



รายงานผลการวิจัย
ทุนวิจัยรับสามปีเขตกมโดย

๔
๒๕๓๑

ทฤษฎีและการสร้างโต๊ะตัดแผ่นเหล็กด้วยเปลวไฟ
ที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

สถาบันวิจัยบริหาร

โดย

วริทธิ์ อิงภากรณ์

วิบูลย์ แสงวระพันธ์ศิริ

629.8
๖173 ๓

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ทฤษฎีวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานผลการวิจัย

ทฤษฎีและการสร้างโต๊ะตัดแผ่นเหล็กด้วยเปลวไฟที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์
THEORY AND CONSTRUCTION OF A COMPUTER CONTROL OF A
FLAME CUTTING TABLE

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดย

ศาสตราจารย์ ดร. วรสิทธิ์ อึ้งภากรณ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

มิถุนายน 2531

ชื่อโครงการวิจัย ทฤษฎีและการสร้างโตะตัดแผ่นเหล็กด้วยเปลวไฟที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์
ชื่อผู้วิจัย ศาสตราจารย์ ดร.วริทธิ์ อึ้งภากรณ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ
เดือนและปีที่ทำวิจัยเสร็จ เมษายน พ.ศ. 2531



บทคัดย่อ

โตะตัดแผ่นเหล็กด้วยเปลวไฟที่มีหัวตัดเคลื่อนที่ไต่ในแนวระนาบนี้ควบคุมด้วยเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ การเคลื่อนที่ในแต่ละทิศทางในแนวระนาบนี้ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวรสองตัวที่ควบคุมการเคลื่อนที่ในสองทิศทางที่ตั้งฉากกันโดยระบบควบคุมจะเป็นแบบปิดชนิด พี ไอ ดี พี (PIDP, Proportional-Integral-Derivative plus Preview) ในการออกแบบสร้างโตะตัดแผ่นเหล็กนี้ได้ทำการศึกษาทางไดนามิกของโครงสร้างด้วย (Structure Dynamics) เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะนำไปออกแบบระบบควบคุมแบบปิด

จากผลการทดลองค่าความผิดพลาดของตำแหน่งตามแนวการตัด ในช่วงความเร็วตามแนวการตัด 0.005 ถึง 0.015 เมตรต่อวินาที พบว่าค่าความผิดพลาดของตำแหน่งมีค่าน้อยกว่า 0.70 มิลลิเมตรในแนวแกนเอ็กซ์และ 0.76 มิลลิเมตรในแนวแกนวาย ที่ความเร็วตามแนวการตัด 0.015 เมตรต่อวินาที ในการเคลื่อนที่เป็นวงกลม ซึ่งค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นผลมาจากค่าแบ็คแลช (backlash) ของชุดเฟืองทด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Project Title **THEORY AND CONSTRUCTION OF A COMPUTER CONTROL OF A FLAME CUTTING TABLE**

Name of the Investigators Professor Dr. Variddhi Ungbhakorn
Assistant Prof. Dr. Viboon Sangveraphunsiri

Year 1988

Abstract

Microcomputer is used for controlling the X-Y plane motion flame cutting table. The motion in each direction, which is orthogonal, is powered by two permanent magnet d.c. servomotors (one in each direction). PIDP (Proportional-Integral-Derivative plus Previes) is implemented in a microcomputer to control the motion of the d.c. servomotors. The dynamics of the structure of the flame cutting table is also studied and tested experimentally to verified the mathematical model which is used for the design of the closedloop control.

From the experiments, it was shown that the position errors were less than 0.70 millimeter and 0.76 millimeter for X and Y direction respectively, when the path velocity is 0.015 m/sec in circular path motion. The position errors of the path velocity range from 0.005 to 0.15 m/s have also been investigated. It is noted that the major effect for the position error is mostly due to backlash of the gear drive unit.

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีส่วนหนึ่งก็ด้วยความร่วมมือจากนิสิตของห้องปฏิบัติการควบคุมอัตโนมัติ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่มีส่วนช่วยเหลือในด้านการทดลอง

อีกทั้งการวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย จากโครงการรัชดาภิเษกสมโภชของฝ่ายวิจัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ทำยนี้ คณะผู้วิจัยก็ต้องขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

.....



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการ ออกแบบระบบควบคุม	4
2.1 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของไต้ะตัดแผ่นเหล็ก..	4
2.2 การประมาณความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างของระบบ ไต้ะตัดแผ่นเหล็กด้วยเปลวไฟ	7
2.3 การหาทรานส์เฟอ์ฟังก์ชันของชุดขับเคลื่อนของระบบ ...	10
2.4 ระบบควบคุมแบบ พี ไอ ดี (PID)	20
2.5 ระบบควบคุมแบบ พี ไอ ดี พี (PIDP)	21
2.6 การควบคุมความเร็วตามแนวการตัด	23
เส้นโค้ง	23
เส้นตรง	24
2.7 การออกแบบระบบควบคุมแบบ พี ไอ ดี พี	26
3. การทดลองและผลของการทดลอง	41
3.1 การทดลองและผลของการทดลอง	41
3.2 การทดลองเปลี่ยนภาวะ	50
4. สรุป	55
5. หนังสืออ้างอิง	56
6. ภาคผนวก	58

สารบัญภาพ

		หน้า
รูปที่ 1	รูปแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	2
รูปที่ 2	free body diagram ของระบบหีบเคลื่อน	5
รูปที่ 3	ระบบเตี๊ยะตัดแผ่นเหล็กด้วยเปลวไฟ	8
รูปที่ 4	แสดงตำแหน่งการทดสอบระบบไต้ะตัดแผ่นเหล็กโดยใช้การ ทดสอบแบบพัลส์	9
รูปที่ 5(a)	เพาเวอร์สเปกตรัลเดนซิตีของความเร่งในแนว x	11
รูปที่ 5(b)	เพาเวอร์สเปกตรัลเดนซิตีของความเร่งในแนว x (เมื่อไม่ใส่อินพุท)	12
รูปที่ 6(a)	เพาเวอร์สเปกตรัลเดนซิตีของความเร่งในแนว y	13
รูปที่ 6(b)	เพาเวอร์สเปกตรัลเดนซิตีของความเร่งในแนว y (เมื่อไม่ใส่อินพุท)	14
รูปที่ 7(a)	เพาเวอร์สเปกตรัลเดนซิตีของความเร่งในแนว z	15
รูปที่ 7(b)	เพาเวอร์สเปกตรัลเดนซิตีของความเร่งในแนว z (เมื่อไม่ใส่อินพุท)	16
รูปที่ 8	แสดงโมเดลที่สร้างจากค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้เทียบกับ ผลตอบความถี่ ของทรานส์เฟอ์ฟังก์ชัน H_x เมื่อใส่ อินพุทของเศษเป็น 2 และส่วนเป็น 5	17
รูปที่ 9	แสดงโมเดลที่สร้างจากค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้เทียบกับ ผลตอบความถี่ ของทรานส์เฟอ์ฟังก์ชัน H_y เมื่อใส่ อินพุทของเศษเป็น 0 และส่วนเป็น 4	18
รูปที่ 10	บล็อกไดอะแกรมของไต้ะตัดแผ่นเหล็ก	22
รูปที่ 11	แสดงผลของสัญญาณควบคุมพีวีวีในกรณีที่มีการเคลื่อนที่มีการ หักมุม	22
รูปที่ 12	การแบ่งจุดตามแนวการเคลื่อนที่	25
รูปที่ 13	การแบ่งจุดกรณีที่แนวการเคลื่อนที่เป็นส่วนโค้ง	25
รูปที่ 14	แสดงการแบ่งจุดกรณีที่แนวการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง	25
รูปที่ 15	บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุม พี ไอ ดี ของไต้ะ ตัดแผ่นเหล็ก	29
รูปที่ 16	บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุม พี ไอ ดี ที่ใช้ในการ	

		ออกแบบ	29
รูปที่	17	ตารางแสดงผลการทดสอบค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง ที่ระยะการมองล่วงหน้าค่าต่าง ๆ	29
รูปที่	18	Bode plot ของระบบ $G(s)$ และระบบควบคุม พี ไอ ดี	31
รูปที่	19	Bode plot ของระบบควบคุมที่ใช้ในการทดลอง	32
รูปที่	20	กราฟแสดงตำแหน่งที่ได้จากแบบจำลองของการเคลื่อนที่ เป็นเส้นตรงของโต๊ะตัดแผ่นเหล็กที่ความเร็ว 0.015 m/s..	34
รูปที่	21	กราฟแสดงความเร็วที่ได้จากแบบจำลองของการเคลื่อนที่ เป็นเส้นตรงของโต๊ะตัดแผ่นเหล็กที่ความเร็ว 0.015 m/s..	35
รูปที่	22	กราฟแสดงตำแหน่งที่ได้จากการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ของโต๊ะตัดแผ่นเหล็กที่ความเร็ว 0.015 m/s	36
รูปที่	23	กราฟแสดงความเร็วที่ได้จากการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ของโต๊ะตัดแผ่นเหล็กที่ความเร็ว 0.015 m/s	37
รูปที่	24(a)	แสดงลักษณะของแนวทางเดินที่เป็นวงกลมที่มีเส้น ผ่านศูนย์กลางที่ใช้ในการทดสอบหาค่าความแม่นยำ	40
รูปที่	25(b)	แสดงลักษณะของแนวทางเดินที่เป็นเส้นตรงที่มี การหักมุมที่ใช้ในการทดสอบหาค่าความแม่นยำ	40
รูปที่	25(a)	ตารางแสดงผลการทดสอบความแม่นยำ ในการเคลื่อน ที่เป็นวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความเร็วตามแนวทาง ตัดต่าง ๆ	40
รูปที่	25(b)	ตารางแสดงผลการทดสอบความแม่นยำ ในการเคลื่อนที่ เป็นเส้นตรงที่มีการหักมุม 75 องศา ที่ความเร็วตามแนว การตัดค่าต่าง ๆ	43
รูปที่	26	กราฟแสดงตำแหน่งที่ได้จากการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของ โต๊ะตัดแผ่นเหล็กที่ความเร็ว 0.015 m/s โดยใช้การ ควบคุมแบบ พี ไอ ดี	44
รูปที่	27	กราฟแสดงตำแหน่งที่ได้จากการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของ โต๊ะตัดแผ่นเหล็กที่ความเร็ว 0.015 m/s โดยใช้การควบ คุมแบบ พี ไอ ดี พี	45
รูปที่	28	กราฟแสดงความเร็วที่ได้จากการเคลื่อนที่เป็นวงกลม ของโต๊ะตัดแผ่นเหล็กที่ความเร็ว 0.005 m/s	46
รูปที่	29	กราฟแสดงตำแหน่งที่ได้จากการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงที่มี	

รูปที่ 30	การหักมุมของโต๊ะตัดแผ่นเหล็กที่ความเร็ว 0.015 m/s.. กราฟแสดงความเร็วที่ได้จากการเคลื่อนที่เส้นตรงที่มี	47
รูปที่ 31	การหักมุมของโต๊ะตัดแผ่นเหล็กที่ความเร็ว 0.015 m/s.. ตารางแสดงผลการทดสอบความแม่นยำในการเคลื่อนที่เป็น เส้นตรงที่มีค่าความชันเท่ากับ 1 ที่ภาระและความเร็วตาม แนวการเคลื่อนที่ค่าต่าง ๆ	48 49
รูปที่ 32	กราฟแสดงตำแหน่งที่ได้จากการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงของ โต๊ะตัดแผ่นเหล็กที่ความเร็ว 0.015 m/s ที่มีภาระเพิ่ม ขึ้น 5 kg	51
รูปที่ 33	กราฟแสดงตำแหน่งที่ได้จากการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงของ โต๊ะตัดแผ่นเหล็กที่ความเร็ว 0.015 m/s ที่มีภาระเพิ่ม ขึ้น 10 kg	52
รูปที่ 34	กราฟแสดงตำแหน่งที่ได้จากการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงของ โต๊ะตัดแผ่นเหล็กที่ความเร็ว 0.005 m/s ที่มีภาระเพิ่ม ขึ้น 5 kg	53
รูปที่ 35	กราฟแสดงตำแหน่งที่ได้จากการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงของ โต๊ะตัดแผ่นเหล็กที่ความเร็ว 0.005 m/s ที่มีภาระเพิ่ม ขึ้น 10 kg	54

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



1. บทนำ

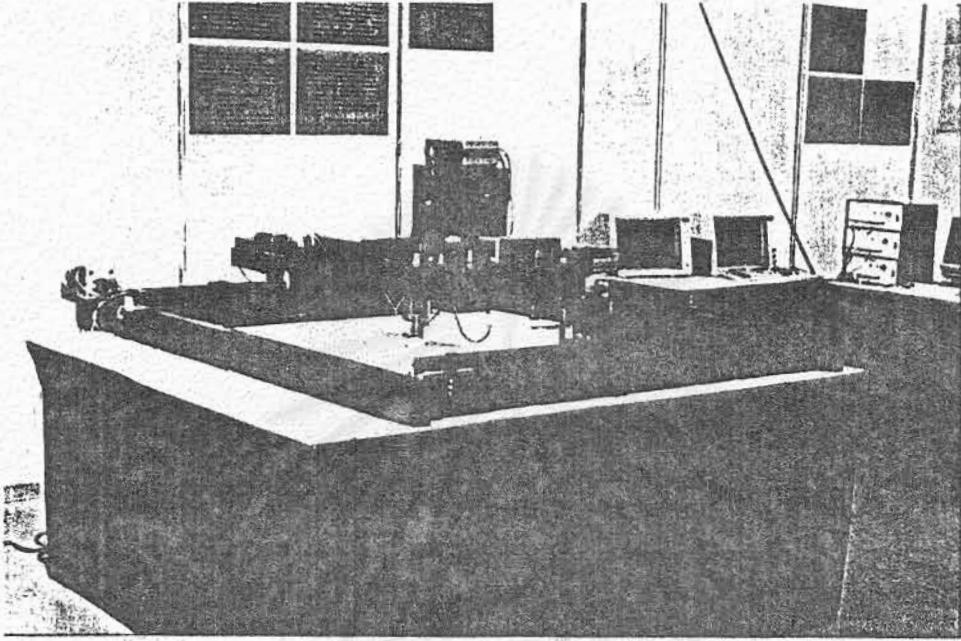
ในปัจจุบันนี้การนำเอาคอมพิวเตอร์มาควบคุมระบบกลไกต่าง ๆ ที่นำมาใช้กับ
กระบวนการผลิตนั้นเริ่มแพร่หลายมากขึ้น โดยเฉพาะประเทศอุตสาหกรรม จุดประสงค์ของ
การนำเอาคอมพิวเตอร์เข้ามาควบคุมนั้นก็คือต้องการงานที่ละเอียด แม่นยำ มีการผิดพลาด
น้อยที่สุด และสามารถผลิตในปริมาณมากโดยคุณภาพของผลิตภัณฑ์มีความสม่ำเสมอสูง

โต๊ะตัดแผ่นเหล็กด้วยเปลวไฟที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์นี้ อาจจะจัดอยู่ในประ
เภทของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมก็ได้ โดยมีการเคลื่อนที่ที่อยู่ในระบบพิกัดฉาก (Rectangular
coordinate) หรืออยู่ในระนาบ X-Y ปัญหาด้านความหยุ่นตัว (Flexibility) ของ
หุ่นยนต์ที่มีผลต่อการเคลื่อนที่นั้นนับว่าเป็นปัญหาหนึ่งที่ถูกหยิบยกขึ้นมาศึกษาควบคู่กัน กับการ
ออกแบบระบบควบคุมแบบปิด (Close-loop Control) ปัจจุบันนี้การแก้ปัญหาด้านความ
หยุ่นตัวที่มีต่อการเคลื่อนที่นั้นก็ได้ โดยออกแบบให้หุ่นยนต์มีมวลมากเพียงพอ ด้วยเหตุนี้หุ่น
ยนต์ในปัจจุบันจึงต้องใช้กำลังขับเคลื่อนสูงเพื่อเอาชนะมวลที่มากเกินความต้องการ ทำให้สิ้น
เปลืองพลังงานและมีรูปร่างเทอะทะ การศึกษาในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลกระทบ
เนื่องจากความหยุ่นตัวที่มีต่อระบบควบคุมเพื่อจะเป็นแนวทางในการศึกษาทางด้านนี้ต่อไปใน
ภายภาคหน้า

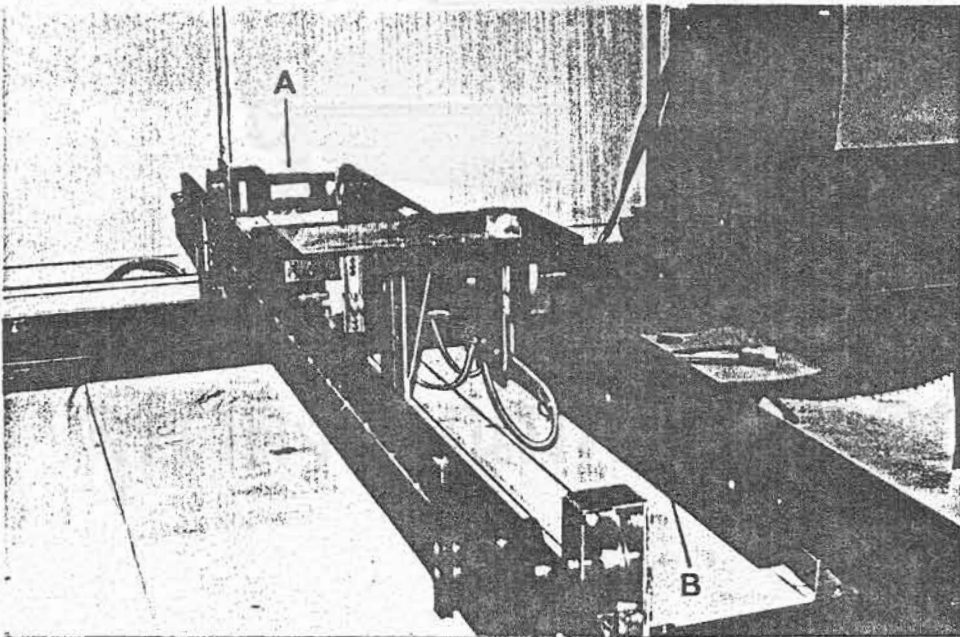
การเคลื่อนที่ในแต่ละทิศทางนี้นั้นจะใช้มอเตอร์กระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร
(Permanent Magnet D.C. Servo Motor) เป็นตัวขับเคลื่อน เนื่องจากมอเตอร์
กระแสตรงนี้มีลักษณะเป็นเชิงเส้นดีกว่าระบบที่ควบคุมด้วยไฮดรอลิก ทั้งนี้การบำรุงดูแลรักษา
ก็เป็นไปได้ง่ายและสะดวกในกรณีของมอเตอร์กระแสตรง เนื่องจากมอเตอร์กระแส
ตรงชนิดแม่เหล็กถาวรนี้สามารถจำลองเป็นระบบเชิงเส้นในช่วงการทำงานที่กว้างได้ ทำ
ให้การออกแบบระบบควบคุมสะดวกมากขึ้น ระบบควบคุมที่จะทำการออกแบบก็จะเป็นระบบ
ควบคุมแบบปิด (Close-loop Control) โดยใช้วิธีการควบคุมแบบ พี ไอ ดี (PID
Proportional-Integral-Derivative Control) และ พี ไค ดี พี (PIDP
(Proportional-Integral-Derivative plus Preview) เป็นหลัก อุปกรณ์ต่าง ๆ
ที่จำเป็นเช่นเครื่องขยายสัญญาณแบบเชิงเส้นปรับในตัว (Linear Servo Amplifier)
อุปกรณ์ถอดรหัสสัญญาณ (Decoder) จากอุปกรณ์วัดตำแหน่งชนิดเชิงเส้น (Linear
Encoder) อุปกรณ์กรองสัญญาณ เป็นต้นเหล่านี้ก็ได้จัดสร้างขึ้นหรือดัดแปลงจากอุปกรณ์
ที่พอหาซื้อได้ในประเทศไทยเป็นส่วนใหญ่

โครงการนี้นับได้ว่าเป็นโครงการพื้นฐานของการพัฒนาหุ่นยนต์อุตสาหกรรมอื่น ๆ ใน
ประเทศไทย ในการวิจัยจะเริ่มด้วยการศึกษาและออกแบบระบบการทำงานทางทฤษฎีก่อน
โดยจะวิเคราะห์ถึงผลกระทบเนื่องจากการยืดหยุ่นตัวที่ทำให้เกิดการสั่นตัวและอาจจะมีผล
กระทบไปถึงระบบควบคุมด้วย การวิเคราะห์โมดัล (Modal Analysis) สามารถทำได้
โดยการวิเคราะห์ระบบควบคุมบนหุ่นยนต์โดยวิธีการวิเคราะห์ทางสเปกตรัม (Spectrum

รูปแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



โต๊ะตัดแผ่น เหล็กที่พัฒนาขึ้น



A - มอเตอร์และระบบล้อยานพาน, B - ออปติคอลลีเนียร์เอ็นโคเดอร์

Analysis) ของระบบควบคุม การออกแบบระบบควบคุมซึ่งจะเป็นระบบควบคุมแบบปิด
จะทำได้โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และทำการทดสอบกับแขนหุ่นยนต์ที่สร้างขึ้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์การออกแบบระบบควบคุม

2.1 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโต๊ะตัดแผ่นเหล็ก

ในการออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนกลับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Dynamics Model) นั้นว่ามีส่วนสำคัญมากเพราะระบบควบคุมที่ออกแบบจะขึ้นอยู่กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในรูปที่ 1 แสดงรูปแบบของแขนแต่ละแขนของโต๊ะตัดแผ่นเหล็ก การเคลื่อนที่ของโต๊ะตัดแผ่นเหล็กนี้จะเคลื่อนที่ได้ในแนวแกน X และแนวแกน Y ทั้งสองแกนนี้จะมีรูปแบบคล้าย ๆ กันจะต่างก็เฉพาะขนาดมวลที่จะถูกขับเคลื่อนเท่านั้น ระบบขับเคลื่อนประกอบด้วยมอเตอร์กระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวรที่ใช้ขับเคลื่อนแต่ละแขนผ่านทางลวดสลิงซึ่งพันติดอยู่กับลูกกลิ้งที่ลอคติดอยู่กับกันแกนของมอเตอร์ เนื่องจากว่าการเคลื่อนที่ของแขนอยู่ในแนวระนาบ แรงโน้มถ่วงจึงไม่มีผลโดยตรงกับการขับเคลื่อนนอกจากจะมีผลที่ก่อให้เกิดแรงเสียดทานชั้นที่กลางและที่เพลาหมุนลูกปืนซึ่งวิ่งอยู่บนกลางนั้น ผลอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของแกนหนึ่งที่มีต่อการเคลื่อนที่ของอีกแกนหนึ่งก็มีน้อยมากจึงสามารถจำลองการเคลื่อนที่ของแขนแต่ละแขนให้เป็นอิสระต่อกัน และเนื่องจากว่าที่แกนมอเตอร์นั้นได้ติดตั้งระบบเฟืองทดซึ่งมีอัตราทด 90:1 นั้นหมายความว่าความเร็วที่แกนหมุนขาออกของเฟืองทอมีความเร็วช้ากว่าแกนหมุนขาเข้าของเฟืองทออยู่เก้าสิบเท่า เพราะฉะนั้นแรงบิดที่ออกมาก็จะถูกขยายไปเก้าสิบเท่า ขณะเดียวกันถ้ามองย้อนกลับเข้าไปในมอเตอร์จะเห็นว่าแรงเสียดทานและแรงเฉื่อยเนื่องจากมวลที่อาจจะเปลี่ยนแปลงนั้นจะถูกลดลงเป็นจำนวนเท่ากับอัตราทดรอบของชุดเฟืองทดเมื่อคิดที่แกนหมุนด้านที่ติดกับมอเตอร์

ที่มวลของระบบซึ่งคิดที่ตำแหน่งหลังชุดเฟืองทอเราสามารถหาสมการพลศาสตร์ (Dynamics Equation) ได้โดยพิจารณาที่รูปที่ 2 คือ

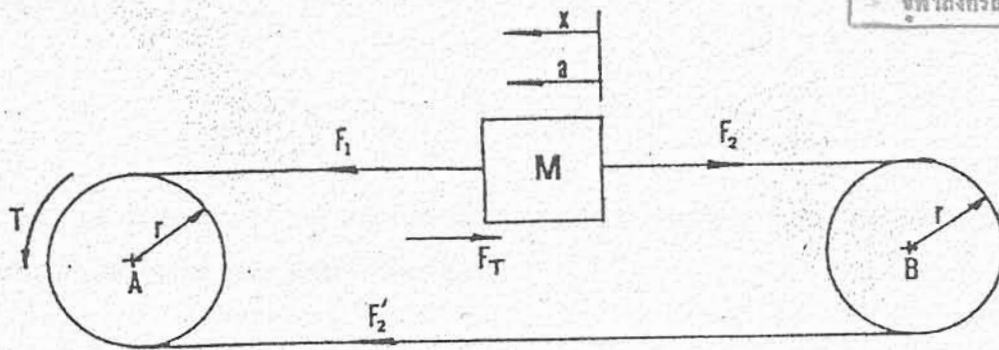
$$F_1 - F_2 - F_f = m\ddot{x} \quad (1)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} F_f &= \text{แรงเสียดทาน} = \mu mg \\ F_1, F_2 &= \text{ความตึงของเส้นลวด} \\ m &= \text{มวลของแขนและอุปกรณ์} \\ g &= \text{ค่าคงที่ของแรงโน้มถ่วง} \\ \mu &= \text{สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน} \end{aligned}$$

เนื่องจากว่า

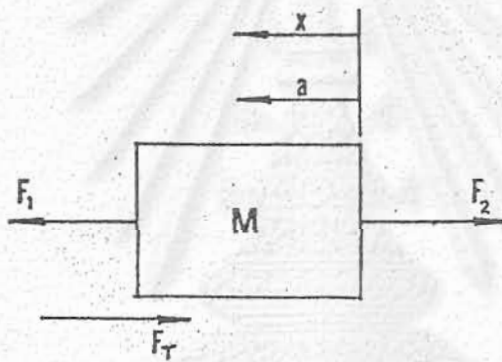
$$x = r\theta \quad (2)$$



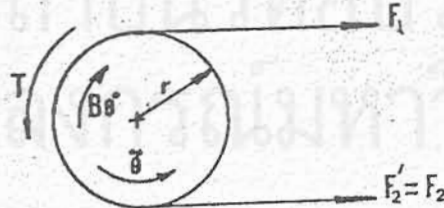
ล้อสายพาน A

ล้อสายพาน B

รูปที่ 2 free body diagram ของระบบขับเคลื่อน



free body diagram ของมวล M



free body diagram ของล้อสายพาน A

เพราะฉะนั้นจะได้ว่า

$$F_1 - F_2 = m(r\ddot{\theta} + \mu g)$$

ที่ตรงตำแหน่งของล้อยาวพานซึ่งมีแกนติดอยู่กับชุดเฟืองทดของมอเตอร์ตามรูปที่ 2 นั้นสมการพลศาสตร์สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$T - r(F_1 - F_2) - B\dot{\theta} = J\ddot{\theta} \quad (3)$$

เมื่อ

- T = โมเมนต์บิดของมอเตอร์
- r = รัศมีของมู่เล่ย์
- B = viscous friction ของมอเตอร์
- J = โมเมนต์อินเนอร์เชียของมอเตอร์และมู่เล่ย์
เมื่อคิดที่แกนขาออกของชุดเฟืองทด

เพราะฉะนั้นจากสมการที่ 1 และ 2 จะไดสมการ Dynamics ดังต่อไปนี้คือ

$$(J + mr^2)\ddot{\theta} + B\dot{\theta} = T - \mu rmg \quad (4)$$

ซึ่งอาจจะเขียนอยู่ในรูปแบบมาตรฐานได้ดังนี้คือ

$$J_u \ddot{\theta} + B\dot{\theta} = T_u \quad (5)$$

โดยที่

J_u = Equivalent polar moment of inertia

T_u = Equivalent torque

ในรูปของ s-domain หรือ Laplace Transform คือ

$$\frac{\theta(s)}{T_u(s)} = \frac{(1/B)}{s(\tau s + 1)} \quad (6)$$

$$\tau = J/B = \text{time constant}$$

ส่วนการจัดสมการในรูปของ State variable Description ก็สามารจัดได้ดังนี้คือ

กำหนดให้ $x_1(t) = \theta(t)$

$$x_2(t) = \dot{\theta}(t)$$

จะได้ว่า

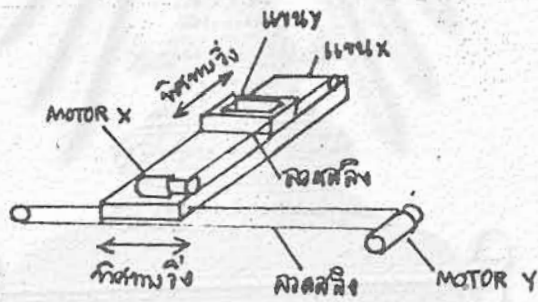
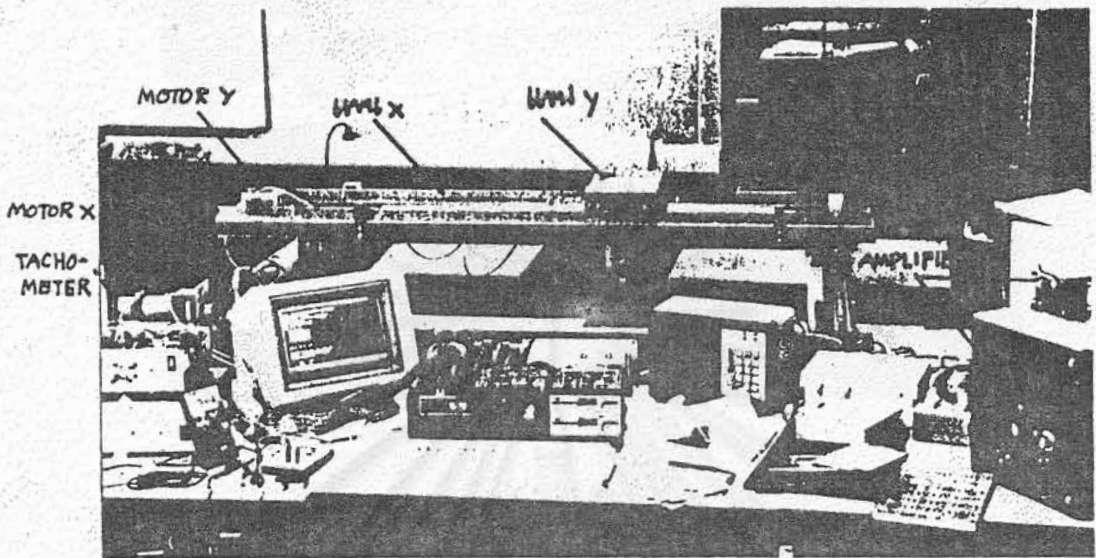
$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -B/J_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/J_0 \end{bmatrix} T_u \quad (7)$$

2.2 การประมาณความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างของระบบโตะตัดแผ่นเหล็กด้วยเปลวไฟ

จะเห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่หามาแต่ข้างต้นนั้นค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสมการที่ 6 ขึ้นอยู่กับระบบจริงที่สร้างขึ้นและเนื่องจากว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นจำลองขึ้นโดยได้ละทิ้งบางเทอมออกเช่นที่ข้อต่อตรงตำแหน่งหมุน ก็ไม่ได้นำมาคิด ความหยุ่นตัวของระบบแขนก็ไม่ได้นำมาคิดเช่นเดียวกัน เป็นต้น ซึ่งถ้านำมาคิดแล้วแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก็จะเป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียลที่มีออร์เดอร์สูงกว่านี้ (Higher Degree of Differential Equation) การประมาณความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างจะช่วยให้เราตัดสินใจในขั้นต้นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เราจำลองขึ้นนั้นมีความถูกต้องใกล้เคียงกับที่ต้องการหรือไม่ การประมาณความถี่ธรรมชาติจะใช้วิธีการวิเคราะห์สเปกตรัมเป็นหลักซึ่งโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์ก็ได้พัฒนาขึ้นเองที่ห้องปฏิบัติการควบคุมของภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์เครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

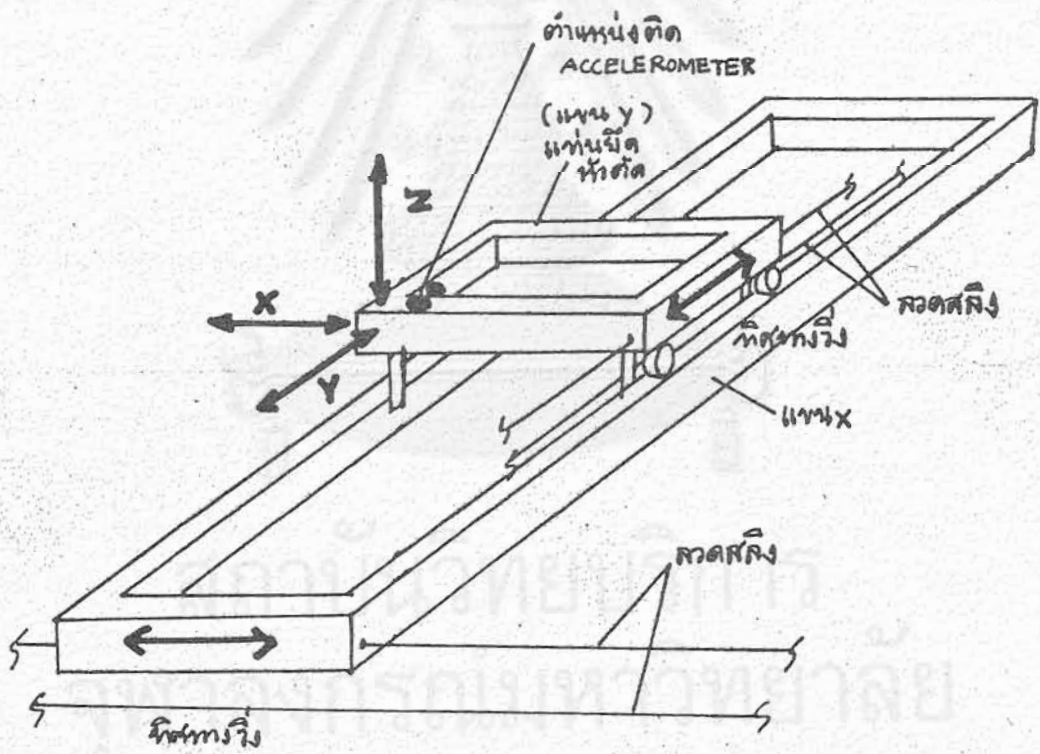
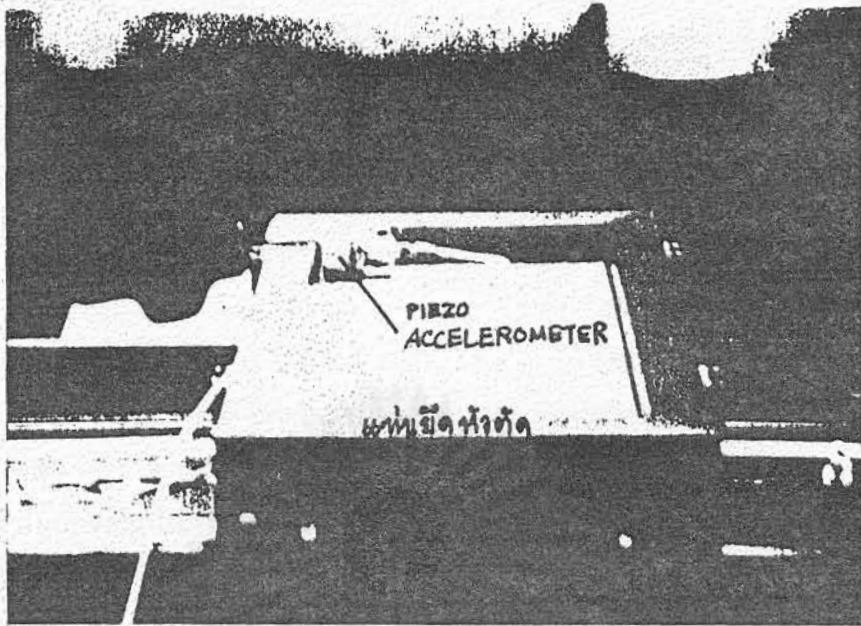
รูปที่ 3 แสดงระบบโตะตัดแผ่นเหล็กด้วยเปลวไฟประกอบด้วยแขนซึ่งเคลื่อนที่ไปมาเป็นเส้นตรงสองแขนในทิศทางตามแนวระบบ X-Y โดยแขน Y จะเคลื่อนที่อยู่กับแขน X ดังที่กล่าวมาแล้ว ผลดีของการทดลองเพื่อหาความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างอีกอย่างหนึ่ง ก็เพื่อหาข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบระบบควบคุม เพื่อให้มีช่วงความถี่ที่ครอบคลุมระบบควบคุมให้ดีที่สุด โดยจะทำการทดสอบหาค่าความถี่ด้วยวิธีการใช้อินพุทแบบพัลส์ (Pulse Input) เนื่องจากสะดวกในการสร้าง รูปที่ 4 แสดงตำแหน่งสำหรับติดตั้งมิเตอร์วัดความเร่ง โดยติดตั้งไว้บนแขน Y เพื่อให้ได้รับผลเนื่องจากความหยุ่นตัวของแขนโครงสร้างอื่นได้แก่ ความหยุ่นตัวของลวดสลิงทั้งสองชุด และความหยุ่นตัวของแขน X เอง ให้มากที่สุด

การสร้างอินพุทแบบพัลส์ให้กับโครงสร้างสามารถทำได้โดยใช้มีนอนพลาสติกเคาะที่ตำแหน่งแสดงไว้ในรูปที่ 4 การทดสอบกระทำทั้ง 3 ทิศทาง X, Y และ Z เนื่องจาก การวิ่งไปมาของตัวแขนทั้งสอง มีผลทำให้เกิดการสั่น (Vibration) ได้ทั้งสามทิศทางการเก็บข้อมูลเอาพุท (output signal) เข้าเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ โดยจะใช้อุปกรณ์แปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital Converter) ใช้ความถี่การสุ่มข้อมูลที่ 500 Hz เก็บข้อมูลสัญญาณ 4 ชุดในแต่ละทิศทาง แต่ละชุดจำ-



รูป 3 ระบบโต๊ะตัดแผ่นเหล็กด้วยเปลวไฟ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 4 แสดงตำแหน่งการทดสอบระบบโต๊ะตัดแผ่นเหล็ก
โดยใช้การทดสอบแบบพัลส์

นวน 512 ค่า แล้วจึงใช้โปรแกรมวิเคราะห์สเปกตรัมหาเพาเวอร์สเปกตรัลเดนซิตี (Power Spectral Density) โดยที่อินพุทของโปรแกรมแสดงได้ดังนี้คือ

- จำนวนชุดข้อมูล (Ensemble)	4
- จำนวนข้อมูลในแต่ละชุด (Data points)	512
- ความเร็วในการสุ่ม (Sampling period)	0.002 วินาที
- ออเดอร์ของ FFT (Order of FFT)	9

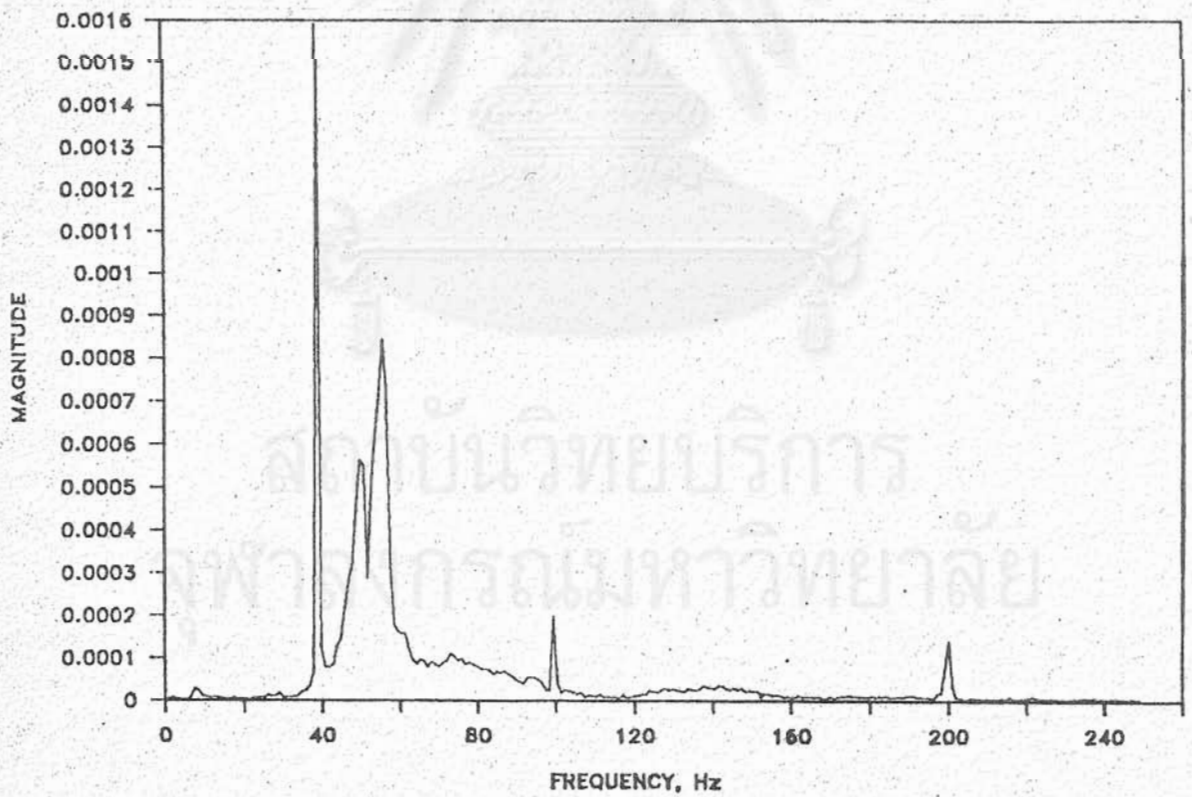
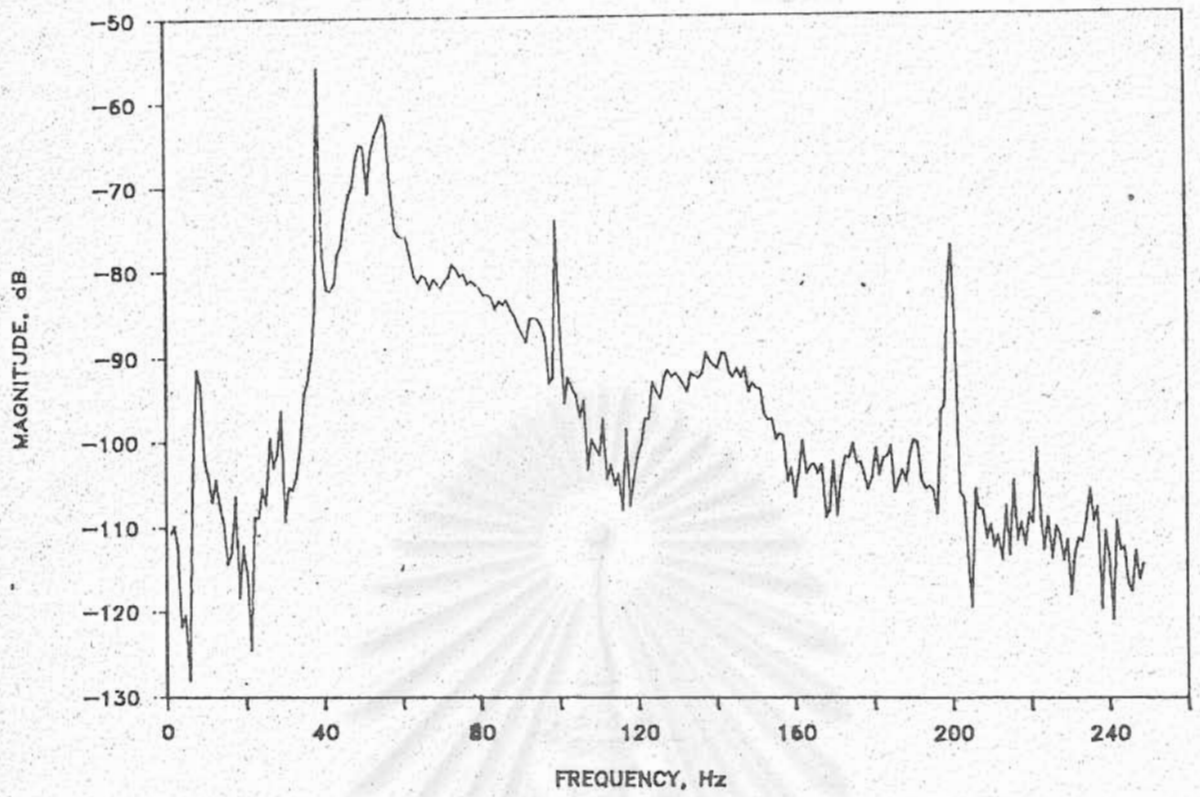
ได้สเปกตรัมในช่วงความถี่ตั้งแต่ 0 ถึง 250 Hz ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5 6 และ 7 ซึ่งจะเห็นว่าความถี่ธรรมชาติที่โหมดแรกมีค่าความถี่ประมาณ 55 60 และ 45 Hz ในแนว X Y และ Z ตามลำดับ

การวัดสเปกตรัมนี้ทำที่ห้องปฏิบัติการซึ่งพื้นไม้แข็งพอจึงมีความถี่ของการสั่นสะเทือนเข้ามาแทรกในการวัด ซึ่งการสั่นสะเทือนนี้เกิดมาจากการสั่นสะเทือนของเครื่องปรับอากาศชนิดติดหน้าต่าง รูปที่ 5(b) 6(b) และ 7(b) เป็นค่าความถี่ของการสั่นสะเทือนเนื่องจากโครงสร้างภายนอกซึ่งไม่เกี่ยวกับโครงสร้างของโต๊ะซึ่งมีค่าเหมือนกันของการวัดทั้งสามแกน เพราะฉะนั้นถ้าโต๊ะตัดแผ่นเหล็กนี้จะใช้งานในห้องนี้แล้วช่วงความถี่ที่ใช้ในการควบคุมควรจะน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความถี่ 40 Hz ถึงแม้ความถี่ของโครงสร้างของตัวโต๊ะเองจะสูงกว่าค่านี้ก็ตาม

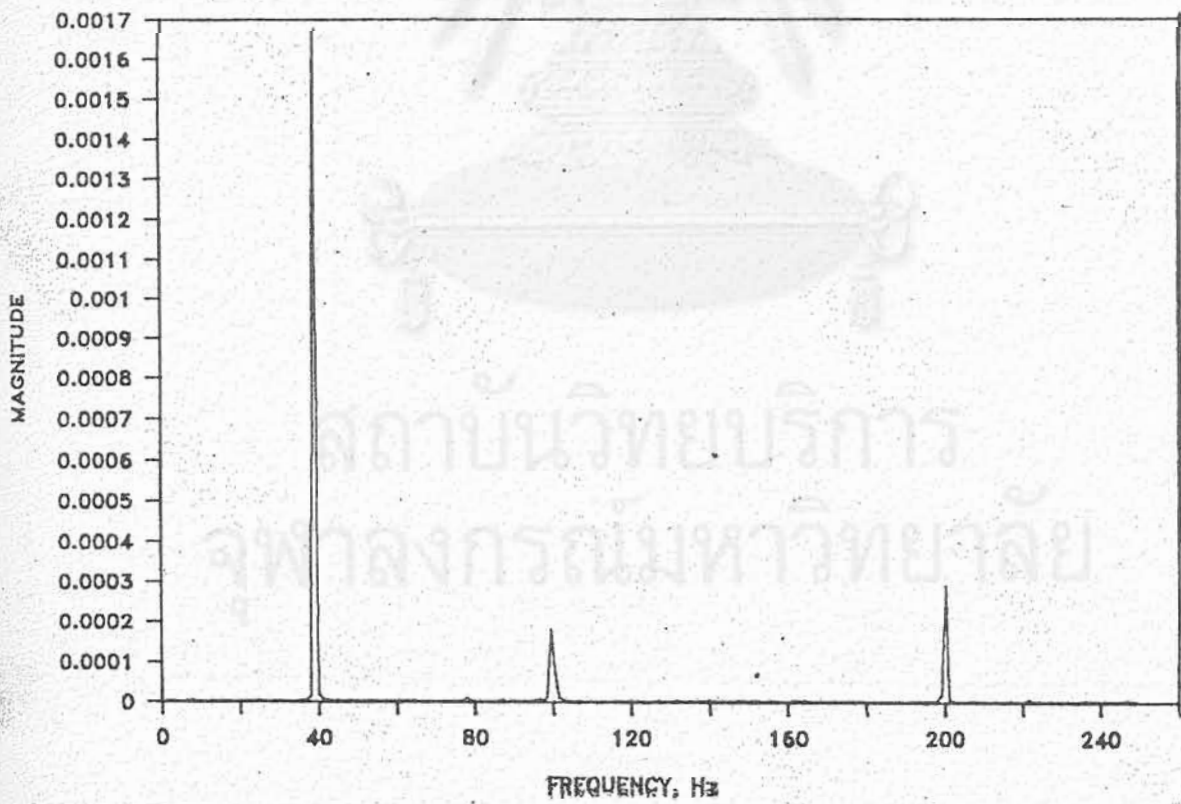
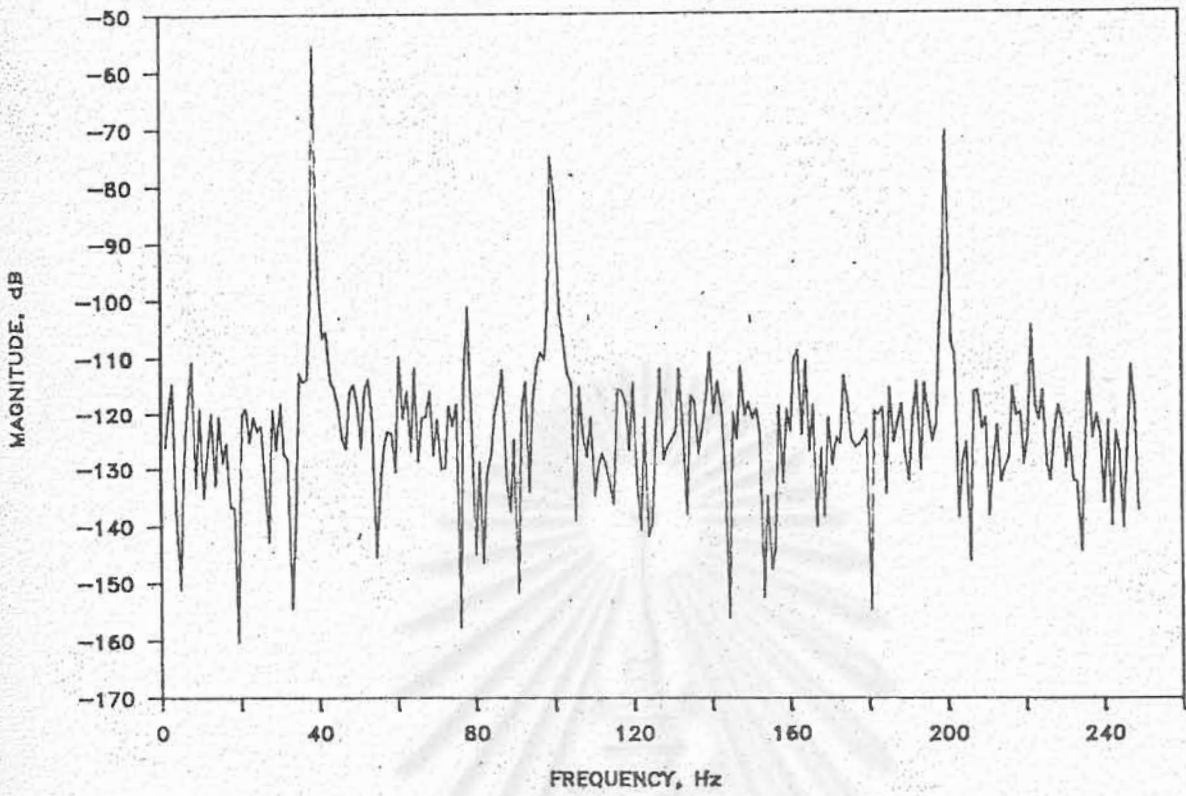
2.3 การหาทรานส์เฟอว์ฟังก์ชันของชุดขับเคลื่อนของระบบ

ชุดขับเคลื่อนประกอบด้วยมอเตอร์กระแสตรงต่อกับแทคโคมิเตอร์ (Tachometer) และต่อกับโวลต์คีย์ แชน X และ Y ผ่านทางลวดสลิง ทรานส์เฟอว์ฟังก์ชันที่จะหาเป็นทรานส์เฟอว์ฟังก์ชันระหว่างเอาพุทคือความเร็วเชิงมุมของเพลากับอินพุทคือโวลต์เตจที่ป้อนให้กับแอมพลิไฟเออร์ (Amplifier) ของมอเตอร์ทั้งสองชุดได้แก่ ทรานส์เฟอว์ฟังก์ชัน H_y และ H_x เช่นเดียวกันกับในกรณีข้างต้นที่กล่าวมาแล้ว รูปที่ 3 แสดงชุดขับเคลื่อนของแชน X และแชน Y ความเร็วเชิงมุมของเพลาสามารถวัดได้โดยใช้แทคโคมิเตอร์ (Tachometer) ที่ติดอยู่กับแกนหมุนของมอเตอร์ สัญญาณที่ได้จากแทคโคมิเตอร์จะอยู่ในรูปของโวลต์เตจ (Voltage)

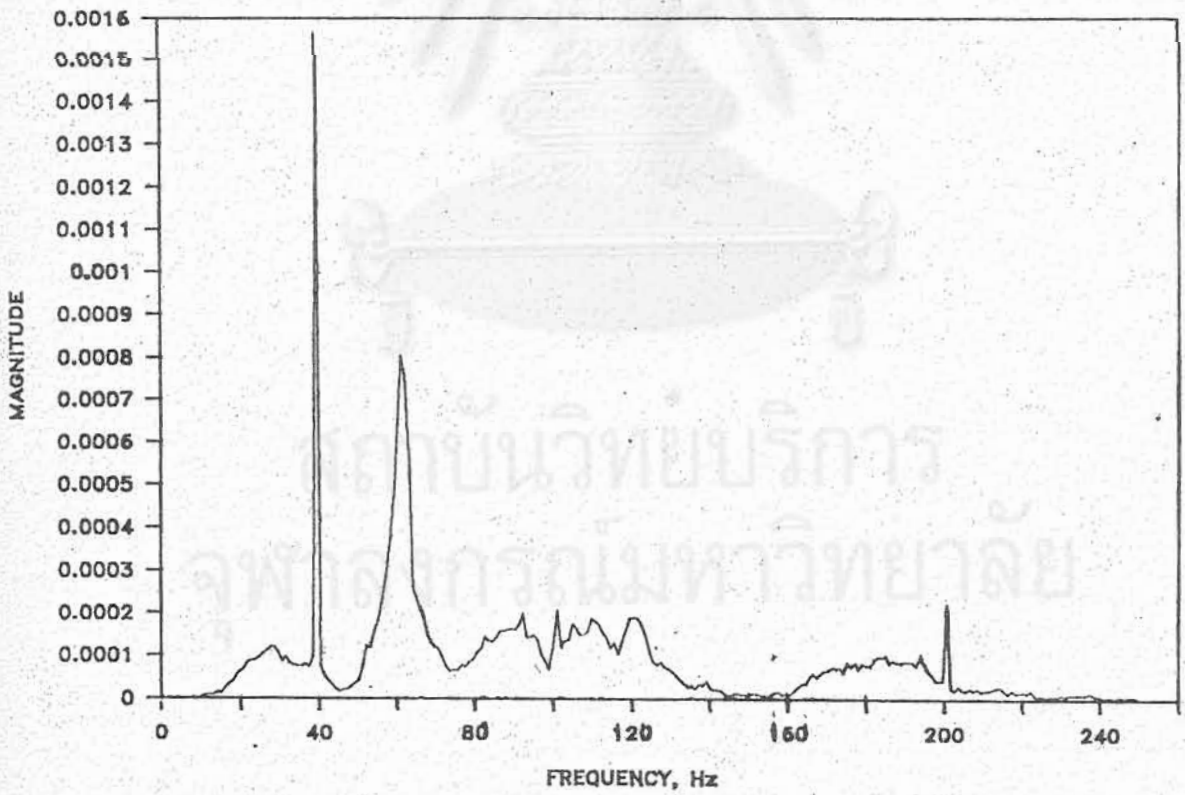
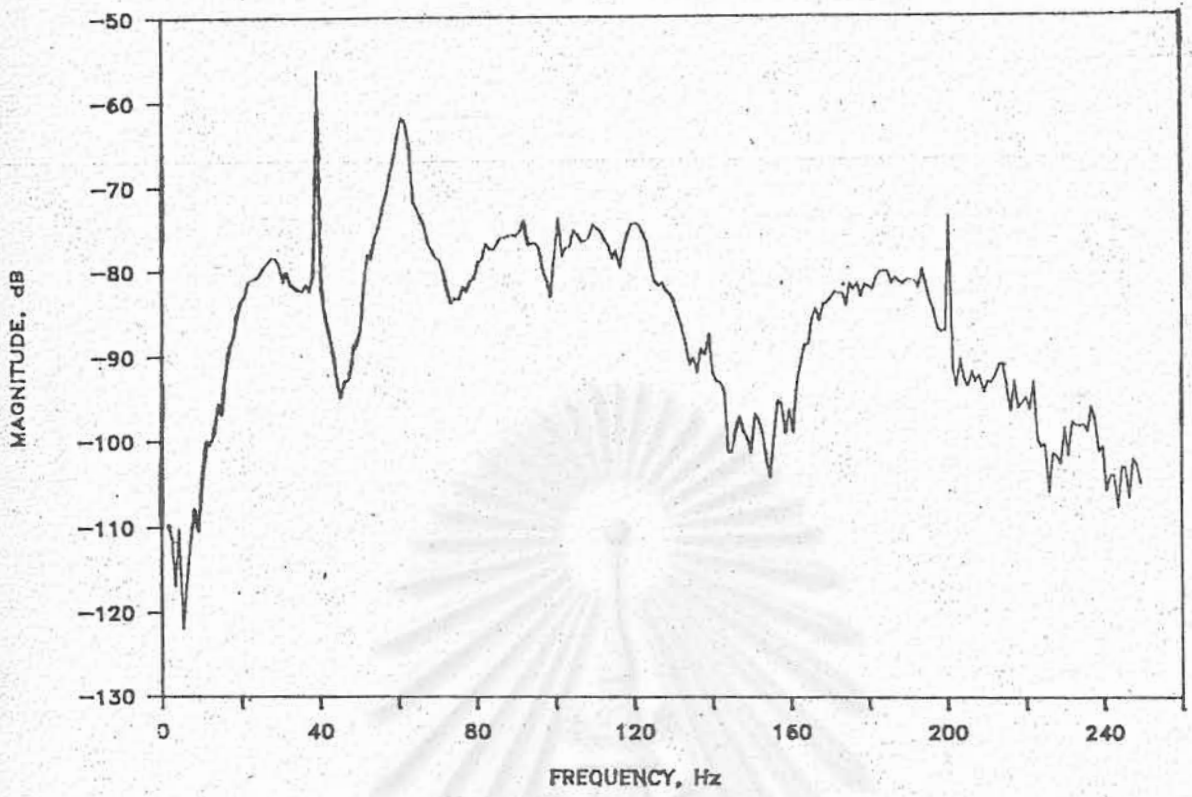
การทดสอบหาทรานส์เฟอว์ฟังก์ชันนี้จะใช้อินพุทเป็นสัญญาณแรนดอม (Random Input Signal) โดยใช้แรนดอมที่จำกัดช่วงกว้างความถี่ (Bandwidth) เป็น 100 Hz การสร้างสัญญาณแรนดอมที่ใช้เป็นสัญญาณที่อิมพุทเข้าไปในระบบนั้นสร้างได้จากอุปกรณ์สร้างสัญญาณแรนดอมซึ่งมาพร้อมกับเครื่องวิเคราะห์ฟูเรียร์ที่มีอยู่ เนื่องจากที่ความถี่สูงกว่านี้มอเตอร์ไม่สามารถตอบสนองได้เร็วพอหรือทันต่อความถี่ในการเปลี่ยนแปลงสัญญาณทางด้านขาเข้า การเก็บข้อมูลอินพุทและเอาพุทใช้อัตราความถี่ในการสุ่มข้อมูล 400 Hz จำนวน



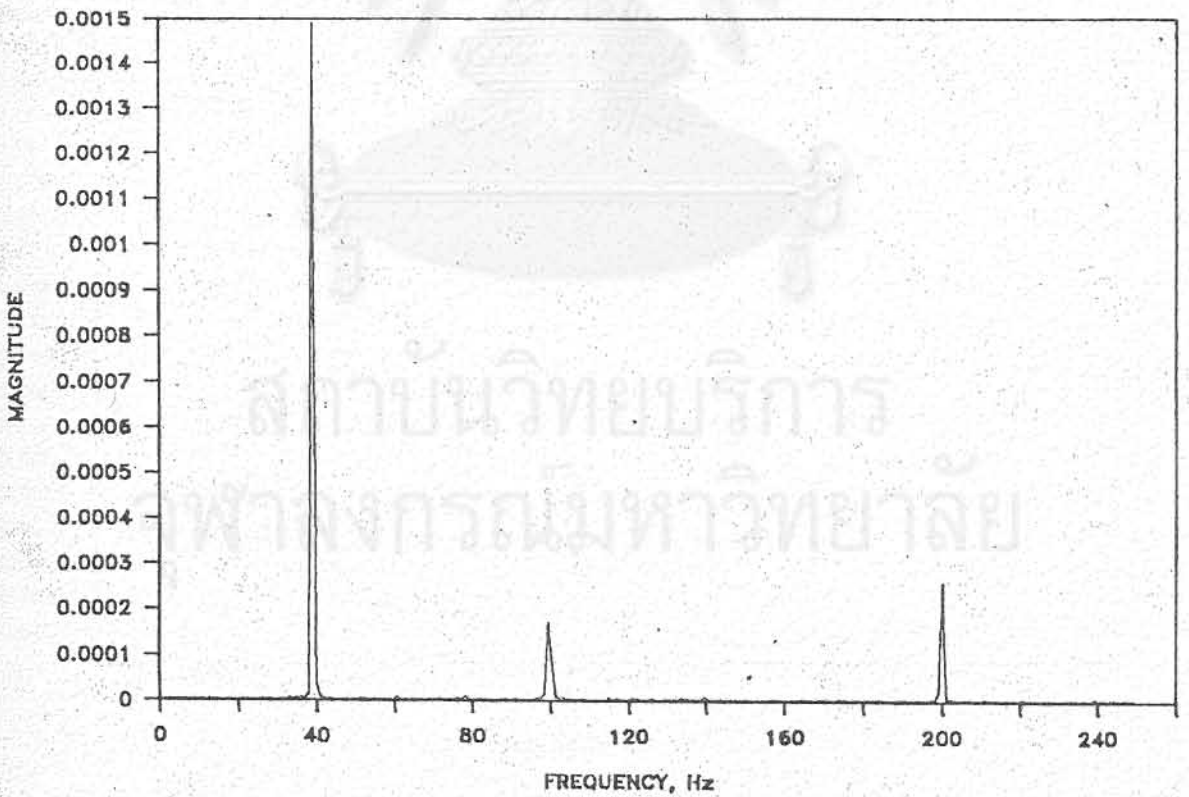
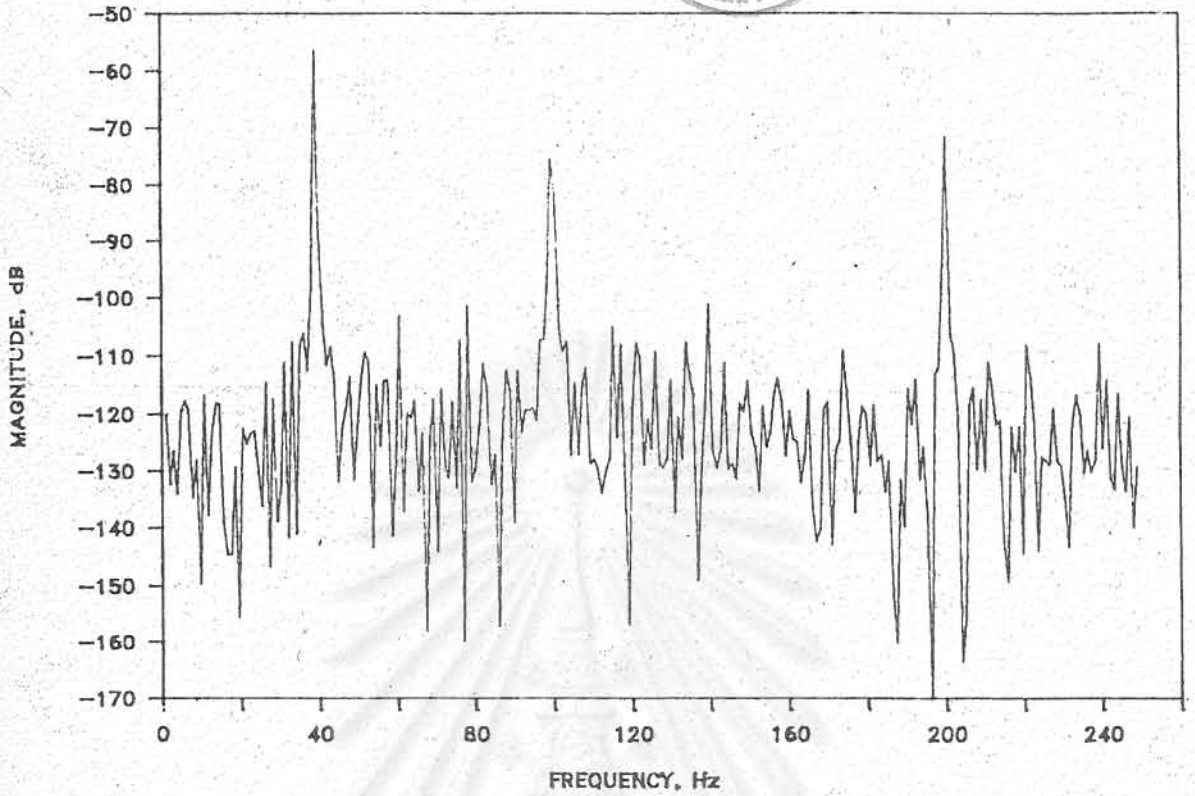
รูป 5 (๑) เพาเวอร์สเปคตรัลเดนซิตีของความเร่งในแนว x



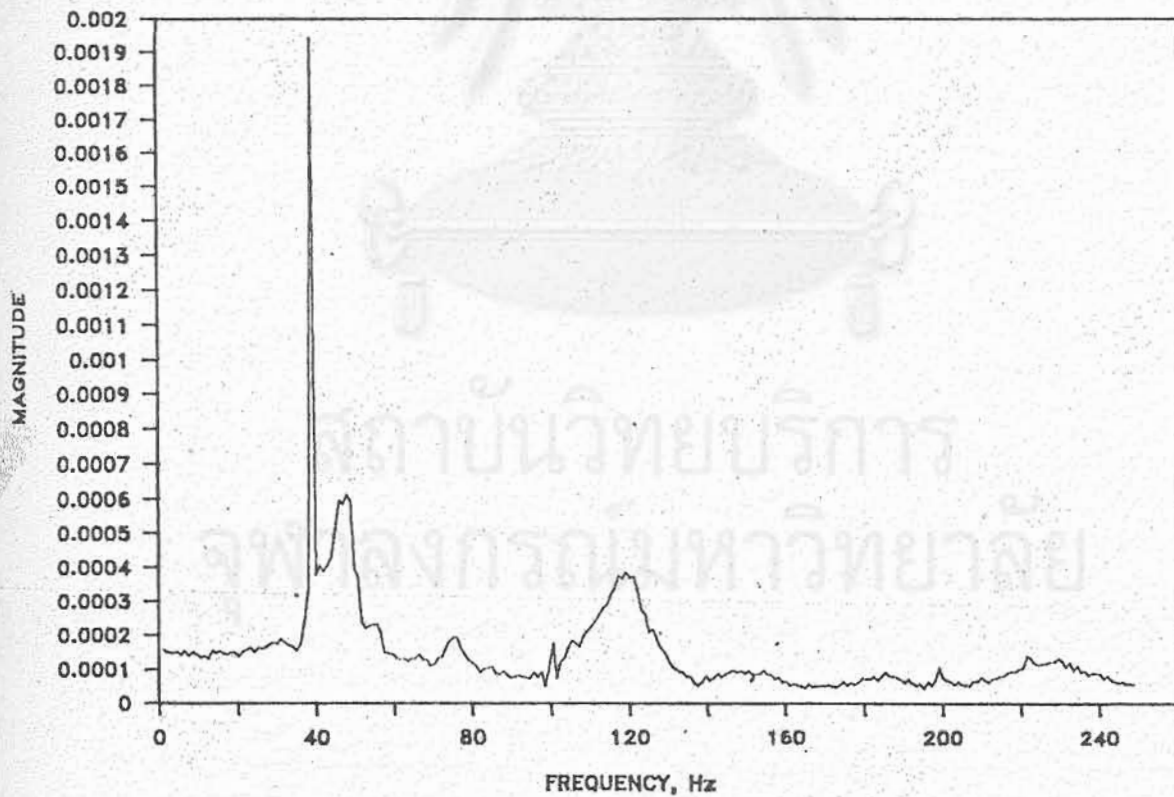
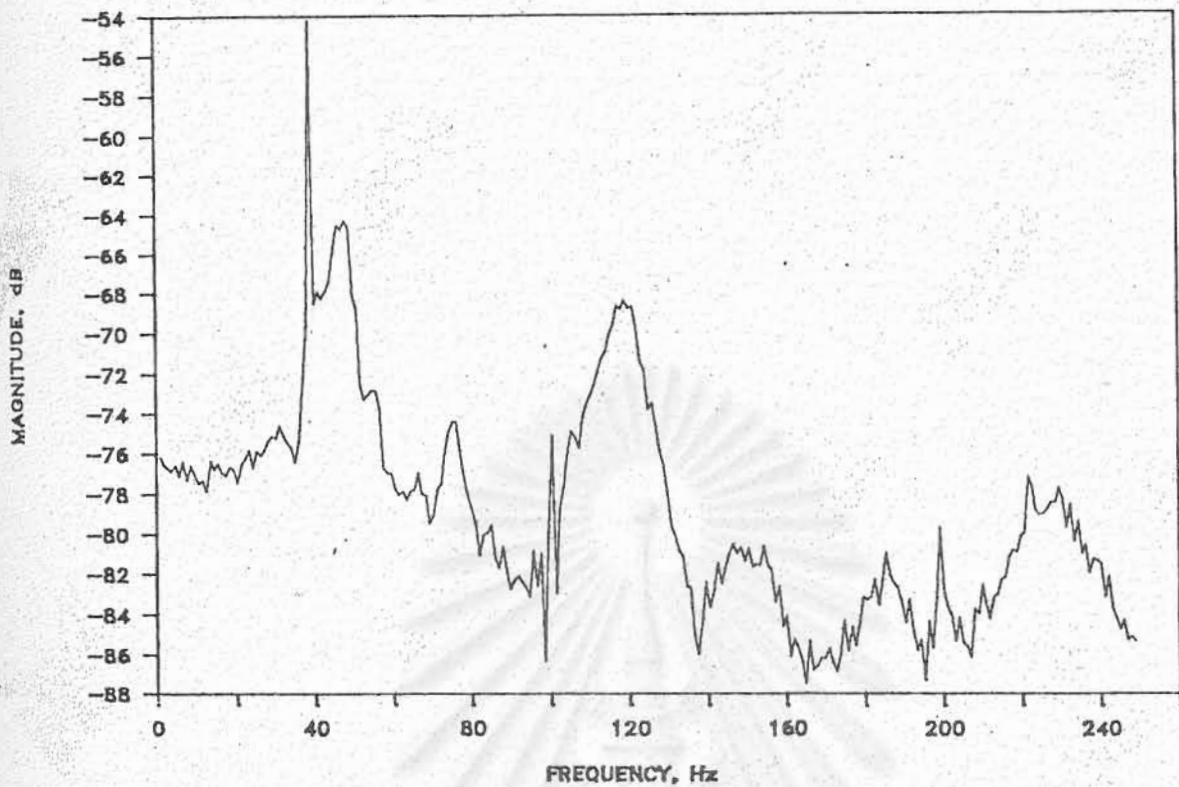
(บ) เพาเวอร์สเปกตรัลเคเนิตีของความเร่งในแนว x
(เมื่อไม่ใส่อินพุท)



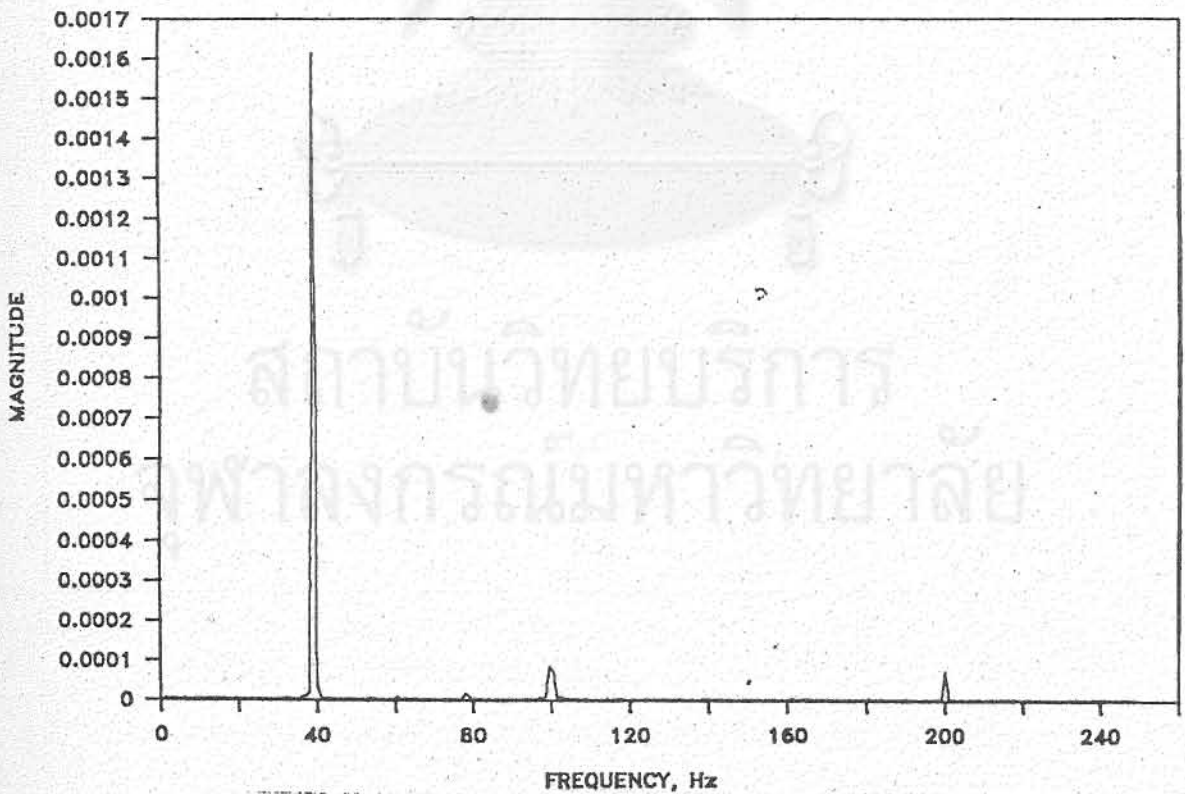
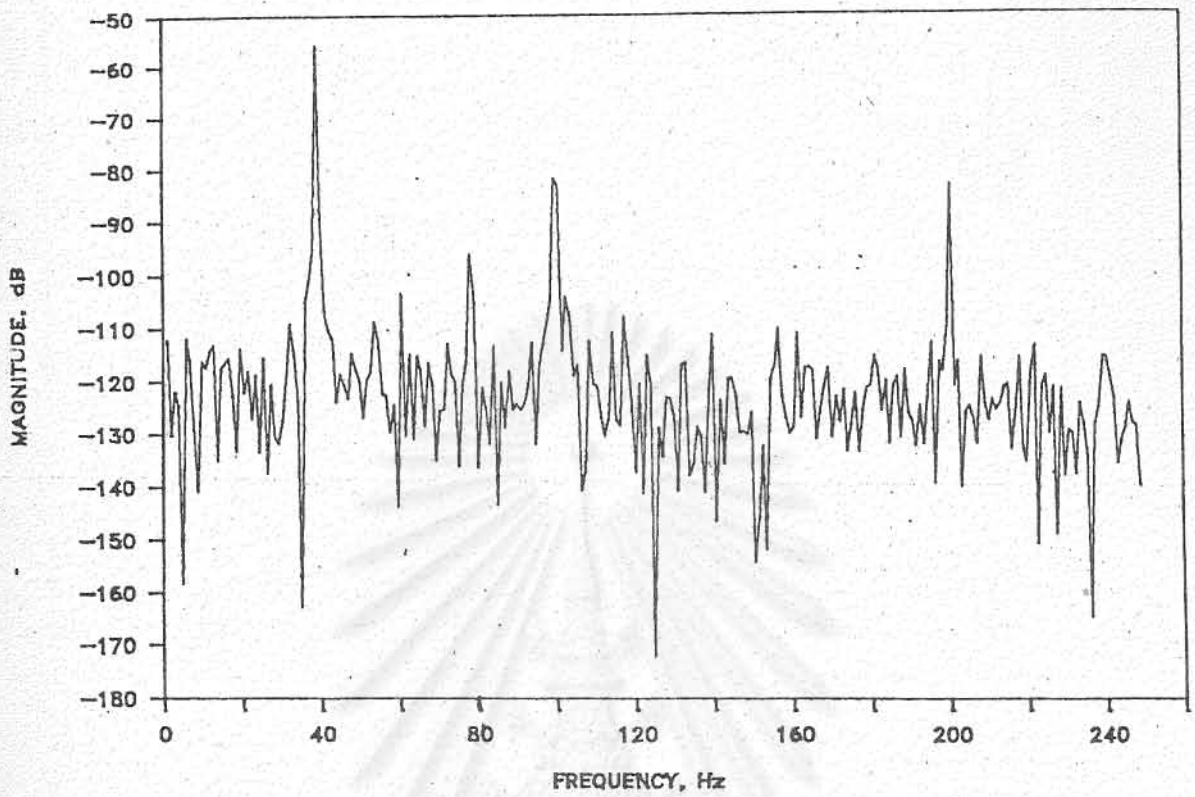
รูป ๑ (๑) เพาเวอร์สเปกตรัมเดซิเบลของความเร่งในแนว y



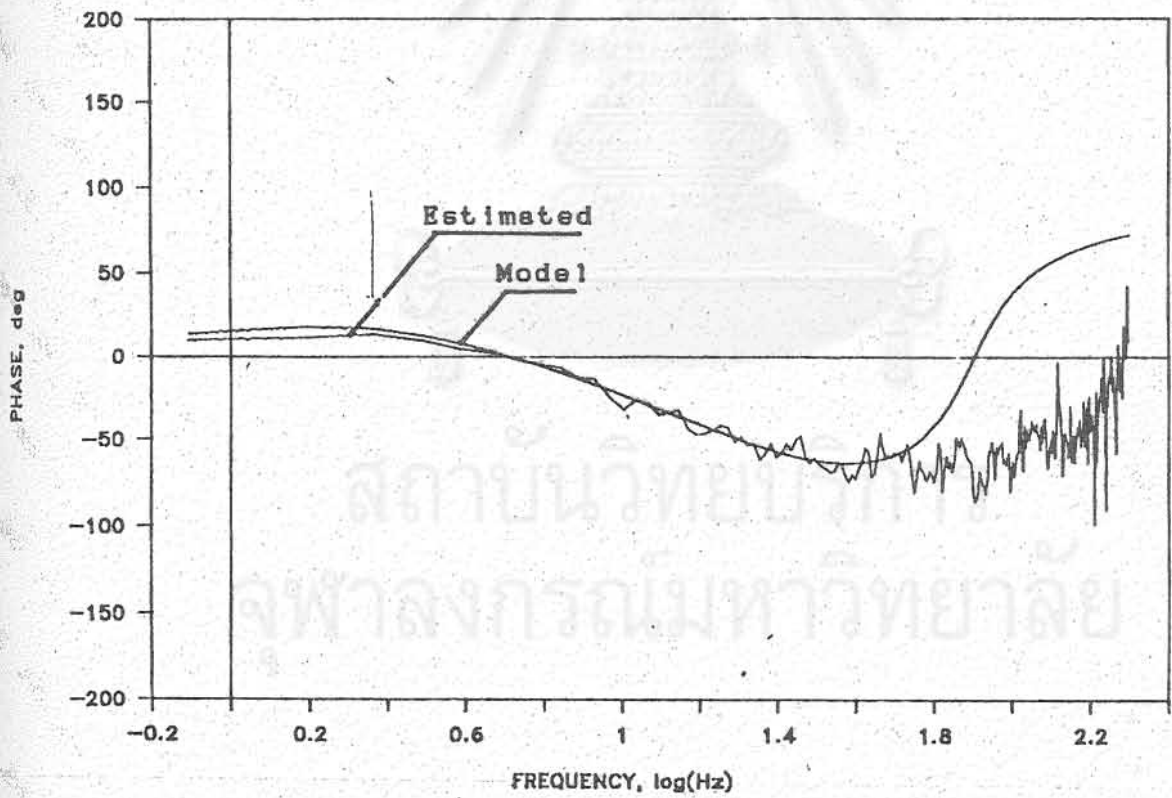
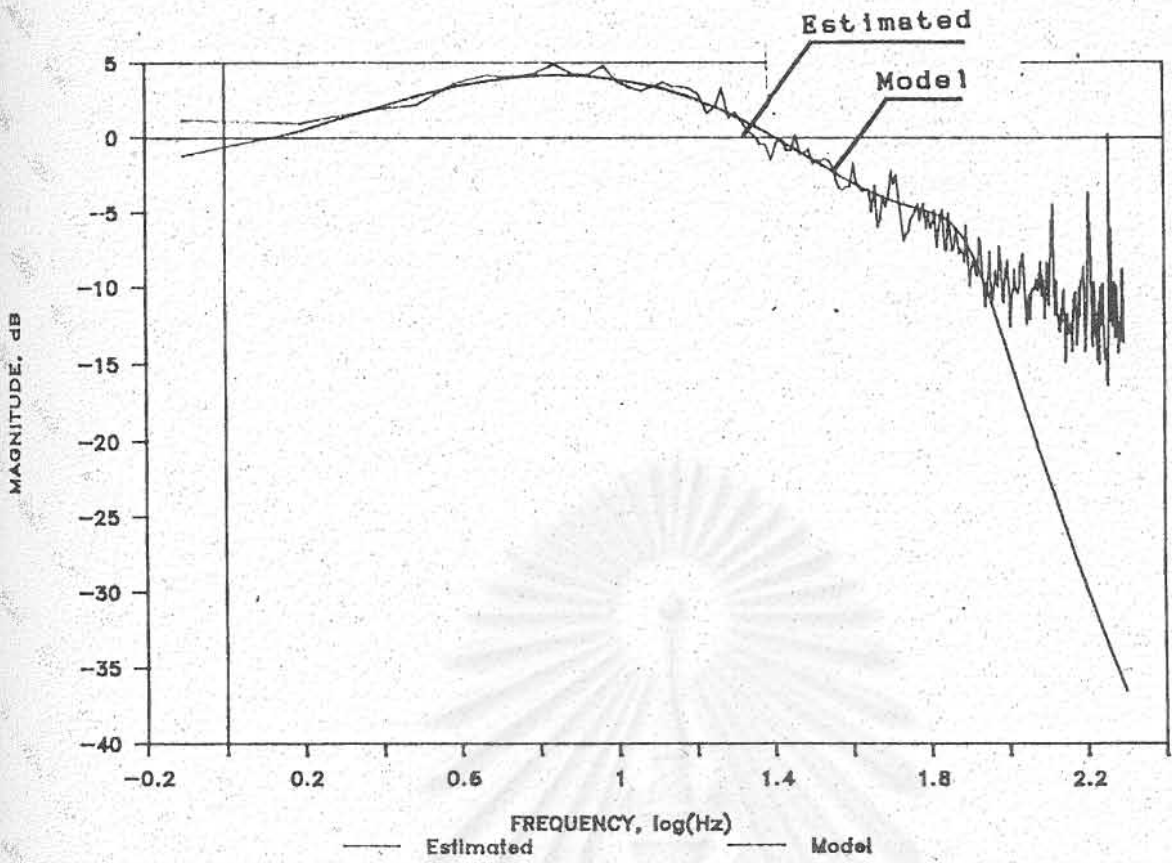
(b) เพาเวอร์สเปกตรัลเดนซิตีของความถี่ในแนว y
(เมื่อไม่ใส่อินพุท)



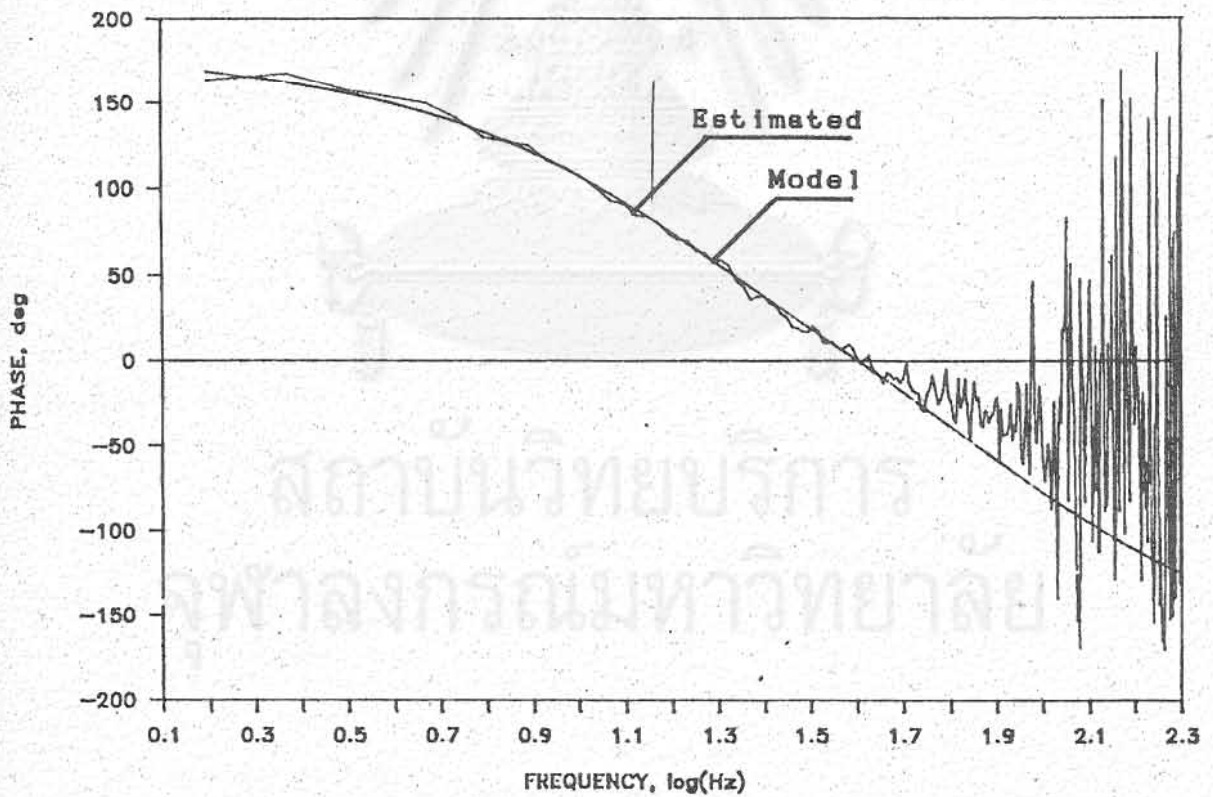
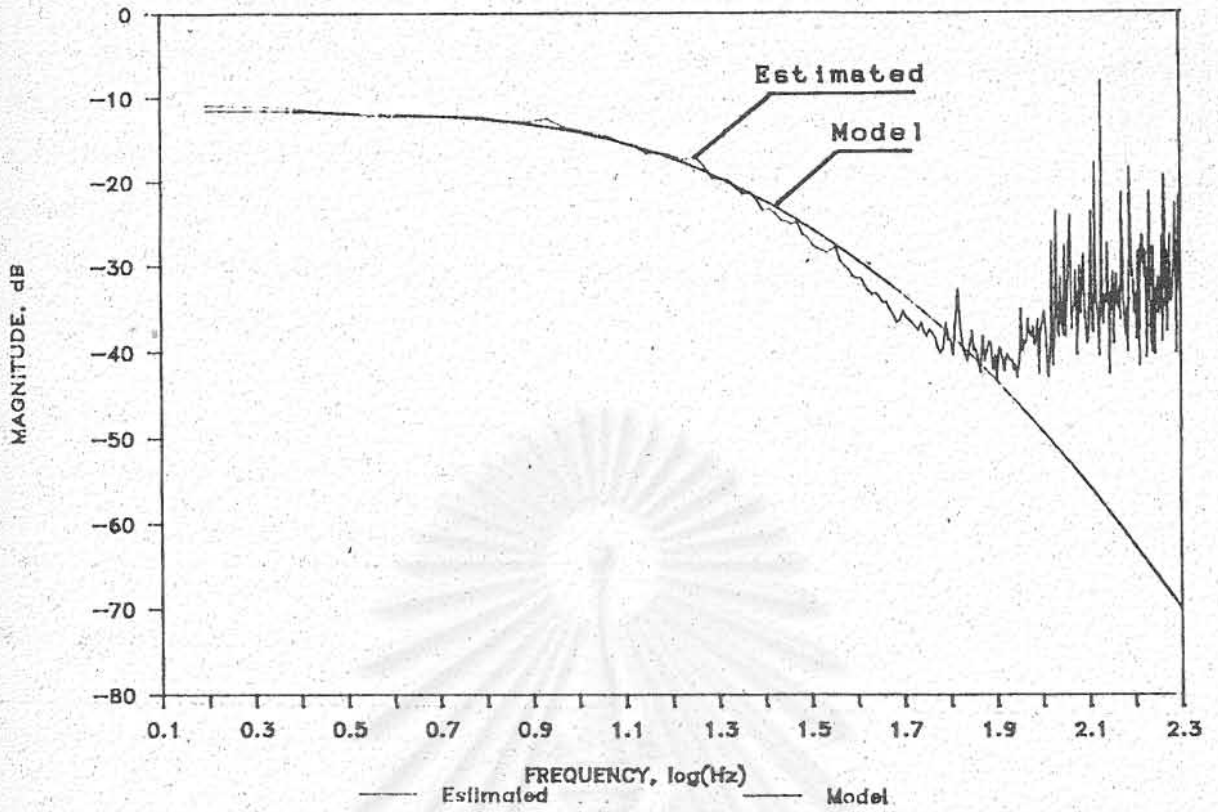
รูป 7 (a) เวกเตอร์สเปกตรัลเคเนซิตีของความเร่งในแนว z



(b) เพาเวอร์สเปกตรัลเดนซิตีของความเร่งในแนว z
(เมื่อไม่ใส่อินพุท)



รูป 8 แสดงโมเดลที่สร้างจากค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้เทียบกับผลตอบความถี่ ของทรานสเฟอ์ฟังก์ชัน H_x เมื่อให้ออเคอร์ของเศษเป็น 2 และส่วนเป็น 5



รูป 9 แสดงโมเดลที่สร้างจากค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้เทียบกับผลตอบความถี่ ของทรานสเฟอ์ฟังก์ชัน H_v เมื่อให้ออเดอร์ของเศษเป็น 0 และส่วนเป็น 4

ชุดข้อมูล (Ensemble) 16 ชุด ข้อมูลชุดละ 512 ค่า ผลการประมวลค่าพารามิเตอร์ ทำให้ได้โมเดลหรือทรานสเฟอ์ฟังก์ชันซึ่งมีความแม่นยำเมื่อเทียบกับผลตอบความถี่ในช่วงความถี่ใช้งานไม่เกิน 40 Hz ซึ่งผลแสดงไว้ดังในรูปที่ 8 และ 9 ในรูปที่ 8 และ 9 นี้เปรียบเทียบระหว่างทรานสเฟอ์ฟังก์ชันที่วัดได้จากระบบจริงกับโมเดลที่หาได้จากการทดลองซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน

ทรานสเฟอ์ฟังก์ชันของชุดขับเคลื่อนแต่ละชุดสามารถเขียนได้ดังนี้คือ สำหรับชุดขับเคลื่อนชุดล่าง

$$H_x(s) = (2.46 \times 10^7 s^2 + 9.88 \times 10^9 s + 8.57 \times 10^{10}) / (s^5 + 4.73 \times 10^1 s^4 + 1.86 \times 10^5 s^3 + 6.91 \times 10^5 s^2 + 6.51 \times 10^9 s + 1.10 \times 10^{11})$$

สำหรับชุดขับเคลื่อนชุดบน

$$H_y(s) = (- 8.79 \times 10^8) / (s^4 + 1.21 \times 10^3 s^3 + 5.33 \times 10^5 s^2 + 7.75 \times 10^7 s + 3.37 \times 10^9)$$

สมการการเคลื่อนที่ของมอเตอร์กระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวรสามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$V(t) - K_B \dot{\theta} = R \cdot i + L \cdot di/dt \quad (8)$$

$$T = K_I \cdot i \quad (9)$$

ถ้าเขียนอยู่ในรูปของทรานสเฟอ์ฟังก์ชันระหว่างตำแหน่งการหมุนกับโวลต์เตจที่ใส่เข้าไป จะได้ดังนี้คือ

$$\frac{T(s)}{V(s) - K_B w(s)} = \frac{K_I}{L \cdot s + R} \quad (10)$$

กำหนดให้

J = Equivalent Inertia

B = Viscous damping

- L = Inductant of Coil
- R = Resistant of Coil
- K_B = Motor Back emf constant
- V = Motor Input Voltage
- T = Motor Torque

ซึ่งเมื่อรวมสมการที่ 6 และ 10 ก็จะได้ว่า

$$\frac{\theta(s)}{V(s) - K_B * w(s)} = \frac{1/B}{sL((J/B)*s + 1)*(L*s + R)} \quad (11)$$

รูปที่ 10 เป็นบล็อกไดอะแกรมของสมการที่ 11 และระบบควบคุม จากสมการนี้ทรานส์-เฟอว์ฟังก์ชันของระบบเมื่อเอาพุทเป็นความเร็วและอินพุทเป็นโวลท์เตจที่ใส่เข้าไปแล้วจะอยู่ในรูปแบบที่เป็น Second order แต่รูปแบบของ H_x และ H_y จะมี order มากกว่าสอง ทั้งนี้เนื่องจากตัวโครงสร้างของโต๊ะที่เข้ามารวมอยู่ในทรานส์เฟอว์ฟังก์ชัน

2.4 ระบบควบคุมแบบ พี ไอ ดี (PID)

ระบบควบคุมแบบ พี ไอ ดี นั้นจะประกอบด้วยระบบควบคุมย่อยสามส่วนด้วยกันคือ แบบ พี หรือ Proportional Control แบบ ไอ หรือ Integral Control และแบบ ดี หรือ Derivative Control แต่ละส่วนจะมีส่วนตักกล่าวคือ พี นั้นช่วยให้ระบบมีการตอบสนองเร็วขึ้น แบบ ไอ ก็ช่วยลดความผิดพลาดที่ปลายได้ (Steady State Error) และแบบ ดี ก็ช่วยเพิ่มค่าแดมปีง (damp) ให้กับระบบ ทำให้ระบบสมดุล (stable) มากขึ้น สมการของระบบ พี ไอ ดี นั้นสามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$m(t) = K_p * e(t) + K_i \int_0^t e(t) + K_d * e(t)$$

ถ้าจัดอยู่ในรูปแบบของ s-domain จะได้ดังนี้

$$e(s)/m(s) = 1/(K_p + K_i/s + K_d*s)$$

ถ้าจัดอยู่ในรูปแบบของคาโนนิคัล (Canonical Form) จะได้ดังนี้คือ

$$e(s)/m(s) = (K/s)(T_d * s + 1)(s + 1/T_1)$$

โดยที่

$$K_p = K(1 + T_d/T_1)$$

$$K_1 = K/T_1$$

$$K_d = K * T_d$$

2.5 ระบบควบคุมแบบ พี ไอ ดี พี (PIDP)

สำหรับการควบคุมแบบ พี ไอ ดี พี เป็นการนำเอาสัญญาณควบคุมแบบ พี ไอ ดี มาใช้ร่วมกับสัญญาณควบคุมแบบพรีวิว (Preview) ซึ่งการนำเอาสัญญาณควบคุมแบบพรีวิว มาใช้จะช่วยลดค่าความผิดพลาดเมื่อการเคลื่อนที่มีการเปลี่ยนทิศทางหรือแนวทางการเคลื่อนที่มีการหักมุมดังแสดงในรูปที่ 11 ซึ่งแสดงผลของสัญญาณควบคุมแบบพรีวิวในกรณีที่แนวทางการเคลื่อนที่มีการหักมุม เส้น A แสดงแนวทางในการเคลื่อนที่ที่ต้องการ ในกรณีที่ไม่มีการใช้สัญญาณควบคุมแบบพรีวิวนั้นเมื่อแนวทางการเคลื่อนที่ที่มีการหักมุมระบบจะเคลื่อนที่มาจากจุดที่มีการหักมุมจึงจะมองเห็นว่ามีการเปลี่ยนทิศทางทางการเคลื่อนที่ ทำให้ระบบเคลื่อนที่เลยจุดที่มีการหักมุมดังแสดงตามเส้น B ในรูป

ในกรณีที่มีการนำเอาสัญญาณควบคุมแบบพรีวิวมาใช้ เมื่อแนวทางการเคลื่อนที่ที่มีการหักมุมสัญญาณควบคุมแบบพรีวิวซึ่งมีการมองแนวทางเดินไปล่วงหน้า จะมองเห็นจุดที่มีการหักมุมก่อนที่ระบบจะเคลื่อนที่ไปถึงจุดหักมุม ทำให้ระบบเริ่มมีการปรับการเคลื่อนที่ทั้งทิศทางและความเร็วก่อนที่จะถึงจุดที่มีการหักมุมดังแสดงตามเส้น C และ D ในรูปที่ 11 สำหรับระยะทางในการมองไปล่วงหน้านั้นถ้ากำหนดไว้เป็นระยะทางไกล ระบบก็จะเริ่มเปลี่ยนทิศทางทางการเคลื่อนที่ก่อนที่จะถึงจุดหักมุมเร็วขึ้นดังแสดงตามเส้น D เป็นกรณีที่ใช้ระยะทางในการมองล่วงหน้ามากกว่าระบบตามเส้น C ดังแสดงในรูป

สำหรับการควบคุมโดยใช้สัญญาณควบคุมแบบ พี ไอ ดี พี จะมีความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตของสัญญาณควบคุม $m(t)$ กับค่าสัญญาณแตกต่าง $e(t)$ ตามสมการที่ 12 ส่วนบล็อกไดอะแกรมของโอดีตัดแผ่นเหล็กพร้อมระบบควบคุมแสดงไว้ในรูปที่ 10

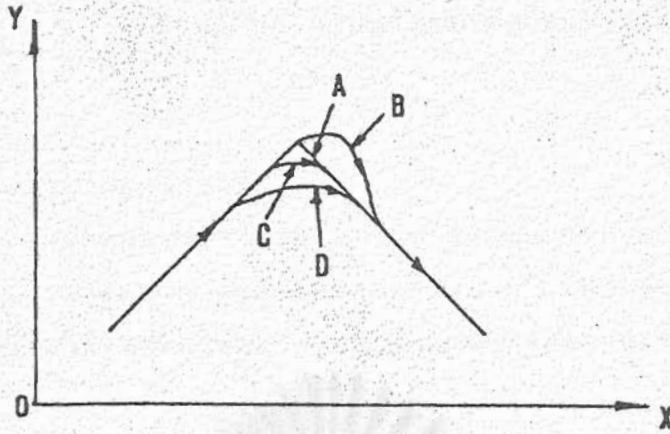
$$m(t) = K_p * e(t) + K_1 \int e(t) dt + K_d * \dot{e}(t) + K_{pr} * [R(n+np) - C(n)] \quad (12)$$

กำหนดให้

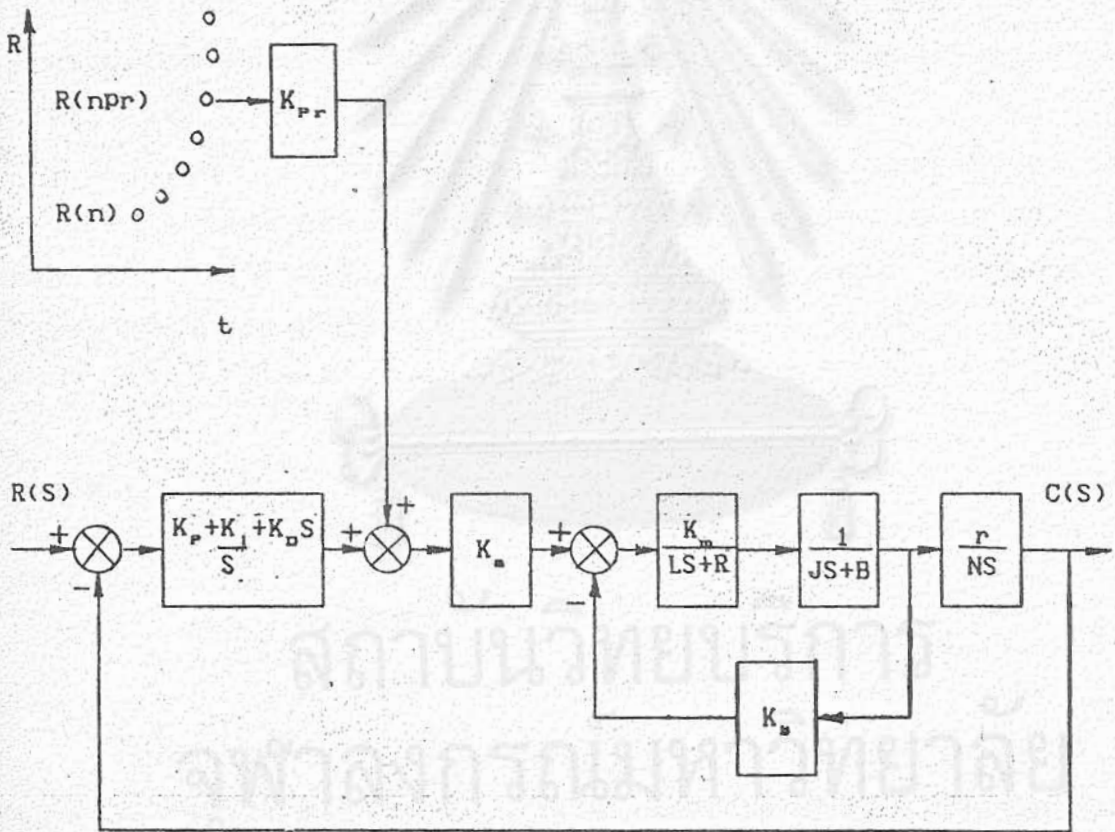
$$m(t) = \text{สัญญาณควบคุมที่ได้จากตัวควบคุมแบบ พี ไอ ดี พี ที่เวลา } t$$

$$e(t) = \text{ค่าสัญญาณแตกต่างระหว่างจุดอ้างอิงกับค่าที่วัดได้ที่เวลา } t$$

$$R(n) = \text{จุดอ้างอิงที่เวลา } t = n * \Delta t$$



รูปที่ 11 แสดงผลของลัษณาคความพริ้วไหวในกรณีที่มีการเคลื่อนที่มีการหน่วง



รูปที่ 10 บล็อกไดอะแกรมของโต๊ะตัดแผ่นเหล็ก

$$C(n) = \text{ค่าตำแหน่งที่วัดได้ที่เวลาใด ๆ } t = n * \Delta t$$

$$np = \text{จุดอ้างอิงที่มองไปล่วงหน้าที่เกี่ยวข้องกับจุดอ้างอิงที่เวลา}$$

$$t = n * \Delta t$$

2.6 การควบคุมความเร็วตามแนวการตัด

ในการตัดแผ่นเหล็กด้วยเปลวไฟนั้น สิ่งที่สำคัญนอกเหนือจากความถูกต้องของแนวการตัดแล้ว ความเร็วตามแนวการตัดจะต้องคงที่ด้วย เพื่อให้ชิ้นงานที่ได้มีคุณภาพที่ดีตามแนวการตัด ในที่นี่จะใช้เทคนิคในการควบคุมตำแหน่งและความเร็วตามแนวการตัดดังนี้

$$\text{Velocity} = \Delta S / \Delta t \quad (13)$$

จากคำจำกัดความในสมการที่ 13 จะเห็นได้ว่าถ้ากำหนดให้ Δt มีค่าเท่ากับคาบเวลาในการสุ่มข้อมูลสัญญาณ (Sampling Period) ซึ่งมีค่าคงที่ และถ้าสามารถควบคุมให้ ΔS ซึ่งมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนตำแหน่งในแต่ละครั้งของการสุ่มค่าให้มีค่าคงที่ ก็จะได้ค่าความเร็วที่มีค่าคงที่ จากหลักการดังกล่าวนี้จะนำมาใช้ในการควบคุมตำแหน่งและความเร็วได้ดังนี้

จากรูปที่ 12 เส้นทึบจะแสดงถึงแนวตัดที่ต้องการ โดยจะแบ่งแนวการตัดออกเป็นส่วนเล็ก ๆ ที่มีขนาดเท่ากับ ΔS ซึ่งแสดงในรูปด้วยเส้นตรง AB BC CD (เส้นประ) จากสมการที่ 13 ถ้ากำหนดให้ค่า Δt มีค่าเท่ากับเวลาในการสุ่มค่า จะสามารถหาค่า ΔS ได้ตามความสัมพันธ์ของสมการ 14

$$\Delta S = V_{\text{des}} * t_{\text{sam}} \quad (14)$$

กำหนดให้

$$V_{\text{des}} = \text{ความเร็วตามแนวการตัด}$$

$$t_{\text{sam}} = \text{เวลาในการสุ่มค่า}$$

$$\Delta S = \text{ระยะทางที่เคลื่อนที่ในการสุ่มค่า 1 ครั้ง}$$

จากสมการที่ 14 นำค่า ΔS ที่คำนวณได้ไปใช้ในการคำนวณหาจุดอ้างอิงตามแนวแกน X และแกน Y ที่เวลา t_{sam} ใด ๆ แล้วเก็บไว้ก่อน ในการสร้างแนวการเคลื่อนที่จะใช้รูปแบบของส่วนโค้งและเส้นตรงมาใช้ประกอบกัน ตามหลักการดังนี้คือ

ส่วนโค้ง ในการสร้างแนวทางเดินที่เป็นส่วนโค้ง ข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณจุดอ้างอิงมีดังนี้คือ

- 1 จุดศูนย์กลางของส่วนโค้ง

2 รัศมีของส่วนโค้ง

3 มุมเริ่มต้นของส่วนโค้ง เทียบกับแนวแกน X

4 มุมสิ้นสุดของส่วนโค้ง เทียบกับแนวแกน X มีค่าเป็นบวกในทิศทวนเข็มนาฬิกา

จากรูปที่ 13 แสดงการแบ่งแนวการเคลื่อนที่ที่เป็นส่วนโค้งออกเป็นส่วนเล็ก ๆ โดยมีความยาวเท่ากับ ΔS ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 14 จากรูปที่ 13 ถ้าพิจารณาสามเหลี่ยม ABC จะมีความสัมพันธ์ต่าง ๆ ดังนี้คือ

$$\theta = \cos^{-1} [(2*AC*AB - BC^2) / (2*AC*AB)] \quad (15)$$

$$AC = AB = r_c \quad (16)$$

$$BC = S \quad (17)$$

แทนค่าสมการ 16 และ 17 ลงในสมการที่ 15 จะได้ว่า

$$\theta = \cos^{-1} [(2*r_c^2 - \Delta S^2) / (2*r_c^2)] \quad (18)$$

จากสมการที่ 18 สามารถนำไปคำนวณหาค่าจุดอ้างอิงตามแนวแกน X และแนวแกน Y ที่เวลาในการสุ่มค่าครั้งที่ n ได้ตามสมการที่ 19 และ 20

$$X(n) = r_c * \cos(\theta * n) + X_c \quad (19)$$

$$Y(n) = r_c * \sin(\theta * n) + Y_c \quad (20)$$

กำหนดให้

$$r_c = \text{รัศมีของส่วนโค้ง}$$

$$X(n) = \text{จุดอ้างอิงตามแนวแกน X ที่เวลาในการสุ่มค่าครั้งที่ n}$$

$$Y(n) = \text{จุดอ้างอิงตามแนวแกน Y ที่เวลาในการสุ่มค่าครั้งที่ n}$$

$$X_c = \text{จุดศูนย์กลางของส่วนโค้งตามแนวแกน X}$$

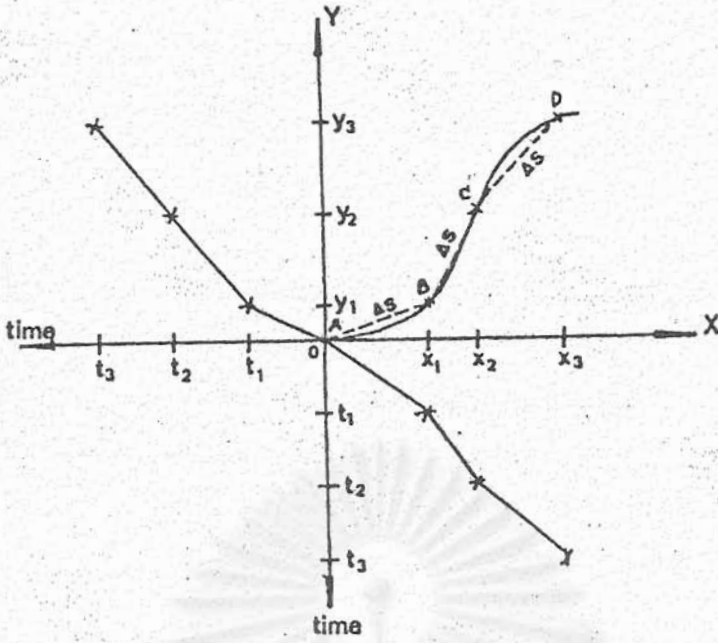
$$Y_c = \text{จุดศูนย์กลางของส่วนโค้งตามแนวแกน Y}$$

เส้นตรง ในการสร้างแนวทางเดินที่เป็นเส้นตรง ข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณจุดอ้างอิงมีดังนี้คือ

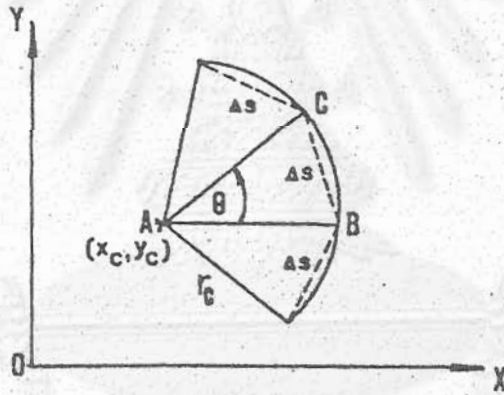
1 จุดเริ่มต้นของเส้นตรง

2 จุดสิ้นสุดของเส้นตรง

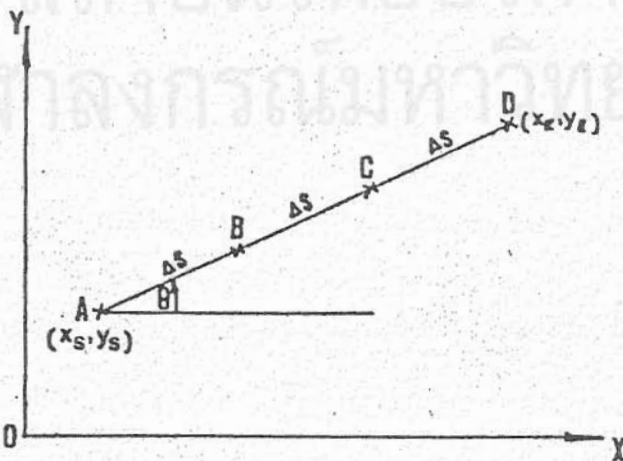
จากรูปที่ 14 แสดงถึงการแบ่งเส้นตรงออกเป็นส่วน ๆ ที่มีความยาวเท่ากับ ΔS ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 14 จากรูปที่ 14 นี้จะมีความสัมพันธ์ต่าง ๆ ดังนี้คือ



รูปที่ 12 . การแบ่งจุดตามแนวการเคลื่อนที่



รูปที่ 13 การแบ่งจุดกรณีแนวการเคลื่อนที่เป็นส่วนโค้ง



รูปที่ 14 แสดงการแบ่งจุดกรณีแนวการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง

$$\theta = \tan^{-1}[(Y_E - Y_S)/(X_E - X_S)] \quad (21)$$

$$X(n) = (S*n)*\cos(\theta) + X_S \quad (22)$$

$$Y(n) = (S*n)*\sin(\theta) + Y_S \quad (23)$$

กำหนดให้

$$X_S = \text{จุดเริ่มต้นของเส้นตรงตามแนวแกน X}$$

$$Y_S = \text{จุดเริ่มต้นของเส้นตรงตามแนวแกน Y}$$

$$X_E = \text{จุดสิ้นสุดของเส้นตรงตามแนวแกน X}$$

$$Y_E = \text{จุดสิ้นสุดของเส้นตรงตามแนวแกน Y}$$

$$X(n) = \text{จุดอ้างอิงตามแนวแกน X ที่เวลาในการสุ่มค่าครั้งที่ n}$$

$$Y(n) = \text{จุดอ้างอิงตามแนวแกน Y ที่เวลาในการสุ่มค่าครั้งที่ n}$$

2.7 การออกแบบระบบควบคุมแบบ พี ไอ ดี พี

ในการออกแบบระบบควบคุม พี ไอ ดี พี นั้นก็คือการหาค่าเกนต่าง ๆ คือ K_p , K_i , K_d และ K_{pr} โดยจะแบ่งการออกแบบเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกจะออกแบบหาค่าเกนของสัญญาณควบคุม พี ไอ ดี ก่อน หลังจากนั้นจึงจะทำการออกแบบหาค่าเกนของสัญญาณควบคุมพีวีวี ซึ่งการออกแบบหาค่าเกนของสัญญาณควบคุมมีรายละเอียดดังนี้

การออกแบบหาค่าเกนของสัญญาณควบคุม พี ไอ ดี จากรูปที่ 10 ถ้าใช้ระบบควบคุมแบบ พี ไอ ดี และทำการชูนบล็อกไดอะแกรมของระบบ จะสามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมได้ดังแสดงในรูปที่ 15

โดยที่ (DC Servo motor by Electrocrat model 586 คูภาคผนวก ข.)

K_m	=	0.0551	N.m/A
K_u	=	4	volt/volt
K_b	=	0.0551	volt/(rat/sec)
r	=	0.025	m
n	=	90	
R	=	1.1	Ohm
L	=	2.3	mH
B	=	6.74×10^{-6}	kg.m ² /sec

สำหรับค่าโมเมนต์ของแรงเฉื่อยของมอเตอร์และภาระติดเทียบที่เพลามอเตอร์

สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 24

$$J = M*r^2/n^2 + J_m \quad (24)$$

กำหนดให้

$$J = \text{โมเมนต์ของแรงเฉื่อยของมอเตอร์และภาระคิดเทียบ
ที่เพลามอเตอร์}$$

$$M = \text{มวลของระบบแกน}$$

$$J_m = \text{โมเมนต์ของแรงเฉื่อยของมอเตอร์} \\ = 3.88 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^2$$

จากสมการที่ 24 แทนค่ามวลของระบบแกน $X = 11.423$ กิโลกรัม และมวลของระบบแกน $Y = 2.174$ กิโลกรัม จะได้ค่าโมเมนต์ของแรงเฉื่อยของระบบแกน X และแกน Y ตามสมการที่ 25 และ 26

$$J_x = 3.95 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^2 \quad (25)$$

$$J_y = 3.89 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^2 \quad (26)$$

จากสมการที่ 25 และ 26 จะเห็นได้ว่าค่ามวลของระบบแกนมีผลต่อค่าโมเมนต์ของแรงเฉื่อยที่มอเตอร์ต้องขับน้อย ทำให้ค่าโมเมนต์ของแรงเฉื่อยของระบบส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับค่าโมเมนต์ของแรงเฉื่อยของมอเตอร์เอง ที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากชุดเฟืองทดที่มีอัตราทดรอบสูงถึง 90 โมเมนต์แรงเฉื่อยของโพลดีเมื่อแปลงเป็นโมเมนต์แรงเฉื่อยที่แกนมอเตอร์ต้องทำการหารด้วยกำลังสองของอัตราทดรอบ ดังนั้นในการออกแบบจะออกแบบให้ค่าเกนของสัญญาณควบคุมของทั้งสองแกนมีค่าเท่ากันและใช้ค่าโมเมนต์ของแรงเฉื่อยของแกน X เป็นค่าที่ใช้ในการออกแบบ และจากรูปที่ 15 แทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยให้ค่าอินดิคแทนซ์ของมอเตอร์มีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความต้านทานของมอเตอร์ บล็อกไดอะแกรมของระบบจึงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 16

จากรูปที่ 15 กำหนดให้

$$K_p = K*(1 + T_d/T_1) \quad (27)$$

$$K_i = K/T_1 \quad (28)$$

$$K_d = K*T_d \quad (29)$$

$$G(s) = 1.262*K/[s(s + 70.25)] \quad (30)$$

จากความสัมพันธ์ของ static velocity error coefficient

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} s * G(s) \quad (31)$$

$$K_v = \text{output velocity/FVE} \quad (32)$$

กำหนดให้

$G(s)$ = ทรานสเฟอ์ฟังก์ชันของระบบที่ถูกควบคุม

K_v = static velocity error coefficient

FVE = ค่าผิดพลาดของตำแหน่งที่สภาวะสิ้นสุด
(Final Value Error)

ถ้ากำหนดให้ค่า Output Velocity มีค่าเท่ากับ 0.015 m/s และค่าผิดพลาดของตำแหน่งที่สภาวะสิ้นสุดให้มีค่าเท่ากับ 1 มิลลิเมตร จากสมการที่ 32 จะได้ค่า K_v ดังแสดงไว้ในสมการที่ 33

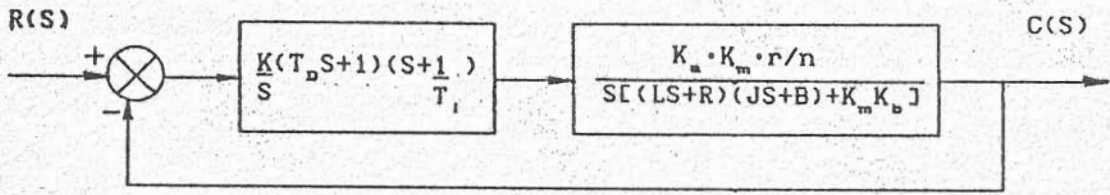
$$\begin{aligned} K_v &= 0.015/0.001 \\ K_v &= 15 \quad \text{sec}^{-1} \end{aligned} \quad (33)$$

แทนค่า K_v จากสมการที่ 33 และค่า $G(s)$ จากสมการที่ 30 ลงในสมการที่ 31 จะได้ค่าเกน K ที่ให้ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่สภาวะสิ้นสุดที่ความเร็วเอาต์พุตตามที่ต้องการ

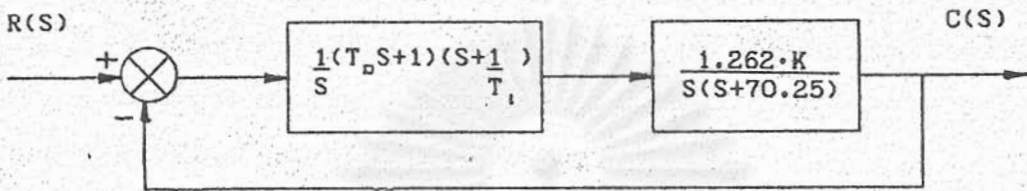
$$\begin{aligned} 15 &= \lim_{s \rightarrow 0} s * 1.262 * K / [S(S+70.25)] \\ K &= 15 * 70.25 / 1.262 \\ K &= 835 \end{aligned} \quad (34)$$

ในการหาค่า K_i และ K_d จะออกแบบโดยพิจารณาจาก Frequency-response ของ open-loop transfer function โดยพิจารณาจาก Open-loop transfer function ของระบบควบคุม พี โย ดี และ open-loop transfer function ของระบบ $G(s)$ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 18

จากรูปที่ 18 จะเห็นว่า Open-loop frequency-response ของระบบควบคุม พี โย ดี จะมี conner frequency ที่ $1/T_i$ และ $1/T_D$ และมี phase angle อยู่ระหว่าง -90 ถึง 90 องศา ในการออกแบบจะทำการเลือกค่า $1/T_D$ ที่บริเวณใกล้ ๆ กับ conner frequency ของระบบ $G(s)$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 70.25



รูปที่ 15. บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุม พี.ไอ.ดี. ของโต๊ะตัดแผ่นเหล็ก



รูปที่ 16. บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุม พี.ไอ.ดี. ที่ใช้ในการออกแบบ

ระยะทางในการ มองล่วงหน้า (จุด)	ค่าเกนพีรีวิว K_{pr}	ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่ความเร็ว ตามแนวการตัดค่าต่างๆ (mm)					
		0.005 m/s		0.015 m/s		0.025 m/s	
		แกน X	แกน Y	แกน X	แกน Y	แกน X	แกน Y
4	325	0.70	0.86	0.76	0.92	0.86	0.96
5	300	0.65	0.70	0.73	0.80	0.76	0.84
6	250	0.65	0.65	0.70	0.76	0.71	0.83
7	215	0.70	0.75	0.71	0.79	0.72	0.86

รูปที่ 17 ตารางแสดงผลการทดสอบค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่ระยะการมองล่วงหน้าค่าต่างๆ

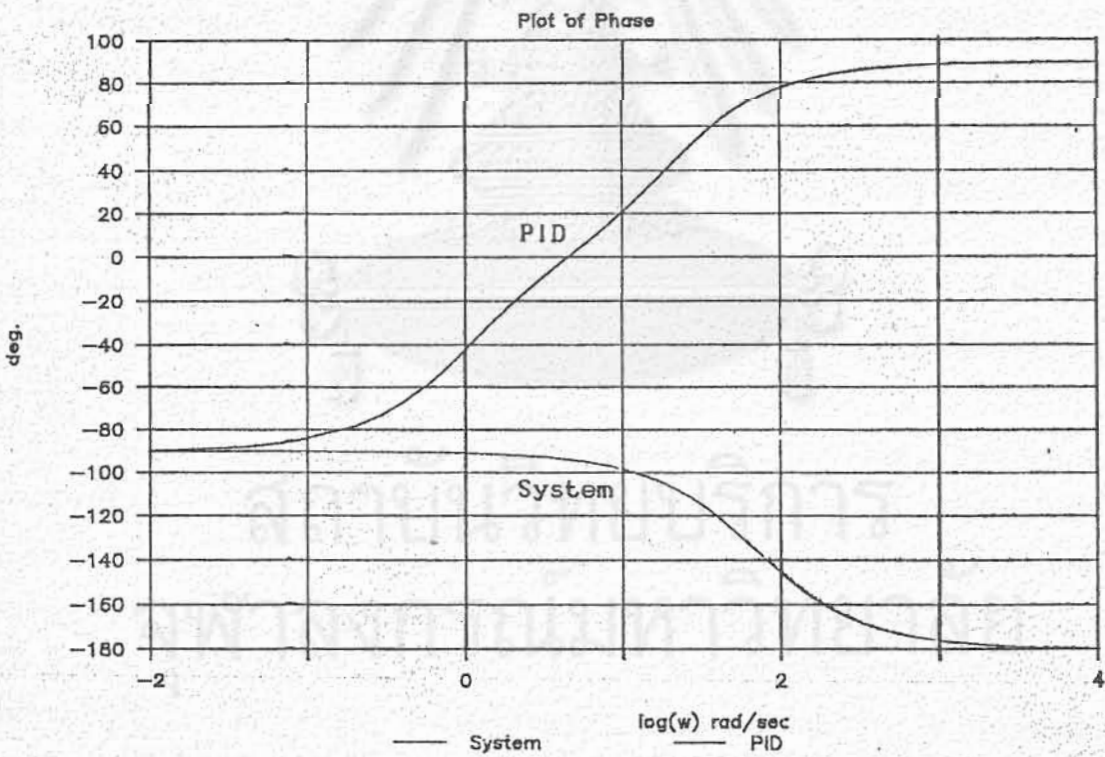
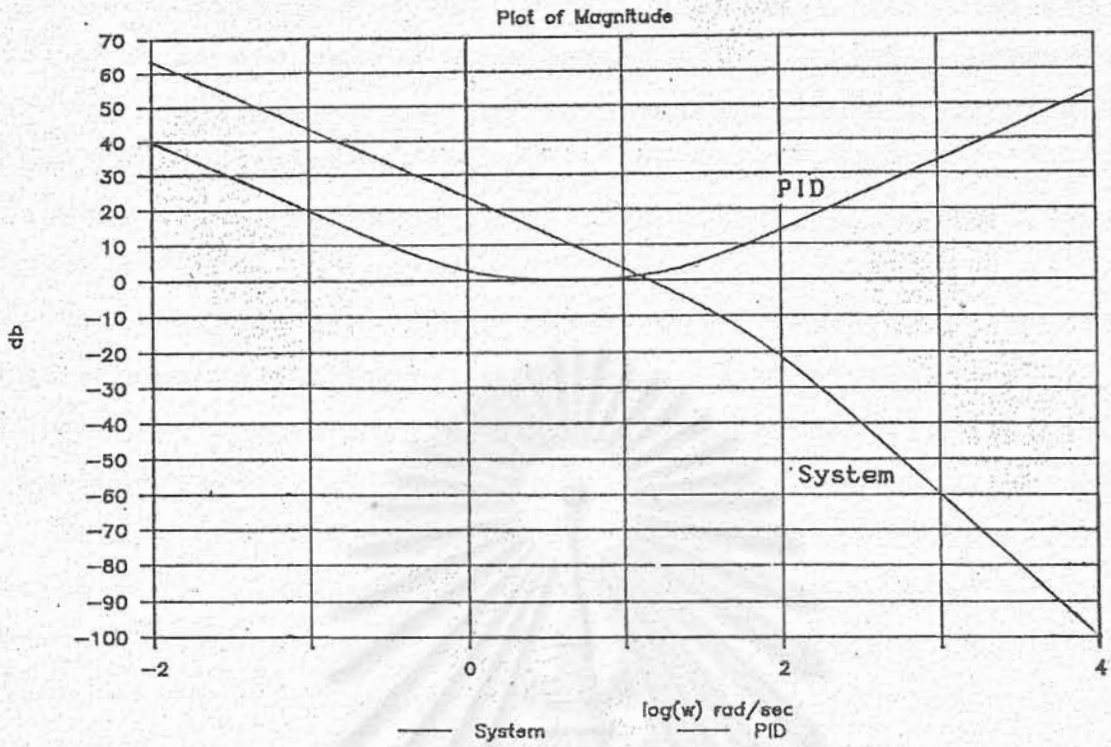
rad/sec เพื่อต้องการให้ได้ Phase Margin มีค่ามากเพียงพอ และเลือกค่า $1/T_1$ ให้มีค่าน้อยกว่าประมาณ 20 เท่า หลังจากนั้นก็จะทำการคำนวณหาค่าเกน K_p , K_i และ K_d ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ 27 ถึง 29 แล้วนำค่าเกนที่คำนวณได้ไปทำการทดสอบผลของการควบคุมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แล้วจึงค่อยนำไปทดสอบกับระบบจริง เพื่อตรวจสอบผลของค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็ว ในการพิจารณาเลือกค่า $1/T_D$ และ $1/T_1$ จะเลือกค่าที่ทำให้ระบบรวมมี Phase margin มีค่าน้อยไม่ต่ำกว่า 65 องศา นอกจากนี้แล้วในระบบควบคุมจะต้องมีสัญญาณควบคุมแบบพรีวิว ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับสัญญาณควบคุมแบบ พี ซึ่งจะทำให้การตอบสนองของระบบเกิด overshoot ขึ้น ฉะนั้นในการออกแบบระบบควบคุมนั้นจึงต้องออกแบบให้การตอบสนองต่อสัญญาณควบคุมตำแหน่งมีลักษณะเป็น Overdamp และลักษณะการตอบสนองของความเร็วของระบบมีลักษณะเป็นแบบ exponential decay

จากการทดลองเลือกค่า $1/T_D$ ให้มีค่าเท่ากับ 40 rad/sec และ $1/T_1$ มีค่า 0.8 rad/sec จะให้ค่าของ phase margin มีค่าเท่ากับ 100 องศา และค่า gain margin เป็นลบอนันต์ ถ้านำมาตรวจสอบดูตำแหน่งของ close-loop pole ซึ่งมีค่าเท่ากับ -84.141, -11.863 และ -0.848 จะเห็นว่าตำแหน่งของ poles อยู่ทางซ้ายของ s-plane แสดงว่าระบบนี้เสถียร (stable) และระบบมี close-loop pole อยู่บนแกน real แสดงว่าเป็นระบบ overdamp สำหรับผลของ frequency-response ของระบบแสดงดังรูปที่ 19

จากสมการที่ 27 ถึง 29 แทนค่า $1/T_D$ เท่ากับ 40 และ $1/T_1$ เท่ากับ 0.8 จะคำนวณหาค่า K_p , K_i และ K_d ได้ดังนี้คือ

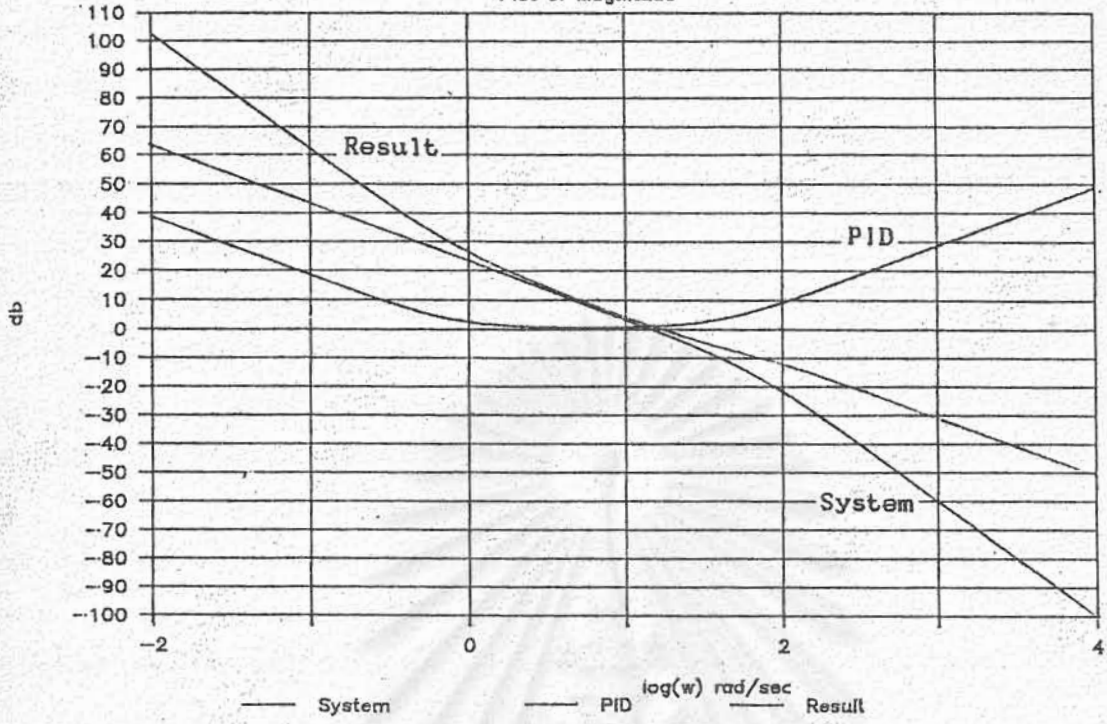
$$\begin{aligned} K_p &= 851.70 \\ K_i &= 668.00 \\ K_d &= 20.88 \end{aligned}$$

จากค่าเกนที่คำนวณได้ข้างบนนี้ นำไปทดสอบดูผลของค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและค่าความผิดพลาดของความเร็ว โดยใช้เวลาในการลุ่มค่า 20 msec ที่ความเร็วตามแนวการเคลื่อนที่ 0.015 m/s และการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงจากจุด $X=500$, $Y=500$ ไปยังจุด $X=540$ และ $Y=530$ ซึ่งผลของการเคลื่อนที่เมื่อทดสอบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงไว้ในรูปที่ 20 และ 21 ส่วนผลของการเคลื่อนที่เมื่อทดสอบกับระบบจริงแสดงไว้ในรูปที่ 22 และ 23

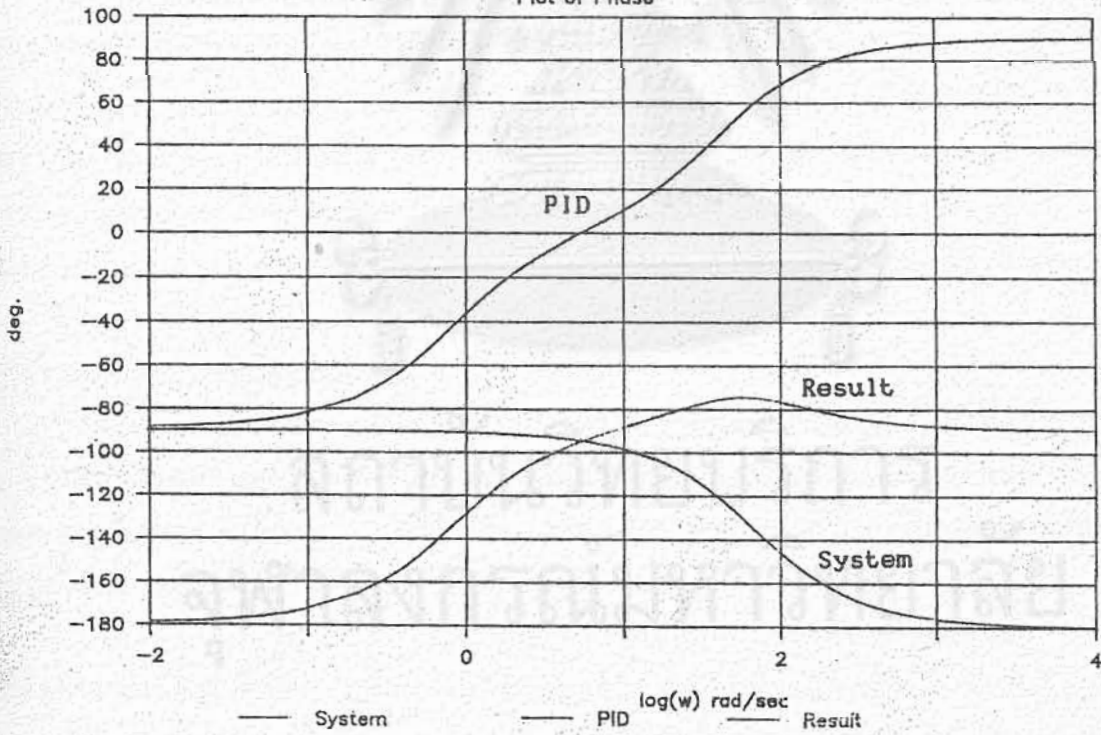


รูปที่.18 Bode plot ของระบบ $G(s)$ และระบบควบคุม พี.ไอ.ดี.

Plot of Magnitude



Plot of Phase



รูปที่ 19 Bode Plot ของระบบควบคุมที่ใช้ในการทดลอง

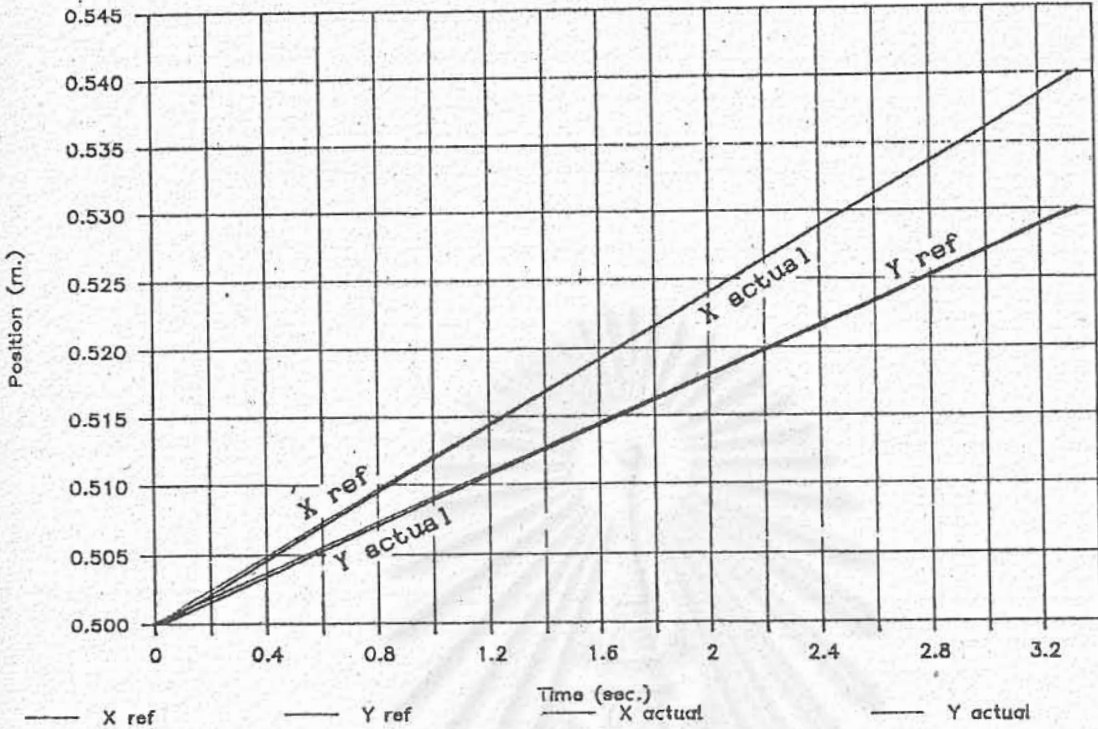
จากรูปที่ 20 และ 21 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดของตำแหน่งตามแนวการตัดที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่าน้อยกว่าค่าความผิดพลาดที่ได้จากระบบจริงดังในรูปที่ 22 และ 23 ทั้งนี้เพราะในระบบจริงมีค่า backlash ของชุดเฟืองทด ซึ่งเป็นเทอม nonlinear และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นไม่ได้รวมเทอมนี้เข้าไป และระบบควบคุมที่ทำการออกแบบนี้ก็ออกแบบโดยใช้แบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น ในรูปที่ 21 แสดงผลของความเร็วดตามแนวแกนการเคลื่อนที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งจะมี overshoot อยู่เล็กน้อย ส่วนผลของความเร็วยของระบบจริงแสดงไว้ในรูปที่ 23 จะมีลักษณะเป็นแบบ Exponential decay ตามต้องการ สาเหตุที่ผลของความเร็วยของแบบจำลองมีค่าแตกต่างจากระบบจริง เพราะในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ค่าโมเมนต์ของแรงเฉื่อยและค่าสัมประสิทธิ์ของวิสคอสแดมป์บิงที่ใช้ไม่ได้รวมค่าโมเมนต์ของแรงเฉื่อยและค่าสัมประสิทธิ์ของวิสคอสแดมป์บิงของชุดเฟืองทดเนื่องจากไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว ซึ่งเป็นสาเหตุอันหนึ่งที่ทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนระหว่างการจำลองการเคลื่อนที่กับการเคลื่อนที่จริง และสาเหตุอีกอันหนึ่งก็เนื่องจากแบบจำลองการคณิตศาสตร์นั้นไม่ได้รวมแบบจำลองของโครงสร้างจริง ดังได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งผลอันเนื่องมาจากโครงสร้างที่มีต่อการเคลื่อนที่นั้นจะขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่เป็นส่วนใหญ่ ถ้าวิ่งเร็วมากไป โครงสร้างจะถูกกระตุ้นให้มีการไหว ทำให้เกิดการผิดพลาดขึ้น

การออกแบบหาค่าเกนพีวีวี ในการหาค่าเกนพีวีวีจะใช้วิธีทดลองค่ากับระบบจริง เพราะยังไม่มีทฤษฎีเฉพาะในการหาค่าเกนนี้ โดยปกติแล้วจะเริ่มจากค่าที่ใกล้เคียงกับค่าของ Proportional gain K_p แล้วดูผลของค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่ความเร็วตามแนวการเคลื่อนที่ต่าง ๆ กัน โดยทดลองเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ 2 ตัว คือระยะทางในการมองไปข้างหน้าเป็นกึ่งจุด และค่าเกนของสัญญาณควบคุมพีวีวี สำหรับลักษณะของแนวทางเดินที่นำมาใช้ทดลองจะใช้ลักษณะทางเดินเป็นวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 24 โดยเริ่มต้นจากการลากเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมก่อน แล้วจึงวาดส่วนของวงกลมที่เหลือ

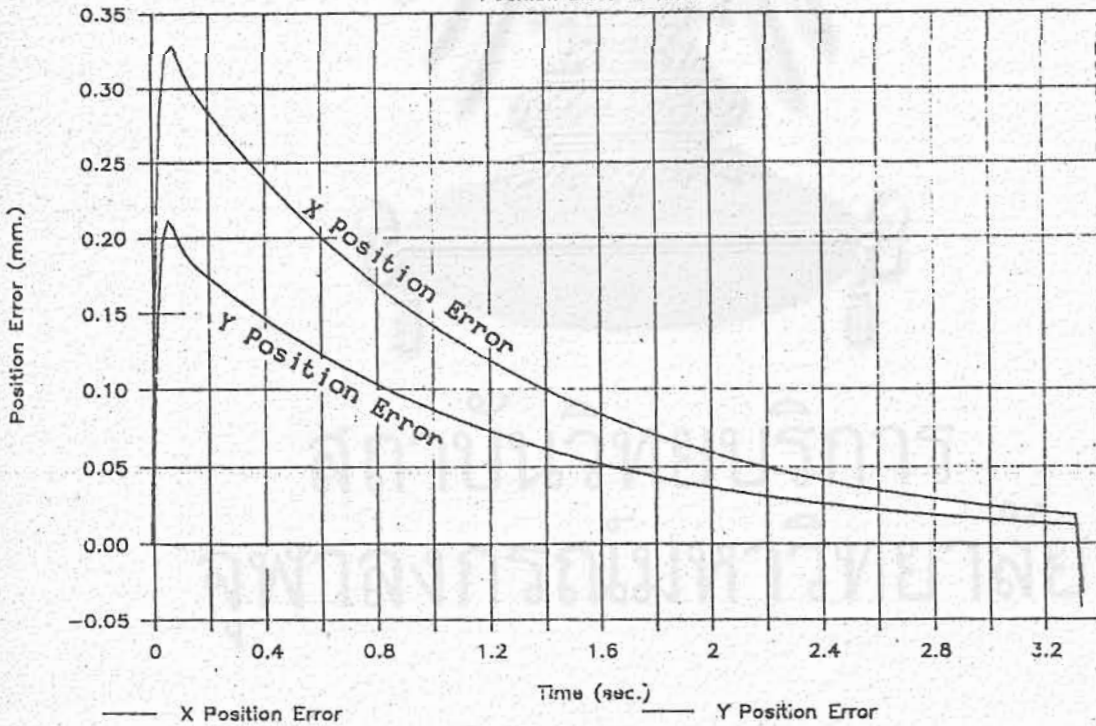
ในขั้นตอนแรกจะทดสอบหาค่าเกนพีวีวีของระยะทางในการมองไปล่วงหน้าค่าต่าง ๆ แล้วเลือกค่าเกนพีวีวีที่ให้ผลของค่าความผิดพลาดของตำแหน่งน้อยที่สุด หลังจากนั้นนำผลของการมองไปล่วงหน้าที่มีระยะทางต่าง ๆ กัน มาเปรียบเทียบกับค่าที่ให้ผลของค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด ซึ่งผลการเปรียบเทียบแสดงดังตารางในรูปที่ 17

จากตารางในรูปที่ 25 จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดที่ระยะการมองล่วงหน้า 6 จุด ที่มีค่าเกนพีวีวีเท่ากับ 250 จะให้ผลของความผิดพลาดน้อยที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่าเกนพีวีวี 250 ที่ระยะการมองล่วงหน้า 6 จุด สำหรับผลการเคลื่อนที่ของระบบควบคุมแบบ พี ไอ ดี ได้แสดงไว้ในรูปที่ 26 ส่วนรูปที่ 27 เป็นผลการเคลื่อนที่ของระบบควบคุมแบบ พี ไอ ดี พี โดยมีความเร็วดตามแนวการเคลื่อนที่ 0.015 m/s จะเห็นได้ว่า

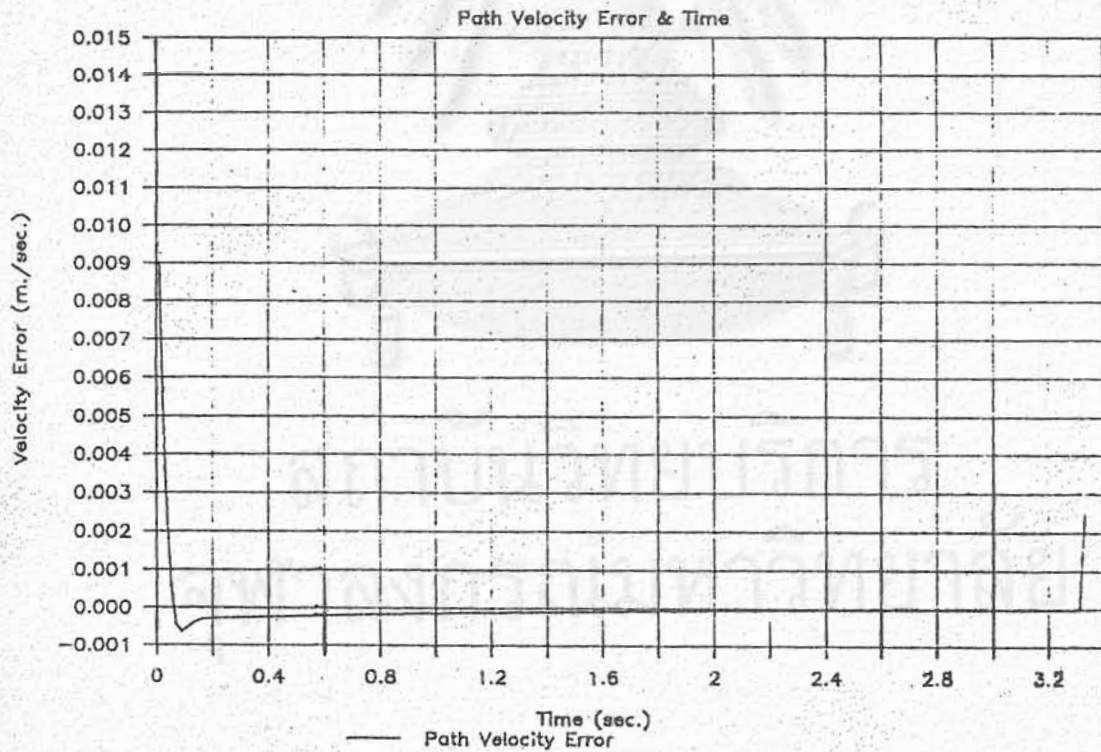
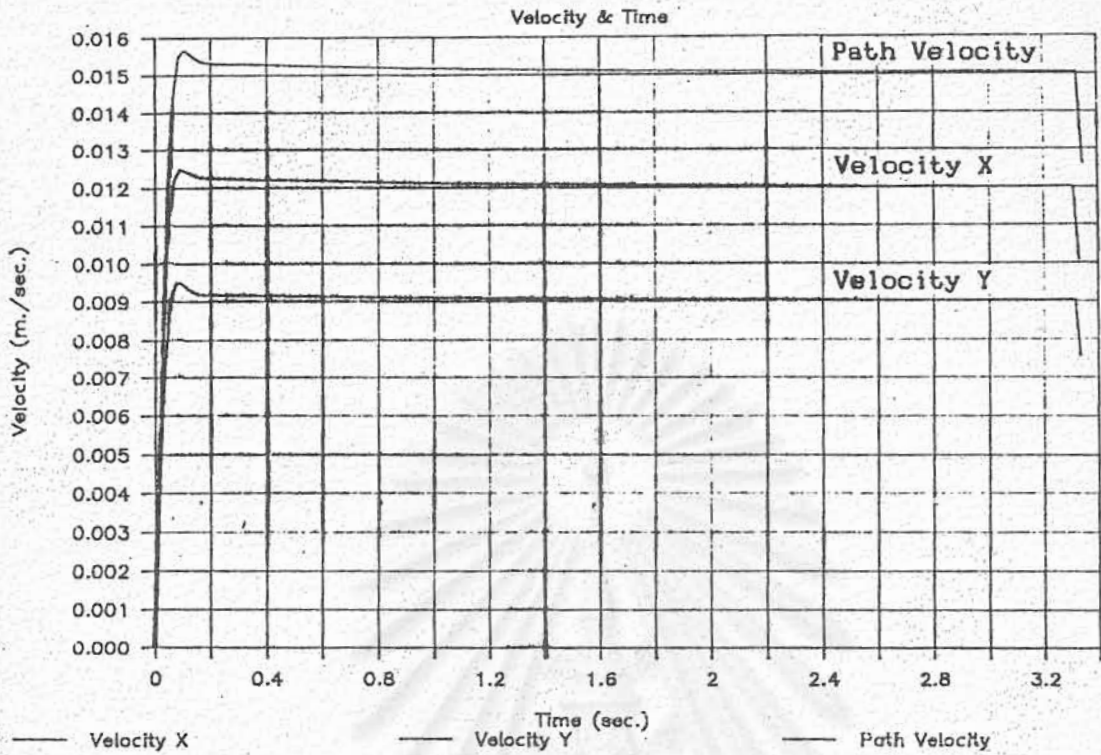
Position & Time



Position Error & Time

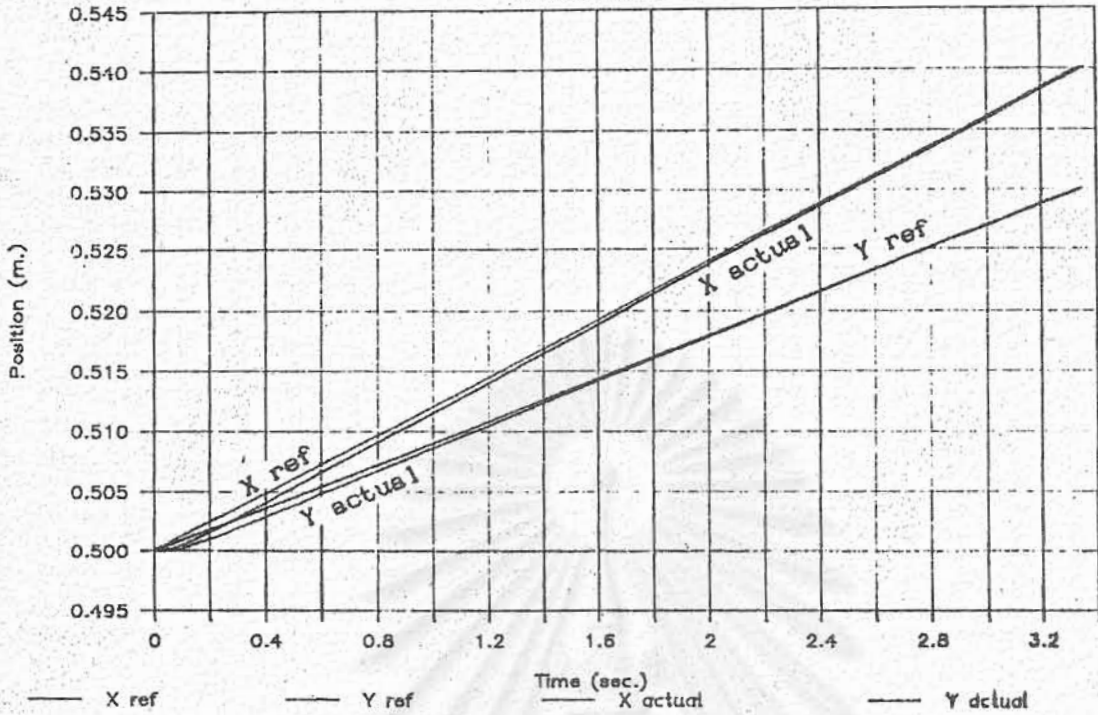


รูปที่ 20 กราฟแสดงตำแหน่งที่ได้จากแบบจำลองของการเคลื่อนที่ เป็นเส้นตรงของ โต๊ะตัดแผ่นเหล็กที่ความเร็ว 0.015 m/s

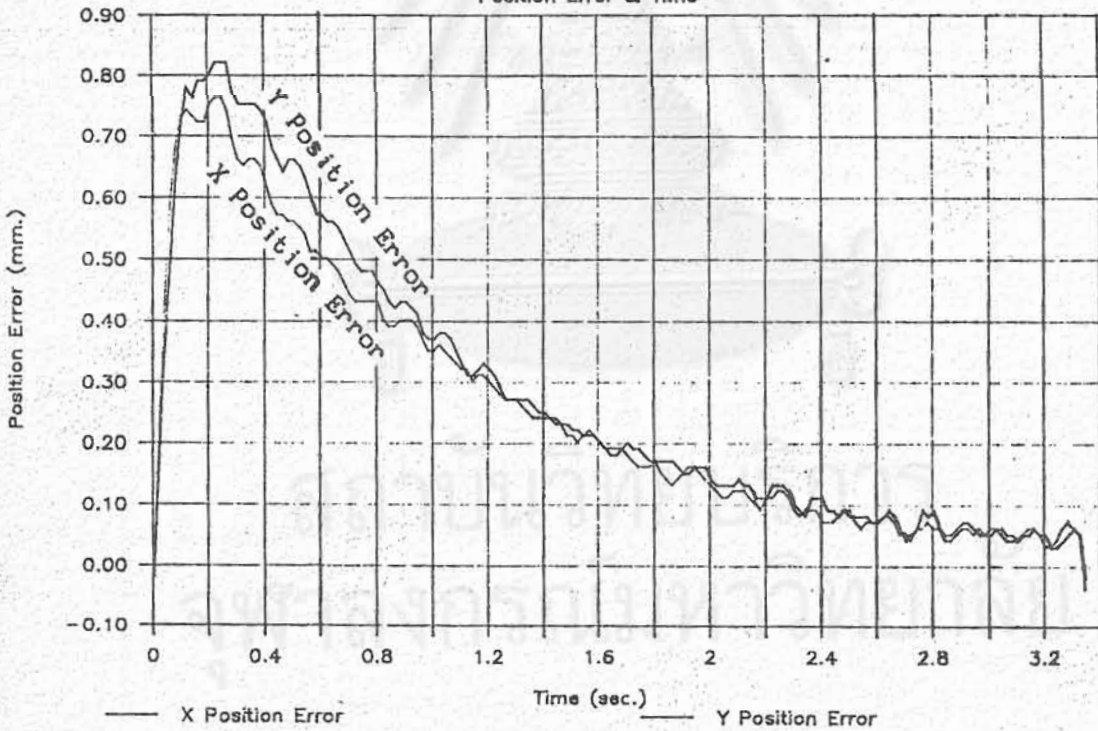


รูปที่ 21 กราฟแสดงความเร็วที่ได้จากแบบจำลองของการเคลื่อนที่
เป็นเส้นตรงของโต๊ะตัดแผ่นเหล็กที่ความเร็ว 0.015 m/s

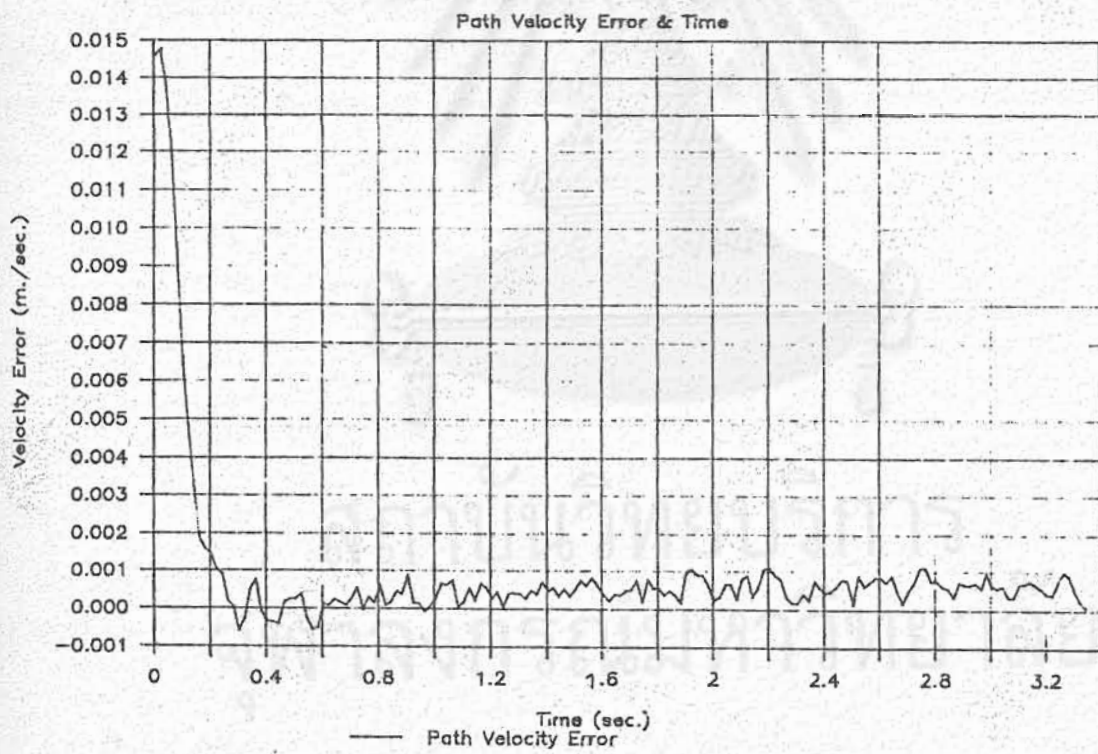
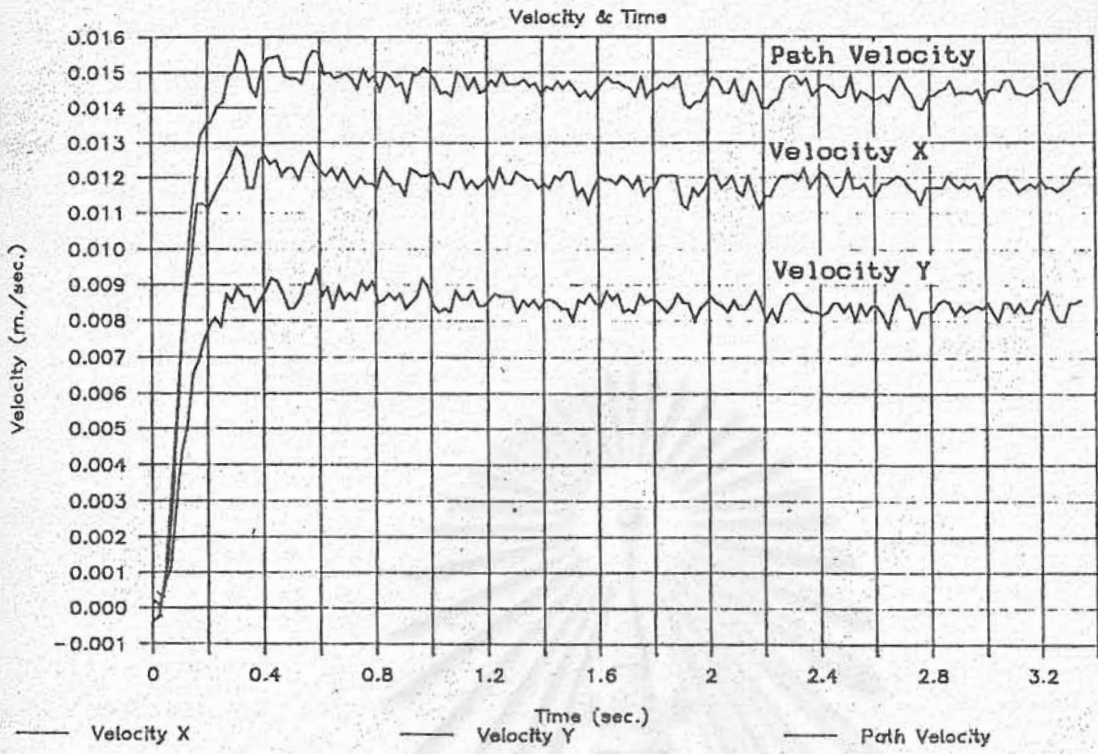
Position & Time



Position Error & Time



รูปที่ 22 กราฟแสดงตำแหน่งที่ได้จากการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง
ของโต๊ะตัดแผ่นเหล็กที่ความเร็ว 0.015 m/s



รูปที่ 23 กราฟแสดงความเร็วที่ได้จากการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง
ของโต๊ะตัดแผ่นเหล็กที่ความเร็ว 0.015 m/s

ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งก่อนการใช้สัญญาณควบคุมแบบพีวีวีในแนวแกน X จะมีค่า 1.13 mm และในแนวแกน Y จะมีค่า 1.47 mm ซึ่งเป็นค่าผิดพลาดของตำแหน่งที่มากที่สุด จะสังเกตได้ว่าค่าความผิดพลาดจะมีค่ามากในตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนทิศทางของการเคลื่อนที่ สำหรับค่าความผิดพลาดของตำแหน่งเมื่อมีการใช้สัญญาณควบคุมแบบพีวีวีในแนวแกน X จะมีค่า 0.70 mm และในแนวแกน Y จะมีค่า 0.76 mm สำหรับค่าสัญญาณควบคุมที่ใช้ในแต่ละครั้งของการสุ่มค่าจะหาได้จากสมการดังนี้คือ

$$m(n) = K_p * [R(n) - C(n)] + K_i * [(R(m) - C(m)) * dt] + K_d * [R(n) - C(n)] + K_{pr} * [R(n+6) - C(n)] \quad (35)$$

กำหนดให้

$$m(n) = \text{ค่าสัญญาณควบคุมที่เวลาในการสุ่มค่าครั้งที่ } n$$

$$R(n) = \text{จุดอ้างอิงที่เวลาในการสุ่มค่าครั้งที่ } n$$

$$C(n) = \text{ค่าตำแหน่งที่วัดได้ที่เวลาในการสุ่มค่าครั้งที่ } n$$

จากสมการที่ 35 จะสังเกตเห็นว่าสัญญาณควบคุมแบบพีวีวีจะมีลักษณะคล้ายกับสัญญาณควบคุมแบบ พี ถ้าให้ค่า K_p ของระบบควบคุมในรูปที่ 10 มีค่าตามสมการที่ 36 จะสามารถหาค่า close-loop pole ได้ตามสมการที่ 37 ถึง 39 และตำแหน่งของ pole ใน s-plane สามารถคำนวณหาได้ดังนี้คือ

$$K_{p_{eq}} = K_p + 6K_{pr} = 851.6 + 6 * 250 = 2351.7 \quad (36)$$

$$S_1 = -0.287 \quad (37)$$

$$S_2 = -48.283 + 24.942j \quad (38)$$

$$S_3 = -48.283 - 24.942j \quad (39)$$

จากค่าโพล (poles) ที่หาได้นี้สามารถนำมาหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบเชิงกลได้ดังนี้คือ

$$\omega_n = \sqrt{48.283^2 + 24.924^2} = 54.34 \text{ rad/sec}$$

$$\tau = 1 / \xi \omega_n = 3.48 \text{ sec}$$

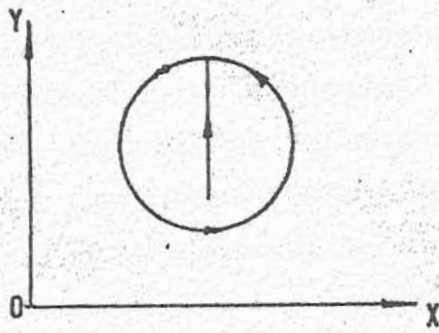
$$\tau_2 = 20.71 \quad \text{sec}$$

$$\xi = \cos(\theta)$$

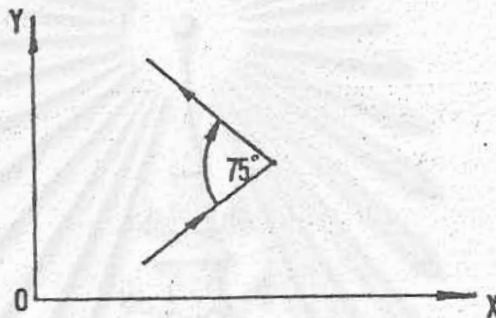
$$\xi = 0.888$$



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 24.A แสดงลักษณะของแนวทางเดินที่เป็นวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใช้ในการทดสอบหาค่าความแม่นยำ



รูปที่ 24.B แสดงลักษณะของแนวทางเดินที่เป็นเส้นตรงที่มีการหักมุมที่ใช้ในการทดสอบหาค่าความแม่นยำ

ความเร็วตามแนวการตัด (m/sec)	ค่าความผิดพลาดสูงสุด ^๑ ของตำแหน่ง (mm)		ค่าความผิดพลาดสูงสุด ^๒ ของความเร็วตามแนว การตัด (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

^๑ ค่าผิดพลาดในช่วงเริ่มต้นของการเคลื่อนที่แต่ละ

ในช่วงที่มีการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่

รูปที่ 25 ตารางแสดงผลการทดสอบความแม่นยำ ในการเคลื่อนที่เป็นวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความเร็วตามแนวการตัดต่างๆ

3. การทดลองและผลของการทดลอง

ในการทดลองเพื่อทดสอบดูความแม่นยำของการเคลื่อนที่ของหัวจับของโต๊ะตัดแผ่นเหล็กที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ ได้ทำการทดสอบให้ระบบเคลื่อนที่ตามแนวทางเดินที่กำหนดขึ้น 2 ลักษณะคือ แนวทางเดินที่เป็นวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางและแนวทางเดินที่เป็นเส้นตรงที่มีการหักมุม โดยทำการทดสอบและเก็บผลของตำแหน่งและผลของความเร็วก่อนที่เครื่องจริงนำมาเปรียบเทียบกับจุดอ้างอิงที่กำหนด เพื่อดูค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็ว ในการทดลองจะมีการทดสอบระบบที่ความเร็วตามแนวการตัดและขนาดของภาระต่าง ๆ โดยใช้เวลาในการสุ่มค่า 20 msec

3.1 การทดสอบเปลี่ยนความเร็วตามแนวทางเดิน

สำหรับค่าความเร็วที่จะทดสอบ จะพิจารณาจากความเร็วในการตัดของการตัดแผ่นเหล็กด้วยเปลวไฟซึ่งมีความสัมพันธ์กับขนาดของหัวตัดและความหนาของแผ่นเหล็ก จะเห็นว่าความเร็วสูงสุดที่ใช้ในการตัดมีค่าอยู่ในช่วงความเร็วประมาณ 32 inch/min (0.0135 m/sec) ดังนั้นในการทดสอบจะทำการทดลองที่ความเร็วตามแนวการตัด 3 ค่าคือที่ความเร็ว 0.005 m/s, 0.015 m/s และ 0.025 m/s โดยกำหนดลักษณะของแนวทางเดินเป็น 2 ลักษณะคือ เคลื่อนที่เป็นวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 24A และเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงที่มีการหักมุม 75 องศา ดังในรูปที่ 24B ซึ่งแสดงผลของค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็ว ตารางในรูปที่ 25A และ 25B แสดงถึงค่าผิดพลาดที่มีค่ามากที่สุดของการเคลื่อนที่ตามแนวการตัดของแกน X และแกน Y

จากตารางในรูปที่ 25A และ 25B จะเห็นได้ว่าที่ความเร็วตามแนวการตัดมีค่าต่ำ ๆ จะมีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและค่าความผิดพลาดของความเร็วน้อยกว่าค่าความผิดพลาดที่ความเร็วตามแนวการตัดที่มีค่าสูง ทั้งนี้เพราะระบบควบคุมที่ใช้ในการควบคุมมีลักษณะเป็นแบบ point to point ดังนั้นค่าเกินของสัญญาณควบคุมที่หาได้จะใช้ได้ดีที่ความเร็วช่วงหนึ่ง ซึ่งการออกแบบนั้นได้ออกแบบหาค่าเกินในช่วงความเร็วต่ำ ดังนั้นถ้าเรานำค่าเกินของสัญญาณควบคุมที่หาได้ไปใช้ควบคุมความเร็วในการตัดที่มีค่าสูงขึ้น ค่าความผิดพลาดก็จะมีค่าสูงขึ้น

จากรูปที่ 27 และ 28 เป็นกราฟแสดงผลการทดสอบการเคลื่อนที่เป็นรูปวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง โดยใช้ความเร็วการตัด 0.005 m/s จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดของตำแหน่งจะเกิดขึ้นในช่วงแรกของการเคลื่อนที่และช่วงที่มีการเคลื่อนที่กลับทิศทาง โดยเฉพาะในช่วงที่มีการเคลื่อนที่กลับทิศทางจะมีค่าความผิดพลาดสูงสุด ซึ่งสาเหตุมาจากในช่วงที่มีการกลับทิศทาง ระบบจะผ่านช่วง backlash ของชุดเฟืองทดซึ่งเป็นช่วง nonlinear โดยที่ชุดเฟืองทดของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนระบบในแนวแกน X มีช่วงของ backlash 0.32 มิลลิเมตร ส่วนชุดเฟืองทดของมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนระบบในแนวแกน Y มีช่วงของ backlash อยู่ประมาณ 0.35 มิลลิเมตร ซึ่งจะสังเกตได้จาก

กราฟในรูปที่ 6.3 จะเห็นได้ว่าจุดที่มีการเปลี่ยนโค้งของจุดอ้างอิง ค่าตำแหน่งของระบบที่เกิดขึ้นจริงจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงขนานกับแกนเวลา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าช่วงดังกล่าวระบบไม่มีการเคลื่อนที่ เพราะผ่านช่วง backlash ของชุดเฟืองทด

รูปที่ 28 เป็นกราฟแสดงผลของความเร็วของแต่ละแกน และผลของความเร็วตามแนวการตัด และค่าผิดพลาดของความเร็วตามแนวการตัด ซึ่งจะเห็นได้ว่าจุดที่ความผิดพลาดมากที่สุดคือจุดที่มีการเปลี่ยนทิศทางในการเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นผลมาจากความผิดพลาดของตำแหน่ง ทั้งนี้เพราะในการออกแบบระบบควบคุมความเร็ว ความถูกต้องของความเร็วจะขึ้นอยู่กับความถูกต้องของตำแหน่ง

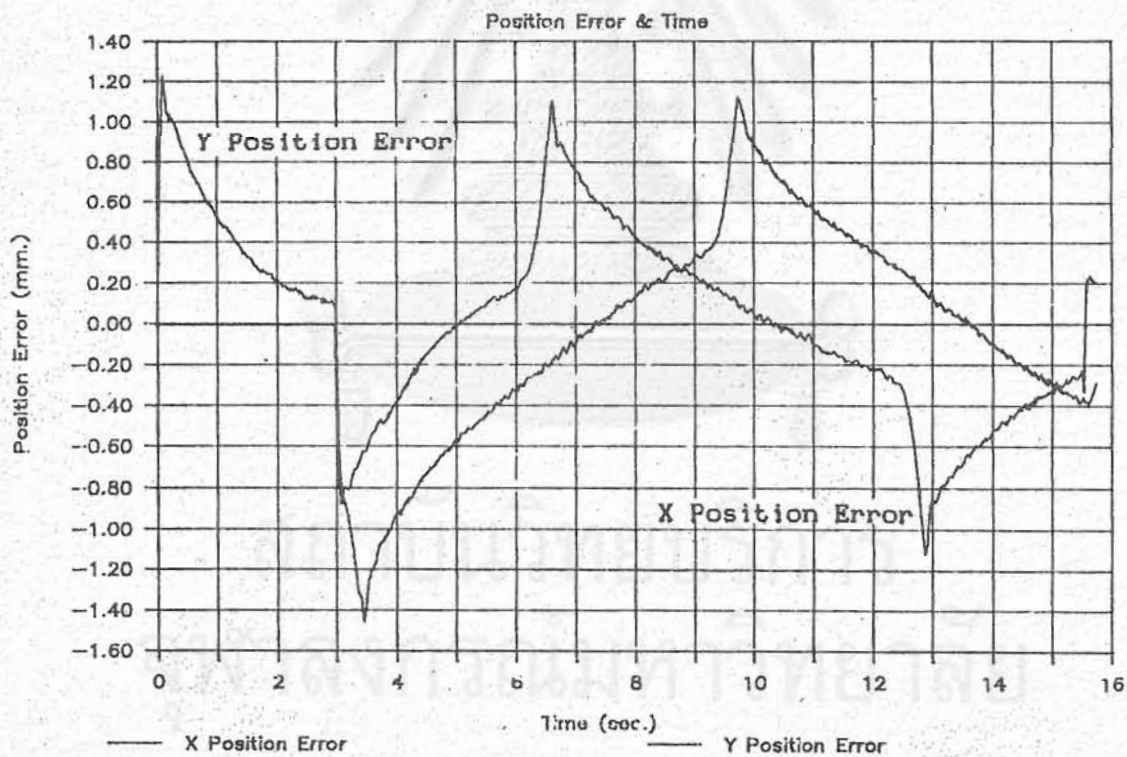
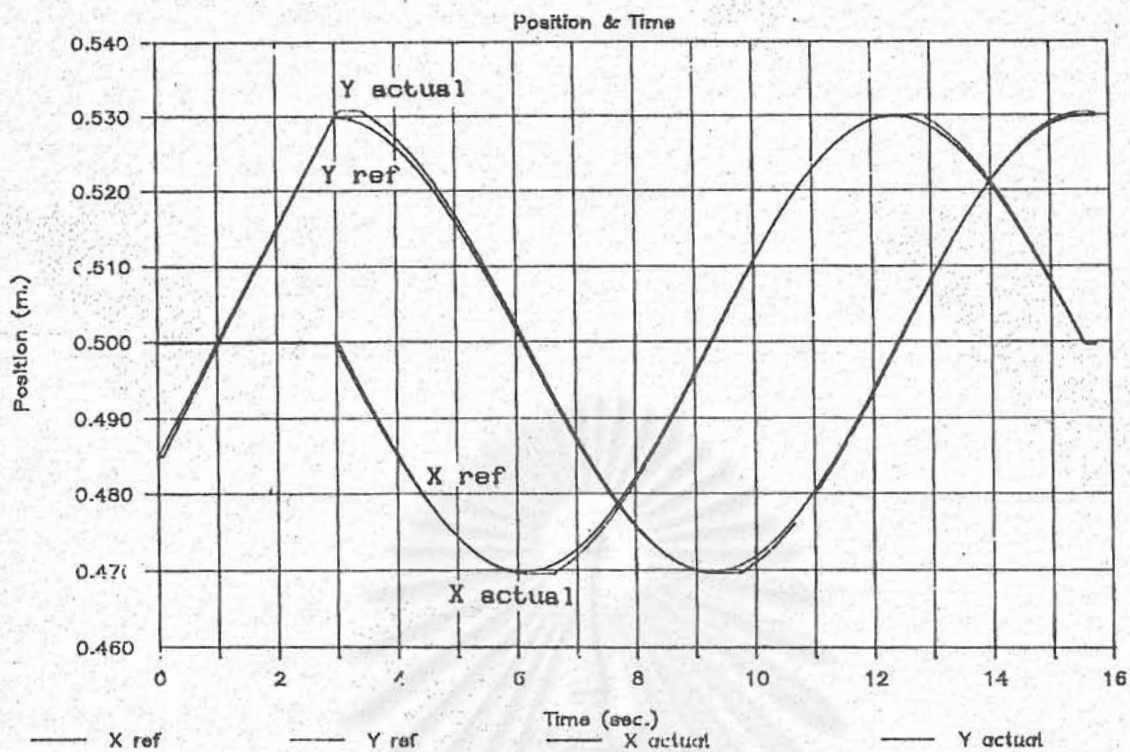
รูปที่ 29 และ 30 เป็นกราฟแสดงการทดสอบความแม่นยำเมื่อแนวทางเดินเป็นเส้นตรงที่มีการหักมุม 75 องศา โดยใช้ความเร็วในการตัด 0.015 m/s จะเห็นได้ว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่งที่มีการเคลื่อนที่กลับทิศทาง ซึ่งในกรณีของการเคลื่อนที่ของเส้นตรงที่มีการหักมุม ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่เกิดขึ้นจะมีทั้งผลจากค่า backlash ของชุดเฟืองทด และผลของโมเมนต์ของระบบแกน ในขณะที่การกลับทิศทางของการเคลื่อนที่เป็นวงกลมจะมีผลจากโมเมนต์ของระบบแกนน้อยกว่า ทั้งนี้เพราะการเคลื่อนที่เป็นวงกลมระบบมีการลดความเร็วลงจนถึงจุดที่เปลี่ยนทิศทางจะมีค่าความเร็วเป็นศูนย์ หลังจากนั้นค่าความเร็วก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นในทิศทางตรงข้าม

ความเร็วตามแนวการตัด (m/sec)	ค่าความผิดพลาดสูงสุด ^๓ ของตำแหน่ง (mm)		ค่าความผิดพลาดสูงสุด ^๓ ของความเร็วตามแนว การตัด (m/sec)
	แกน X	แกน Y	
0.005	0.66	0.31	0.0029
0.015	0.69	0.50	0.0072
0.025	0.74	0.71	0.0111

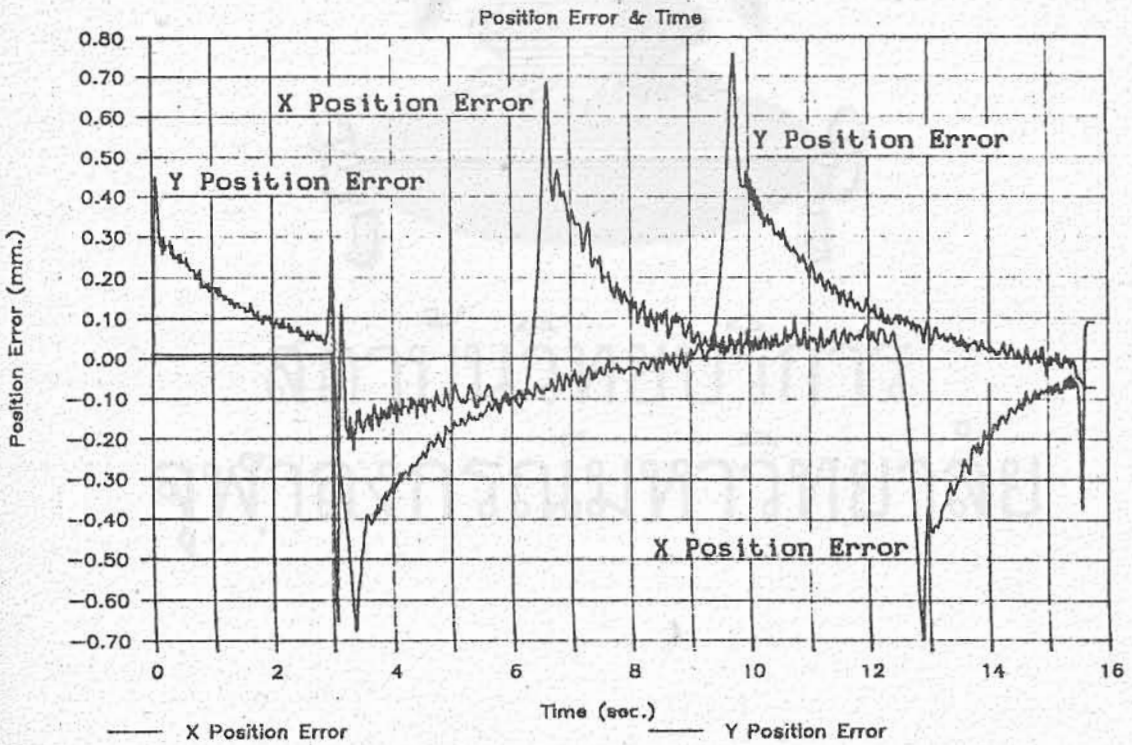
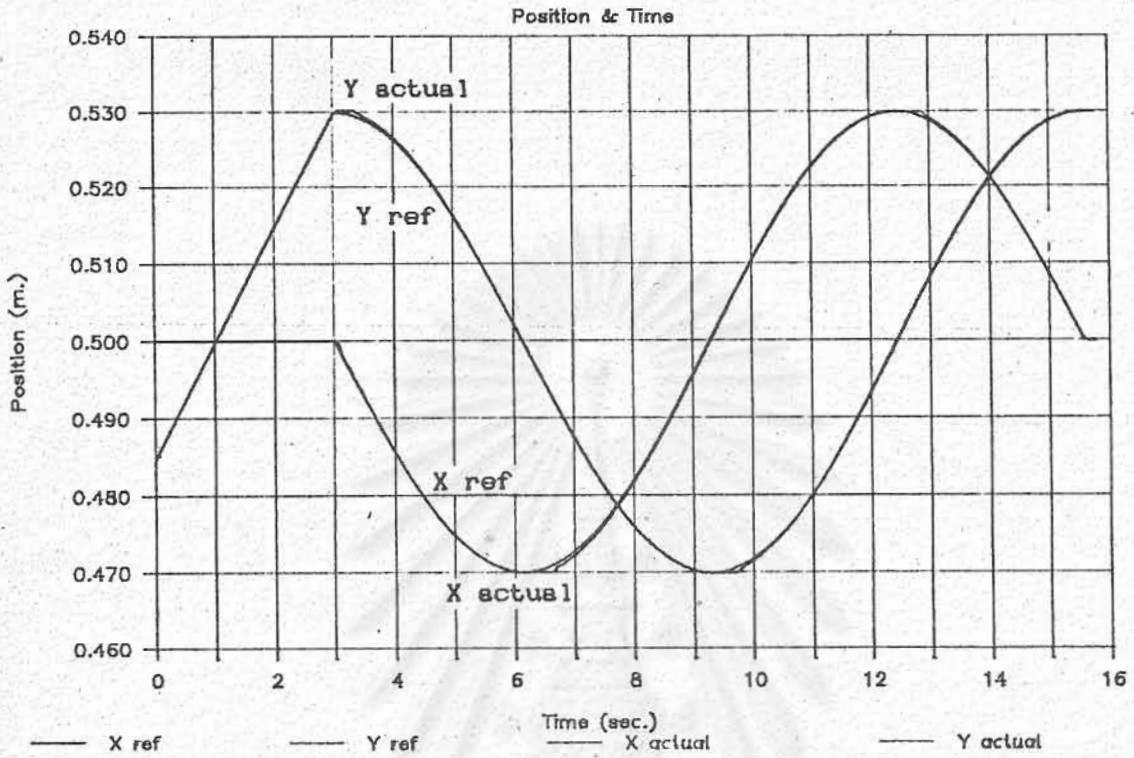
๓ ค่าผิดพลาดในช่วงเริ่มต้นของการเคลื่อนที่และ
ในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางของการเคลื่อนที่

รูปที่ 25.B ตารางแสดงผลการทดสอบความแม่นยำ ในการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง
ที่มีการหักมุม 75 องศา ที่ความเร็วตามแนวการตัดค่าต่างๆ

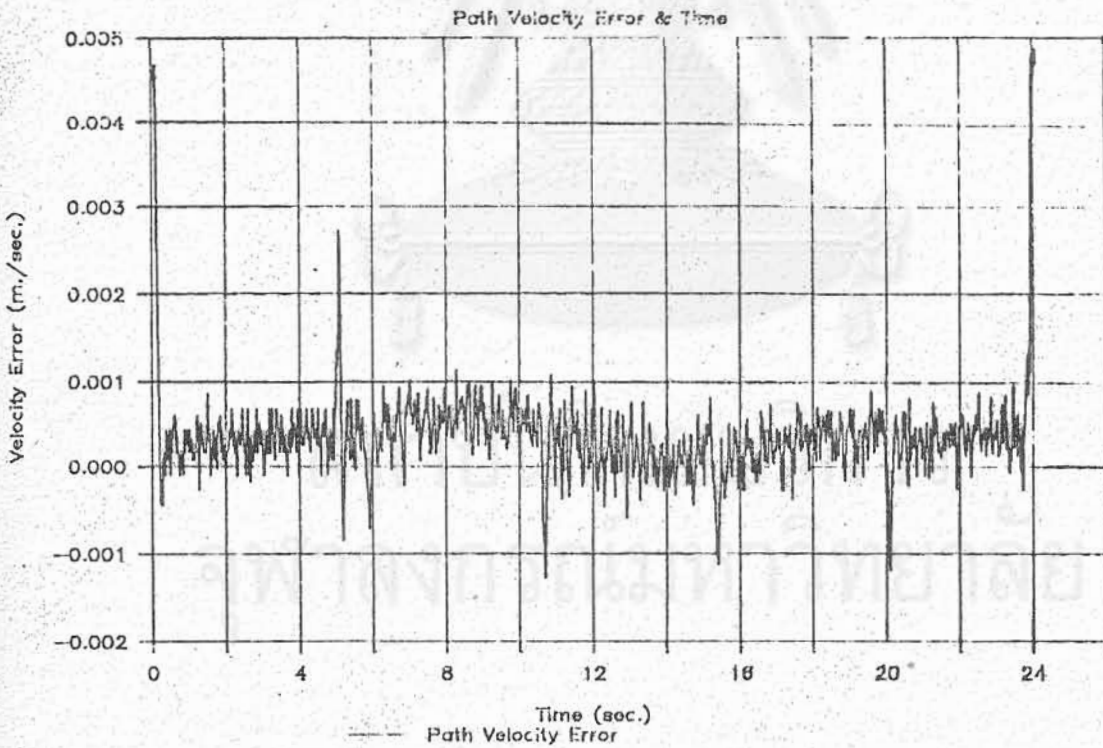
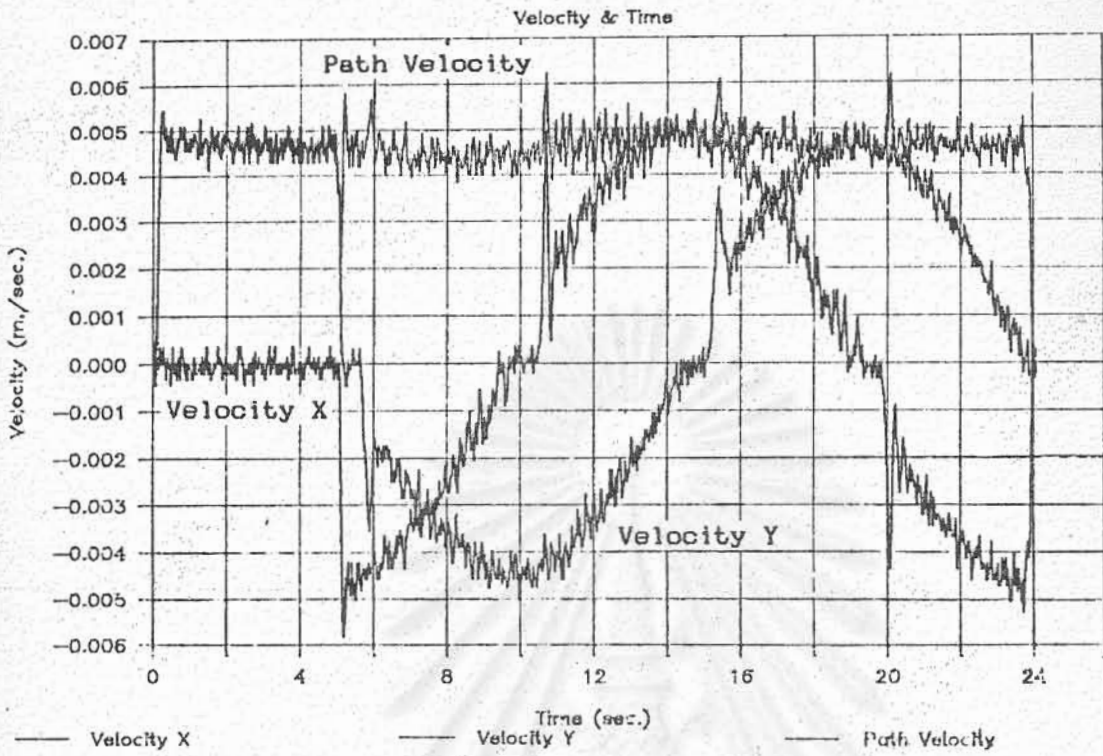
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



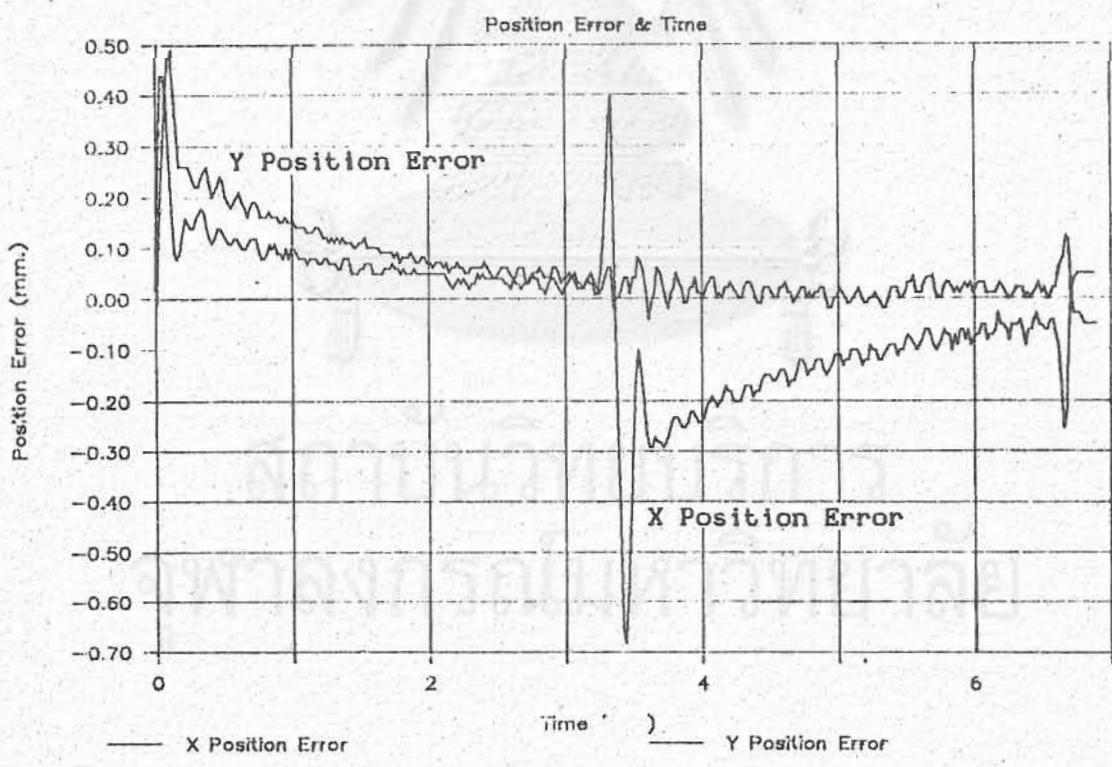
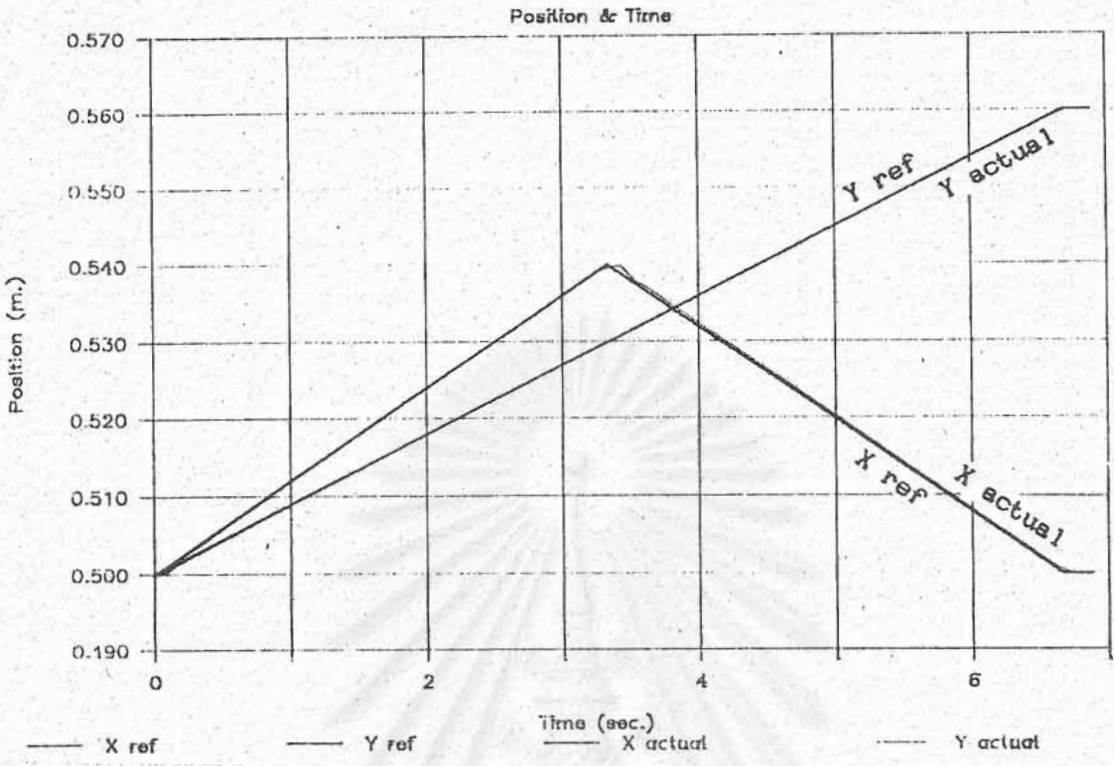
รูปที่ 26 กราฟแสดงตำแหน่งที่ได้จากการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของโต๊ะตัดแผ่น
เหล็กที่ความเร็ว 0.015 m/s โดยใช้การควบคุมแบบ พี.ไอ.ดี.



รูปที่ 27 กราฟแสดงตำแหน่งที่ได้จากการเคลื่อนที่เป็นวงกลมของโต๊ะตัดแผ่น
เหล็กที่ความเร็ว 0.015 m/s โดยใช้การควบคุมแบบ พี.ไอ.ดี.พี

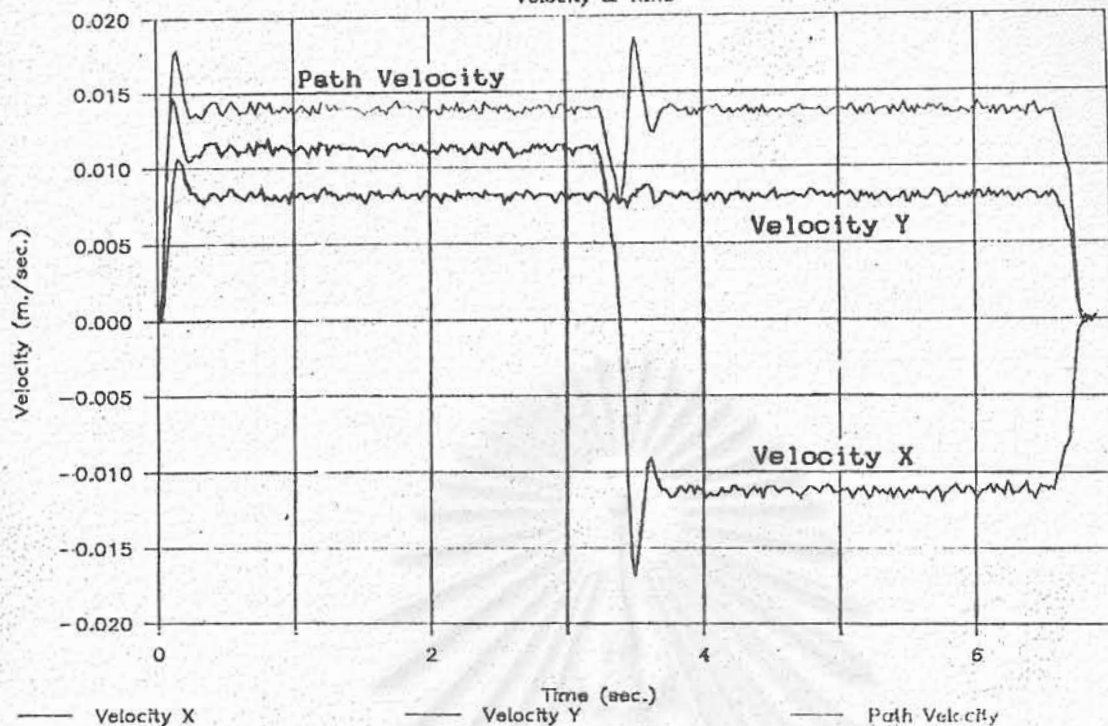


รูปที่ 28 กราฟแสดงความเร็วที่ได้จากการเคลื่อนที่เป็นวงกลม
ของโต๊ะตัดแผ่นเหล็กที่ความเร็ว 0.005 m/s

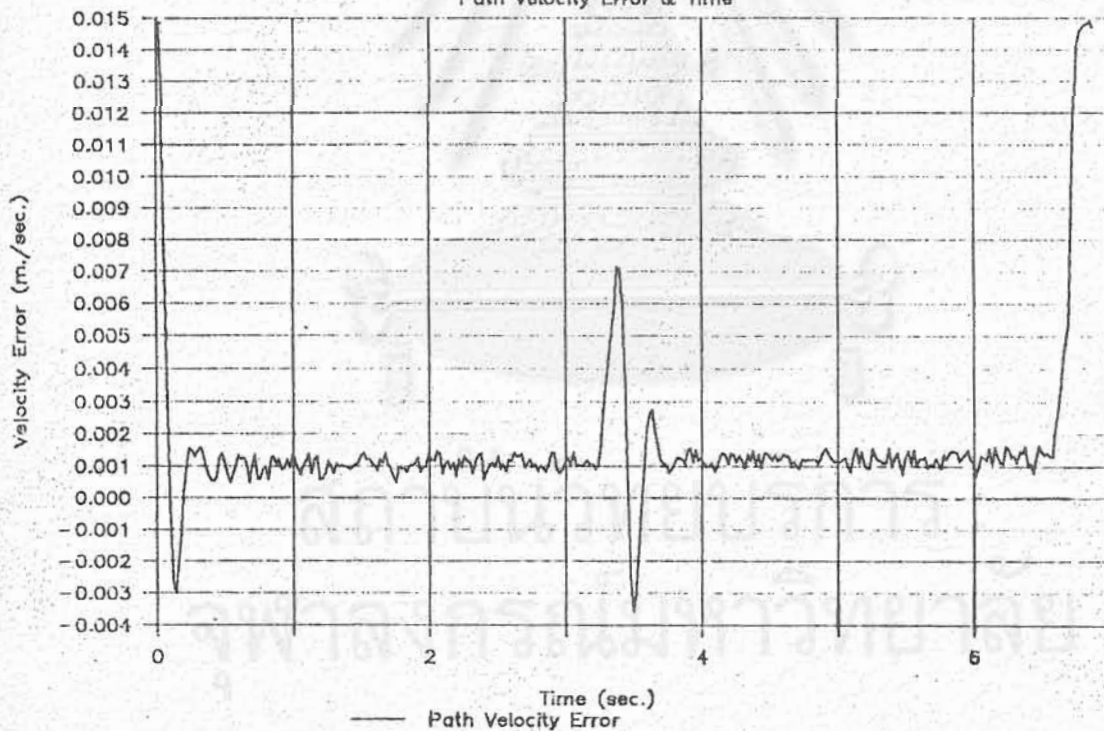


รูปที่ 29 กราฟแสดงตำแหน่งที่ได้จากการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงที่มี
การหักมุมของโต๊ะตัดแผ่นเหล็กที่ความเร็ว 0.015 m/s

Velocity & Time



Path Velocity Error & Time



รูปที่ 30. กราฟแสดงความเร็วที่ได้จากการเคลื่อนที่เส้นตรงที่มี
การหักมุมของโต๊ะตัดแผ่นเหล็กที่ความเร็ว 0.015 m/s

ความเร็ว ตามแนว การตัด (m/s)	ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วที่ภาระขนาดต่างๆ *								
	5 kg			7.5 kg			10 kg		
	ค่าผิดพลาด ของตำแหน่ง (mm)		ค่าผิดพลาด ของความเร็ว (m/s)	ค่าผิดพลาด ของตำแหน่ง (mm)		ค่าผิดพลาด ของความเร็ว (m/s)	ค่าผิดพลาด ของตำแหน่ง (mm)		ค่าผิดพลาด ของความเร็ว (m/s)
	X	Y		X	Y		X	Y	
0.005	0.36	0.35	0.0015	0.40	0.36	0.0016	0.51	0.41	0.0036
0.015	0.43	0.41	0.0023	0.45	0.43	0.0024	0.57	0.46	0.0048
0.025	0.85	0.57	0.0119	0.87	0.60	0.0126	0.92	0.89	0.0156

* ค่าผิดพลาดในช่วงเริ่มต้นของภาระเคลื่อนที่

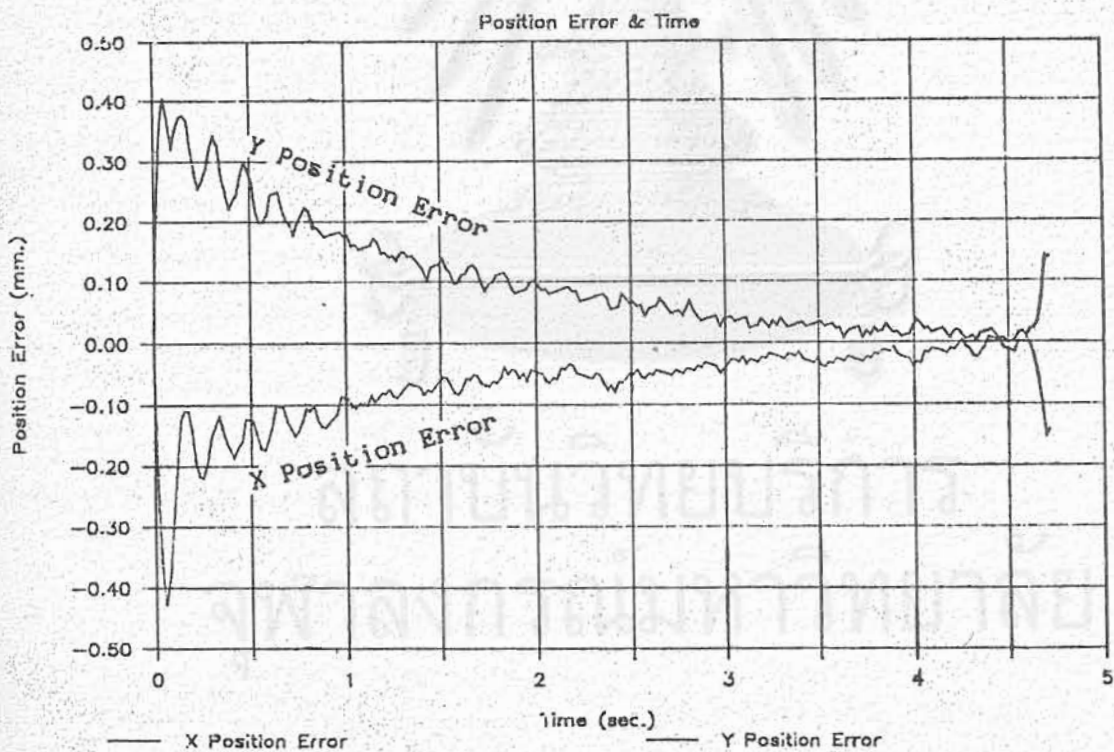
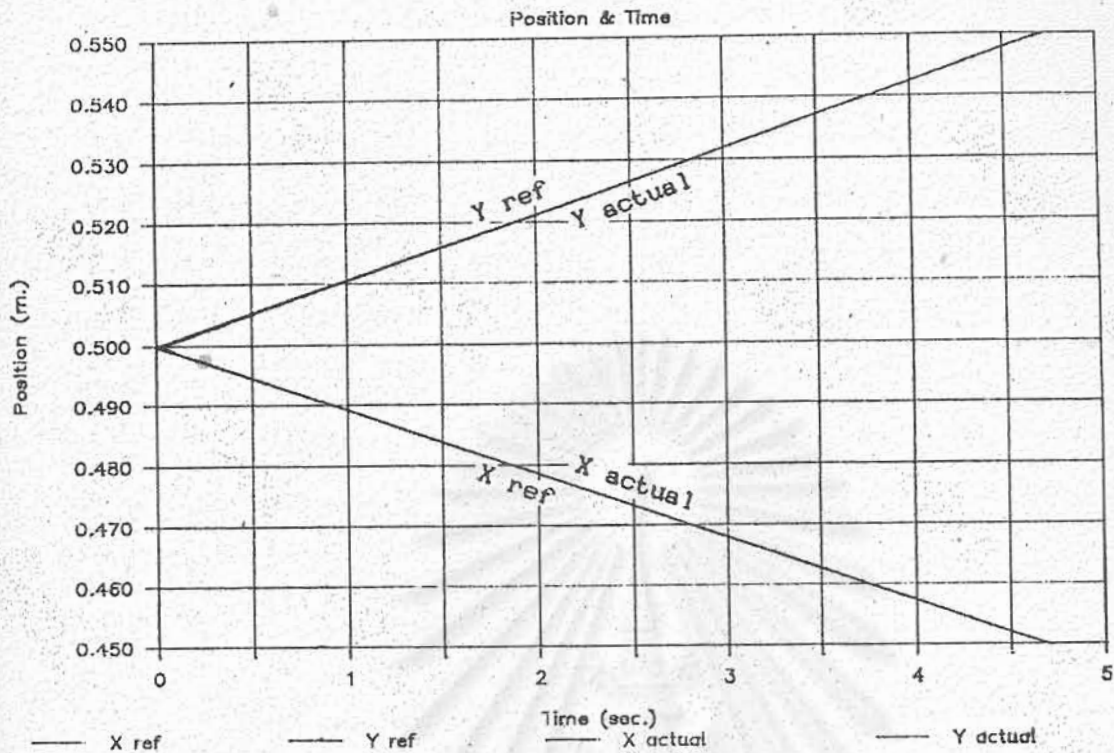
รูปที่ 31 ตารางแสดงผลการทดสอบความแม่นยำในการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงที่มี
ค่าความชันเท่ากับ 1 ที่ภาระและความเร็วตามแนวการเคลื่อนที่ค่าต่างๆ

3.2 การทดลองเปลี่ยนภาระ

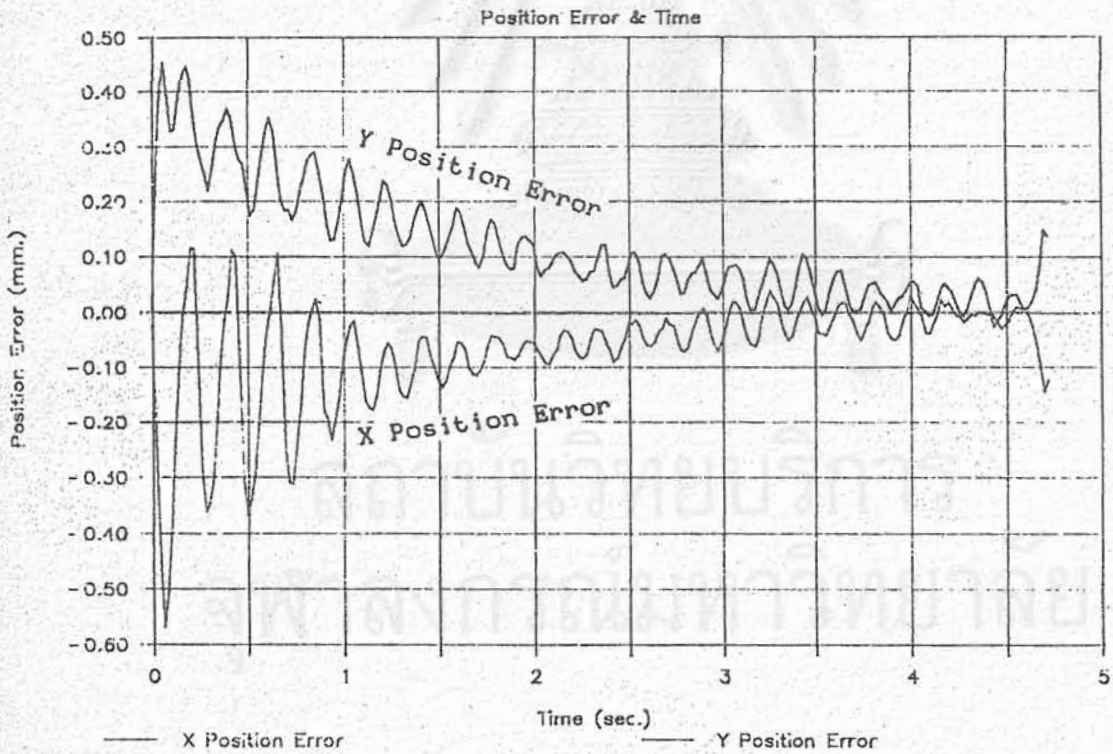
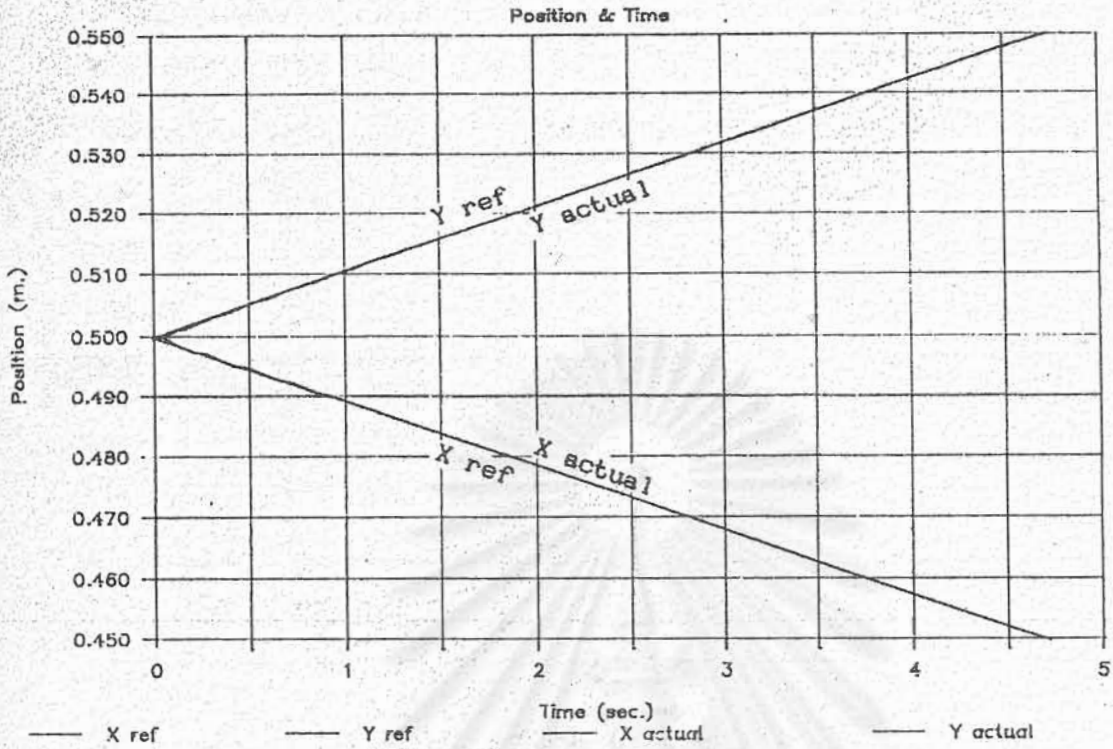
การทดลองเปลี่ยนภาระนี้ก็เพื่อที่จะต้องการคุณสมบัติของระบบควบคุมแบบปิดที่ได้ ออกแบบนี้ไว้ว่ามีความสามารถในการปรับระบบมากน้อยแค่ไหนเมื่อภาระเปลี่ยน ระบบควบคุมถูกออกแบบมาโดยสมมติว่าไม่มีภาระอื่นที่ปลายแขน นอกจากภาระเนื่องจากโครงสร้างเอง การทดลองจะทำการเปลี่ยนขนาดของภาระเป็น 5 kg, 7.5 kg และ 10 kg โดยมีแนวการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงที่มีค่าความชัน (slope) เท่ากับ 1 มีความเร็วตามแนวการตัด 0.005 m/s, 0.015 m/s และ 0.025 m/s ซึ่งผลของการทดลองแสดงไว้ในตารางในรูปที่ 31

จากตารางในรูปที่ 31 จะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อความเร็วตามแนวการตัดและขนาดของภาระมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและค่าความผิดพลาดของความเร็วจะมีค่ามากขึ้น

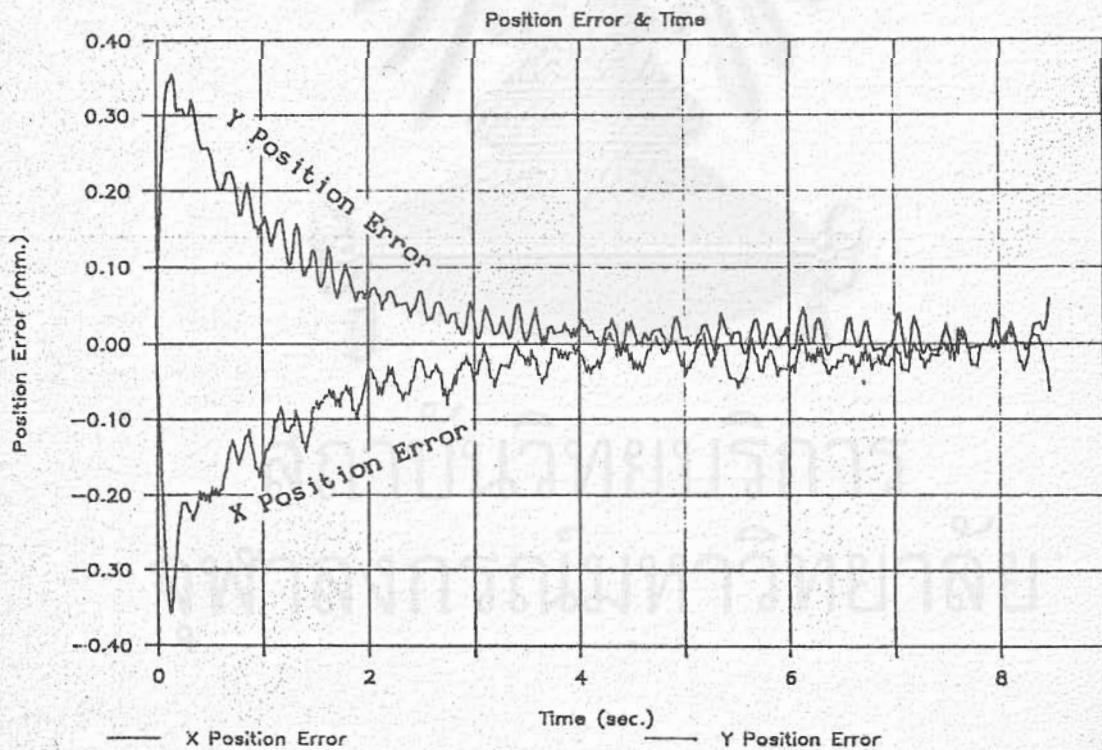
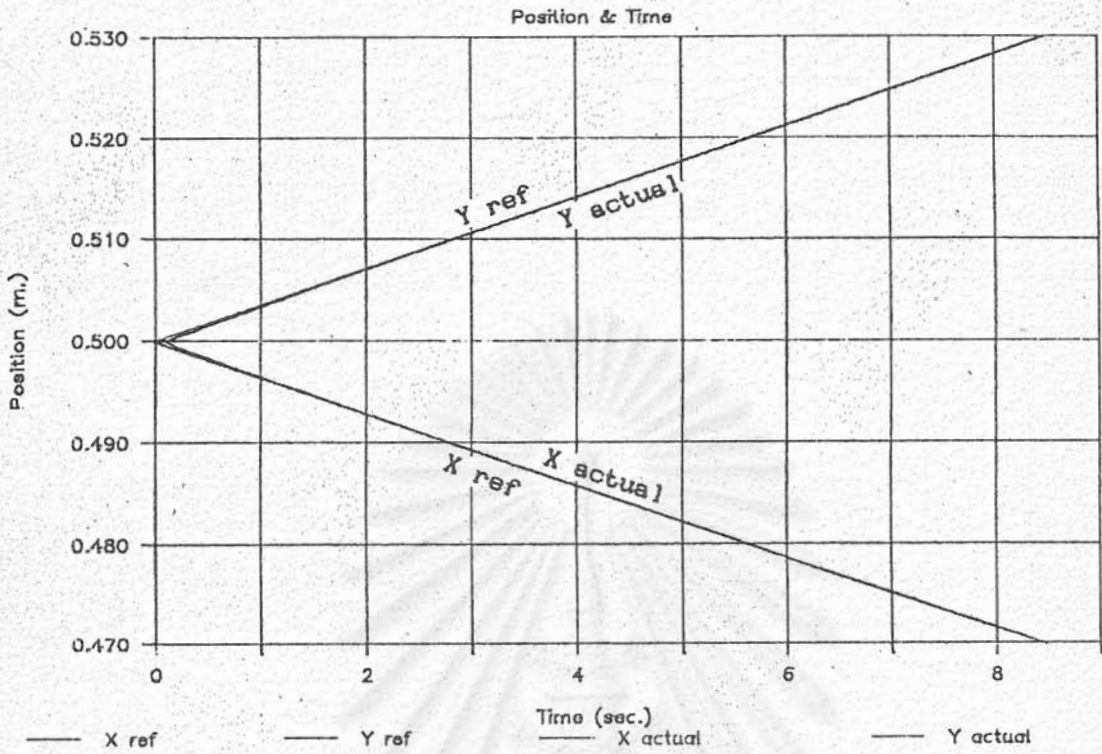
จากกราฟแสดงผลการเคลื่อนที่และค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง เมื่อมีการเพิ่มขนาดของภาระ 5 kg, 10 kg ที่ความเร็วตามแนวการตัด 0.005 m/s ดังแสดงในรูปที่ 34 และ 35 และที่ความเร็วตามแนวการตัด 0.015 m/s ดังแสดงในรูปที่ 32 และ 33 ซึ่งจะเห็นได้ว่าคุณค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเป็นค่าความผิดพลาดในช่วงเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ และเมื่อมีการเพิ่มขนาดของภาระให้มีค่ามากขึ้นค่าผิดพลาดในช่วงเริ่มต้นก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นและจะมีการสั่นในช่วงเริ่มต้นของการเคลื่อนที่มากขึ้นด้วย ทั้งนี้เพราะในการเพิ่มขนาดของภาระจะมีผลต่อค่า static friction ของระบบและค่าความยืดหยุ่นของลวดสลิงที่ใช้เป็นระบบขับเคลื่อน ทำให้ระบบมีการสั่นในช่วงเริ่มต้นของการเคลื่อนที่



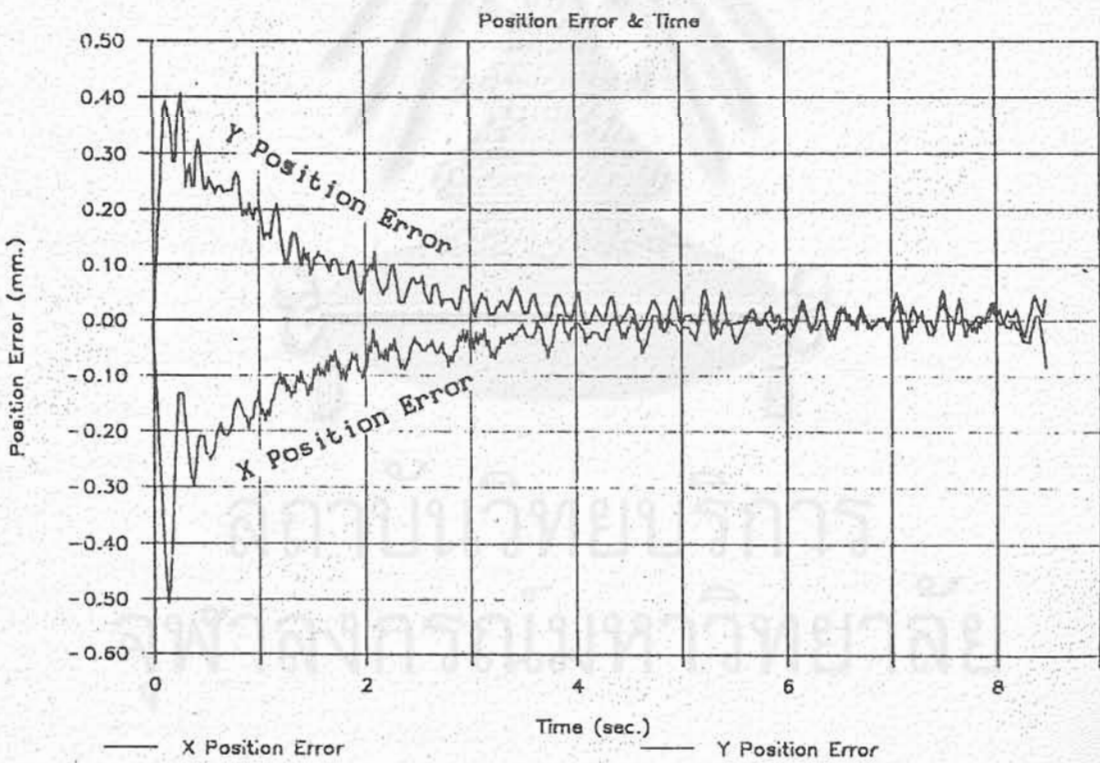
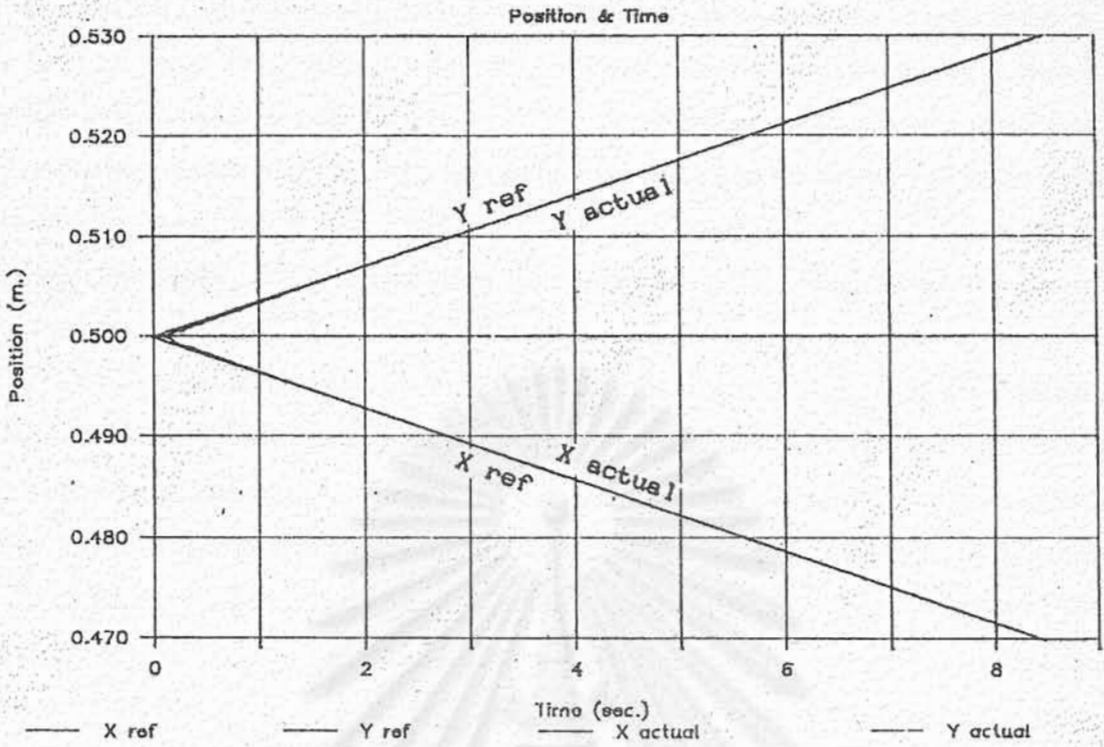
รูปที่ 32 กราฟแสดงตำแหน่งที่ได้จากการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงของโต๊ะ
ตัดผ่านเหล็กที่ความเร็ว 0.015 m/s ที่มีภาระเพิ่มขึ้น 5 กก



รูปที่ 33 กราฟแสดงตำแหน่งที่ได้จากการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงของโต๊ะ
ตัดแผ่นเหล็กที่ความเร็ว 0.015 m/s ที่มีภาระเพิ่มขึ้น 10 Kg



รูปที่ 34 กราฟแสดงตำแหน่งที่ได้จากการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงของโต๊ะ
ตัดแผ่นเหล็กที่ความเร็ว 0.005 m/s ที่มีภาระเพิ่มขึ้น 5 ครง



รูปที่ 35 กราฟแสดงตำแหน่งที่ได้จากการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงของโต๊ะ
ตัดแผ่นเหล็กที่มีความเร็ว 0.005 m/s ที่มีภาระเพิ่มขึ้น 10 กก

4. สรุป

โต๊ะตัดแผ่นเหล็กที่ควบคุมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีระบบควบคุมแบบปิดชนิด พี ไอ ซี พี นี้สามารถทำงานได้อยู่ในขั้นที่น่าพอใจ ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่จากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งก็ขึ้นอยู่กับชุดเฟืองทดที่ติดตั้งอยู่บนแกนต่อระหว่างมอเตอร์กับแกนลูกโลกที่ขับมากกว่า ชุดเฟืองทดที่ใช้ก็มี Backlash ค่อนข้างสูงซึ่งจะเป็นผลให้ระบบที่จะควบคุมไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear system) จากผลการทดลองเห็นว่าระบบควบคุมที่ออกแบบมาทำงานได้ดีในช่วงที่กว้างพอสมควร ซึ่งถ้าสามารถลดความผิดพลาดที่เกิดจากชุดเฟืองทดนี้ได้ ก็จะทำให้ระบบสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

การพิจารณาถึงความต้องการของความแม่นยำในการเคลื่อนที่ของโต๊ะตัดแผ่นเหล็ก เนื่องจากการพัฒนาขึ้นเพื่อนำไปใช้ในการตัดแผ่นเหล็กโดยใช้เปลวไฟ ซึ่งมีช่วงความเร็วในการเคลื่อนที่ตามแนวการตัดไม่เกิน 0.015 m/s และจากการทดสอบความแม่นยำของระบบควบคุมพบว่าความผิดพลาดของตำแหน่ง เมื่อการเคลื่อนที่เป็นรูปร่างกลมที่มีความเร็วตามแนวการตัด 0.015 m/s มีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งน้อยกว่า 0.70 มิลลิเมตรในแนวแกน X และ 0.76 มิลลิเมตรในแนวแกน Y โดยใช้ค่าเกนของสัญญาณควบคุม $K_p = 851.7$, $K_i = 668$, $K_{dr} = 250$ ที่ระยะทางในการมองล่วงหน้า 6 จุด ซึ่งผลของค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะมีค่าความผิดพลาดสูง เมื่อการเคลื่อนที่ที่มีการกลับทิศการหมุนของมอเตอร์ ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากชุดเฟืองทดที่ใช้มี backlash ซึ่งเป็นช่วง nonlinear โดยที่ชุดเฟืองทดของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนระบบในแนวแกน X มีช่วงของ backlash 0.32 มิลลิเมตร ส่วนชุดเฟืองทดของมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนระบบในแนวแกน Y มีช่วงของ backlash 0.35 มิลลิเมตร

สำหรับค่าความผิดพลาดกับการเปลี่ยนความเร็วตามแนวการเคลื่อนที่ จากการทดลองพบว่า เมื่อความเร็วตามแนวการเคลื่อนที่มีค่าสูงขึ้น ค่าความผิดพลาดจะสูงขึ้น เนื่องจากระบบควบคุมตำแหน่งและความเร็วที่ใช้ในการควบคุมมีลักษณะเป็นแบบ point-to-point ซึ่งระบบการควบคุมแบบนี้จะให้ผลของการควบคุมที่ดีเฉพาะการเคลื่อนที่ที่ความเร็วไม่สูงมาก ส่วนที่ความเร็วสูงผลของการเคลื่อนที่จะมีค่า offset เกิดขึ้นตามแนวการเคลื่อนที่

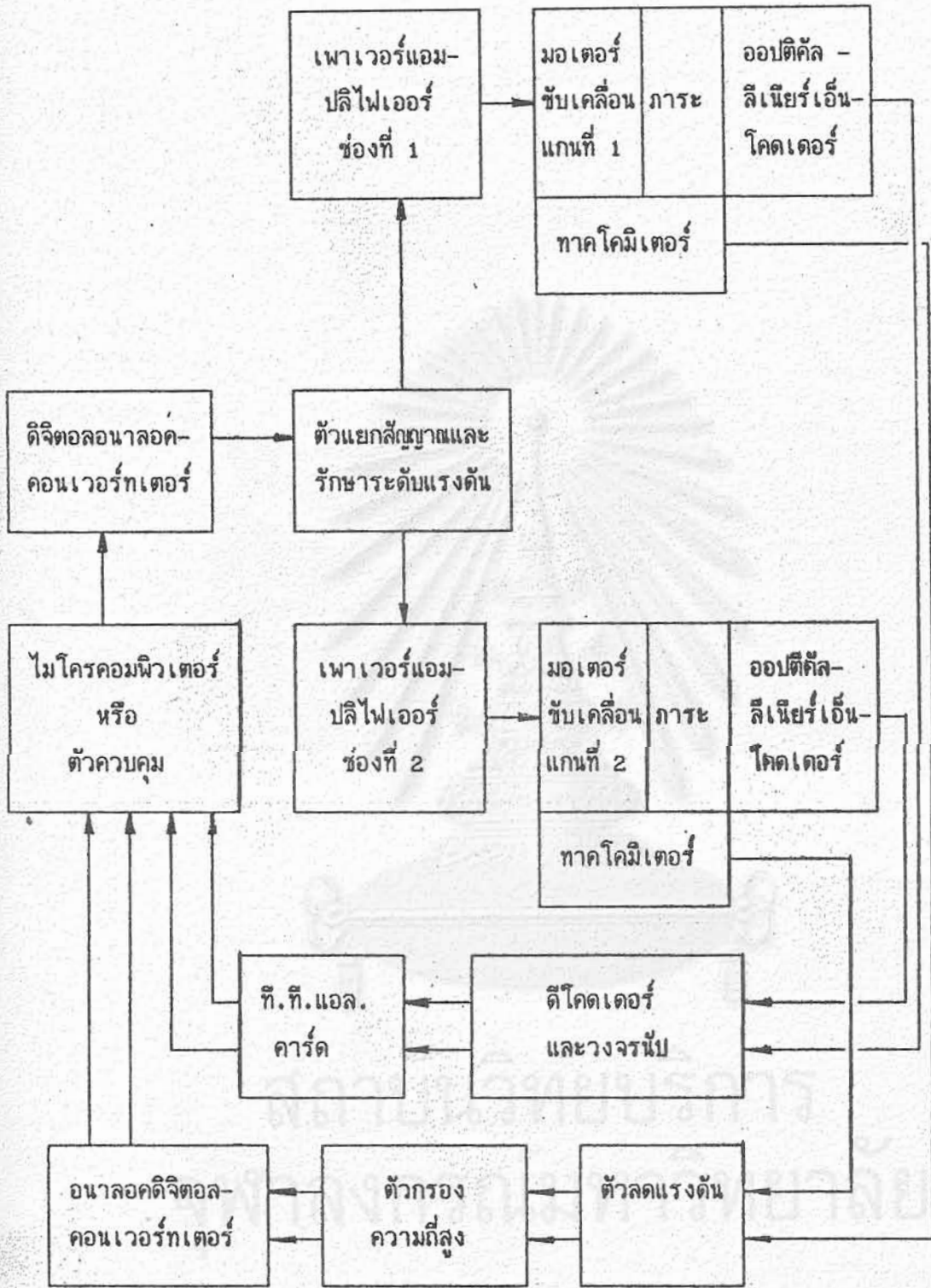
จากการทดสอบเพิ่มขนาดของภาวะ พบว่าเมื่อมีการเพิ่มขนาดของภาวะให้มีความมากขึ้น จะทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่ามากขึ้น และทำให้ระบบมีการสั่นในช่วงเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ ทั้งนี้เพราะในการเพิ่มขนาดของภาวะจะมีผลต่อค่า static friction ของระบบและค่าความยืดหยุ่นของลวดสลิงที่ใช้เป็นระบบขับเคลื่อน ทำให้ระบบมีการสั่นในช่วงเริ่มต้นของการเคลื่อนที่

หนังสืออ้างอิง

1. Tomizuka, M., D. Dornfeld, and M. Purcell, "Application of Microcomputers to Automatic Weld Quality Control," ASME Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, 102, 62-68, 1980.
2. Tomizuka, M., D. Dornfeld, X. Q. Bian, And H. G. Cai, "Experimental Evaluation of the Preview Servo Scheme for a Two-Axis Position System," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 106, 1-5, 1984
3. กิตติ ผดุงชีวิต "Parameter Estimation For Control System Design Of Mechanical Systems", วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2530

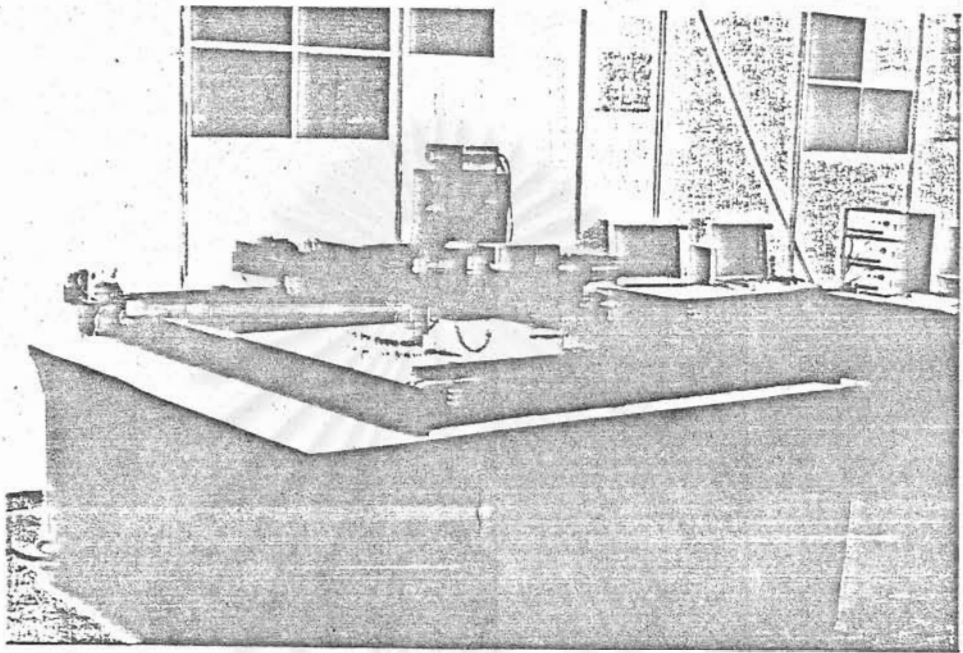


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

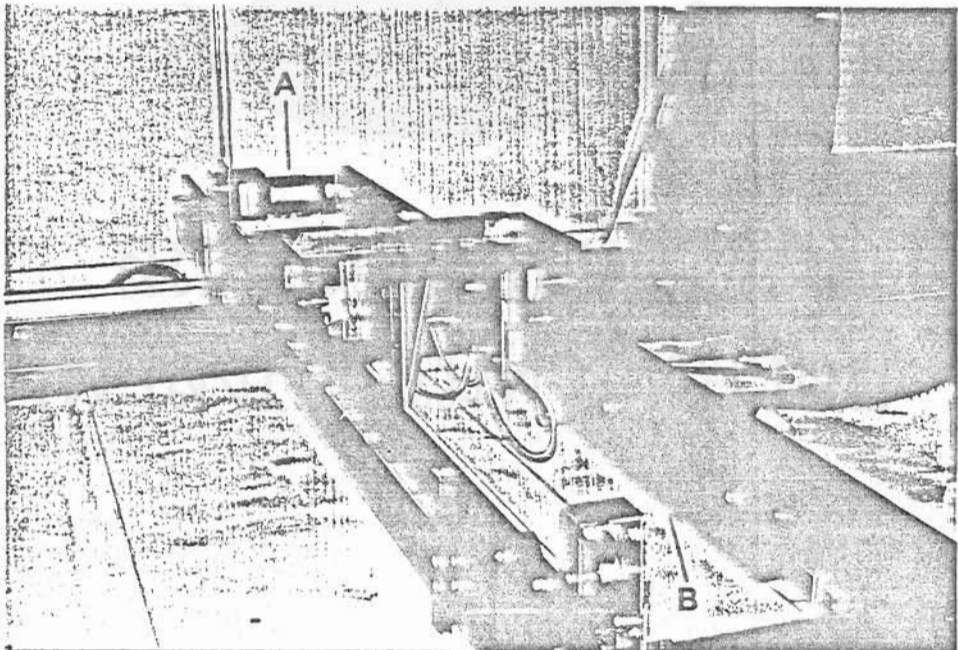


บล็อกไดอะแกรมของโต๊ะตัดแผ่นเหล็ก

รูปแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



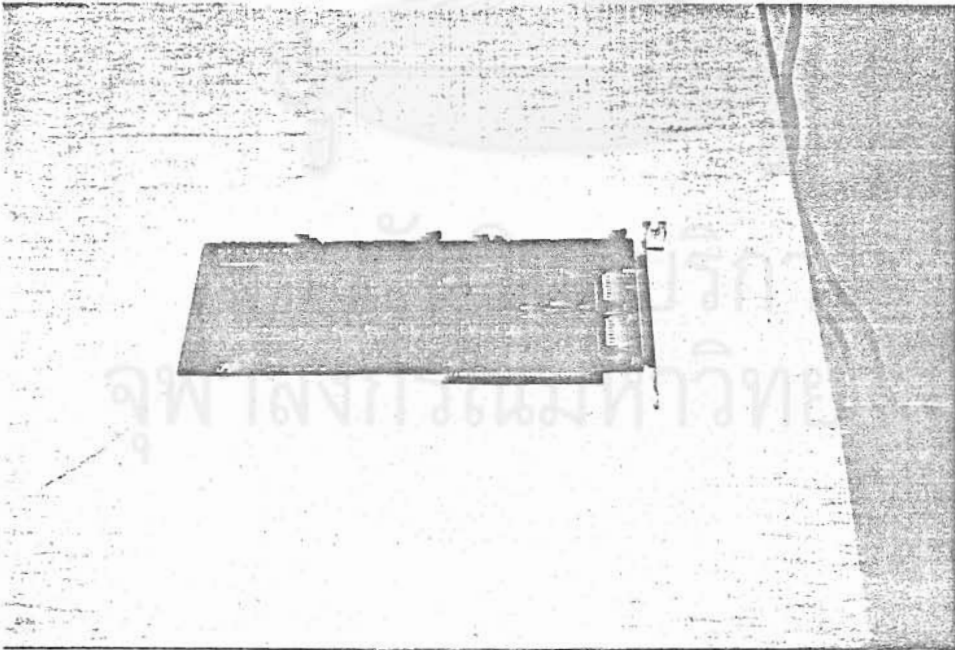
โต๊ะตัดแผ่นเหล็กที่พัฒนาขึ้น



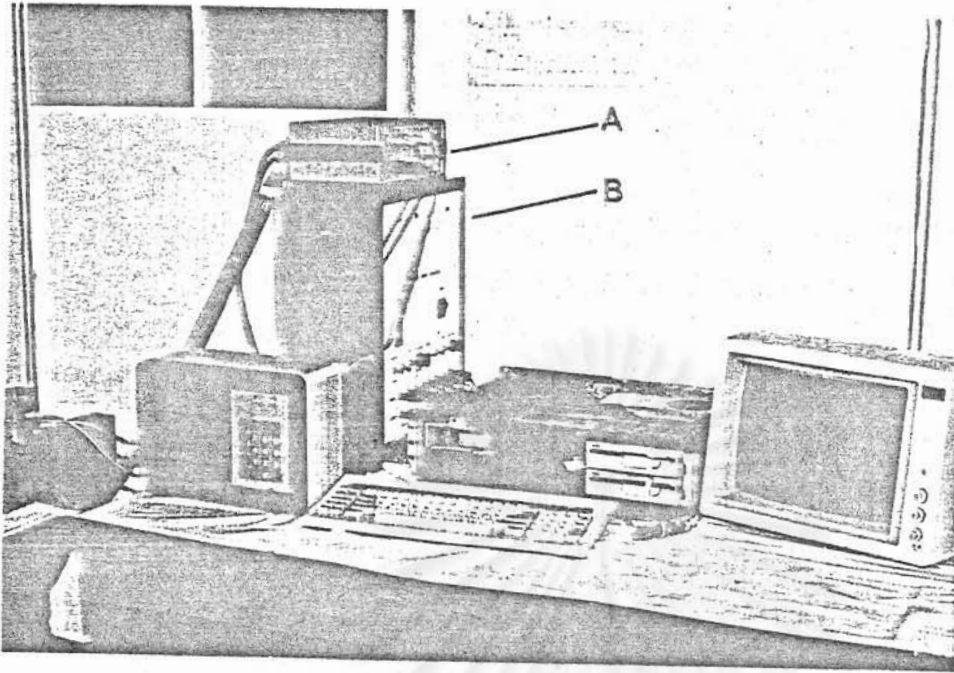
A - มอเตอร์และระบบล้อยางพาน. B - ออปติคอลลิเอร์เงินโคโคเจอร์



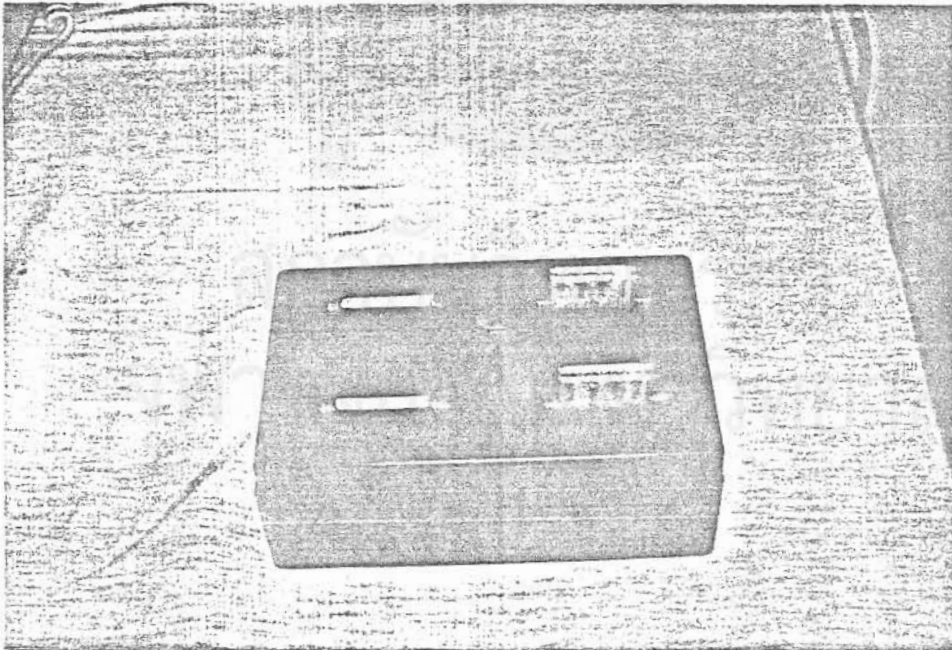
ติฉิตอลอนาสอคคาร์ด



ที.ที.แอล.คาร์ด



A - ชุดดีโคเดเตอร์และวงจรมับ, B - เพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์



ตัวแยกสัญญาณและรักษาระดับแรงดัน ตัวกรองความถี่สูง

ภาคผนวก ข.

รายละเอียดของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

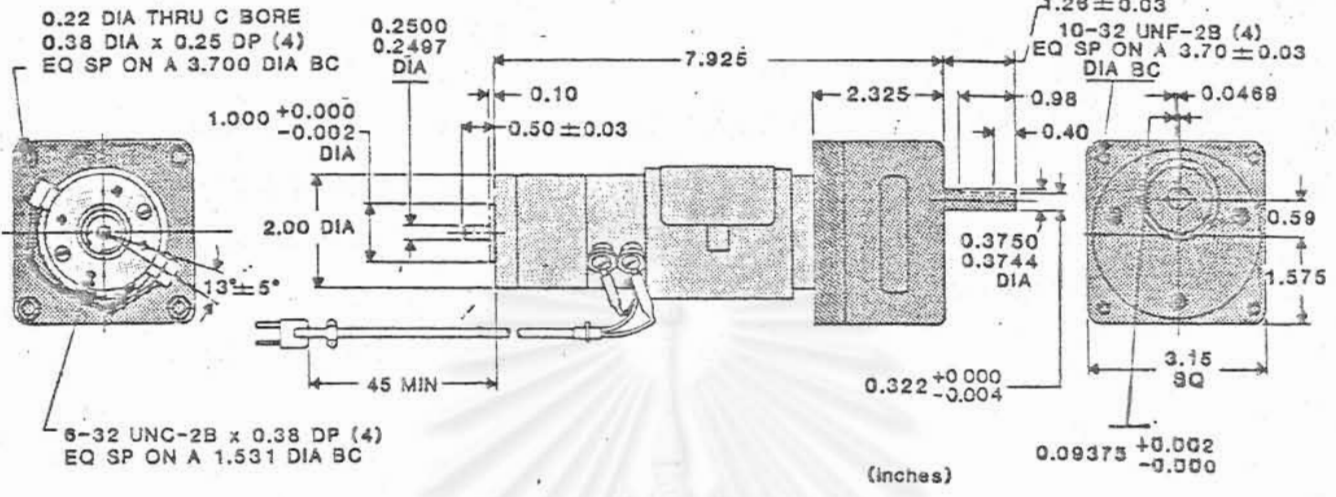
มอเตอร์ที่ใช้ในโครงการวิทยานิพนธ์นี้เป็นมอเตอร์กระแสตรงของบริษัท Electro Craft Model 586-022-113 ด้านท้ายของมอเตอร์มี Tachometer ด้านเฟลามอเตอร์มีชุดเฟืองทดที่มีอัตราทด 100:1 สำหรับรายละเอียดต่างๆ ของมอเตอร์แสดงดังตารางต่อไปนี้

SPECIFICATIONS			MODELS
			E586-MG
Rated Voltage	V_r	V	36
NO-LOAD SPEED at V_r	N_0	rpm	6200
MAX. RATED I at STALL	I_r	A	4.6
STALL TORQUE at I_r	T_0	oz-in	29
MAX. PULSE CURRENT	I_p	A	24.0
TORQUE CONSTANT	K_t	oz-in/A	7.8
VOLTAGE CONSTANT	K_e	volts/krpm	5.8
TERMINAL RESISTANCE	R_t	Ω at 25°C	1.1
Armature Mom. Inertia	J_m	oz-in-s ²	5.5×10^{-2}
Rotational Loss Constant	K_d	oz-in/krpm	0.10
Static Friction Torque	T_f	oz-in	3.0
Thermal Resistance Arm./Amb.	R_{th}	°C/W	5.0
ARMATURE INDUCTANCE	L_a	mH	2.3
ELECTRICAL Time Constant	τ_e	ms	2.1
MECHANICAL Time Constant	τ_m	ms	14.0
TACH. Voltage Gradient	K_g	V/krpm	14.2
TACH. Terminal Resistance	R_g	Ω at 25°C	720
TACH. Armature Inductance	L_g	mH	138
TACH. Load Resistance (optimum)	R_l	Ω	5000
Ripple Amplitude		%pk-pk	5.0
LINEARITY		%	0.2
Temperature Coefficient		%/°C	-0.05

E586-MGHP

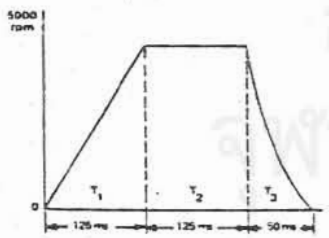
586-022-XXX

WEIGHT: 4 lb 8 oz



E586-MG Matching Motor Generator

PART NUMBER 0586-00-028



Motor Type 0586-00-028
Control Type E586-M
†Load Inertia 0.011 oz-in-s²
5000 rpm

†Load inertia is defined as the total moment of inertia
J_T = J_M + J_L (motor-generator) is 0.055 oz-in-s²
J_L (load) is 0.055 oz-in-s²

- Features**
- Hardened stainless steel shaft.
 - Die cast end caps.
 - Plated tubular steel housing.
 - Armature windings are epoxy coated and dynamically balanced. The motor and generator commutators are machined to a fine micro-finish (20-30) to insure proper brush-commutator interface.
 - High energy product (grade B) magnets withstand higher demagnetization currents.
 - Ball bearings are shielded to maximize reliability and long life.
 - External brush holders facilitate motor and generator brush replacement.
 - Metal graphite brushes withstand high pulse current and maximize brush life.
 - Separate motor and generator armature.
 - Temperature compensated generator.
 - Bi-directional.
 - Machined mounting surface on all flange mounting models.
 - Rated at 1/10 hp with matching E586 servo motor control.

E586-MGHP Matching Gearmotors

Ratio	PART NUMBER	Max. Speed	Max. Torque
6:1	586-022-102	833 rpm	6 lb-in
12.5:1	586-022-103	400 "	12 "
30:1	586-022-107	167 "	26 "
50:1	586-022-109	100 "	44 "
100:1	586-022-113	50 "	79 "
150:1	586-022-115	33 "	90 "
180:1	586-022-116	28 "	90 "

Flange mounted — all steel gears — ball bearings — precision die cast housing.
Lubricant Grease
Maximum thrust load 15 lb.
Maximum overhung load 25 lb $\frac{1}{2}$ " from face.

ภาคผนวก ค.
การตัดแผ่นเหล็กด้วยเปลวไฟ

ในการตัดแผ่นเหล็กด้วยเปลวไฟโดยใช้ก๊าซอะซิทีลีนและก๊าซออกซิเจน ความร้อนที่ตัดเหล็กให้ขาดได้มาจาก การที่เหล็กสีแดงทำปฏิกิริยากับออกซิเจน แล้วให้เหล็กออกไซด์กับพลังงานความร้อน 500 พู ซึ่งพลังงานความร้อนนี้จะทำให้เหล็กหลอมละลายและถูกเป่าให้หลุดออกไปด้วยแรงดันของก๊าซออกซิเจน

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการตัด ขนาดของแผ่นเหล็กและปริมาณของก๊าซอะซิทีลีนและก๊าซออกซิเจนแสดงไว้ในตารางดังต่อไปนี้

Table 2. Typical Data for Manual Oxyacetylene Cutting of Low-Carbon Steel Plate

Plate thickness, in.	Diameter of cutting orifice, in.	Oxygen pressure, psi	Cutting speed, (ipm)(a)	Gas consumption, cu ft(b)(c)			
				Per hr		Per linear ft	
				Oxygen	Acetylene	Oxygen	Acetylene
1/8	0.0380-0.0400	15-23	20-30	45-55	7-9	0.37-0.45	0.06-0.07
1/4	0.0380-0.0595	11-20	16-25	50-93	9-11	0.63-0.72	0.08-0.11
3/8	0.0380-0.0595	17-25	15-24	80-115	10-12	0.80-0.96	0.10-0.13
1/2	0.0465-0.0595	20-30	12-22	66-125	10-13	1.10-1.14	0.12-0.17
3/4	0.0465-0.0595	24-35	12-20	117-143	12-15	1.43-1.95	0.15-0.20
1	0.0465-0.0595	28-40	9-18	130-160	13-16	1.78-2.89	0.18-0.29
1 1/2	0.0595-0.0810	35-48	6-14	143-178	15-18	1.96-3.18	0.21-0.33
2	0.0670-0.0810	22-50	6-13	185-231	16-20	3.55-6.16	0.31-0.53
3	0.0670-0.0810	33-55	4-10	240-290	19-23	5.80-12.00	0.46-0.95
4	0.0810-0.0860	42-60	4-8	293-388	21-26	9.70-14.64	0.65-1.05
5	0.0810-0.0860	53-70	3.5-6.4	347-437	24-29	13.66-19.83	0.91-1.37
6	0.0980-0.0995	45-80	3.0-5.4	400-567	27-32	21.00-26.70	1.19-1.80
8	0.0995	60-77	2.6-4.2	505-615	31.5-38.5	29.30-38.84	1.83-2.42
10	0.0995	75-96	1.9-3.2	610-750	36.9-45.1	46.90-64.20	2.57-3.84
12(c)	0.1200	69-86	1.4-2.6	720-880	42.3-51.7	67.70-103.00	3.98-6.05

(a) Lowest speeds and highest gas consumptions are for inexperienced operators, short cuts, dirty or poor material. Highest speeds and lowest gas consumptions are for experienced operators, long cuts, and clean and good material.

(b) Because the pressure of acetylene for the preheating flames is more a function of torch design than of the thickness of the part being cut, pressure data have been omitted from

this table. For acetylene pressure data, see charts of manufacturers of apparatus.

(c) Beyond 12-in. thickness, the critical data of manual cutting practices are greatly affected by the condition of the metal and the skill of the operator, resulting in wide ranges of data. In view of this, the table has been terminated at the 12-in. thickness. In Table 3, on machine cutting, thickness range is extended to 36 in.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Table 3. Typical Data for Machine Oxyacetylene Cutting of Low-Carbon Steel Plate (a)

Plate thickness, in.	Diameter of cutting orifice, in.	Oxygen pressure, psi	Cutting speed, in./min (b)	Gas consumption, cu ft (b)(c)			
				Per hr		Per linear ft	
				Oxygen	Acetylene	Oxygen	Acetylene
1/8	0.0250-0.0400	15-23	22-32	40-55	7-9	0.34-0.36	0.05-0.06
1/4	0.0310-0.0595	11-35	20-28	45-93	8-11	0.34-0.66	0.07-0.08
3/8	0.0310-0.0595	17-40	19-26	82-115	9-12	0.86-0.89	0.08-0.09
1/2	0.0310-0.0595	20-55	17-24	105-125	10-13	1.04-1.24	0.11-0.12
3/4	0.0380-0.0595	24-50	15-22	117-159	12-15	1.45-1.56	0.14-0.16
1	0.0465-0.0595	28-55	14-19	130-174	13-16	1.83-1.86	0.17-0.19
1 1/4	0.0670-0.0810	25-55	12-15	185-240	14-18	3.20	0.23-0.24
2	0.0670-0.0810	22-50	10-14	185-260	16-20	3.70-3.72	0.29-0.32
3	0.0810-0.0860	33-50	8-11	240-332	18-23	6.00-6.04	0.42-0.45
4	0.0810-0.0860	42-60	6.5-9	293-384	21-26	8.53-9.02	0.58-0.65
5	0.0810-0.0860	53-65	5.5-7.5	347-411	23-29	10.97-12.62	0.77-0.84
6	0.0980-0.0995	45-65	4.5-6.5	400-490	26-32	15.10-17.78	0.98-1.16
8	0.0980-0.0995	60-90	3.7-4.9	505-625	31-39	25.52-27.20	1.59-1.88
10	0.0995-0.1100	75-90	2.9-4.0	610-750	37-45	37.50-42.10	2.25-2.55
12	0.1100-0.1200	69-105	2.4-3.5	720-880	42-52	49.70-60.00	2.97-3.50
12	0.1935	30	(e)	1274	85	(d)	(d)
14	0.221	25	(e)	1458	98	(d)	(d)
16	0.221	30	(e)	1683	98	(d)	(d)
18	0.250	25	(e)	1838	134	(d)	(d)
20	0.250	30	(e)	2098	134	(d)	(d)
22	0.259	35	(e)	2358	134	(d)	(d)
24	0.290	25	(e)	2467	174	(d)	(d)
26	0.290	30	(e)	2772	174	(d)	(d)
28	0.290	35	(e)	3077	174	(d)	(d)
30	0.332	25	(e)	3125	204	(d)	(d)
32	0.332	30	(e)	3425	204	(d)	(d)
34	0.332	35	(e)	3775	204	(d)	(d)
36	0.332	40	(e)	4125	204	(d)	(d)
Cutting With One-Piece Divergent Nozzles (High-Speed Tips)(f)							
1/8	...	120	26	70	14	0.54	0.109
1/4	...	100	22	100	18	0.91	0.163
3/8	...	100	20	120	18	1.00	0.18
1	...	110	18	130	18	1.44	0.20
1 1/4	...	100	16	170	25	2.11	0.31
2	...	100	13	230	25	3.52	0.39
3	...	85	10	270	32	5.4	0.64
4	...	85	9	330	35	7.3	0.78
5	...	110	8	395	35	9.7	0.87
6	...	125	7	435	35	12.4	1.00
7	...	80	6	495	36	16.5	1.20
8	...	100	5 1/2	580	36	21.2	1.32

(a) Column values do not necessarily vary in exact proportion to plate thickness, because straight-line relations do not exist among pressure, speed, and orifice sizes.

(b) Lowest speeds and highest gas consumptions are for inexperienced operators, short cuts, dirty or poor material. Highest speeds and lowest gas consumptions are for experienced operators, long cuts, clean, and good material.

(c) Because the pressure of acetylene for the preheating flames is more a function of torch design than of the thickness of the part being cut, pressure data have been omitted from this table. For acetylene pressure data, see charts of manufacturers of apparatus.

(d) The data for 12 to 36 in. are for torches with large tips, using large volumes of oxygen at low pressures. Because the speed depends on the condition of the material being cut and the skill of the operator, no figures are given for gas consumption per linear foot.

(e) Cutting speeds vary from 4 ipm for light sections to 2 ipm for heavy sections.

(f) These data are for divergent orifices that have controlled expansion tips, permitting the use of relatively high oxygen pressures so as to expand the cutting oxygen through the orifice. Thus the gas stream has high velocity and is relatively narrow. Higher speeds and lower specific consumption of oxygen result.

ภาคผนวก 4
โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุม

โปรแกรมที่เขียนขึ้นเพื่อใช้ในการควบคุมเขียนด้วยภาษา C และใช้ compiler Optimizing C86 ver 2.20J ของบริษัท COMPUTER INNOVATIONS, INC. ซึ่งมีรายละเอียดของโปรแกรมหาดังต่อไปนี้

```
/* mctrl.c 16:10:55 11/15/1987 */

#include "stdio.h"

mctrl(kgain,totalp,numpoint,pvp,vlimit,f2)
float kgain[ ][3],vlimit;
int totalp,numpoint,pvp,f2;
{
extern double fabs();
extern float data[ ][10],sqrt();
int chnox,chnoy,i,j,idelay,index;
long xm,ym;
float temp,errx,erry,vdax,vday,voltx,volty,zero;
float xc,yc,errxc,erryc,xs,ys,vx,vy,vcalx,vcaly;
int start,delay2,endd;
extern key_getc();
char ch;

chnox = 1; /* Read vel x chno. 1 */
chnoy = 2; /* Read vel y chno. 2 */
index = 0; /* start index */
zero = 0;
errx = 0;
erry = 0;
vx = 0;
```

```
vy    = 0;
vcalx = 0;
vcaly = 0;
xs    = data[index][1]*1000;
ys    = data[index][2]*1000;
crt_cls();
block1(0,0,23,79);
crt_srcp(12,10,0);
printf("Calibrate Velocity");
for(i=1;i<=1000;i++)
{
    readv(&voltx,chnox);
    readv(&volty,chnoy);
    vcalx += voltx;
    vcaly += volty;
}
vcalx = vcalx/1000.0;
vcaly = vcaly/1000.0;
crt_srcp(12,10,0);
printf("Go to Start Point ");
go_tar(xs,ys);
crt_srcp(12,10,0);
printf("Press Any Key to Begin Control or Esc to Cancel");
delay2 = 2.5*1230L * 10;
start = -1;
do
{
    sound(2,10);
    for(i=0;i< delay2;i++);
    start = key_scan();
}while (start == -1);
```

```

if (start != 299)
{
    crt_srcp(12,10,0);
    printf("                Begin Control                ");
    crt_srcp(12,40,0);
    /* begin controller */
    readp(&xm,&ym);
    temp = xm;
    data[index][3] = temp/100000;
    temp = ym;
    data[index][4] = temp/100000;
    readv(&voltx,chnox);
    readv(&volty,chnoy);
    data[index][5] = (vcalx - voltx)*0.0525;
    data[index][6] = (vcaly - volty)*0.0391;
    data[index][8] = data[index][9] = 0 ; /* torque start */
    for(index=1;index<=numpoint;index++)
    {
        gain(kgain, index, pvp, errx, erry, vx, vy, sampling);
        vdax = (data[index][8] - 0.03115)/(3.982691);
        vday = (data[index][9] - 0.04298)/(3.976296);
        data[index][8] = vdax;
        data[index][9] = vday;
        if (vdax >= vlimit || vdax <= -1*vlimit ||
            vday >= vlimit || vday <= -1*vlimit )
        {
            out(zero,zero);
            crt_srcp(12,10,0);
            printf("Volt Out Excess limit Press Any Key ");
            index = numpoint;
            start = key_getc();
        }
    }
}

```

```

    start = 0;
}
else
    out(vdax, vday);
for(idelay = 1; idelay <= endd; idelay++); /* delay loop */
readp(&xm, &ym);
readv(&voltx, chnox);
readv(&volty, chnoy);
temp = xm;
data[index][3] = temp/100000;
temp = ym;
data[index][4] = temp/100000;
vx = (data[index][3] - data[index-1][3])/sampling;
vy = (data[index][4] - data[index-1][4])/sampling;
/* update 20-10-87 */
data[index][5] = (vcalx - voltx)*0.0525;
data[index][6] = (vcaly - volty)*0.0391;
errx += (data[index][1]-data[index][3])*sampling;
erry += (data[index][2]-data[index][4])*sampling;
}
out(zero, zero);
for(i=0; i<=totalp; i++)
{
    if (f2 == 1) /* keep Error */
    {
        data[i][8] = (data[i][1]-data[i][3])*1000;
        data[i][9] = (data[i][2]-data[i][4])*1000;
    }
    data[i][7] = sqrt(data[i][5]*data[i][5] +
        data[i][6]*data[i][6]);
}
}

```

```
/* gain      14:35:09  11/14/1987 */
```

```
gain(kgain,ref,pvp,errx,erry,vx,vy,sampling)
```

```
float kgain[][3],errx,erry,vx,vy,sampling;
```

```
int  pvp,ref;
```

```
{
```

```
extern float data[][10];
```

```
float tpx,tix,tdx,tprx,vdx;
```

```
float tpy,tiy,tdy,tpry,vdy;
```

```
int  act;
```

```
act = ref -1;
```

```
vdx = (data[ref][1]-data[act][1])/sampling;
```

```
vdy = (data[ref][2]-data[act][2])/sampling;
```

```
tpx = kgain[1][1]*(data[ref][1]-data[act][3]);
```

```
tix = kgain[2][1]*errx;
```

```
tdx = kgain[3][1]*(vdx-vx);
```

```
tprx = kgain[4][1]*(data[ref+pvp][1]-data[act][3]);
```

```
data[ref][3] = tpx + tix + tdx + tprx ;
```

```
tpy = kgain[1][2]*(data[ref][2]-data[act][4]);
```

```
tiy = kgain[2][2]*erry;
```

```
tdy = kgain[3][2]*(vdy-vy);
```

```
tpry = kgain[4][2]*(data[ref+pvp][2]-data[act][4]);
```

```
data[ref][4] = tpy + tiy + tdy + tpry ;
```

```
}
```

```
/* End gain */
```

```

printf("Begin Simulation :");
for(index=1;index<=numpoint;index++)
{
    gain(kgain,index,pvp,errx,erry,vx,vy,sampling);

    model(index,sampling);

    vx = (data[index][3] - data[index-1][3])/sampling;
    vy = (data[index][4] - data[index-1][4])/sampling;
    errx += (data[index][1]-data[index][3])*sampling;
    erry += (data[index][2]-data[index][4])*sampling;
    crt_srcp(12,28,0);
    printf("%d",index);
}
for(i=0;i<=totalp;i++)
{
    if (f2 == 1) /* keep Error */
    {
        data[i][8] = (data[i][1] - data[i][3])*1000;
        data[i][9] = (data[i][2] - data[i][4])*1000;
    }
    data[i][7] = sqrt(data[i][5]*data[i][5] + data[i][6]*data[i][6]);
}
}

/*      end sim.c      */

```

```
/* sim.c 17:04:25 11/14/1987 */
```

```
#include "stdio.h"
```

```
simu(kgain,totalp,numpoint,pvp,f2,sampling)
```

```
float kgain[][3],sampling;
```

```
int totalp,numpoint,pvp,f2;
```

```
{
```

```
extern float data[][10],sqrt();
```

```
int i,index;
```

```
float errx,erry,vx,vy;
```

```
crt_ols();
```

```
block1(0,0,23,79);
```

```
index = 0;
```

```
errx = 0;
```

```
erry = 0;
```

```
vx = 0;
```

```
vy = 0;
```

```
/* begin controller */
```

```
data[index][3] = data[index][1];
```

```
data[index][4] = data[index][2];
```

```
data[index][5] = data[index][6] = 0 ; /* start velocity */
```

```
data[index][8] = data[index][9] = 0 ; /* torque */
```

```
crt_srop(12,10,0);
```



```
/*      model.c      14:54:29  11/14/1987  */
```

```
#include "stdio.h"
```

```
/*  define Parameter modelx  */
```

```
#define massx 11.423
```

```
#define jx 2.0*6.18960849e-4
```

```
#define bx 6.118242512e-5
```

```
/*  define parameter modely  */
```

```
#define massy 2.174
```

```
#define jy 2.0*6.18960849e-4
```

```
#define by 6.118242512e-5
```

```
#define g 9.81
```

```
#define mu 0.02*8.0
```

```
#define rpull 0.025
```

```
#define R 1.1 /* Motor Amature resistance */
```

```
#define L 2.3e-3 /* Motor Inductance */
```

```
#define Km 7.8*7.0612e-3 /* Motor Torque Constant */
```

```
#define n 100.0 /* Motor Gear Ratio */
```

```
#define jm 5.5e-3*3.499e-3 /* Motor Mom. Intia */
```

```
#define stm 6*7.0612e-3 /* Static Friction Torque */
```

```
model(point,sampling)
```

```
int point;
```

```
float sampling;
```

```
{
```

```
extern double exp();
```

```
extern float data[][10];
```

```
float cx1,cx2,cx3,cx33,cx4,sx,wx,toqx,toqy;
```

```
float cy1,cy2,cy3,cy33,cy4,sy,wy;
```

```
toqx = (data[point][8]/19.9719086)*35.0;
```

```
cx33 = mu*rpull*massx*g;
```

```
cx1 = (jx+rpull*rpull*massx + jm*n*n);
```

```
cx2 = bx*n;
```

```
cx33 = cx33 + stm;
```

```
if (toqx <= cx33) cx33 = 0.0;
```

```
if (toqx < 0) cx33 = -cx33;
```

```
cx3 = (toqx - cx33);
```

```
cx4 = exp(-1.0*sampling*cx2/cx1);
```

```
sx = data[point-1][3]/rpull; /* seta motion */
```

```
wx = data[point-1][5]/rpull; /* omega */
```

```
data[point][3] = rpull*((cx1*cx3-cx1*cx2*wx)*cx4+cx2*cx3*sampling  
- cx1*cx3+cx1*cx2*wx+cx2*cx2*sx)/(cx2*cx2);
```

```
data[point][5] = rpull*(wx+(cx1*cx3-cx1*cx2*wx)*(1-cx4)/(cx1*cx2));
```

```
/* End modelx */
```

```
/* modely */
```

```
toqy = (data[point][9]/19.9719086)*35.0;
```

```
cy33 = mu*rpull*massy*g;
```

```
cy1 = (jy+rpull*rpull*massy + jm*n*n);
```

```
cy2 = by*n;
```

```
cy33 = cy33 + stm;
```

```
if (toqy < cy33) cy33 = 0.0;
```

```
if (toqy < 0) cy33 = -cy33;
```

```
cy3 = (toqy - cy33);
```

```
cy4 = exp(-1.0*sampling*cy2/cy1);
```

```
sy = data[point-1][4]/rpull; /* seta motion */
```

```

wy = data[point-1][6]/rpull ; /* omega */
data[point][4] = rpull*((cy1*cy3-cy1*cy2*wy)*cy4+cy2*cy3*sampling
- cy1*cy3+cy1*cy2*wy+cy2*cy2*sy)/(cy2*cy2);
data[point][6] = rpull*(wy+(cy1*cy3-cy1*cy2*wy)*(1-cy4)/(cy1*cy2));
/* End modely */

```

3

```

/* end model.c */

```

```

/* pmenu.c 21:00:25 11/13/1987 */

```

```

#include "stdio.h"
#define bell '\007'

```

```

path_edit(datapath)
float datapath[][6];

```

```

{
extern int feof();
extern FILE *fopen();
extern int fclose();
FILE *prt;
extern key_getc();
int i,j,k,l,press,check,ii,jj,endif;
char pname[15];
check = 0;
k = 1;
i = datapath[i][j][0]+1;
press = 4209;
do
{

```

```

switch(press)
{
    case 11875 : /* c clear data */
        i = 1;
        break;
    case 15104 : /* F1 */
        crt_ols();
        printf("Type Exit and Press Return to go Back");
        system("a:command");
        break;
    case 15360 : /* F2 save path file */
        crt_ols();
        block1(0,0,23,79);
        crt_srop(12,10,0);
        printf("Path File Name to save:");
        scanf("%s",pname);
        crt_srop(14,10,0);
        printf("Save path :");
        prt = fopen(pname,"w");
        for(ii=0;ii<i;ii++)
        {
            for(jj=0;jj<=5;jj++)
                fprintf(prt,"%f ",datapath[ii][jj]);
            fprintf(prt,"\n");
            crt_srop(14,22,0);
            printf("%d",ii);
        }
        fclose(prt);
        break;
    case 15616 : /* F3 read path file */
        crt_ols();

```

```

block1(0,0,23,79);
crt_srop(12,10,0);
printf("Path File Name to read:");
scanf("%s",pname);
crt_srop(14,10,0);
printf("Read path :");
prt = fopen(pname,"r");
ii = -1;
do
{
    ii++;
    for(jj=0;jj<=5;jj++)
        fscanf(prt,"%f",&datapath[ii][jj]);
    crt_srop(14,22,0);
    printf("%d",ii);
    endf = feof(prt);
}while(!endf); /* not end of file (zero) */
fclose(prt);
i = ii;
break;
case 7777 :
    datapath[i][0] = 1;
    crt_cls();
    crt_srop(3,10,0);
    printf(" Arc Path no. %d ",i);
    crt_srop(5,15,0);
    printf(" Center point X & Y is ");
    scanf("%f %f \n",&datapath[i][1],&datapath[i][2]);
    crt_srop(7,15,0);
    printf(" Radius of circle is ");
    scanf("%f\n",&datapath[i][3]);

```

```

crt_srocp(9,15,0);
printf(" start angle is ");
scanf("%f\n",&datapath[i][4]);
crt_srocp(11,15,0);
printf(" End angle is ");
scanf("%f\n",&datapath[i][5]);
for (l=1;l<=3;l++)
    datapath[i][l] = datapath[i][l]/1000;
i = k+1;
break;
case 9836 :
    datapath[i][0] = 2;
    crt_cls();
    crt_srocp(3,10,0);
    printf(" Line Path no. %d ",i);
    crt_srocp(5,15,0);
    printf(" Start point X & Y is ");
    scanf("%f %f \n",&datapath[i][1],&datapath[i][2]);
    crt_srocp(7,15,0);
    printf(" End point X & Y is ");
    scanf("%f %f \n",&datapath[i][3],&datapath[i][4]);
    datapath[i][5] = 0;
    for (l=1;l<=4;l++)
        datapath[i][l] = datapath[i][l]/1000;
    i = k+1;
    break;
case 4209 :
    crt_cls();
    break;
default :
    while(check != 283)

```

```

    {
        putchar(bell);
        crt_srop(24,15,0);
        printf(" Select Error Press Esc to continue ");
        check = key_getc();
    }
}

datapath[0][0] = i-1;
crt_cls();
printf(" Path input Data ");
for(j=1;j<i;j++)
{
    check = datapath[j][0];
    switch(check)
    {
        case 1 :
            crt_srop(j*2,5,0);
            printf(" Arc no. Xcenter Ycenter Radius
                Start Angle End Angle\n");
            printf(" %d %5.3f %5.3f %5.3f
                %6.2f %6.2f ",j,datapath[j][1],datapath[j][2],
                datapath[j][3],datapath[j][4],datapath[j][5]);
            break;
        case 2 :
            crt_srop(j*2,5,0);
            printf(" Line no. X start Y start X end Y end \n ");
            printf(" %d %5.3f %5.3f %5.3f %5.3f",
                j,datapath[j][1],datapath[j][2],datapath[j][3],datapath[j][4]);
            break;
    }
}
}

```

```

crt_sscp(22,10,0);
printf("-----");
    crt_sscp(24,12,0);
printf("Arc, Line, Edit, Clear, F1 Dos, F2 Save, F3 Read, Quit");
    press = key_getc();
    k = i;
    if(press == 4709)
    {
        if(i != 1)
        {
            k = k-1;
            crt_sscp(24,12,0);
            printf("
            ");
            crt_sscp(24,15,0);
            printf(" Edit Path no.  ");
            i = key_getc();
            j = i >> 7;
            j = j << 7;
            i = i - j - 48;
            if (i<=k && i != 0)
            {
                crt_sscp(24,15,0);
                printf(" Select Arc or Line ");
                press = key_getc();
                if(press == 4209)
                {
                    press = 0;
                    i = k + 1;
                }
            }
        }
        else

```



```

        i = k + 1;
    }
}
check = 0;
}while(press != 4209 && press != 4177);
}

```

```

/* end pmenu.c */

```

```

/* calpath.c 9:11:27 11/14/1987 */

```

```

#include "stdio.h"

```

```

#define Maxp 1280

```

```

#define exce 50

```

```

calpath(pvp, sector, numpoint, datapath)

```

```

float sector, datapath[][6];

```

```

int *numpoint, pvp;

```

```

{

```

```

extern float data[][10];

```

```

extern key_getc();

```

```

int i, j, k, start, endpoint, check, endp;

```

```

float data_select[6];

```

```

    start = 0;

```

```

    endpoint = 0;

```

```

    endp = datapath[0][0];

```

```

    for(i=1; i<=endp; i++)

```

```

    {

```

```

        for(j=1; j<=5; j++)

```

```

        {

```

```

        data_select[j] = datapath[i][j];
    }
    if (datapath[i][0] == 2)
    {
        line(sector,data_select,start,&endpoint);
        if (endpoint > Maxp) i = endp;
    }
    else
    {
        arc(sector,data_select,start,&endpoint);
        if (endpoint > Maxp) i = endp;
    }
    start = endpoint;
}
*numpoint      = endpoint;
}

```

/* end calpath.c */

/* path.c 13:04:45 10/29/1987 */

/* arc */

```

#define pi 3.1415926536
arc(sector,selct,start,end)
float sector,selct[];
int start,*end;
{
    extern double sin(),cos(),acos();
    extern float data[][10];
    int i,check,stop;
    float num,angle,seta;

```

```
/* Start Line */
```

```
line(sector,selct,start,end)
float  sector,selct[];
int    start,*end;
{
extern double sqrt(),sin(),cos(),atan2();
extern float  data[][10];
int    i,check,stop;
float  num,xunit,yunit,angle,lenght,subl;
angle  = atan2((selct[4]-selct[2]),(selct[3]-selct[1]));
xunit  = cos(angle);
yunit  = sin(angle);
lenght = sqrt((selct[3]-selct[1])*(selct[3]-selct[1])
              + (selct[4]-selct[2])*(selct[4]-selct[2]));
num    = lenght/sector;
check  = num;
stop   = start + check;
if (stop > Maxp) *end = Maxp + 'exce;
else
{
subl   = 0;
for(i=start;i<=stop;i++)
{
data[i][1] = subl*xunit + selct[1];
data[i][2] = subl*yunit + selct[2];
subl += sector;
}
if ((num - check) > 0.5)
{
data[stop+1][1] = lenght*xunit + selct[1];
```

```

angle = acos((2*selct[3]*selct[3]-sector*sector)/
             (2*selct[3]*selct[3]));
num    = (selct[5] - selct[4])*pi/(180*angle);
check  = num;
stop   = start + check;
if (stop > Maxp) *end = Maxp + exce;
else
{
seta = selct[4]*pi/180;
for(i=start;i<=stop;i++)
{
data[i][1] = selct[3]*cos(seta) + selct[1];
data[i][2] = selct[3]*sin(seta) + selct[2];
seta += angle;
}
if ((num - check) > 0.5)
{
data[stop+1][1] = selct[3]*cos(selct[5]*pi/180) + selct[1];
data[stop+1][2] = selct[3]*sin(selct[5]*pi/180) + selct[2];
*end      = stop+1;
}
else
{
data[stop][1] = selct[3]*cos(selct[5]*pi/180) + selct[1];
data[stop][2] = selct[3]*sin(selct[5]*pi/180) + selct[2];
*end      = stop;
}
}
}
}

```

/* End arc */

```
data[stop+1][2] = lenght*yunit + selct[2];
*end      = stop+1;
}
else
{
data[stop][1] = lenght*xunit + selct[1];
data[stop][2] = lenght*yunit + selct[2];
*end      = stop;
}
}
}

/* End Line */
/* end path.c */
```



สถาบันบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย