้งหมด (overall transfer function) และในทางกลับกันค่าซีโร (zero) ของ $a(s)$ ก็จะเป็นโพล (poles) ของสมการ ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน (overall transfer function) ดังนั้นเราจึงสามารถเปลี่ยนแปลงค่าสมการทรานสเฟอร์ฟังก์ชันรวม (overall transfer function) ได้ โดยการเปลี่ยนแปลงที่ $a(s)$ นี้

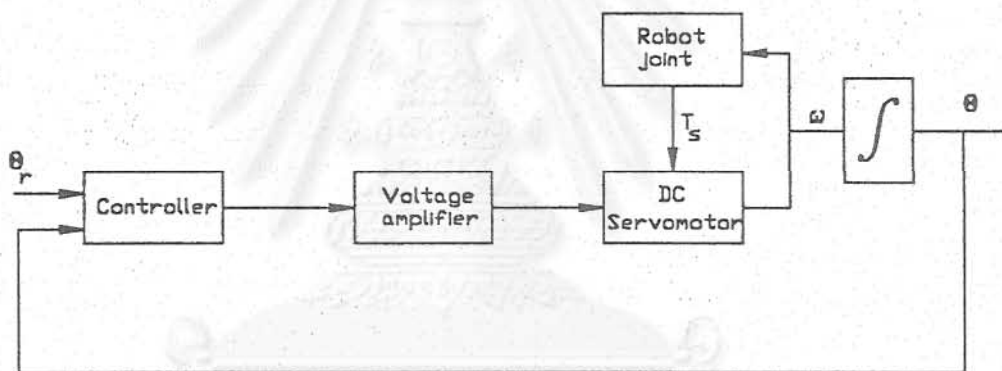
4.4 เปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างการควบคุมการเคลื่อนที่โดยใช้การควบคุมกระแส (Current Amplifier) และการควบคุมแรงดัน (Voltage Amplifier)

หุ่นยนต์อุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็กส่วนแล้วมักจะใช้มอเตอร์กระแสตรงเป็นตัวขับเคลื่อนแทบทั้งสิ้นการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ก็มีด้วยกันสองแบบคือแบบที่ควบคุมที่กระแสของมอเตอร์โดยใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมกระแส (Current Amplifier) และแบบที่ควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์โดยใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมแรงดัน (Voltage Amplifier) ซึ่งทั้งสองแบบนี้ก็เป็นที่ยอมรับกันอยู่กับประเภทของงาน วิธีการที่ควบคุมกระแสดังแสดงในรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าสัญญาณที่ส่งไปยังแขนหุ่นยนต์นั้นคือค่าแรงบิดหรือ torque ในขณะที่การควบคุมโดยใช้แรงดันไฟฟ้า แรงบิดที่ให้เคลื่อนที่แขนหุ่นยนต์จะถือเสมือนว่าเป็นแรงรบกวน (Disturbance load) ที่แกนของมอเตอร์ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.6

ถ้าจะดูให้ง่ายขึ้นก็คือการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ก็คือส่งแรงที่มีขนาดเพียงพอที่จะเอาชนะแรงเสียดทาน แรงโน้มถ่วงและแรงทางพลศาสตร์อันเนื่องมาจากความเฉื่อย (dynamic torques due to the moment of inertia.) ซึ่งแรงเหล่านี้ก็จะขึ้นอยู่กับค่ากระแสที่ไหลอยู่ในขดลวดของมอเตอร์นั่นเองวิธีนี้จึงนิยมใช้ควบคุมด้วยการ ควบคุมกระแสที่ไหลเข้าในมอเตอร์ (Current Amplifier) วิธีการนี้จำเป็นที่จะต้องได้ค่า inertia ของภาระที่ค่อนข้างจะถูกต้องแน่นอนเพื่อที่จะให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในวิถีทางที่ต้องการ

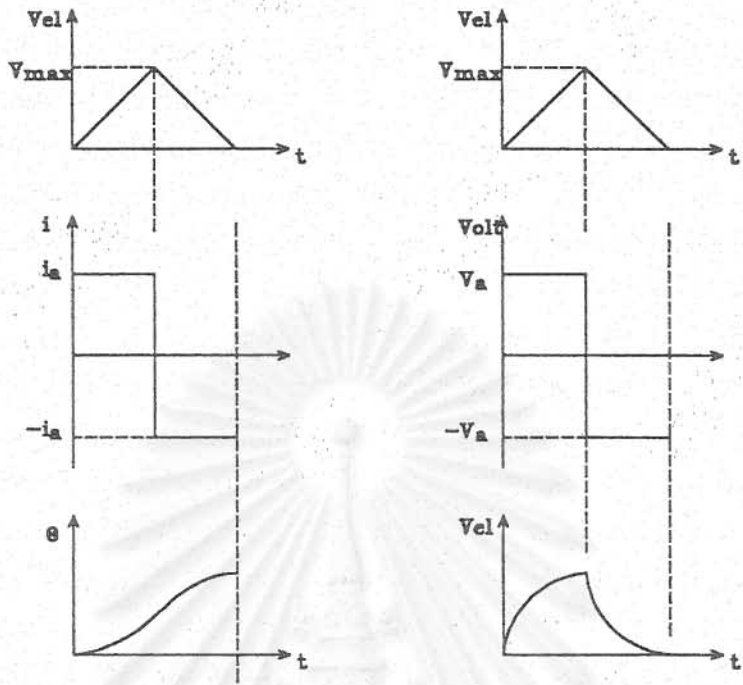


รูปที่ 4.5 ระบบควบคุมการทำงานมอเตอร์กระแสตรงด้วยการควบคุมกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์

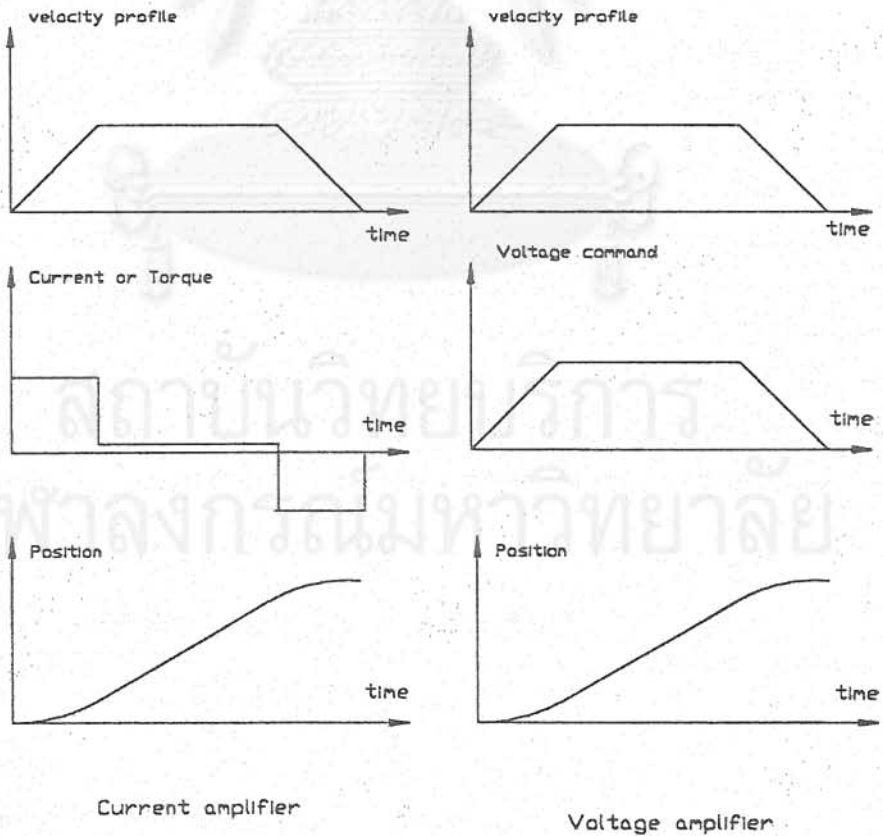


รูปที่ 4.6 ระบบควบคุมการทำงานมอเตอร์กระแสตรงด้วยการควบคุมแรงดันไฟฟ้า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 โปรไฟล์ความเร็วแบบแบน-แบนสำหรับการควบคุมแบบจุดต่อจุด
(Bang-Bang Velocity profile for point to point control)



รูปที่ 4.8 โปรไฟล์ความเร็วที่ประกอบด้วยช่วงความเร็วคงที่ (Velocity profile with dwell period)



ถ้าสมมติว่าเราหาค่า inertia มาได้สูงกว่าค่าความเป็นจริง แรงบิดที่คำนวณได้จากค่าความเฉื่อย (inertia) นี้จะมีค่าสูงเกินไป ทำให้การเคลื่อนที่ของแขนหรือมอเตอร์มีความเร่งสูงเกินไปและทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ก็จะสูงด้วย ซึ่งอาจจะทำความเสียหายหรือเกิดการกระแทกกระทั้นได้เนื่องจากความเร็วของแขนไม่เป็นศูนย์ที่ปลายทางนั่นเอง และในทางกลับกันถ้า inertia ที่หาได้มีค่าต่ำกว่าค่าเป็นจริงก็จะทำให้การเคลื่อนที่ช้าเกินไป ข้อดีของการควบคุมแรงบิดนี้ก็คือเราสามารถควบคุมแรงบิดให้มีค่าตามที่ต้องการ ซึ่งเหมาะสมสำหรับงานประเภทประกอบชิ้นส่วน หรืองานที่เกี่ยวข้องกับการขนส่งสารเป็นต้น ยิ่งไปกว่านั้นถ้าแขนหุ่นยนต์นี้เคลื่อนที่ไปพบสิ่งกีดขวาง แขนหุ่นยนต์ก็จะพยายามคงขนาดของแรงบิดไว้และจะไม่พยายามเพิ่มพลังงานเพื่อจะเอาชนะสิ่งกีดขวางนั้น

วิธีการอีกแบบหนึ่งที่ใช้การควบคุมด้วยแรงดันกระแสของมอเตอร์นั้นก็จะมีประโยชน์ในงานที่ต้องการควบคุมความเร็วของการเคลื่อนที่ ซึ่งจะใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมแรงดัน (Voltage Amplifier) เป็นตัวควบคุม ข้อดีของวิธีนี้ก็คือการเปลี่ยนแปลงค่าความเฉื่อย (inertia) และความไม่แม่นยำในการหาค่า inertia นั้นจะส่งผลกระทบต่อเพียงเป็นการเพิ่มเวลาคงที่เชิงกล (mechanical time constant) ให้กับระบบการเคลื่อนที่เท่านั้น แต่จะไม่ทำให้เกิด การเสียหายเนื่องจากแขนไม่หยุดเคลื่อนที่ และเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ก็ไม่เปลี่ยนแปลงด้วยทำให้และการเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมายก็จะเป็นไปในลักษณะที่ค่อนข้างจะราบเรียบด้วยความเร็วต่ำ ซึ่งตรงกันข้ามกับการควบคุมกระแส ซึ่งจะมีการเคลื่อนที่เร็วถึงจุดหมายและหยุดด้วยความเร็วสูง ปัญหาของการควบคุมด้วยแรงดันกระแสจะมีข้อเสียตรงที่ มอเตอร์นั้นจะพยายามดึงค่ากระแสจากแหล่งจ่ายพลังงานหรือตัวขยายสัญญาณ (amplifier) เพื่อให้ได้กระแสเพียงพอที่จะเอาชนะแรงบิดรบกวนในระบบ ดังนั้นถ้าแขนเกิดเคลื่อนที่ไปเจอสิ่งกีดขวาง มอเตอร์ก็จะพยายามดึงค่ากระแสจากแหล่งจ่ายพลังงานมากขึ้นจนกระทั่งทำให้ระบบจ่ายพลังงานเสียหายได้

รูปที่ 4.7 เป็นตัวอย่างหนึ่งของโปรไฟล์ความเร็ว (velocity profile) ของระบบควบคุมแบบจุดต่อจุด (point to point control) ที่ต้องการให้ใช้เวลาในการเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งน้อยที่สุด และมีลักษณะแบบแบบ-แบบ (Bang-Bang control.) โปรไฟล์ความเร็ว (Velocity profile) นี้อาจจะถูกดัดแปลงให้มีช่วงความเร็วคงที่ระหว่างกลางหรือระหว่างช่วงความเร่งและช่วงความหน่วง (Dwell period) ก็ได้ ดังแสดงในรูป 4.8 โดยสมมติว่าความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ในช่วงความเร่งคงที่จะไม่เกินค่าความเร็วสูงสุดของมอเตอร์ โปรไฟล์ความเร็ว (Velocity profile) นี้จะใช้เป็นคำสั่งอ้างอิง (command reference) ของระบบควบคุม จากรูปแสดงให้เห็นค่ากระแสและแรงดันของทั้งสองกรณี โดยในกรณีที่ใช้ตัวขยายสัญญาณแบบควบคุมกระแส (current amplifier) เราสามารถจำกัดค่ากระแสที่จะไหลเข้าไปยังขดลวดอาร์เมเจอร์ได้ ส่วนในกรณีที่ใช้ voltage amplifier นั้น คำสั่งที่ป้อนเข้าไปเป็นคำสั่งในรูปของแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นค่ากระแสที่ใช้จะขึ้นอยู่กับภาระที่มอเตอร์ต้องขับเคลื่อนซึ่งอาจจะทำให้กระแสมีค่าสูงกว่ากระแสสูงสุดที่มอเตอร์จะทนได้

ช่วงแรกของวิถีทางการเคลื่อนที่ (ช่วงความเร่ง) สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$\theta(t) = \frac{a_m t^2}{2} \quad (4.16)$$

ระยะทางในการเคลื่อนที่ในช่วงนี้คือ

$$\theta_1 = \frac{a_m t_1^2}{2} \quad (4.17)$$

ความเร็วทางปลายของช่วงที่คือ

$$V_m = a_m t_1 \quad (4.18)$$

ช่วงที่สอง (ช่วงความเร็วคงที่) จะได้ว่า

$$\theta(t) = \theta_1 + V_m(t - t_1) \quad (4.19)$$

ตำแหน่งของปลายช่วงที่สองนี้จะอยู่ที่

$$\theta_2(t) = \theta_1(t) + V_m(t_2 - t_1) \quad (4.20)$$

ช่วงที่สามหรือช่วงความหน่วง ตำแหน่งการหมุนของแกนมอเตอร์คือ

$$\theta(t) = \theta_2(t) + V_m(t - t_2) - \frac{a_m(t - t_2)^2}{2} \quad (4.21)$$

ตำแหน่งปลายสุดของการเคลื่อนที่ที่สามารถหาได้โดยการแทนค่า $t = t_f$ คือ

$$\theta_f = \theta_2 + V_m t_1 - \frac{a_m t_2^2}{2} = V_m t_2 \quad (4.22)$$

เวลา t_1 และ t_2 สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$t_1 = \frac{V_m}{a_m} \quad \text{และ} \quad t_2 = \frac{\theta_f}{V_m}$$

และเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ทั้งหมดก็คือ

$$t_f = \frac{V_m}{a_m} + \frac{\theta_f}{V_m} \quad (4.23)$$

5. การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องขยายสัญญาณ (Amplifier) , มอเตอร์และภาระ

การออกแบบระบบควบคุมนั้นจำเป็นที่จะต้องทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่เรา กำลังจะควบคุมเสียก่อน จากหัวเรื่องที่แล้วเราได้หาสูตรสมการของระบบควบคุมที่ใช้เครื่องขยายสัญญาณกระแส (current amplifier) และเครื่องขยายสัญญาณแรงดัน (voltage amplifier) และรูปแบบที่หามาได้เหล่านี้ เราจะนำมาหาแบบจำลองจริงทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ต้องการจะควบคุม ซึ่งในที่นี้ก็จะหาเฉพาะแกนที่สาม เท่านั้น

5.1 Voltage Amplifier กับ Motorและภาระ

จากสมการทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer function) ที่หามาแล้วจากข้างต้นจะได้ว่า

$$\frac{I(s)}{V(s)} = \frac{(Js+c)}{(Ls+R)(Js+c) + K_t K_e} \tag{5.1}$$

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{K_t}{(Ls+R)(Js+c) + K_t K_e} \tag{5.2}$$

ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์(Electrocraft E588)มีดังนี้คือ

K_t	=	11.8 oz-in-amp	=	8.339×10^{-2} N-m/A
K_e	=	8.7 V/KRPM	=	8.31×10^{-2} V/(rad/s)
L	=	3.3 mH		
J_m	=	0.0078 oz-in-sec ²	=	5.51×10^{-5} kg-m ²
R	=	1 ohm		
c (motor)	=	0.3 oz-in/KRPM	=	2.03×10^{-5} N-m/(rad/sec)

ดังนั้นจะได้สมการของมอเตอร์ดังนี้

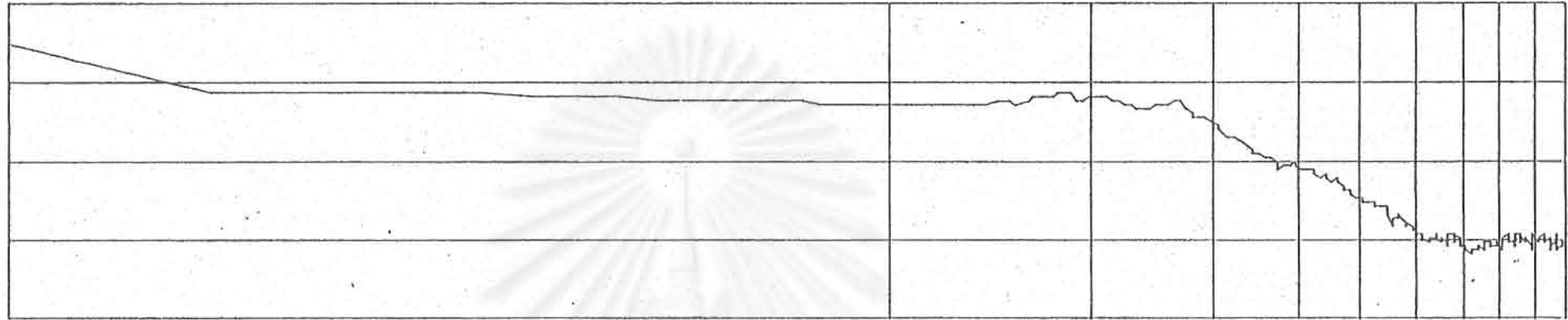
$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{K_t/LJ}{(s+R/L)(s+c/J) + K_t K_e/LJ} \tag{5.3}$$

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{1.4 \times 10^{-4}}{(s^2 + 303.4s + 38197.29)} \tag{5.4}$$

ซึ่งจะได้ว่า

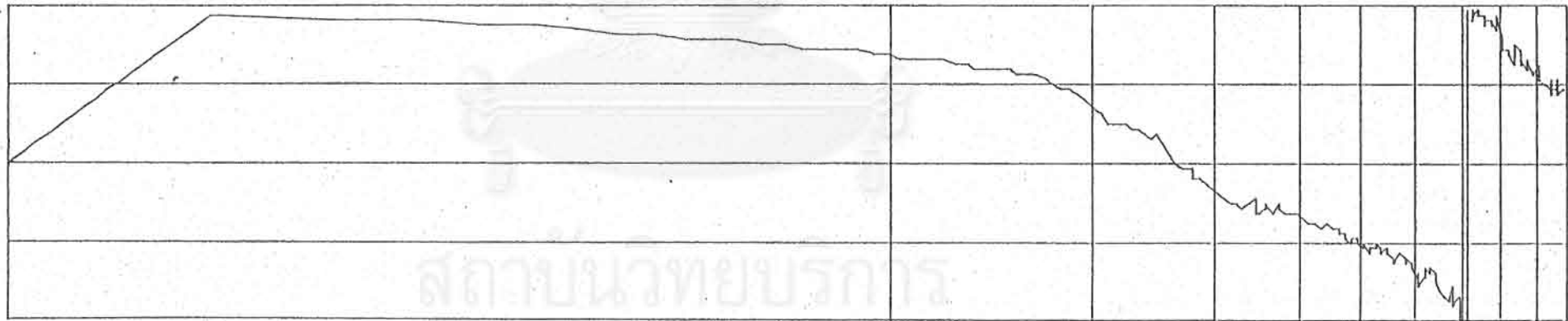
naturalfrequency ω_n = 195.44 rad/sec
 damping ratio ξ = 0.776

รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาด (magnitude) และความถี่ (coherence function) และความถี่



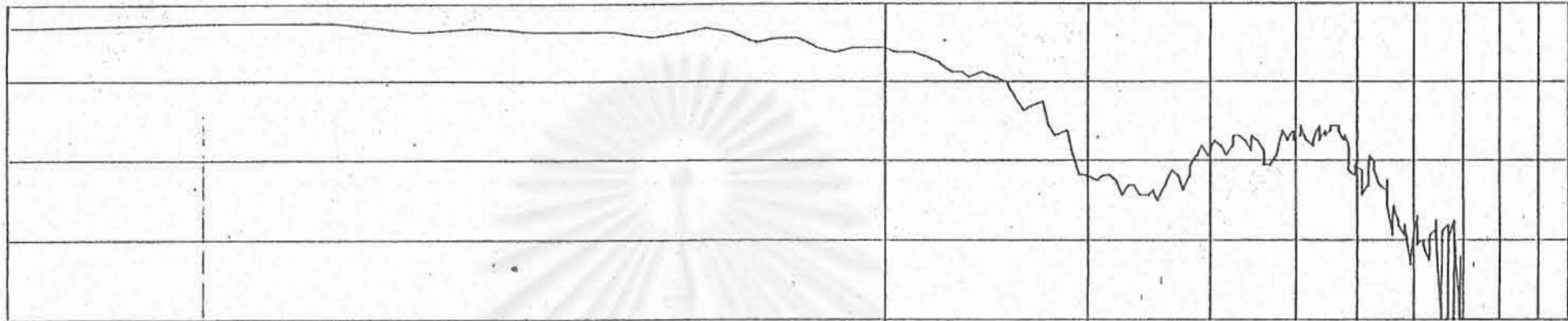
XFR FN MAG : 9.4 dB 5. HZ N: 256 P: 5HZ
SPAN: 0.000HZ -1.0000KHZ FS: 20.00 dB 20 dB/

เฟส (Phase) และความถี่, โทนีจันตัวที่ต้น

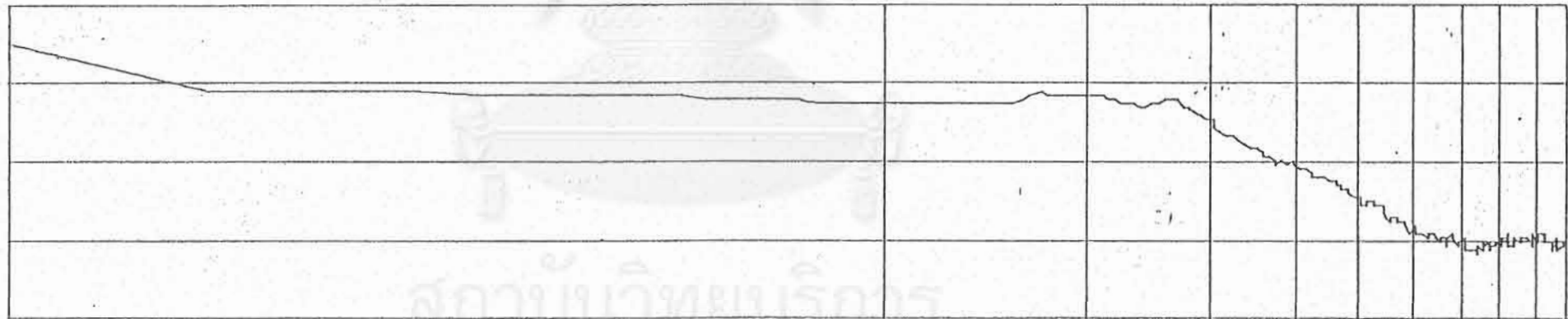


XFR FN PHASE : 0.3 ° 5. HZ N: 256 P: 5HZ
SPAN: 0.000HZ -1.0000KHZ FS: ±180 ° 90 °/

รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาด (magnitude) และความถี่, เฟส (Phase) และ ความถี่, โทลิวเจนซ์ที่สัมพันธ์ (coherence function) และความถี่ (ต่อ)



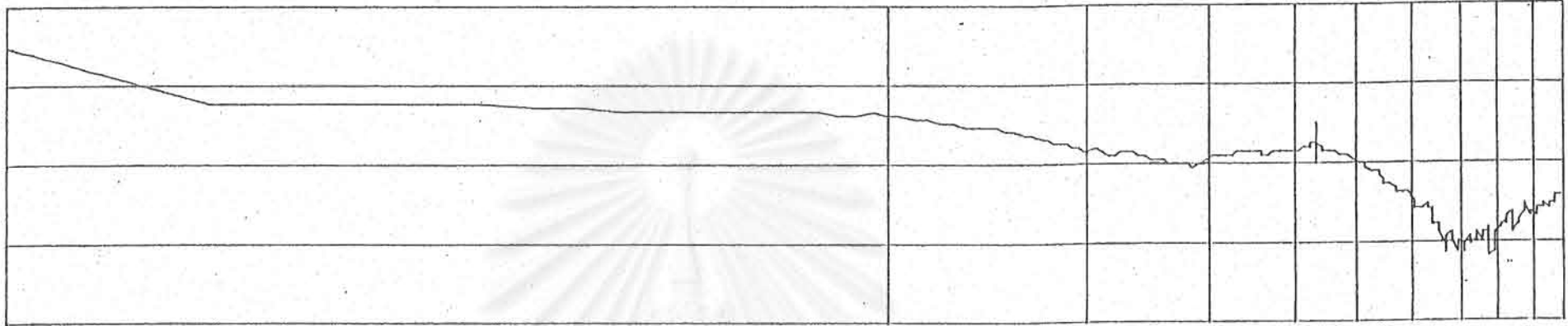
COHER : 0.92 5. HZ N: 256 P: 5HZ
 SPAN: 0.000HZ -1.0000KHZ FS: 1.0 0.25/



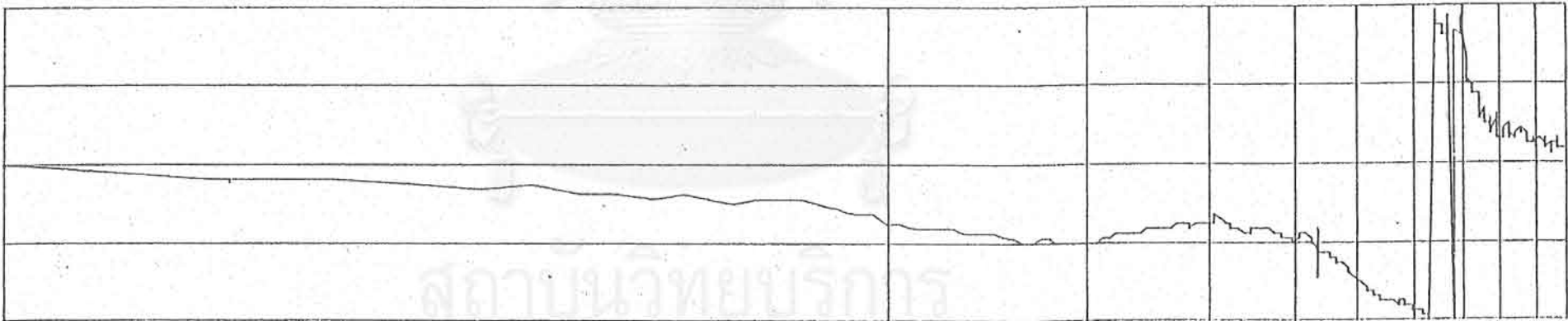
XFR FN MAG : 9.4 dB 5. HZ N: 256 P: 5HZ
 SPAN: 0.000HZ -1.0000KHZ FS: 20.00 dB 20 dB/

รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาด (magnitude) และความถี่ (function) และความถี่ (function) และความถี่ (function) และ ความถี่, โครเชียนซ์ที่สัมพันธ์ (coherence)

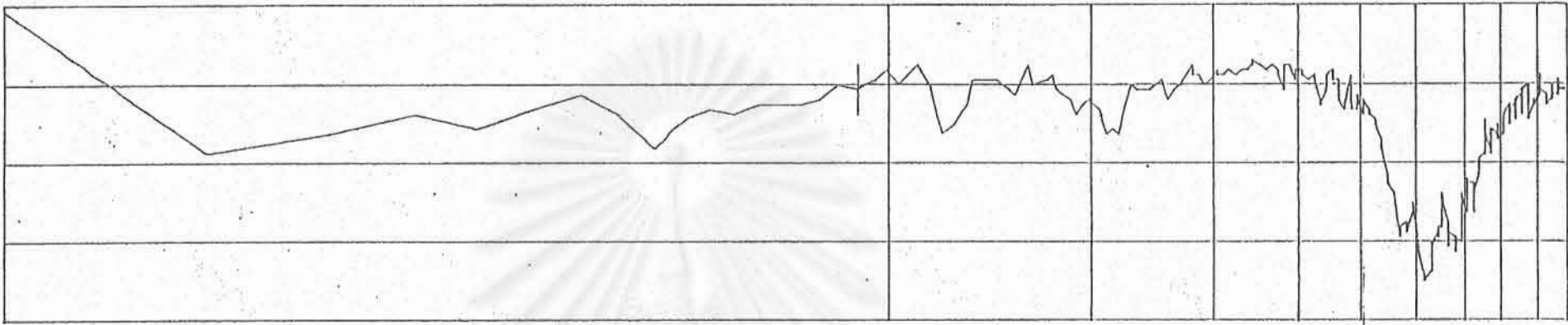
Motor with Current amplifier



XFR FN MAG : - 15.3 dB 440. HZ N: 256 F: 5HZ
 SPAN: 0.000HZ -1.0000KHZ FS: 20.00 dB 20 dB/



XFR FN PHASE : - 98.9 ° 440. HZ N: 256 F: 5HZ
 SPAN: 0.000HZ -1.0000KHZ FS: 180 ° 90 °/



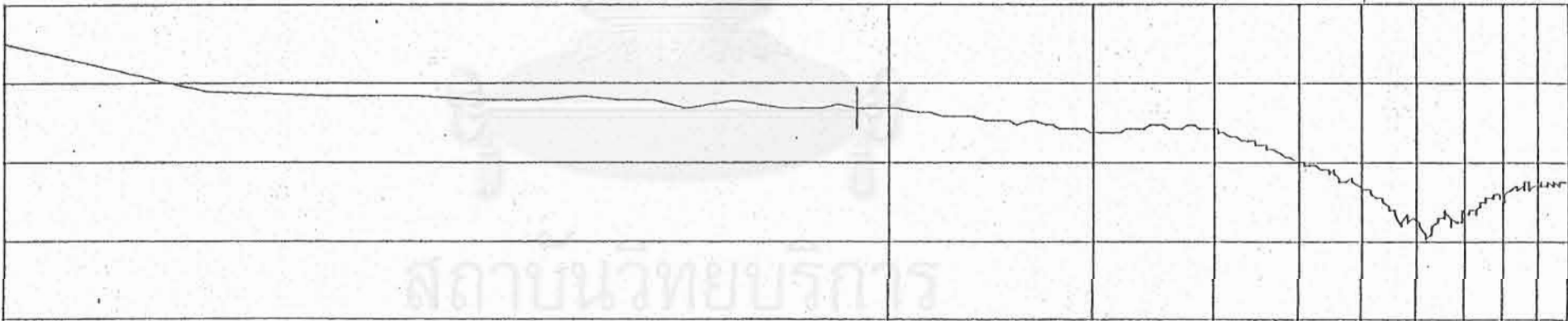
COHER : 0.74 90. HZ

N: 256 P: 5HZ

SPAN: 0.000HZ -1.0000KHZ

FS: 1.0

0.25/



XFR FN MAG : - 6.4dB 90. HZ

N: 256 P: 5HZ

SPAN: 0.000HZ -1.0000KHZ

FS: 20.00dB

20dB/

เมื่อรวมเอาสัญญาณความเร็วป้อนกลับ (velocity feedback) เข้าไปกับระบบด้วยก็จะได้ว่า

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{AK_f}{(\tau s + 1)(Ls + R)(Js + R) + K_f K_c (\tau s + 1) + AK_f K} \quad (5.5)$$

จากสมการข้างบนจะเห็นว่าเป็นสมการลำดับที่สาม ซึ่งยังมีค่า unknown ที่เรายังไม่ทราบเช่น ค่าเกน K และเวลาคงที่ (time constant) ของมอเตอร์ ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องหาค่าเหล่านี้จากการทดลอง โดยการวิเคราะห์โมดัล (Modal analysis) ซึ่งจะใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงความถี่ด้วยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (spectrum analysis) รูปที่ 5.1 เป็นรูปที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาด (magnitude) และ ความถี่, เฟส (phase) และ ความถี่, โคอฮีเรนซ์ (coherence function) และความถี่ จากความสัมพันธ์เหล่านี้ เรานำมาประมาณค่าราก (root) ของสมการคาร์เรคเตอร์ริสติก (characteristic equation) ได้ดังนี้คือ

$$\begin{aligned} s_1 &= 303.03 \text{ rad/sec} && = 48 \text{ Hz} \\ s_2 &= 1818 \text{ rad/sec} && = 290 \text{ Hz} \\ s_3 &= 2000 \text{ rad/sec} && = 319 \text{ Hz} \end{aligned}$$

นำค่าราก (root) ของสมการคาร์เรคเตอร์ริสติก (characteristic equation) นี้มาหาค่าสมการทรานสเฟอร์ฟังก์ชันรวม (overall transfer function) ในกรณีที่ใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบแรงดัน (voltage amplifier) ดังนี้คือ

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{K}{(s + 303)(s + 1818)(s + 2000)} \quad (5.6)$$

ค่า K ในที่นี้ก็คืค่าเกนซึ่งจะมีค่าประมาณ 0.4 โดยอ่านจากรูป

5.2 เครื่องขยายสัญญาณกระแส (Current Amplifier) กับมอเตอร์และเการะ

จากที่กล่าวมาแล้วว่าเครื่องขยายสัญญาณกระแส (current amplifier) กับมอเตอร์นั้นมีประโยชน์ที่เราสามารถควบคุมกระแสที่ไหลในขดลวดของมอเตอร์ได้ และขณะเดียวกันการตอบสนองต่อคำสั่งนั้นก็เร็วกว่าเครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมแรงดัน (voltage amplifier) ดังนั้นจึงเป็นที่นิยมใช้มากกว่า ในปัจจุบันนี้รูปแบบของสมการทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer function) สำหรับกรณีนี้สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{K_f K_c / LJ}{(s + R/L)(s + c/J) + (K_f R/LJ)(s + c/J) + (K_c K_f / LJ)} \quad (5.7)$$

ซึ่งจะเห็นว่าเป็นสมการลำดับที่สอง และเช่นเดียวกันเราสามารถหาค่าราก (root) ของสมการคาร์เรคเตอร์ริสติก (characteristic equation) ได้โดยใช้วิธีวิเคราะห์สเปกตรัมดังแสดงในรูปที่ 5.2 และค่าของ root ก็สามาร

หาได้ดังนี้คือ ดังนี้คือ

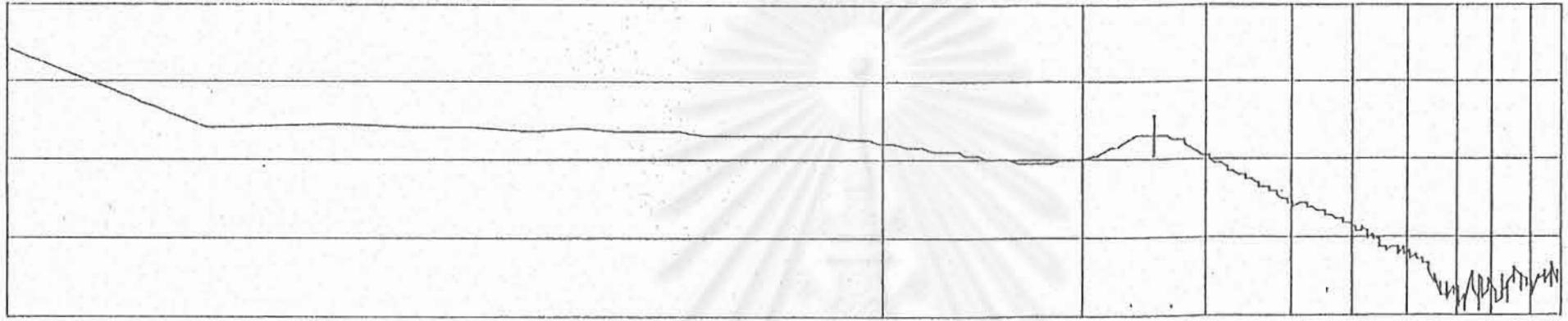
$$\begin{aligned} s_1 &= 606.69 \text{ rad/sec} &= & 97 \text{ Hz} \\ s_2 &= 1818 \text{ rad/sec} &= & 289 \text{ Hz} \end{aligned}$$

5.3 เครื่องขยายสัญญาณกระแส (Current Amplifier) กับมอเตอร์และภาระ โดยมีสัญญาณความเร็วป้อนกลับ (Velocity feedback) รวมอยู่ด้วย

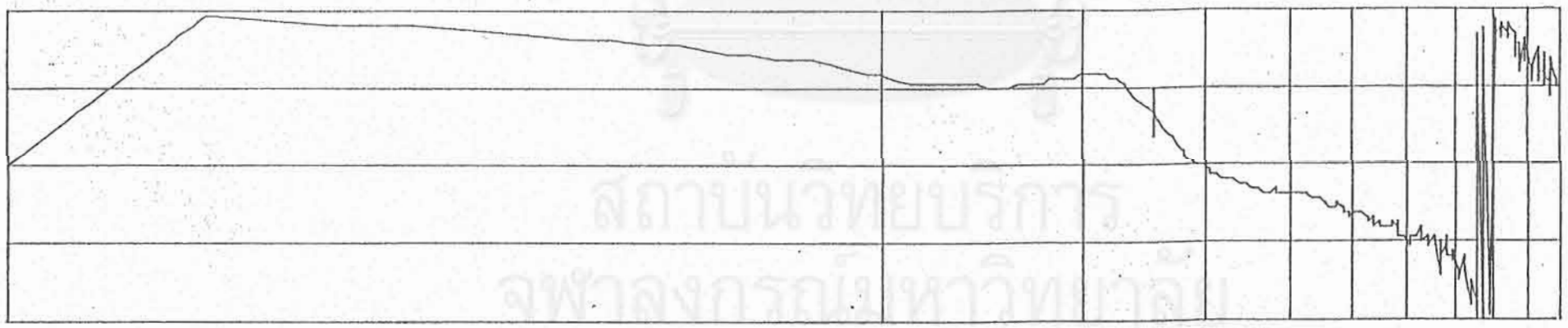
การเพิ่มส่วนของสัญญาณความเร็วป้อนกลับ (velocity feedback) เข้าไปกับระบบควบคุมในตัวขยายสัญญาณ (amplifier) นั้นจะทำให้การตอบสนองช้าลงแต่ก็เป็นการเพิ่มค่าอัตราส่วนแดมปีง (damping ratio) ให้กับระบบ ดังนั้นเราจึงทำการศึกษาในส่วนนี้ด้วย จากรูปที่ 5.3 เราสามารถหาราก (root) ของสมการคาร์เรคเตอร์ริสติก (characteristic equation) ได้ดังนี้คือ

$$\begin{aligned} s_1 &= 303 \text{ rad/sec} &= & 48 \text{ Hz} \\ s_2 &= 1500 \text{ rad/sec} &= & 240 \text{ Hz} \\ s_3 &= 2010 \text{ rad/sec} &= & 320 \text{ Hz} \end{aligned}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



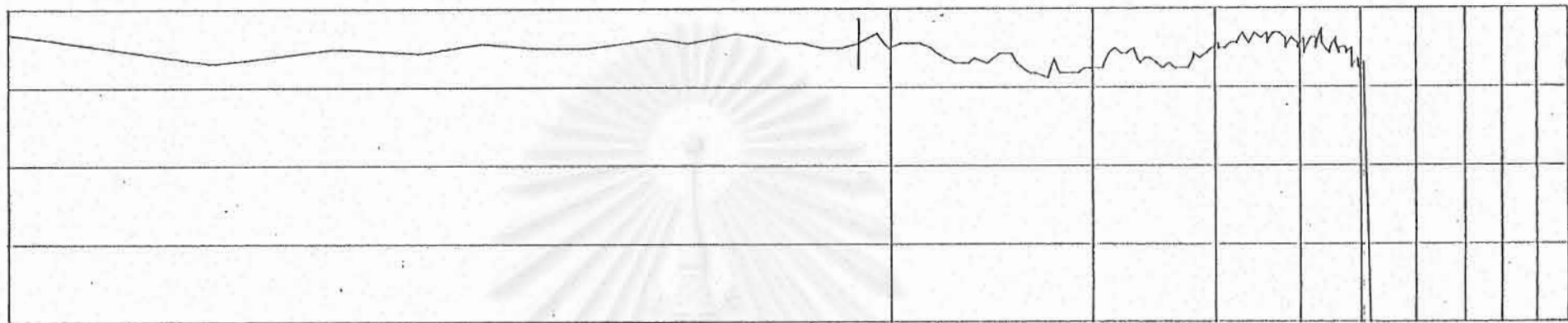
XFR FN MAG : - 13.8 dB 255. HZ N: 256 P: 5HZ
 SPAN: 0.000HZ -1.0000KHZ FS: 20.00 dB 20 dB/



XFR FN PHASE : 60.6 ° 255. HZ N: 256 P: 5HZ
 SPAN: 0.000HZ -1.0000KHZ FS: ±180 ° 90 °/

Motor with current amplifier and innerloop velocity feedback

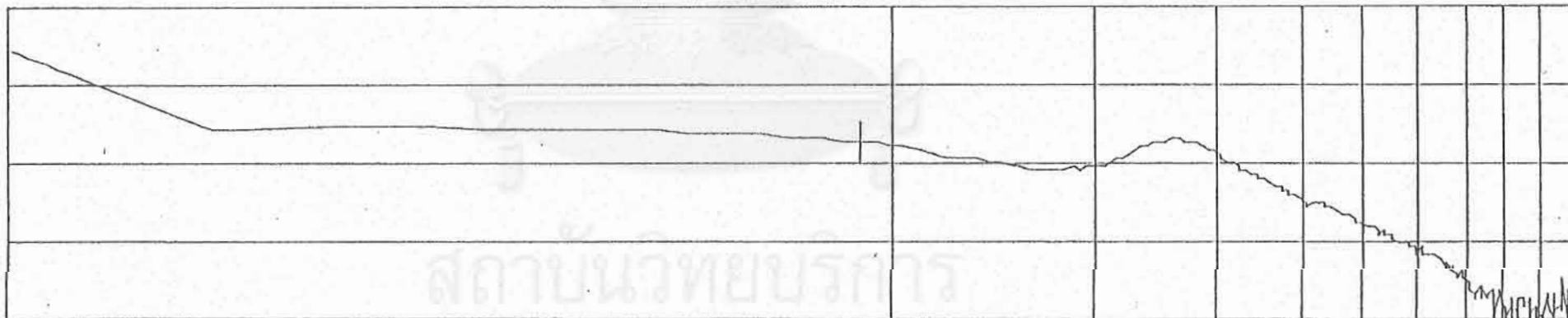
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาด (magnitude) และความถี่, เฟส (Phase) และความถี่ (coherence function) และความถี่



COHER : 0.90 90. HZ
 SPAN: 0.000HZ -1.0000KHZ

FS: 1.0

N: 256 P: 5HZ
 0.25/



XFR FN MAG : - 14.7 dB
 SPAN: 0.000HZ -1.0000KHZ

90. HZ
 FS: 20.00 dB

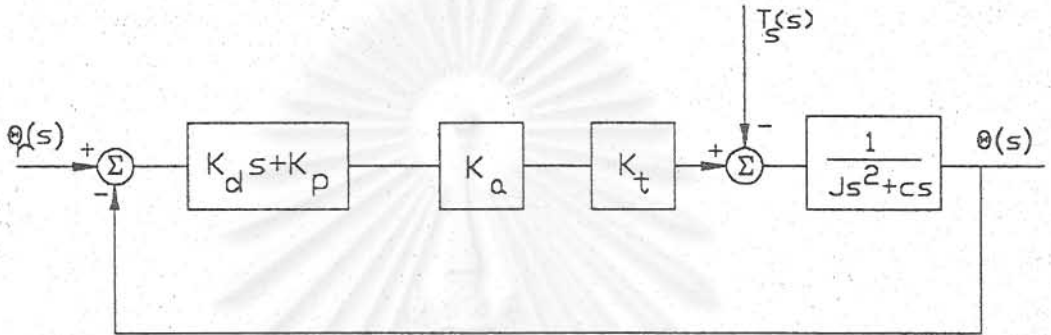
N: 256 P: 5HZ
 20 dB/

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6. Control loop โดยใช้ Current Amplifier

ตามที่ได้อธิบายมาแล้วว่าการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์นั้นก็คือการคำนวณหาตำแหน่งที่ต้องการที่มีขนาดเพียงพอในการที่จะเอาชนะภาระที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ความพิค และแรงบิดพลศาสตร์ (dynamic torques) อันเนื่องมาจากโมเมนต์ความเฉื่อย (moment of inertia) การควบคุมแบบปิดนั้นมีหลายแบบด้วยกัน ในที่นี้จะกล่าวแต่เฉพาะการควบคุมแบบพิค (PD control) เท่านั้น เนื่องจากกระแสที่ไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์ (armature) ของมอเตอร์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้น ดังนั้นการใช้เครื่องขยายสัญญาณกระแส (Current Amplifier) จึงเหมาะสมสำหรับกรณีนี้



รูปที่ 6.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมโดยใช้เครื่องขยายสัญญาณกระแส

รูปที่ 6.1 แสดงให้เห็นถึงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบปิดที่ใช้การขยายสัญญาณกระแส (current amplifier) ระบบควบคุมที่แสดงในบล็อกไดอะแกรมนี้เป็นระบบควบคุมแบบพิค (PD control) $T_s(s)$ สมมติให้เป็นค่าแรงรบกวนอันเนื่องมาจาก ความพิคที่สกรูกำลัง (power screw) และสมมติว่าค่าความพิควิสกอส (viscous friction) มีค่าน้อยมาก จากบล็อกไดอะแกรม เราจะได้ว่า

$$T = K_t I \quad (6.1)$$

$$\omega(s) = \frac{T - T_r(s)}{sJ} \quad (6.2)$$

และตำแหน่งการหมุนก็คือค่าอินทิเกรตของความเร็ว ดังนั้น

$$\theta(s) = \frac{\omega(s)}{s} \quad (6.3)$$

เครื่องขยายสัญญาณกระแส (Current Amplifier) สามารถสร้างกระแสเป็นสัดส่วนกับคำสั่งที่เป็นค่าแรงดันไฟฟ้า (V_u) ดังนั้น

$$I = K_a V_u \quad (6.4)$$

รูปแบบทั่วไปของระบบพิค (PD control) จะมีรูปแบบดังนี้คือ

$$V_u(s) = (K_d s + K_p)(\theta_r(s) - \theta(s)) \quad (6.5)$$

จากระบบควบคุมแบบนี้จะพบว่าค่า K_p จะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดค่าความผิดพลาดสม่ำเสมอ (steady state error) สำหรับสัญญาณเข้าที่เป็นสเตป (step input) และค่า K_d จะช่วยให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น ระบบควบคุมที่แสดงในรูปที่ 6.1 นี้จะเห็นว่ามีการหุ่ยสองค่าตั้งนั้นค่า $\theta(s)$ สามารถหาได้จากวิธีการซูเปอร์โพสิชัน (Superposition) ดังนี้คือ

$$\theta(s) = \frac{(K_1 s + K_2)\theta_r(s)}{J s^2 + K_1 s + K_2} + \frac{-T_r(s)}{J s^2 + K_1 s + K_2} \quad (6.6)$$

โดยที่ $K_1 = K_a K_i K_d$ $K_2 = K_a K_i K_p$

จะเห็นว่าสมการคาร์เรคเตอร์ริสติก (characteristic equation) ของระบบข้างต้น เป็นสมการลำดับที่สอง ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับรูปแบบมาตรฐานของสมการลำดับที่สองซึ่งมีรูปแบบดังนี้คือ

$$s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (6.7)$$

ตั้งนั้นจะได้ว่าแดมปีงเฟคเตอร์ (damping factor) จะมีค่าเท่ากับ

$$\xi = \frac{K_1}{2\sqrt{JK_2}} \quad (6.8)$$

และค่าความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ของระบบสามารถเขียนได้ดังนี้คือ

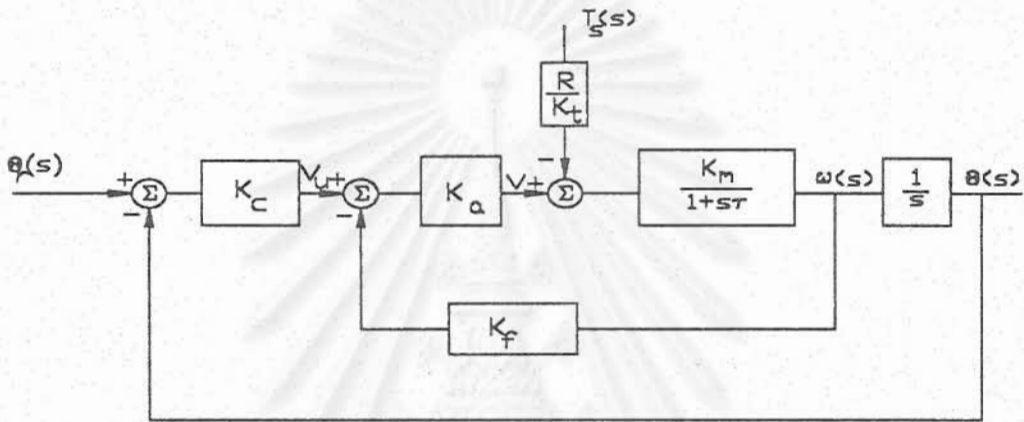
$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_2}{J}} \quad (6.9)$$

จะเห็นว่าค่าแดมปีงเฟคเตอร์ (damping factor) นั้นจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าความเฉื่อยหรือความหน่วง (inertia) ของระบบซึ่งถ้าค่าความเฉื่อย (inertia) ที่หามาได้นั้นไม่ใกล้เคียงความจริงแล้ว ค่าแดมปีงเฟคเตอร์ (damping factor) ของ ระบบควบคุมแบบปิด (close loop control) นั้นก็จะเปลี่ยนไป ตั้งนั้นจึงเห็นว่าระบบควบคุมแบบนี้จำเป็นต้องได้ค่าความเฉื่อยหรือความหน่วง (inertia) ของระบบที่มีค่าที่ค่อนข้างจะใกล้เคียงความจริง ระบบควบคุมหุ่นยนต์แบบพิกัดฉากที่เรากำลังศึกษาอยู่นี้ จะเห็นว่าค่าเฉื่อยหรือความหน่วง (inertia) ที่มีผลต่อการหมุน ของมอเตอร์มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ตั้งนั้นค่า gains (K_1, K_2) ที่หาได้จากสมการข้างบนโดยกำหนดค่า ξ, ω_n จึงค่อนข้างที่จะไม่เปลี่ยนแปลง

7. รูปของระบบควบคุม (Control Loop) โดยใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมแรงดัน Voltage Amplifier

การควบคุมโดยใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมแรงดัน (Voltage Amplifier) นั้นเหมาะสำหรับงานที่ต้องการควบคุมความเร็ว เช่น ควบคุมความเร็วของแขนขี้อต่อหุ่นยนต์อุตสาหกรรม เป็นต้น เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมแรงดัน (Voltage Amplifier) นั้นจะให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้า และสามารถสร้างกระแสตามความต้องการของมอเตอร์ภายใต้แรงดันไฟฟ้านั้น

รูปที่ 7.1 เป็นรูปบล็อกไดอะแกรมที่แสดงการควบคุมขั้นพื้นฐาน ในรูปบล็อกไดอะแกรมนี้จะเห็นว่าค่าเวลาคงที่ (time constant) ของมอเตอร์นั้นมีค่าน้อยมาก ดังนั้นค่า K_a จึงเปรียบเสมือนตัวแทนของเครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมแรงดัน (voltage amplifier) ค่า T_s คือค่าแรงบิดที่เกิดจากแรงเสียดทาน



รูปที่ 7.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมโดยใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมแรงดัน (Voltage amplifier)

จากรูปบล็อกไดอะแกรมข้างบนนี้จะเห็นว่าในรูปของระบบควบคุม (control loop) นั้นจะมีรูปภายใน (inner loop) ที่บ่อนสัญญาณความเร็วจากมอเตอร์กลับไปเปรียบเทียบกับค่าคำสั่งความเร็วที่อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้า ค่าในรูปภายใน (inner loop) นี้ก็มีค่าเกนที่มีขนาด K_f ที่ใช้สำหรับบ่อนสัญญาณความเร็วที่วัดได้จากมอเตอร์กลับสู่การควบคุมภายในของรูปภายใน (inner loop) สมการทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน (transfer function) ของระบบสามารถคำนวณหาได้ดังนี้

ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ส่งไปยังมอเตอร์คือ

$$V(s) = K_a [V_u(s) - K_f \omega(s)] \quad (6.10)$$

และสมการความเร็วของมอเตอร์ก็สามารถค่าได้คือ

$$\omega(s) = \frac{\alpha K_a K_m V_u(s) - (R K_m / K_t) \alpha T_s(s)}{1 + s \alpha \tau} \quad (6.11)$$

โดยที่

$$\alpha = \frac{1}{1 + K_a K_f K_m}$$

จากสมการข้างบนนี้ จะเห็นว่า การเพิ่มลูปรภายใน (inner loop) เข้าไปในระบบควบคุมนั้นก็เพื่อต้องการจะลดค่าเวลาคงที่ (time constant) และเพื่อต้องการจะลดผลสะท้อนที่เกิดจากแรงบิดภาระ เพราะการควบคุมแบบนี้จะถือว่าแรงบิดภาระนี้คือค่าแรงบิดรบกวนในระบบควบคุมของเรา และนอกจากนั้นแล้วก็ยังจะช่วยลดความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearity) ของเครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมแรงดัน (voltage amplifier) ด้วย จากสมการข้างต้นนั้นเราจะเห็นว่าส่วนควบคุมที่เป็นดิริเวทิฟ (derivative control) นั้นไม่จำเป็นสำหรับการควบคุมแบบนี้ เพียงส่วนของการควบคุมแบบเป็นสัดส่วน (Proportional control) ก็เพียงพอแล้ว

สมการ close loop ของระบบรวมสามารถหาได้คือ

$$E(s) = \theta_r(s) - \theta(s) \quad (6.12)$$

และ

$$V_a(s) = K_c E(s) \quad (6.13)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\theta(s) = \frac{K\theta_r(s) - K_q T_s(s)}{\tau's^2 + s + K} \quad (6.14)$$

โดยที่

$$K = \alpha K_a K_m K_c$$

$$K_q = \frac{\alpha R K_m}{K_r}$$

$$\tau' = \alpha \tau = \frac{\alpha R J}{K_1 K_v}$$

ดังนั้นเมื่อนำสมการคาร์เรคเตอร์ริสติก (characteristic equation) มาเปรียบเทียบกับรูปแบบมาตรฐานจะได้ว่า

$$\xi = \frac{1}{2\sqrt{K\tau'}} \quad (6.15)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{\tau'}} \quad (6.16)$$

8. การจำลองการทำงานของระบบพลศาสตร์และระบบควบคุม (Control and Dynamic Systems Simulation)

จากหัวข้อที่แล้วได้กล่าวถึงการออกแบบระบบควบคุมไปแล้วซึ่งครอบคลุมไปถึงการใช้เครื่องขยายสัญญาณ (amplifier) แบบควบคุมแรงดัน (Voltage amplifier) และแบบควบคุมกระแส (Current amplifier) ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการจำลองการทำงานของระบบโดยใช้ระบบควบคุมที่ได้ออกแบบไว้แล้วข้างต้น ในหัวข้อที่ 4.4 ได้กล่าวถึงโปรไฟล์ของความเร็ว (velocity profile) สำหรับการเคลื่อนที่แบบจุดต่อจุด (point to point) ซึ่งเราจะใช้โปรไฟล์ของความเร็ว (velocity profile) นี้เป็นมาใช้หาค่าสั่งที่กำหนดตำแหน่งอ้างอิงดังได้แสดงไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.4

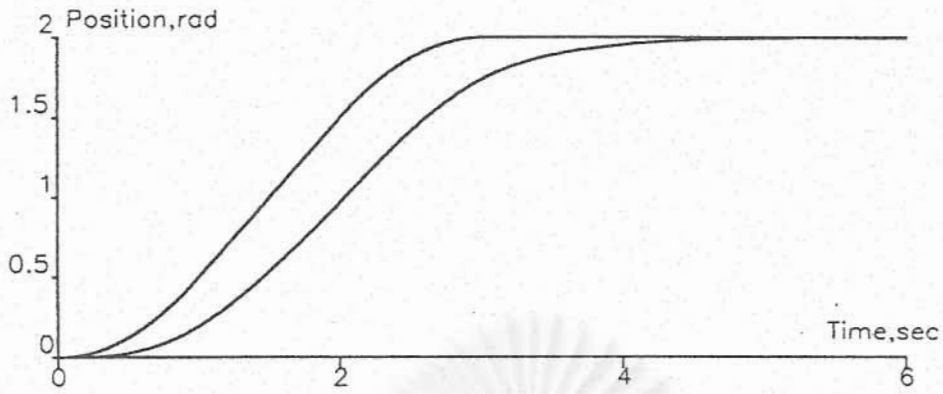
ระบบขับเคลื่อนของแกนที่สามของแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมนี้ประกอบด้วยส่วนที่เป็นตัวขนและชุดขับเคลื่อนใช้สายพานทามมิ่ง (Timing belt) มอเตอร์กระแสตรง และชุดขยายสัญญาณที่ต่อเป็นแบบการควบคุมแรงดัน (Voltage amplifier) หรือการควบคุมกระแส (Current amplifier)

8.1 การจำลองการทำงานของระบบควบคุมที่ใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมแรงดัน (Voltage amplifier)

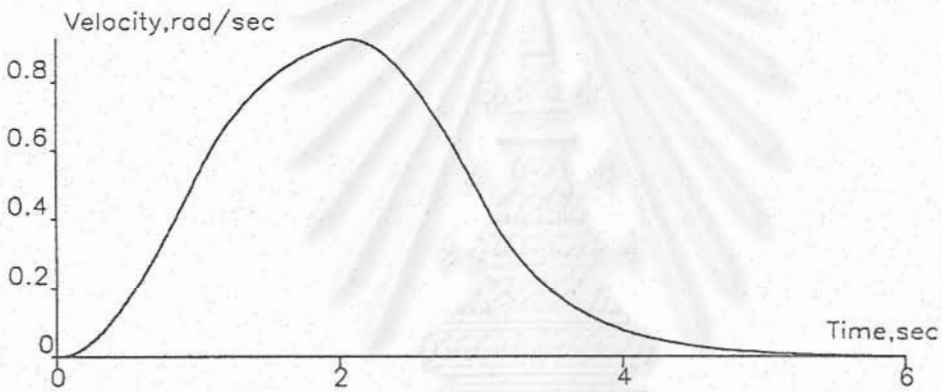
ระบบควบคุมสำหรับกรณีที่ใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมแรงดัน (Voltage amplifier) นั้นดังได้กล่าวมาแล้วว่าการควบคุมค่อนข้างจะง่ายคือเป็นการควบคุมแบบเป็นสัดส่วน (Proportional control) เท่านั้นก็ค่อนข้างจะเพียงพอ รูปที่ 8.1-8.3 เป็นผลที่ได้จากการทำการจำลองการทำงานของระบบโดยใช้ค่าเกนต่างๆกันคือ $K_c = 100, 300$ และ 800 และค่าพารามิเตอร์ของตัวมอเตอร์และเครื่องขยายสัญญาณ (amplifier) ที่ใช้ในแบบจำลองการทำงานของระบบนี้ ก็ใช้ค่าประมาณจากการทดสอบด้วยวิธีการของการวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analysis) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 5 โปรไฟล์ของความเร็ว (Velocity Profile) ที่ใช้นี้กำหนดว่าความเร็วสูงสุด ของการเคลื่อนที่คือ 1 rad/sec และความเร่งสูงสุดคือ 1 rad/sec^2 โดยเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทาง 2 rad . จากผลการจำลองการเคลื่อนที่นี้จะเห็นว่าค่าเกนมีค่ามากจะได้ผลการเคลื่อนที่ใกล้เคียงมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคำสั่งอ้างอิงที่กำหนดตำแหน่งของระบบควบคุมและความเร็วที่วัดได้จากมอเตอร์ก็เป็นไปตามความเร็วอ้างอิง ที่ใช้ในการหาค่าสั่งอ้างอิงที่กำหนดตำแหน่งนั้นด้วย คำสั่งที่ส่งเข้าไปยังเครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมแรงดัน (voltage amplifier) ของมอเตอร์ที่คำนวณมาจากสมการควบคุมก็อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งก็มีลักษณะเป็นเช่นเดียวกับโปรไฟล์ความเร็ว (velocity profile) ของการเคลื่อนที่ที่กำหนดขึ้น

8.2 การจำลองการทำงานของระบบควบคุมที่ใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมกระแส (Current amplifier)

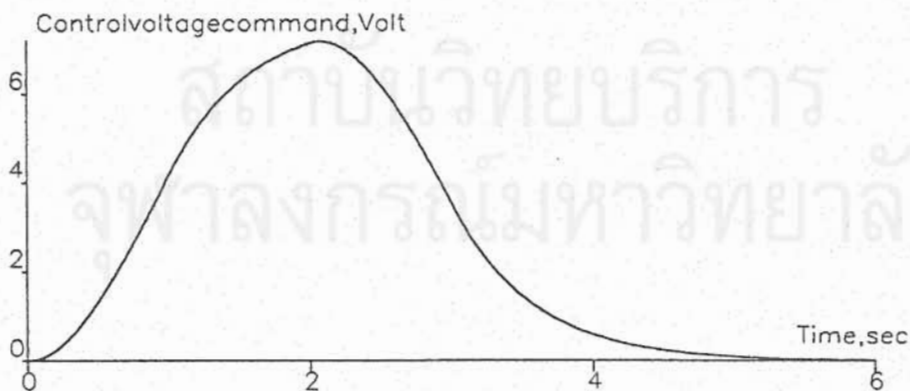
ระบบควบคุมสำหรับกรณีที่ใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมกระแส (Current amplifier) นี้จะเป็นแบบพีดี (PD, Proportional Plus Derivative control) ดังได้กล่าวมาแล้ว รูปที่ 8.4-8.6 เป็นผลที่ได้จากการทำการจำลอง การทำงานของระบบควบคุม ซึ่งในทำนองเดียวกันจะใช้คำสั่งอินพุต (input) เป็นคำสั่งตำแหน่งที่ได้จากโปรไฟล์ความเร็ว (velocity profile) ที่กำหนดขึ้นเพื่อให้ใช้ความเร็วในการเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งให้ใช้เวลาน้อยที่สุด โดยกำหนดความเร็วสูงสุด ความเร่งสูงสุดและระยะทางที่ต้องการเคลื่อนที่ไปเช่นเดียวกับในกรณีของการใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมแรงดัน (voltage amplifier) จากผลของการจำลองการทำงานจะเห็นว่าค่าเกนของส่วนควบคุมที่เป็นสัดส่วน (proportional gain) จะช่วยลดค่าความผิดพลาดสม่ำเสมอ (steady state error) ในขณะที่ค่าเกนของส่วนควบคุมที่เป็นดิริเวทิฟ (derivative gain) จะช่วยเพิ่มค่าแดมปีง (damping) ให้กับระบบทำให้ระบบมีเสถียรภาพ (stability) ดีขึ้น การจำลองการเคลื่อนที่นี้จะใช้ค่าเกนสามชุดคือ $K_p=300, K_d=1$ $K_p=300, K_d=20$ และ $K_p=800, K_d=1$



Comparing the reference position with output position

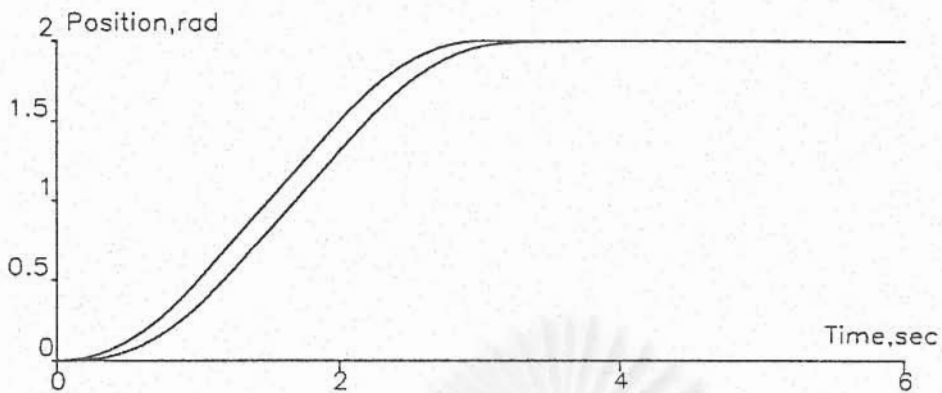


The velocity profile

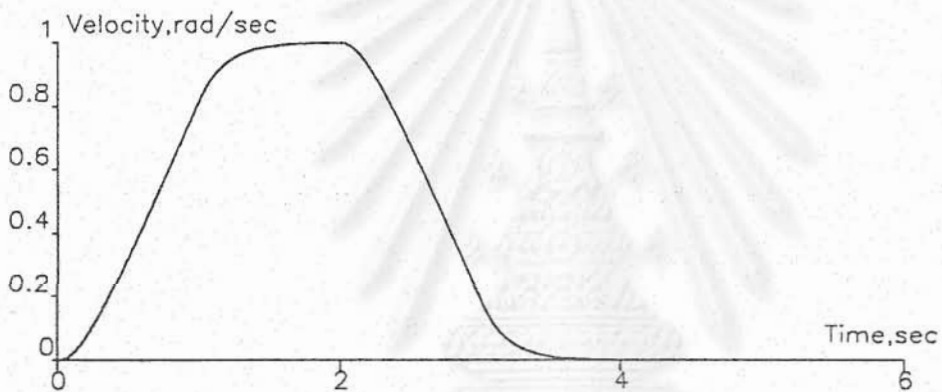


The control voltage with voltage amplifier

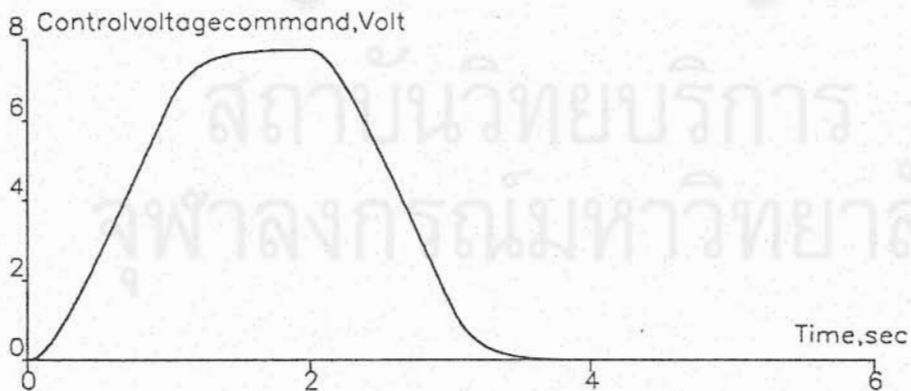
รูปที่ 8.1 ผลการจำลองการเคลื่อนที่โดยใช้ $K_c = 100$



Comparing the reference position with output position

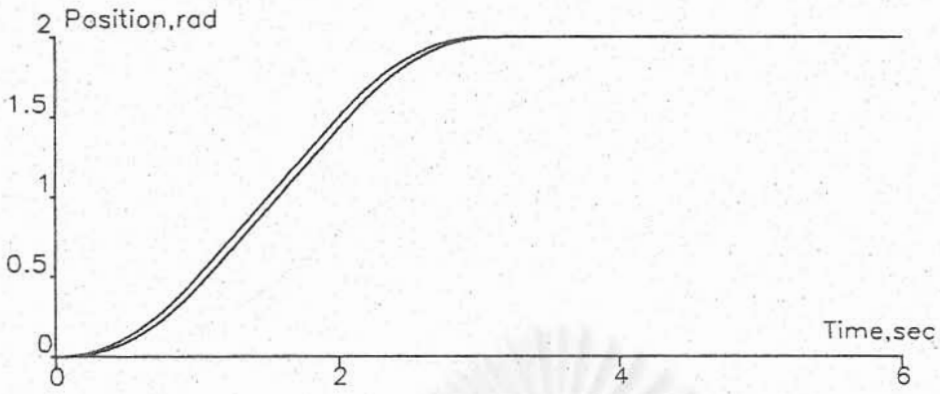


The velocity profile

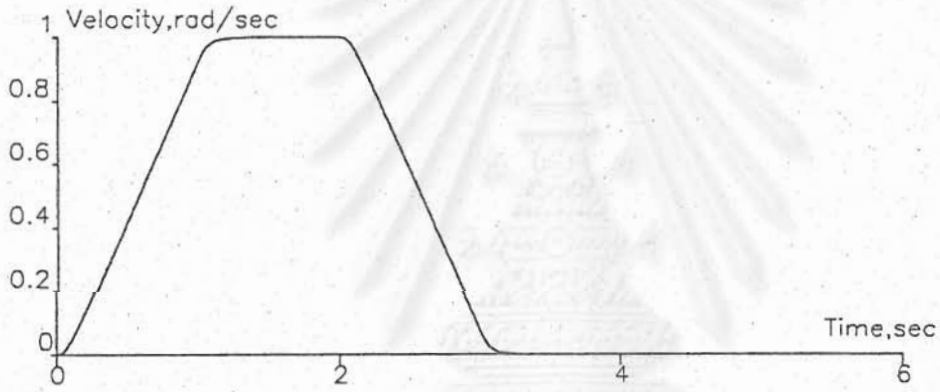


The control voltage with voltage amplifier

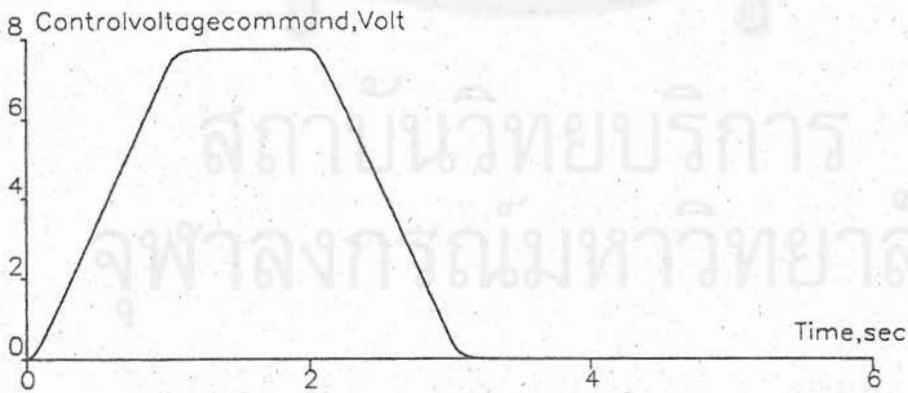
รูปที่ 8.2 ผลการจำลองการเคลื่อนที่โดยใช้ $K_c = 300$



Comparing the reference position with output position

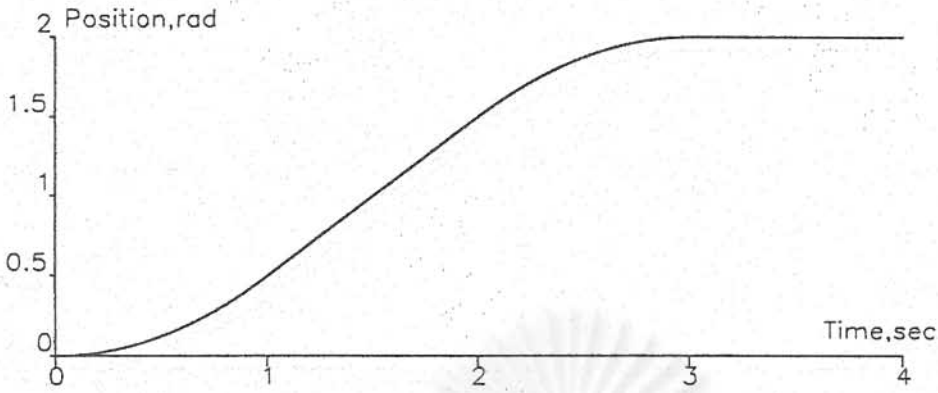


The velocity profile

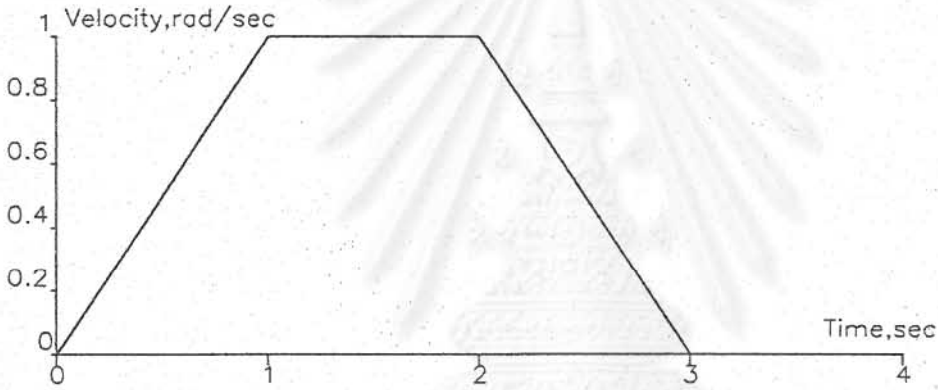


The control voltage with voltage amplifier

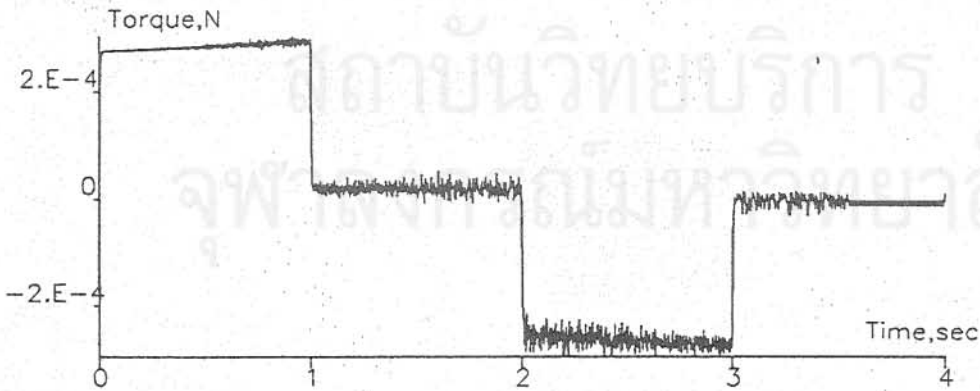
รูปที่ 8.3 ผลการจำลองการเคลื่อนที่โดยใช้ $K_c = 800$



Comparing the reference position with output position

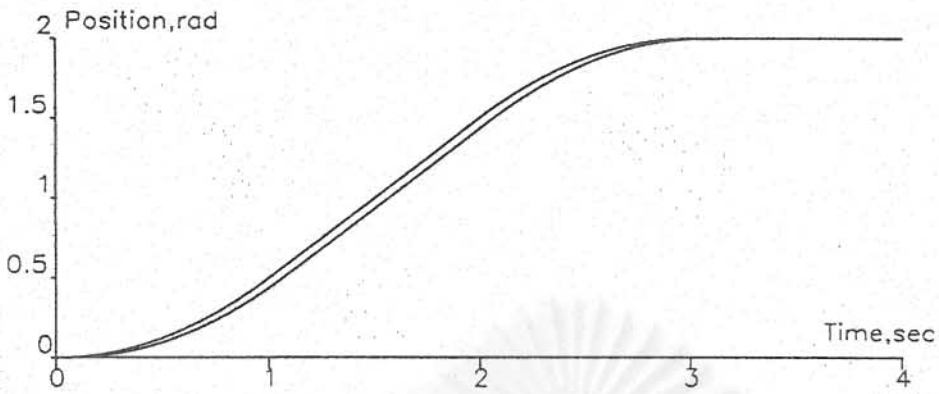


The velocity profile

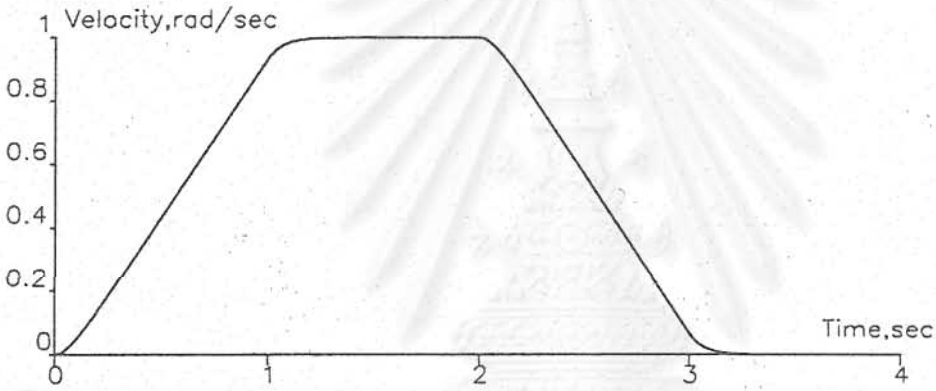


The control torque with current amplifier

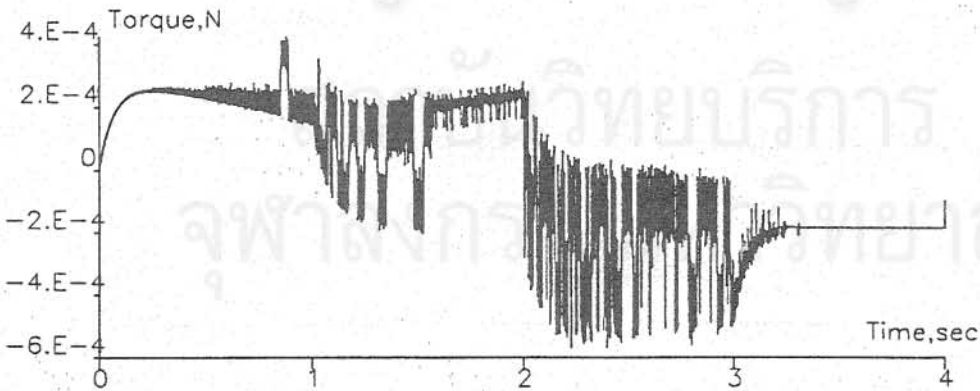
รูปที่ 8.4 ผลการจำลองการเคลื่อนที่โดยใช้ $K_p=300$ และ $K_d=1$



Comparing the reference position with output position

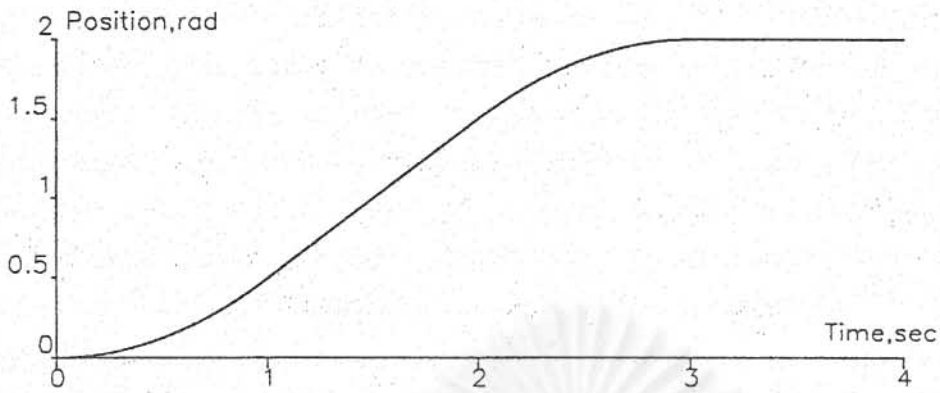


The velocity profile

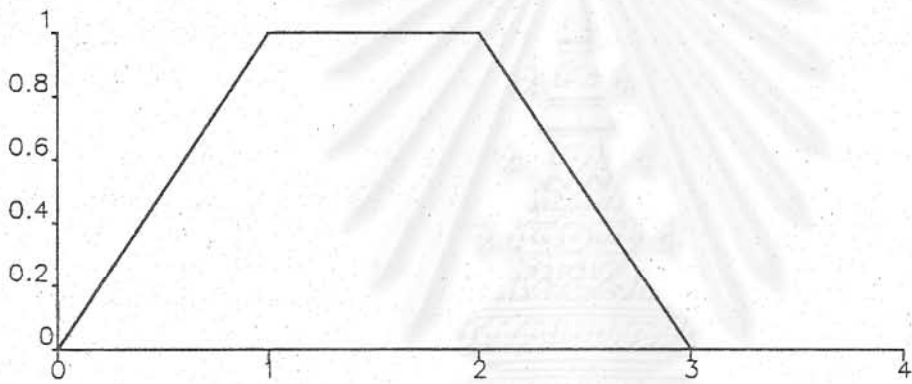


The control torque with current amplifier

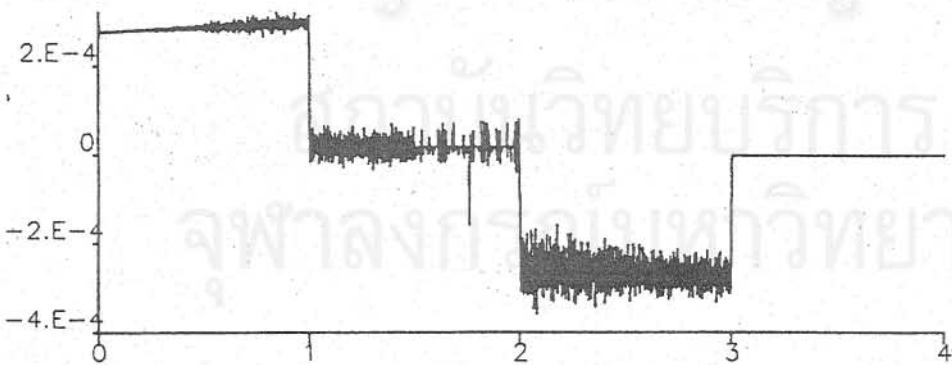
รูปที่ 8.5 ผลการจำลองการเคลื่อนที่โดยใช้ $K_p=300$ และ $K_d=20$



Comparing the reference position with output position



The velocity profile

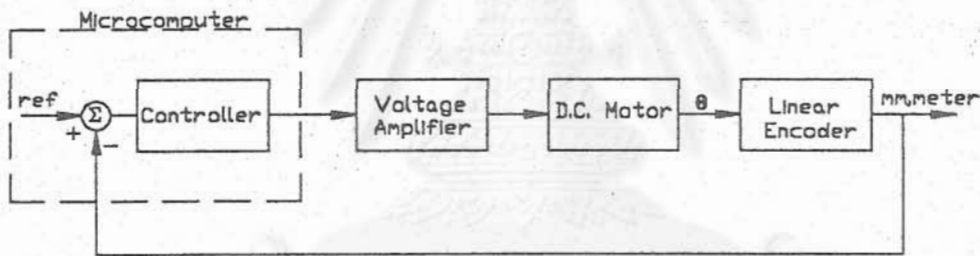


The control torque with current amplifier

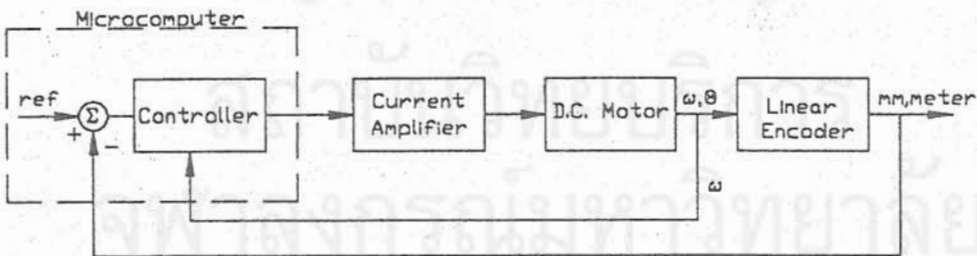
รูปที่ 8.6 ผลการจำลองการเคลื่อนที่โดยใช้ $K_p=800$ และ $K_d=1$

9. ผลการทดลอง

จากหัวข้อที่แล้วเราได้ทำการวิเคราะห์ผลของการเคลื่อนที่โดยใช้แบบจำลองและระบบควบคุมที่ออกแบบโดยใช้ เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมแรงดัน (Voltage amplifier) และใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมกระแส (Current amplifier) จากผลการจำลองการเคลื่อนที่ทำให้เราสนใจมากขึ้นกับระบบควบคุมที่ได้ออกแบบไป หลังจากนั้นนำมาทดลองการเคลื่อนที่กับระบบจริง การเคลื่อนที่ของแขนที่สามของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมชนิดสามข้อต่อแบบพิกัดฉากของระบบจริงนี้จะต้องประกอบด้วยเซ็นเซอร์ (sensors) ที่ใช้วัดตำแหน่ง (Linear Encoder) และวัดความเร็ว (Tachometer) โดยสัญญาณนี้จะผ่านเข้าออกเครื่องควบคุมซึ่งจะเป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ได้ โดยผ่านชุดแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (analog/digital converter) และชุดแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาลอก (digital/analog converter) สัญญาณที่ส่งเข้าออกนี้จะอยู่ในรูปแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะถูกจำกัดขนาดให้มีขนาดไม่เกิน ± 10 volts แต่ชุดวัดตำแหน่ง (Linear Encoder) นั้นจะต้องผ่านชุดแปลงรหัส (decoder) และเครื่องนับสัญญาณ (counter) ซึ่งจะแปลงให้ข้อมูลตำแหน่งนั้นเป็นของมูลเลขฐานสอง (binary) ก่อนที่จะส่งผ่านเข้าสู่คอมพิวเตอร์โดยใช้แผงวงจรต่อเชื่อมแบบทีทีแอล (TTL interface) รูปที่ 9.1 เป็น block diagram ของระบบที่ใช้ทำการทดลองทั้งแบบที่ใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมแรงดัน (voltage amplifier) และเครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมกระแส (current amplifier)

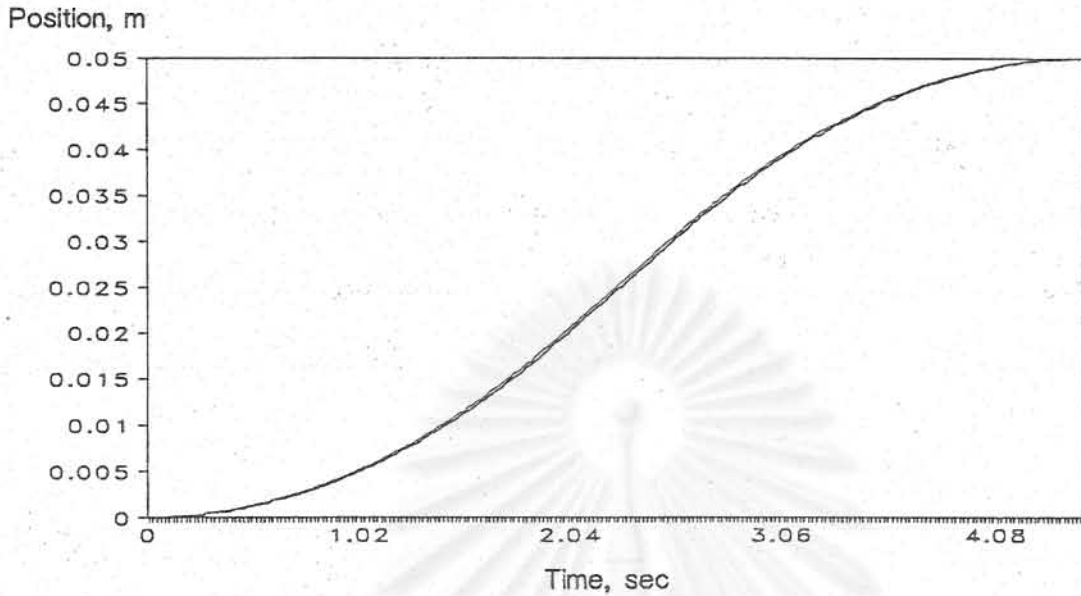


DC motor with voltage amplifier

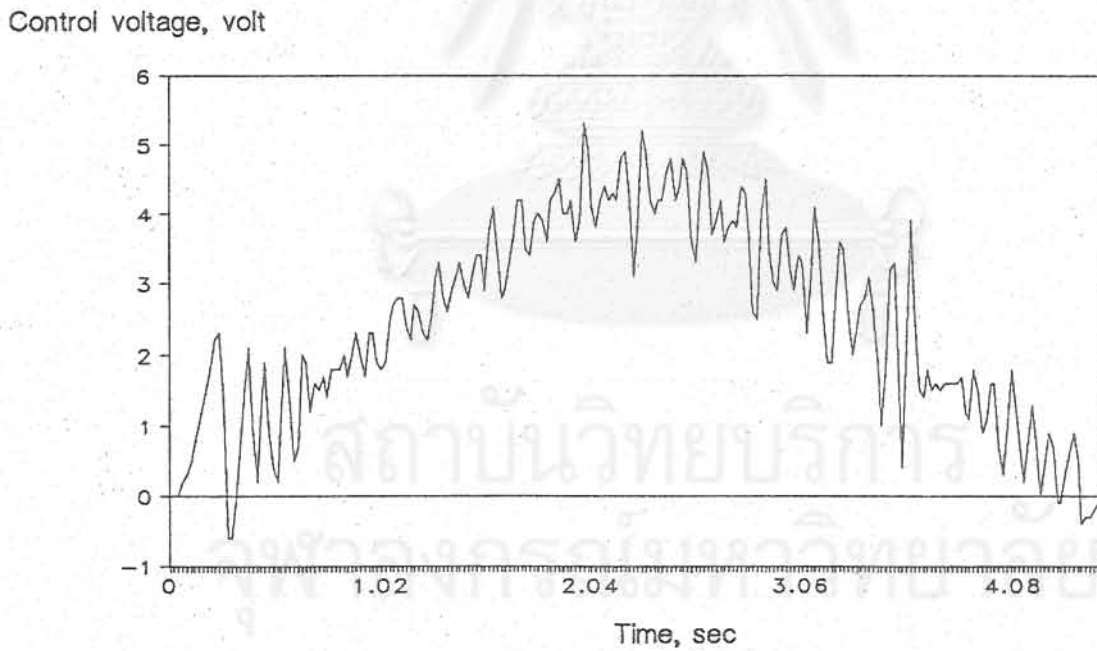


มอเตอร์กระแสตรงกับชุดขยายสัญญาณแบบควบคุมแรงดัน (DC motor with Current amplifier)

รูปที่ 9.1 บล็อกไดอะแกรม ของระบบที่ใช้ในการทดลอง



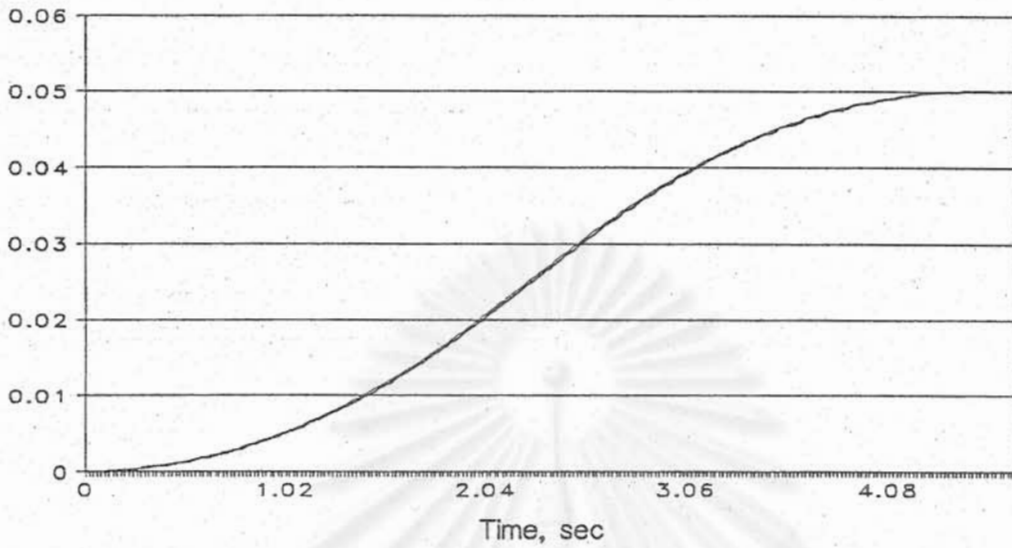
Comparing the reference position with output position



The control voltage with voltage amplifier

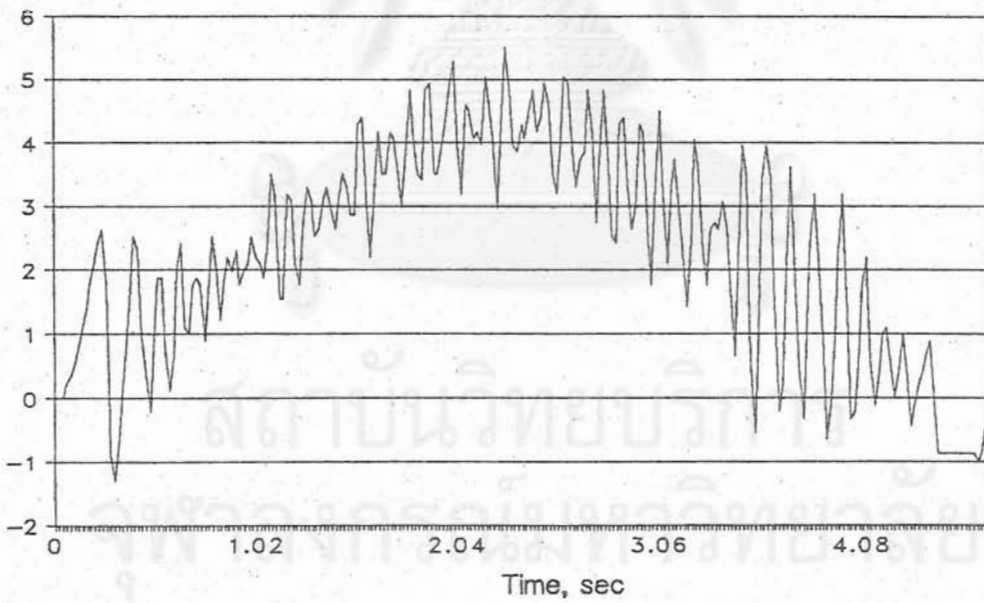
รูปที่ 9.2 เอาร์ทัพจากการทดลองโดยใช้ค่า $K_p=10000$

Position, m



Comparing the reference position with output position

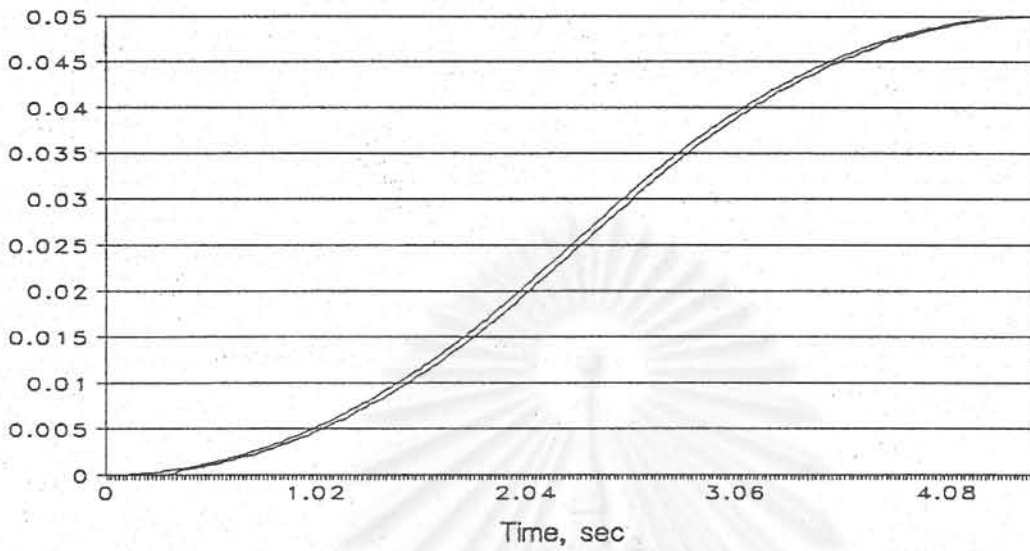
Control voltage, volt



The control voltage with voltage amplifier

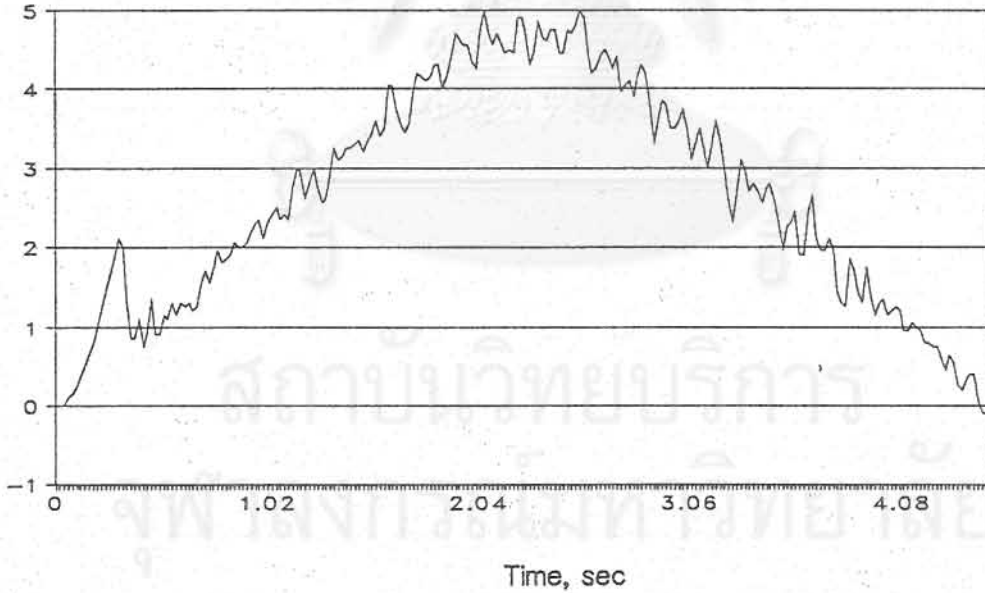
รูปที่ 9.3 เอาร์ทัพจากการทดลองโดยใช้ค่า $K_p=11000$

Position, m



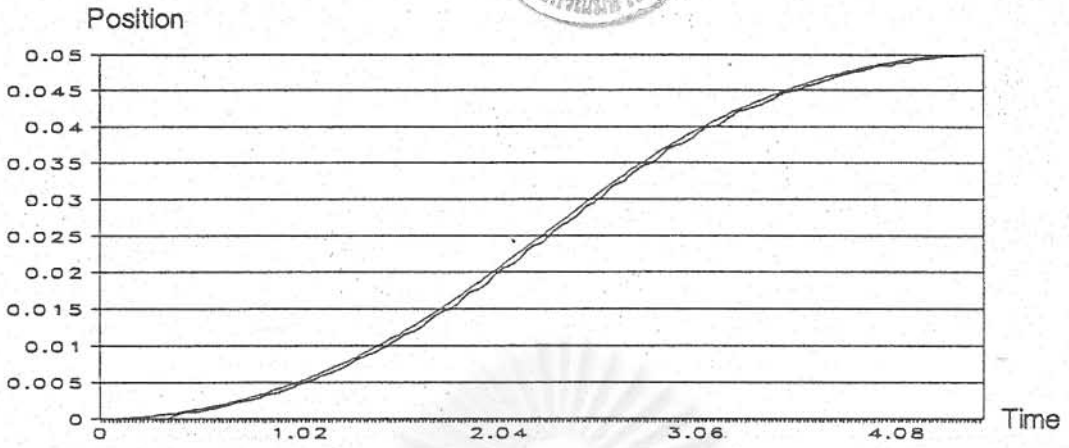
Comparing the reference position with output position

Control voltage, volt

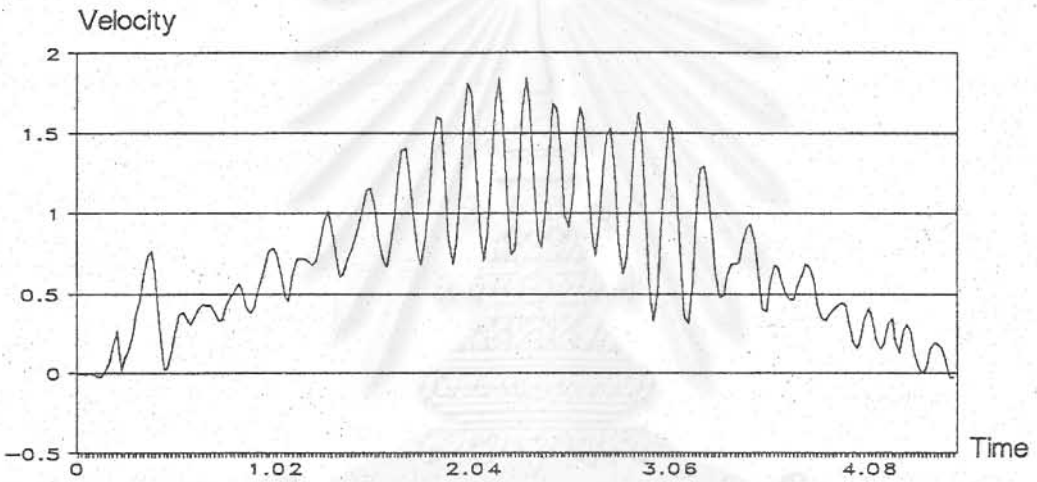


The control voltage with voltage amplifier

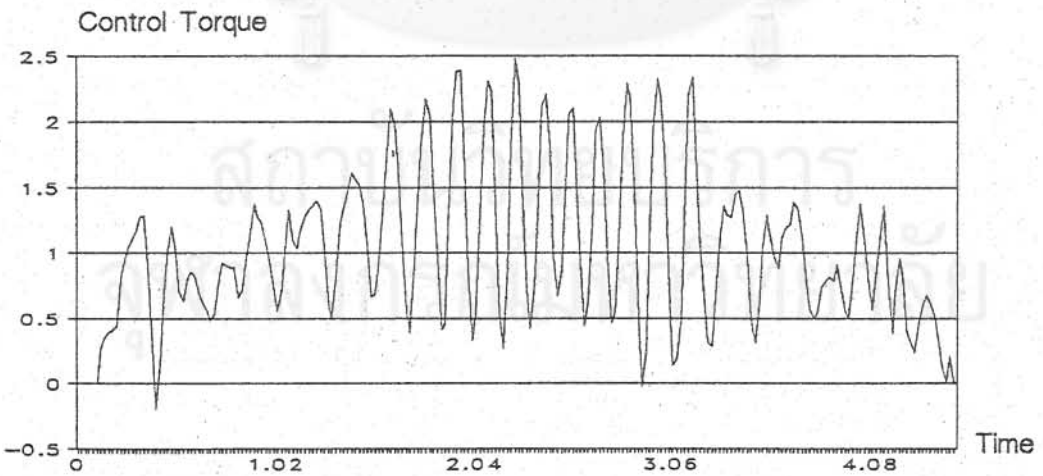
รูปที่ 9.4 เอาร์ทพุทจากการทดลองโดยใช้ค่า $K_p=5000$



Comparing the reference position with output position

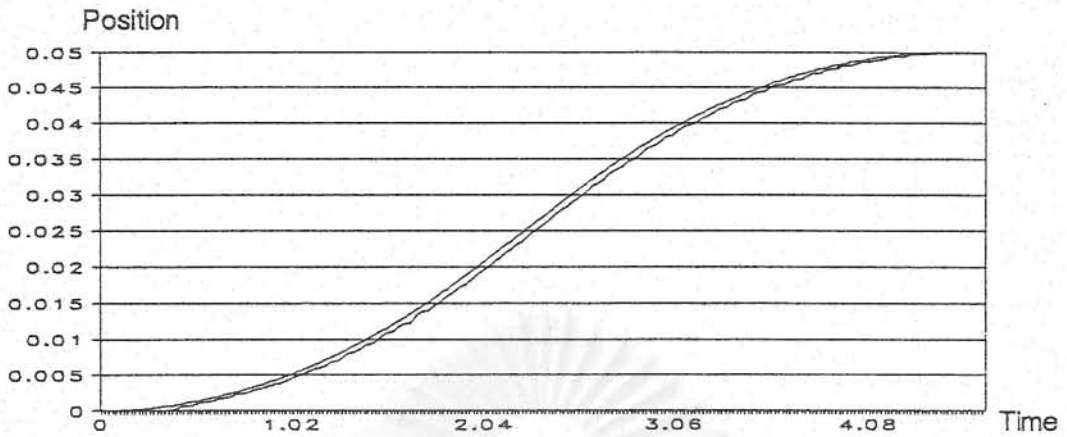


The velocity output

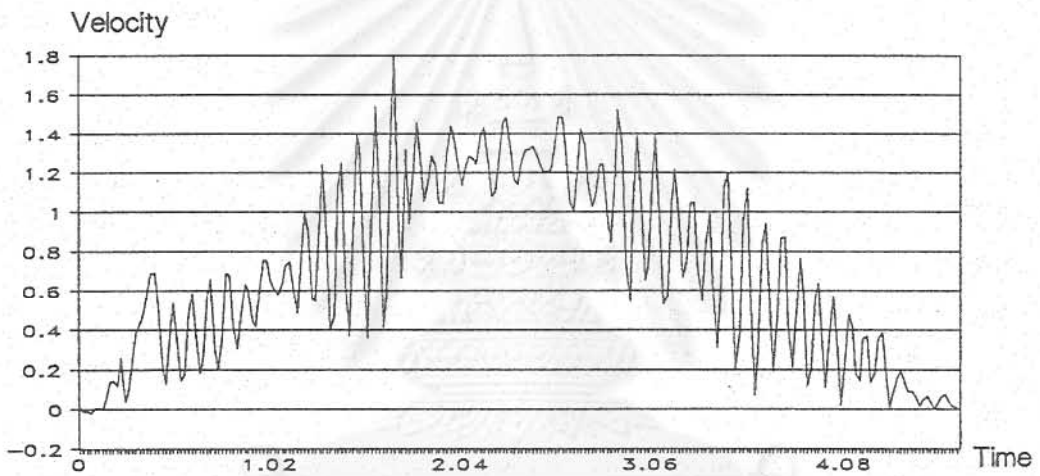


The control voltage with current amplifier

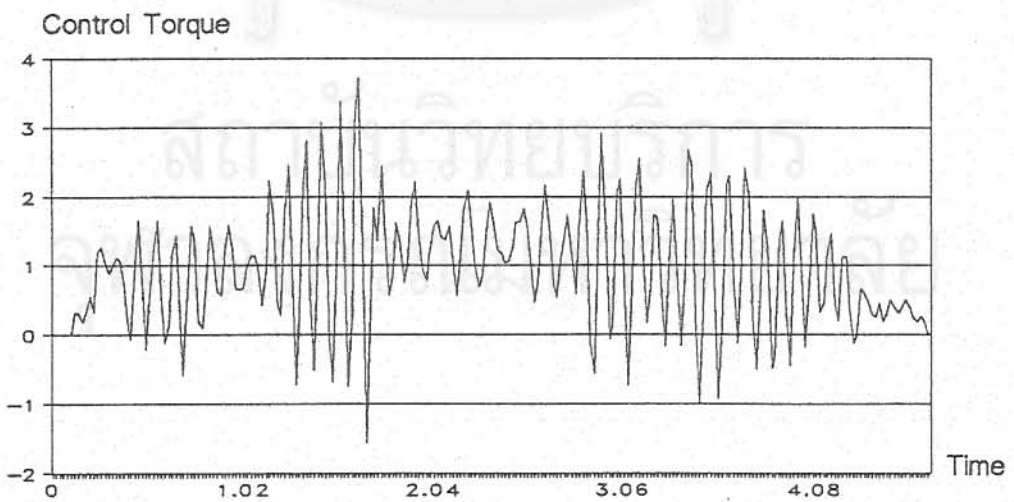
รูปที่ 9.5 เอาร์ทพุทจากการทดลองโดยใช้ค่า $K_p=3500$ และค่า $K_d=1$



Comparing the reference position with output position

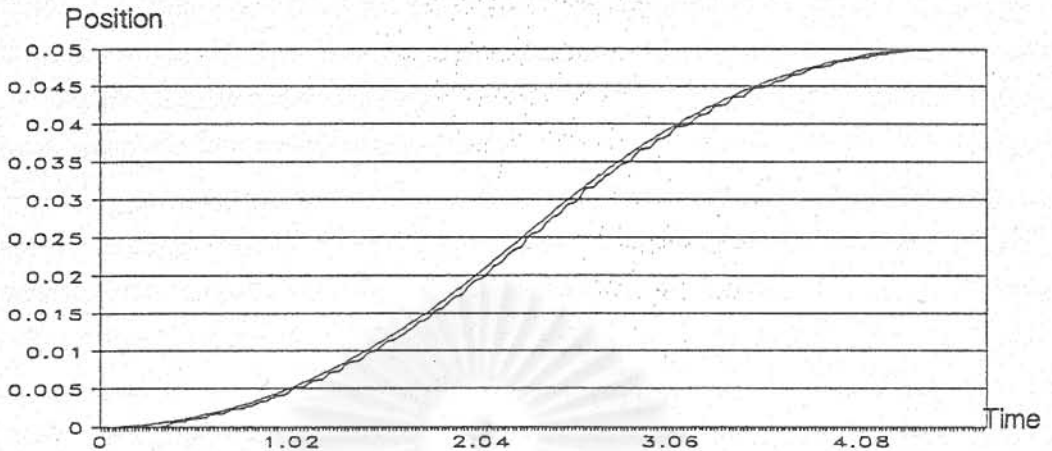


The velocity output

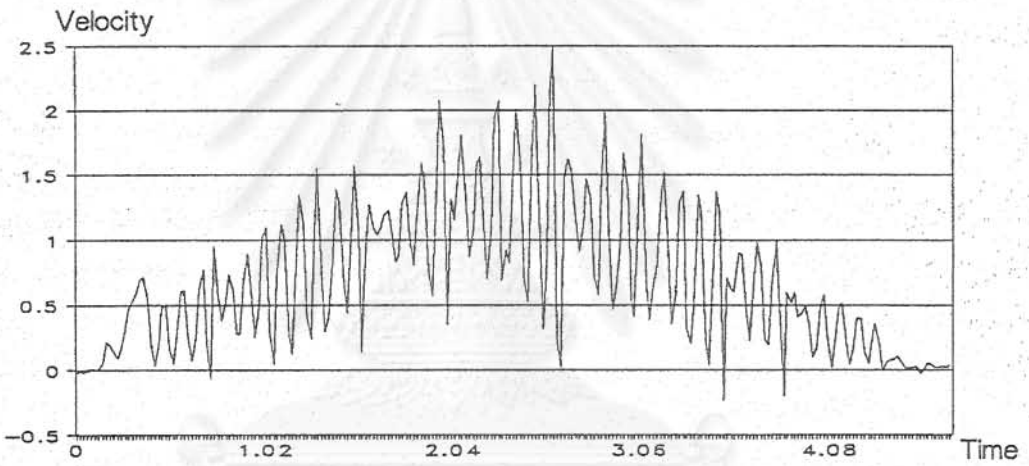


The control voltage with current amplifier

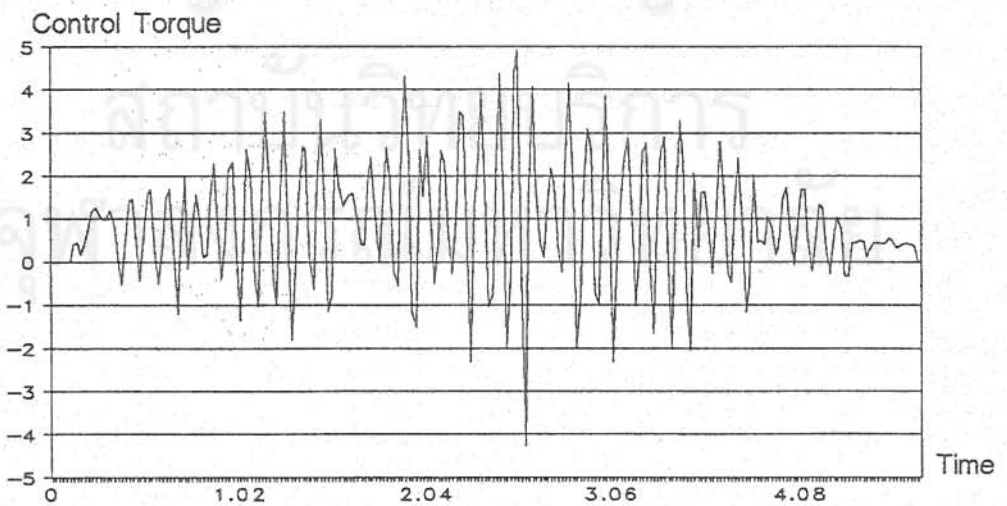
รูปที่ 9.6 เอ้าท์พุททางการทดลองโดยใช้ค่า $K_p=4500$ และค่า $K_d=3$



Comparing the reference position with output position



The velocity output



The control voltage with current amplifier

รูปที่ 9.7 เปรียบเทียบจากการทดลองโดยใช้ค่า $K_p=6000$ และค่า $K_d=3$

รูปที่ 9.2-9.4 เป็นผลการทดลองของระบบควบคุมที่ใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมแรงดัน (Voltage Amplifier) และรูปที่ 9.5-9.7 ก็เป็นผลของการทดลองของระบบควบคุมที่ใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมกระแส (Current Amplifier) ผลการทดลองของระบบควบคุมที่ใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมแรงดัน (Voltage Amplifier) โดยให้เกนมีค่าต่างๆกัน จะเห็นว่าถ้าค่าเกนมีค่ามากแล้วระบบจะยิ่งเข้าใกล้ตำแหน่งอ้างอิงที่กำหนด แต่อย่างไรก็ตามการควบคุมแบบเป็นสัดส่วน (Proportional control) อย่างเดียว สำหรับกรณีนี้ ค่าผิดพลาดคงตัว (steady state error) จะไม่เป็นศูนย์แต่จะมีค่าน้อยเมื่อกำหนดให้ค่าเกนมีค่ามาก แต่อันที่จริงแล้ว Amplifier ที่ใช้นั้นจะมีการป้อนกลับค่าความเร็วของมอเตอร์เข้าไปยังวงจรควบคุมการทำงานของเครื่องขยายสัญญาณ (amplifier) อยู่แล้ว ดังนั้นตัวควบคุมดิริเวทิฟ (derivation control) จึงรวมอยู่ใน ลูปภายใน (inner loop) ของระบบควบคุมในตัวเครื่องขยายสัญญาณ (amplifier) เอง จากรูปที่ 9.2-9.4 ค่าแรงดันควบคุม (Control voltage) ซึ่งเป็นสัญญาณที่ออกจากระบบควบคุมในคอมพิวเตอร์โดยผ่านทางเครื่องแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาล็อก (digital to analog converter, ซึ่งจะมีค่าไม่เกิน $\pm 10V$) ไปยังเครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมแรงดัน (voltage amplifier) มีลักษณะเป็นแบบ แบง-แบง ที่มีช่วงความเร็วคงที่ตรงกลาง (Bang-Bang with dwell period) ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับรูปแบบดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.4 รูปที่ 4.8 แต่มีค่าแรงดันกระเพื่อม (ripple voltage) ซึ่งเกิดจากสัญญาณกระเพื่อมที่เกิดในตัวของอุปกรณ์วัดความเร็ว (tachometer) นั้นเอง นอกจากความกระเพื่อมหรือความไม่ราบเรียบของสัญญาณนี้แล้ว ความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear term) อันเนื่องมาจากแบ็คแลช (backlash) ในระบบส่งกำลังแบบสกรู (power screw) ก็ทำให้เกิดความไม่ราบเรียบ (ripple) ใน position ที่ป้อนกลับไปยังระบบควบคุมด้วย

สำหรับระบบควบคุมที่ใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมกระแส (Current amplifier) นั้นก็ได้ผลลัพธ์เช่นเดียวกับการวิเคราะห์และจำลองการทำงาน กล่าวคือจากรูปที่ 9.5-9.7 ซึ่งใช้ค่าเกนสัดส่วน (proportional gain) และดิริเวทิฟเกน (derivative gain) แตกต่างกันไป ถ้าพิจารณาจากรูปที่แสดงผลการทดลอง จะเห็นว่าค่าแรงบิดควบคุม (control torque) ที่ส่งเข้าไปควบคุมการทำงานของมอเตอร์จะมีลักษณะแบบเดียวกับที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 4.4 รูปที่ 4.8 คือมีลักษณะเป็นสัญญาณคงที่ (step) โดยในรูปที่แสดงผลการทดลอง จะมีค่าแรงบิดกระเพื่อม (ripple torque) เข้ามารวมอยู่ด้วย ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากแบ็คแลช (backlash) ของระบบขับเคลื่อนของแกนที่สามหรือจากอุปกรณ์วัดความเร็ว (tachometer) ที่ใช้วัดความเร็วรอบ นอกจากนี้ในผลการทดลองยังแสดงค่าโปรไฟล์ความเร็ว (velocity profile) ที่วัดจากอุปกรณ์วัดความเร็ว (tachometer) ที่ติดตั้งอยู่กับมอเตอร์ด้วย ซึ่งก็มีลักษณะเป็นแบบ แบง-แบง ที่มีช่วงความเร็วคงที่ (Bang-Bang with dwell) ตามที่ได้กำหนดไว้ การทดลองโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีดี (Proportional plus Derivative control) กับการควบคุมที่ใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมกระแส (current amplifier) นั้นจะเห็นว่าค่าดิริเวทิฟเกน (derivative gain) นั้นมีค่าน้อยกว่าค่าของเกนสัดส่วน (proportional gain) มาก ซึ่งจากการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 6 จะพบว่าถ้าเราเพิ่มค่า K_d เพื่อต้องการเพิ่มค่าสัดส่วนแดมปีง (damping ratio) ให้กับระบบควบคุม ค่าเวลาคงที่ (Time constant) ของระบบควบคุมก็จะน้อยลงไปด้วย ซึ่งจะทำให้ระบบควบคุมจริงคือตัวมอเตอร์และเครื่องขยายสัญญาณ (amplifier) ไม่สามารถตอบสนองความเร็วตามที่ระบบควบคุมกำหนด จึงทำให้ระบบควบคุมมีการทำงานไม่เป็นอย่างที่ต้องการ ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดความไม่สมดุลย์ของระบบควบคุมนี้ด้วย สาเหตุใหญ่อีกสาเหตุหนึ่งก็เนื่องมาจากความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearity)

10. สรุป

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาและออกแบบระบบควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ชนิดสามข้อต่อที่มีการเคลื่อนที่ในแบบที่กีดขวาง การวิจัยได้ศึกษาถึงระบบควบคุมการเคลื่อนที่โดยใช้มอเตอร์กระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร โดยทำการศึกษาระบบควบคุมที่ใช้ทั้งเครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมกระแส (current amplifier) และใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมแรงดัน (voltage amplifier) การควบคุมทั้งสองแบบนี้ก็มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป สำหรับระบบควบคุมที่ใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมแรงดัน (voltage amplifier) นั้นทำให้เราสามารถควบคุมความเร็วได้แม่นยำขึ้นในขณะที่การควบคุมโดยใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบควบคุมกระแส (current amplifier) ก็ช่วยให้เราสามารถจำกัดขนาดของกระแสไม่ให้ไหลมากเกินไปจนเกิดอันตรายขึ้นกับระบบควบคุมของเราได้ ระบบควบคุมนี้มีความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearity) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากแบ็คแลช (backlash) ของระบบส่งกำลังในแกนที่สาม ซึ่งจะเป็นตัวจำกัดค่าเกินไม่ให้อีกค่าสูง

สำหรับการวิจัยที่จะทำต่อไปก็คือการปรับปรุงระบบใช้งานของทั้งสามแกน โดยเน้นไปที่ความง่ายของการใช้งานของแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่สร้างขึ้นนี้ โดยขณะนี้ได้พัฒนาโปรแกรมกราฟฟิกส์ซึ่งจำลองการทำงานของแขนหุ่นยนต์นี้ ทำให้ผู้ใช้สามารถที่จะป้อนข้อมูลการทำงานของแขนนี้ผ่านโปรแกรมกราฟฟิกส์ที่กำลังพัฒนาขึ้นมาได้เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน นอกจากการปรับปรุงเสริมโปรแกรมกราฟฟิกส์เข้าไปแล้ว การศึกษาระบบควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear control) ก็กำลังทำการรวบรวมข้อมูลอยู่ และจะได้ทำการศึกษาต่อไป

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หนังสืออ้างอิง

- 1) วรวิทย์ อึ้งภากรณ์, วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ "ทฤษฎีและการสร้างโต๊ะตัดแผ่นเหล็กด้วยเปลวไฟที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์" รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์, ศูนย์วิจัยวิชาภิเษกสมโภช,จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, มิถุนายน, 2531
- 2) Robert C. Juvinall, Kurt M. Marshek , "Fundamentals of Machine Component Design", 2nd edition , John Wiley, 1983.
- 3) William J. Palm III, "Control System Engineering", John Wiley, 1986.



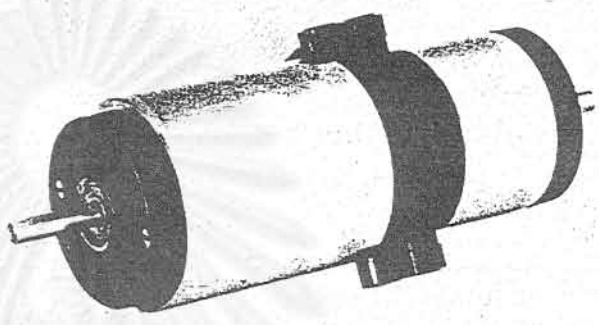
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

มอเตอร์กระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร (Electrocraft E588) ที่ใช้สำหรับขับเคลื่อนแขนหุ่นยนต์แกนที่สาม

588 Series Industrial Standard Products

The 588 series are high performance D.C. permanent magnet motors with an integral tachometer. This series is ideally suited for applications which require precise motion control in a cost effective compact package. Light industrial machinery, robotics, computer peripheral and semiconductor equipment are just a few of the applications.



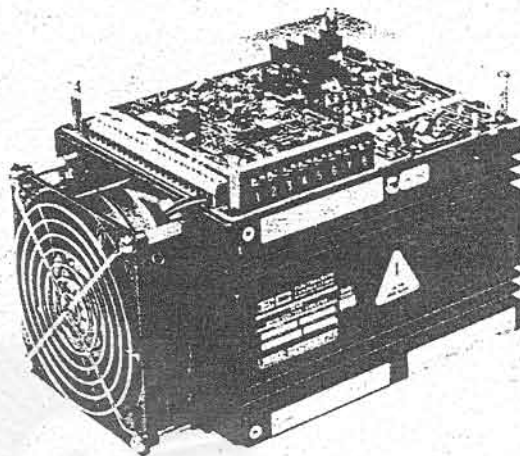
PERFORMANCE CHARACTERISTICS

Available Options: Optical Encoder — Models R-80, RMC 1520

MOTOR PARAMETERS (@ 155°C Armature Temp.)	0588-33-500
Continuous Stall Torque (oz-in)	50
Peak Torque (before demagnetization) (oz-in)	350
Armature Moment of Inertia (oz-in-sec ²)	0.0078
Damping Constant (oz-in/krpm)	0.30
Thermal Resistance (°C/watt)	4.2
Maximum Terminal Voltage (V)	60
Maximum Operating Speed (rpm)	6000
Weight (lbs)	3 lb. 12 oz.
WINDING DATA	3
K _T Torque Constant ± 10% (oz-in/amp)	11.8
K _E Voltage Constant ± 10% (V/krpm)	8.7
Winding Resistance ± 15% @ 25°C (Ω)	1.0
Electrical Time Constant (msec)	2.3
Mechanical Time Constant (msec)	11.3
Armature Inductance (mH)	3.3
Maximum Pulse Current (A)	31
TACHOMETER RATINGS	
Voltage Constant ± 10% (V/krpm)	14.2
Resistance ± 15% @ 25°C (Ω)	720
Ripple (peak to peak rated at 500 rpm) (%)	5

LA-5600 Linear Amplifier

The Electro-Craft LA-5600 linear servo amplifier is designed to drive permanent magnet DC servo motors of both the iron core and moving coil types. It is intended for use in a broad range of computer peripheral and industrial applications, including machine tools and robots. The LA-5600 amplifier is capable of operating in both velocity control and position control servo systems. Special protection circuitry guards against overloading either the amplifier or the motor it drives. The LA-5600 amplifier is listed by Underwriters Laboratories.



LA-5600 Features

- Operation from 115V or 220/230/240 VAC single-phase line
- Internally adjustable current limit
- Easily adjustable servo compensation circuits
- Complete with transformer and power supply

Interface Signals

Controller-To-Amplifier		Amplifier-To-Controller	
VCS	Velocity Command Signal	MVO	Motor Velocity Output
AUX	Auxiliary Input Signal	MCO	Motor Current Output
FAC	Forward Amplifier Clamp	SSO	System Status Output
RAC	Reverse Amplifier Clamp	+15 V and - 15 V regulated voltages are available from the amplifier for external use	
MHC	Motor Hold Clamp		
INH	Amplifier Inhibit Clamp		

INDEX

Servo Amplifier Dimensions

65

PERFORMANCE CHARACTERISTICS

PERFORMANCE	LA-5600
Peak Output Current (A)	22
RMS (or Continuous) Output Current (A) @ 50 °C	9
No-Load Output Voltage (V)	44
Output Voltage (V) @ 9 A	35
Peak Output Power (W) @ 25 V	550
Continuous Output Power (W) @ 35 V	315
ELECTRICAL CHARACTERISTICS	
Open Loop DC Gain (A/V)	
Velocity Command Signal — VCS	1200
Auxiliary Signal	1200
Tachometer Signal	1200
Bandwidth (Hz)	DC-2000
VCS Input Impedance (k Ω)	6 minimum
Input Amplifier Drift μ V/°C	15
Operating Temperature (°C)	0-50
VCS Input Signal Range (V)	\pm 10 nominal; = 60 maximum

Note: 5600 used with moving coil type motor may require notch filter option, part number of 5600 w/notch filter — 9080-0555.