

โต๊ะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน

XY-TABLE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า
หากมีการคัดลอกหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมายและต้องแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี..... - 4 เม.ย. 2548

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2546
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เรื่อง โต๊ะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน
XY-TABLE

ผู้จัดทำ
1.นาย ธนวัฒน์ จินตนากุล รหัสประจำตัว 43010642
2.นาย ธนวัฒน์ ชุ่มทอง รหัสประจำตัว 43010649



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โตะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน

นาย ธนวัฒน์ จินตนาถุล รหัสนักศึกษา 43010642
 นาย ธนาวัฒน์ จุ่มทอง รหัสนักศึกษา 43010649
 คร. ธีรวุฒิ เคไปวา อาจารย์ที่ปรึกษา

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการออกแบบและสร้าง โตะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน ที่สามารถนำไปเป็นต้นแบบของโตะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกนที่มีราคาถูกลงได้ โดยอัลกอริทึมของการควบคุมที่ใช้เป็นของโปรแกรมภาษาซี ผลการที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าโตะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน และ ชุดควบคุมสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมายได้ตามต้องการในสถานะไม่มีภาระ



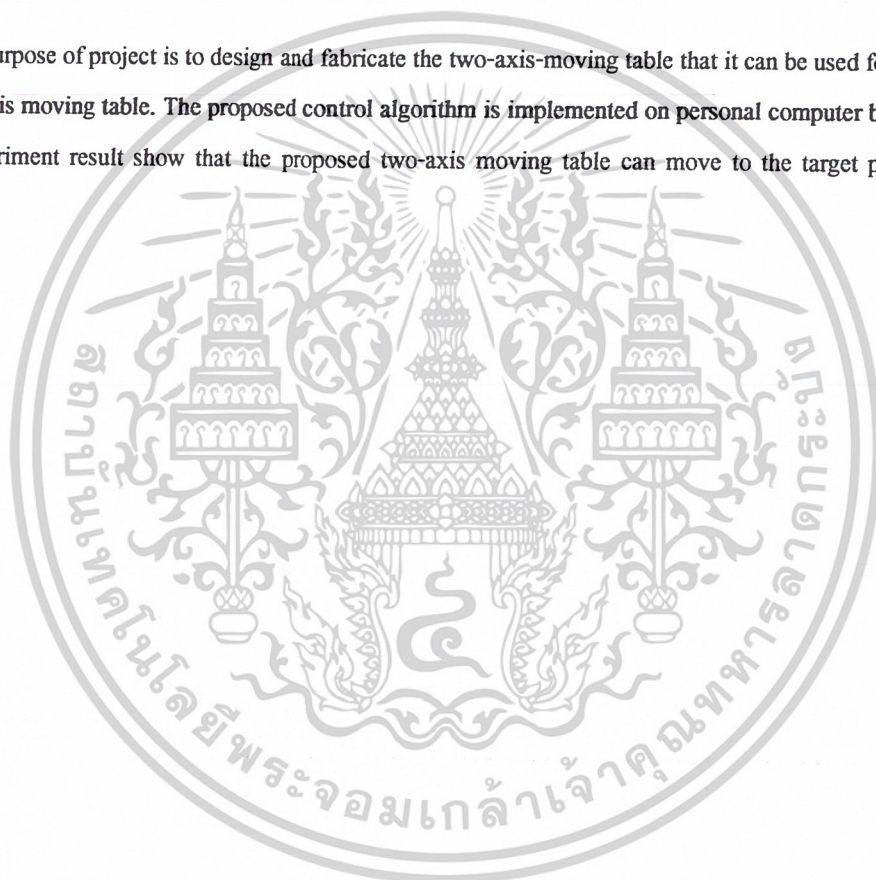
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

XY-TABLE

Mr. Tanawat Jintanagoon	Student ID. 43010642
Mr. Thanawat Khumtong	Student ID. 43010649
Dr. Nattawut Depaiwa	Advisor

ABSTRACT

The purpose of project is to design and fabricate the two-axis-moving table that it can be used for a model of the cheap two-axis moving table. The proposed control algorithm is implemented on personal computer by using C program. The experiment result show that the proposed two-axis moving table can move to the target position as without mass load.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจาก อาจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ เดไป้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความกรุณาแนะนำ ให้ข้อคิดเห็นต่างๆแก่ผู้จัดทำเป็นอย่างดีตลอดมา ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร. ลุนนัต พิณโสภณ ที่ให้คำแนะนำด้านการเขียนระบบควบคุมด้วยภาษาซี และขอขอบคุณ อาจารย์ พลผดุง ผดุงกุล ที่ช่วยให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาในด้านวงจรอิเล็กทรอนิกส์

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่เคารพรักยิ่งที่ได้สนับสนุนด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้จัดทำมาตลอด จนปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงด้วยดี



ธนวัฒน์ จินตนากุล

ธนาวัฒน์ จุ่มทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้าที่

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูปภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ	2
บทที่ 2 โครงสร้างทางกลของโต๊ะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน	3
2.1 ส่วนประกอบของโต๊ะงานเคลื่อนที่	3
2.2 สเตปมอเตอร์	5
2.3 บอลสกรูส่งกำลัง	10
บทที่ 3 ระบบควบคุม	15
3.1 ส่วนประกอบของระบบควบคุมตำแหน่งโต๊ะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน	15
3.2 โปรแกรมควบคุมเส้นทางเดิน	16
3.3 วงจรพัลส์	29
บทที่ 4 รูปแบบและผลการทดลอง	36
4.1 รูปแบบการทดลอง	36
4.2 ชุดทดลอง	36
4.3 ผลการทดลอง	37
บทที่ 5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง	43
5.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง	43
5.2 สรุปผลการทดลอง	43
5.3 ปัญหาที่พบขณะดำเนินงานและแนวทางแก้ไข	44
บรรณานุกรม	45
ภาคผนวก ก C Source Code	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้าที่

ตารางที่ 3-1 พิกัดสูงสุดของไอซี CMOS	31
ตารางที่ 3-2 ลักษณะสมบัติทางไฟของไอซี CMOS	33
ตารางที่ 3-3 ลักษณะสมบัติด้านสวิตชิงของ CMOS	34



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

หน้าที่

รูปที่ 1-1 แสดงถึง โดะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกนที่ใช้ในโครงงานนี้	1
รูปที่ 2-1 แสดงถึง ภาพเขียนแบบโครงสร้างของโดะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน	3
รูปที่ 2-2 แสดงถึง รูปโครงสร้างจริงของโดะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน	4
รูปที่ 2-3 แสดงถึง รูปโครงสร้างจริงของตัวเลื่อนโดะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน	4
รูปที่ 2-4 แสดงถึง ระบบส่งกำลังโดะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน	5
รูปที่ 2-5 แสดงถึง ลักษณะของสเตปป์มอเตอร์	6
รูปที่ 2-6 แสดงถึง การวางตำแหน่งของขดลวดในสเตปป์มอเตอร์ ชนิด 3 เฟส	6
รูปที่ 2-7 แสดงถึง วงจรการควบคุมสเตปป์มอเตอร์	7
รูปที่ 2-8 แสดงถึง วงจรขับ STEPPER MOTOR แบบต่าง ๆ	8
รูปที่ 2-9 แสดงถึง รูปร่างภายในของบอลสกรู	10
รูปที่ 3-1 แสดงถึง ส่วนประกอบของระบบควบคุมตำแหน่งโดะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน	15
รูปที่ 3-2 แสดงถึง ระบบควบคุมตำแหน่งโดะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน	15
รูปที่ 3-3 แสดงถึง คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมโดะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน	16
รูปที่ 3-4 แสดงถึง ลักษณะการกระจายของฟังก์ชันพหุนามอันดับสูงและการใช้ฟังก์ชัน เส้นโค้งสำหรับข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันขั้นบันได	17
รูปที่ 3-5 แสดงถึง การประมาณค่าในช่วงโดยการใช้ฟังก์ชันเส้นตรง	18
รูปที่ 3-6 แสดงถึง การประมาณค่าในช่วงโดยใช้ฟังก์ชันกำลังสอง	19
รูปที่ 3-7 แสดงถึง การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสูงอื่นๆ (ลากรองจ์) กับ ฟังก์ชันเส้นโค้งกำลังสาม	27
รูปที่ 3-8 แสดงถึง บล็อกไดอะแกรมของไอซี เบอร์ 4046 Phase Locked Loop	30
รูปที่ 3-9 แสดงถึง การต่อวงจรพัลส์ที่ขาไอซี ณ ตำแหน่งต่างๆ	30
รูปที่ 4-1 แสดงถึง ชุดทดลองที่ใช้ในโครงงานนี้	36
รูปที่ 4-2 แสดงถึง ชุดทดลองที่ใช้ในโครงงานนี้	36
รูปที่ 4-3 แสดงถึง กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้	37
รูปที่ 4-4 แสดงถึง กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่ที่ได้ กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน	37
รูปที่ 4-5 แสดงถึง กราฟเปรียบเทียบเส้นทางเดินที่ได้ กับ เส้นทางเดินที่ต้องการ (ฟังก์ชันเส้นตรง)	38
รูปที่ 4-6 แสดงถึง กราฟเปรียบเทียบเส้นทางเดินที่ได้ กับ เส้นทางเดินที่ต้องการ (ฟังก์ชันขั้นบันได)	38
รูปที่ 4-7 แสดงถึง กราฟเปรียบเทียบเส้นทางเดินที่ได้ กับ เส้นทางเดินที่ต้องการ (รูปปิด)	39
รูปที่ 4-8 แสดงถึง กราฟเปรียบเทียบเส้นทางเดินที่ได้ กับ เส้นทางเดินที่ต้องการ (Cubic Spline)	39
รูปที่ 4-9 แสดงถึง กราฟค่าความคลาดเคลื่อนรวมในแนวแกน X ของฟังก์ชันเส้นโค้ง Cubic Spline กับ ระยะจริงของรูปที่ 4-8	40
รูปที่ 4-10 แสดงถึง กราฟค่าความคลาดเคลื่อนรวมในแนวแกน Y ของฟังก์ชันเส้นโค้ง Cubic Spline กับ ระยะจริงของรูปที่ 4-8	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4-11 แสดงถึง กราฟเปรียบเทียบเส้นทางเดินที่ได้ กับ เส้นทางเดินที่ต้องการ (Cubic Spline)	41
รูปที่ 4-12 แสดงถึง กราฟค่าความคลาดเคลื่อนรวมในแนวแกน X ของฟังก์ชันเส้นโค้ง Cubic Spline กับ ระยะจริงของรูปที่ 4 – 11	41
รูปที่ 4-13 แสดงถึง กราฟค่าความคลาดเคลื่อนรวมในแนวแกน Y ของฟังก์ชันเส้นโค้ง Cubic Spline กับ ระยะจริงของรูปที่ 4 – 11	42
รูปที่ 4-14 แสดงถึง กราฟเปรียบเทียบเส้นทางเดินที่ได้กับเส้นทางเดินที่ต้องการ (ฟังก์ชันวงกลม)	42

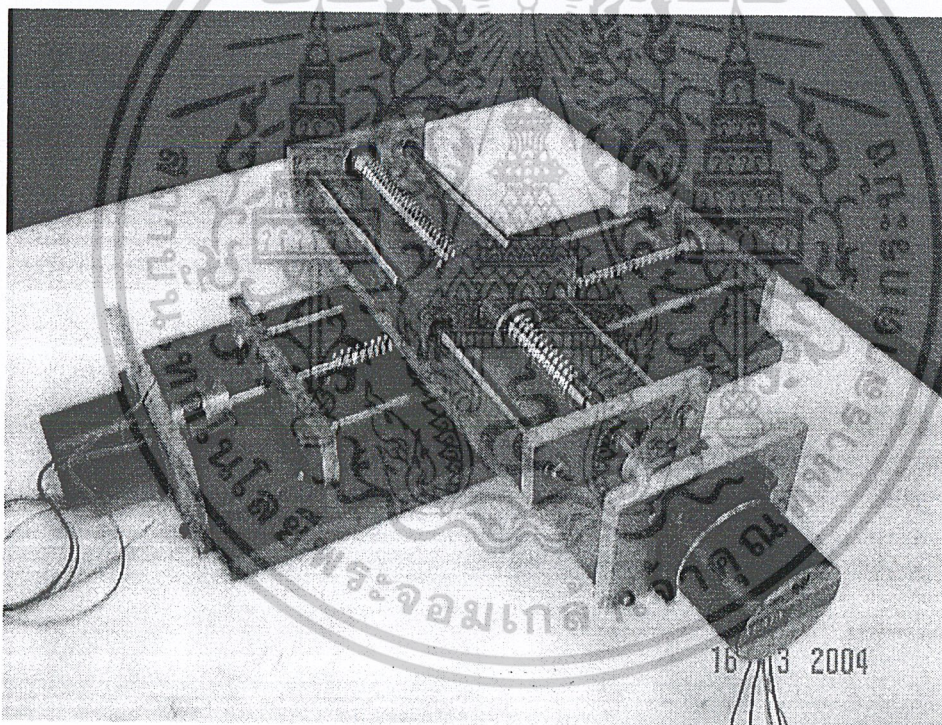


บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

การควบคุมการเคลื่อนที่ (Motion Control) ในอุตสาหกรรมต่างๆ อาทิ เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งในงานหนึ่งๆจะประกอบด้วย การควบคุมแรงบิด, การควบคุมความเร็ว, การควบคุมตำแหน่ง การควบคุมตำแหน่งให้ได้ตามต้องการนั้น เป็นงานที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะว่าเป็นตัวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตอีกทางหนึ่งนั่นเอง ซึ่งโต๊ะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกนก็จัดเป็นอุปกรณ์หนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการควบคุมตำแหน่งและการเคลื่อนที่ในปัจจุบัน ซึ่งอุปกรณ์ชนิดนี้ตามท้องตลาดจะมีราคาสูง ดังนั้นจึงได้รับความสนใจในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ชนิดนี้ให้ได้ในราคาที่ถูกลงและสามารถนำไปใช้งานได้จริง



รูปที่ 1-1 แสดงถึง โต๊ะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกนที่ใช้ในโครงงานนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

1. ออกแบบและสร้างไ้ะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน โดยใช้ Open Loop
2. เพื่อใช้เป็นต้นแบบของไ้ะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน ราคาถูก

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. สามารถนำทฤษฎีและหลักการมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบ ไ้ะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน ได้
2. สามารถทำการออกแบบและสร้างไ้ะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน ต้นแบบขึ้นมาได้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ

1. ศึกษาการทำงานของไ้ะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน
2. ออกแบบและสร้างไ้ะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน
3. ออกแบบระบบควบคุมของไ้ะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน
4. ติดตั้งและทำการทดลอง
5. สรุปผลการทดลองและข้อผิดพลาด
6. นำเสนอผลงาน



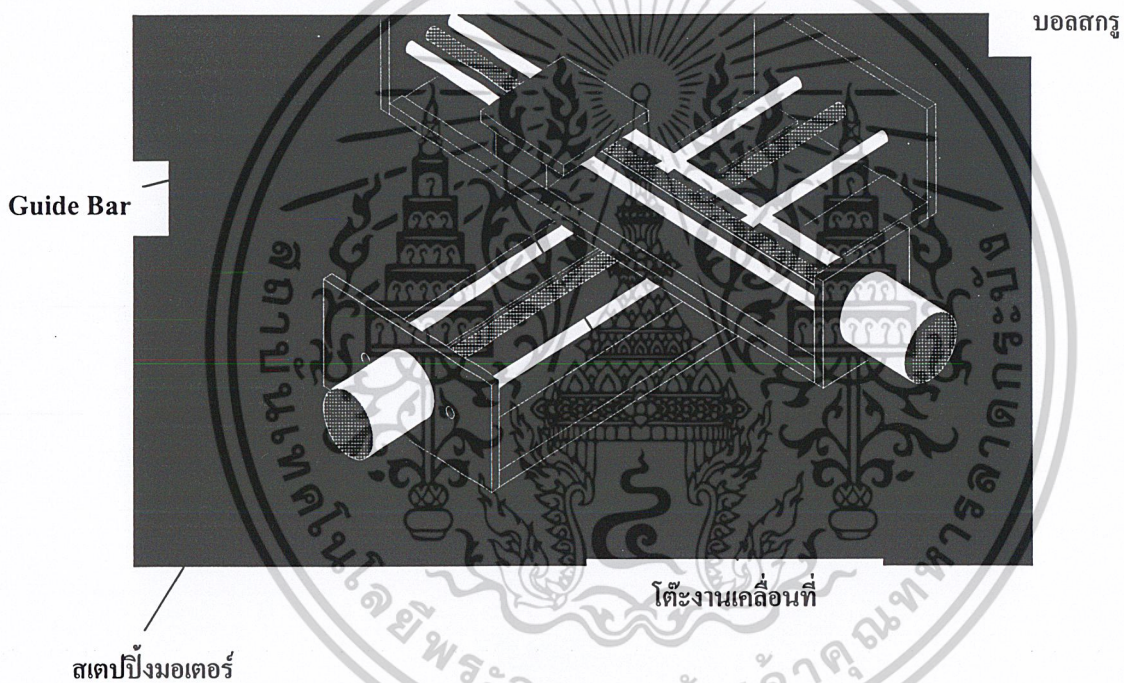
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

โครงสร้างทางกลของโต๊ะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน

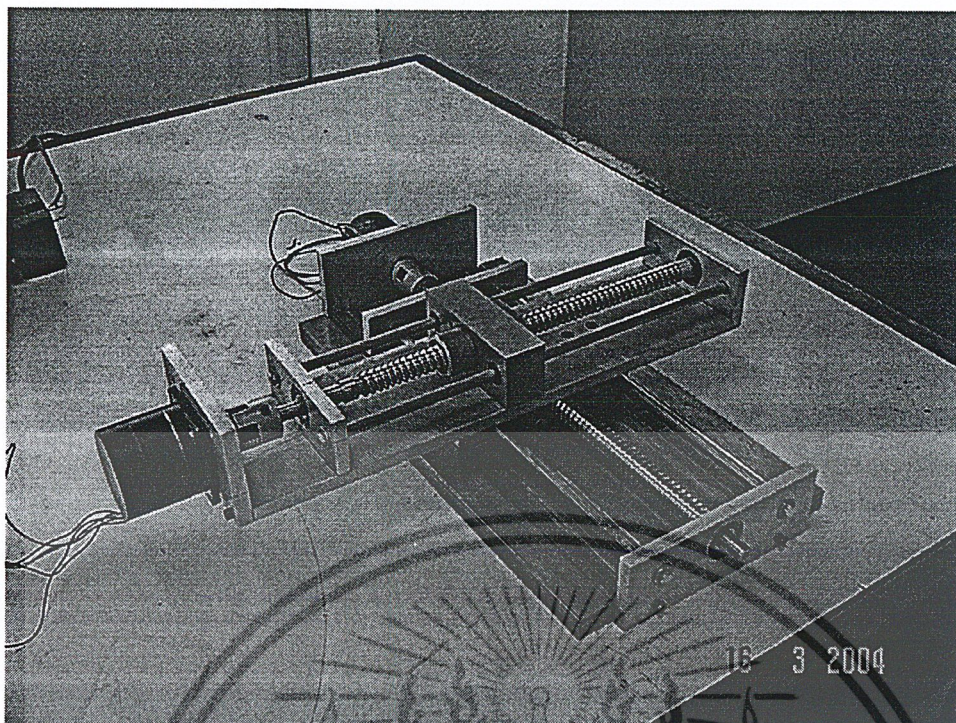
ในการออกแบบโครงสร้างของโต๊ะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การเคลื่อนที่ในแนวแกน X และการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y ทั้ง 2 ส่วนนี้จะมีส่วนประกอบที่เหมือนกันและเคลื่อนที่เป็นอิสระต่อกัน จะประกอบด้วยข้อมูลและเงื่อนไขที่ใช้ในการคำนวณดังต่อไปนี้

2.1 ส่วนประกอบของโต๊ะงานเคลื่อนที่

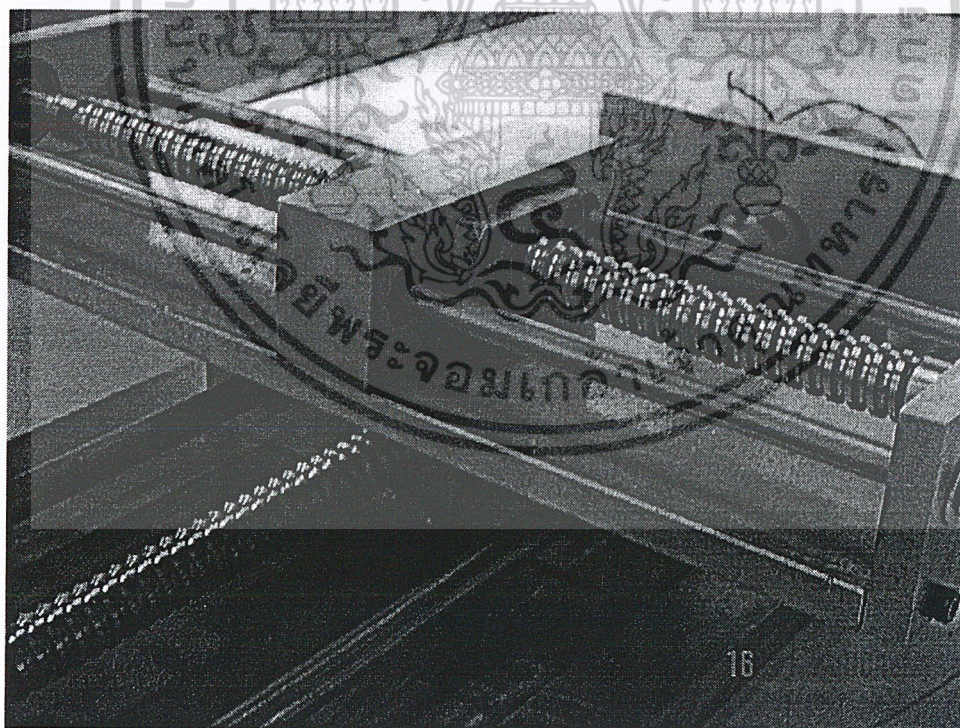


รูปที่ 2-1 แสดงถึง ภาพเขียนแบบโครงสร้างของโต๊ะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

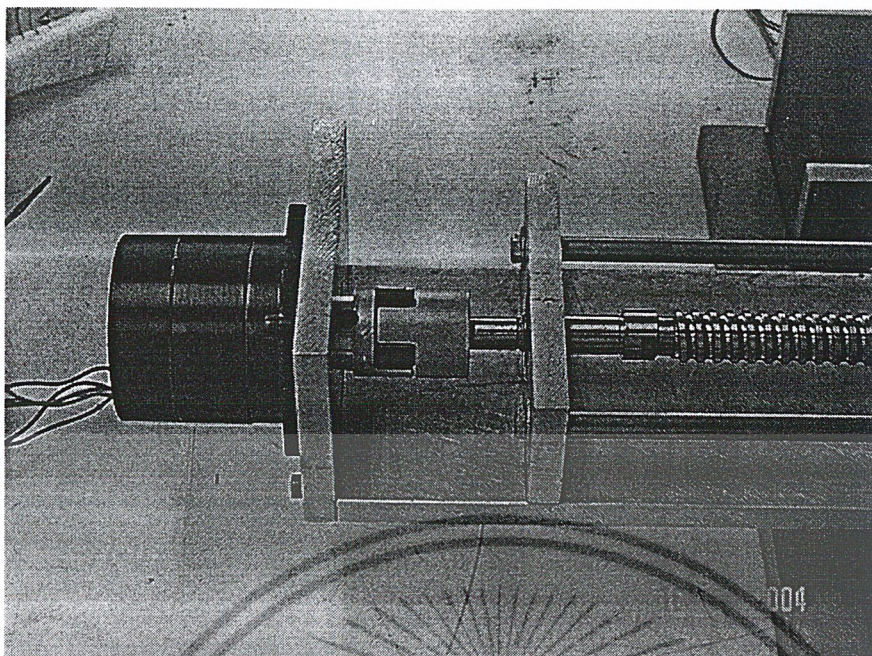


รูปที่ 2-2 แสดงถึง รูปโครงสร้างจริงของโต๊ะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน



รูปที่ 2-3 แสดงถึง รูปโครงสร้างจริงของตัวเลื่อนโต๊ะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-4 แสดงถึง ระบบส่งกำลังไต่งานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน

2.2 สเตปปีงมอเตอร์

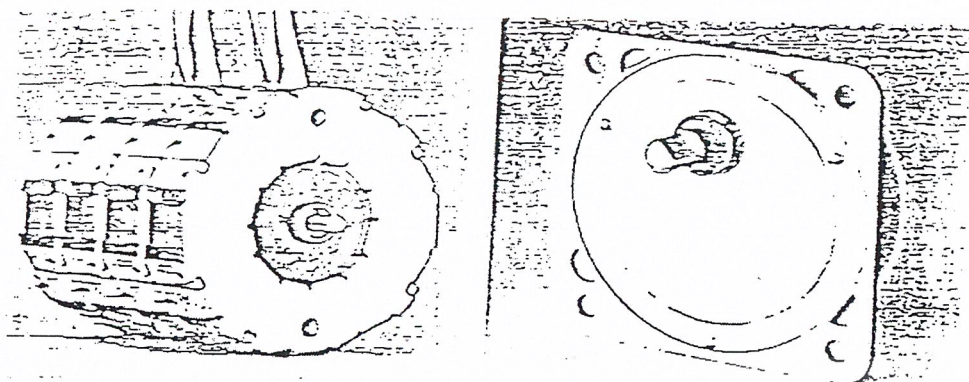
1. สาเหตุที่เลือกใช้สเตปปีงมอเตอร์

1. เป็นลักษณะการควบคุมแบบไม่ต้องการการป้อนกลับ ไม่ว่าจะเป็นการควบคุมตำแหน่งหรือความเร็ว
2. ความผิดพลาดเกี่ยวกับตำแหน่งแทบไม่มีเลยเนื่องจากการเคลื่อนที่ของ Stepping motor นั้นเคลื่อนที่ด้วยจำนวนองศาที่แน่นอน
3. สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยความถี่และความกว้างของพัลส์
4. สเตปปีงมอเตอร์มักจะถูกนำมาใช้กับเครื่องมือที่ต้องการความละเอียดแม่นยำ

2. หลักการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์

สเตปปีงมอเตอร์ เป็นตัวขับเคลื่อนชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการขับเคลื่อนหุ่นยนต์ สเตปปีงมอเตอร์ นี้เมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแล้วจะได้เปรียบกว่ามาก ทั้งนี้เพราะว่าสเตปปีงมอเตอร์ มีแรงบิดที่สูงกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และมีรอบการหมุนที่ช้ากว่าทำให้ไม่จำเป็นต้องมีชุดเฟืองทด สามารถที่จะต่อตรงได้เลย แต่มีข้อเสียเปรียบตรงที่การควบคุมค่อนข้างยาก และมีราคาแพงกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมากและหายากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-5 แสดงถึง ลักษณะของสเตปป์มอเตอร์



รูปที่ 2-6 แสดงถึง การวางตำแหน่งของขดลวดในสเตปป์มอเตอร์ ชนิด 3 เฟส

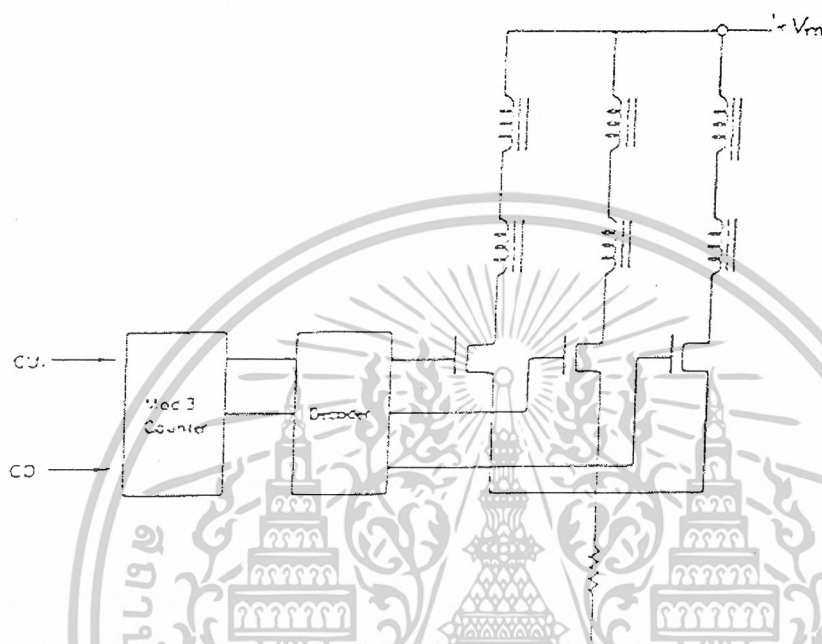
หลักการทำงานอย่างง่าย ๆ ของสเตปป์มอเตอร์ คือเมื่อเราผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดอาร์เมเจอร์ และขดลวดที่อยู่รอบ ๆ จะให้เกิดสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นขั้วแม่เหล็กที่ตรงข้ามกันจะดึงดูดกัน และถ้าต้องการให้หมุนก็เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าให้ไปที่ขดลวดรอบนอกขดต่อไปแกนก็จะหมุนไปที่ขั้วของขดลวดนั้น จากรูปแกนของมอเตอร์จะอยู่ที่คู่ 1a, 1b เราต้องการให้มีการหมุนก็เปลี่ยนกระแสไฟมาที่ขดลวดคู่ 2a, 2b ขดลวดอาร์เมเจอร์ก็จะหมุนมาที่คู่ 2a, 2b คือการหมุนจะหมุนไปที่ละขั้น สเตปป์มอเตอร์ ที่แสดงให้ดูเป็นชนิด 3 เฟส หนึ่งรอบของการหมุน มีการหยุด 6 ครั้ง ดังนั้น ในการหมุนแต่ละครั้งแกนของมอเตอร์จะเบี่ยงไปเท่ากับ $360/6$ คือ 60 องศา

ในสเตปป์มอเตอร์ บางตัวจะมีชุดเฟืองทดอยู่ในตัว เพื่อลดมุมของการหมุน และทำให้มีแรงบิดมากกว่าเดิม สเตปป์มอเตอร์ ส่วนมากจะมีมุมของการหมุนเท่ากับ 1.8 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การควบคุมสเตปป์มอเตอร์

การควบคุมสเตปป์มอเตอร์ มีวงจรควบคุมดังแสดงในรูป 3.3 ซึ่งจะมีตัวดีโคดเตอร์ (Decoder) เป็นตัวเลือกว่าจะปล่อยกระแสให้ไหลผ่าน ไปยังขดลวดขั้วใด เพื่อทำให้เกิดการหมุน และมีมอด 3 เคาน์เตอร์ (Mod 3 counter) เป็นตัวกำหนดทิศทางของการหมุนจากรูป ถ้าเลือก CU (Count Up) มอเตอร์ จะหมุนตามเข็มนาฬิกา และถ้าเลือก CD (Count Down) มอเตอร์จะหมุนทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 2-7 แสดงถึง วงจรการควบคุมสเตปป์มอเตอร์

4. ชนิดของสเตปป์มอเตอร์

โดยทั่วไปมีอยู่ 3 ชนิด คือ

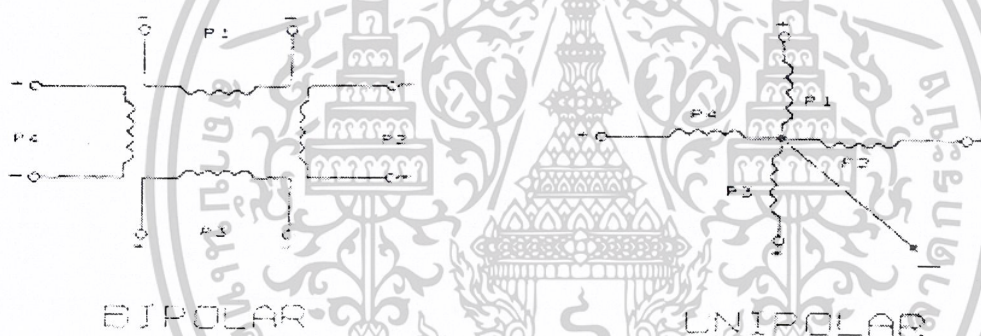
- วารีเอเบิล รีลัคแตนซ์ (VARIABLE RELUCTANCE (VR))
- เพอร์มาเนนท์แมกเนต (PERMANENT MAGNET (PM))
- ไฮบริดสเตปเปอร์มอเตอร์ (HYBRID STEPPER MOTOR (HSM))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. วารีเอเบิลรีล็กแตนซ์ (VR) จะเป็นสเตปเปอร์มอเตอร์ที่ถูกกล่าวถึง และนำไปใช้งานมากที่สุด โดยเฉพาะแบบ 4 เฟส โรเตอร์ และสเตเตอร์จะทำมาจากเหล็กผสมซิลิกอนเพลลาของมอเตอร์จะหมุนไปเป็นค่ามุมคงที่ หรือเรียกว่า มุมสเตป (Os = ชีตร้าเอส) มักจะมีมุมที่ต่างกัน คือ 0.72, 0.9, 1.8, 2.0, 3.6, 7.5, 15 สำหรับสเตปเปอร์มอเตอร์ ชนิดนี้ส่วนใหญ่จะใช้วงจรขับแบบยูนิโพลาร์ (UNIPOLAR) ซึ่งลักษณะการทำงานของวงจรจะต้องป้อนค่าโวลต์เตจเข้าไปในแต่ละขั้วตามลักษณะของพัลส์ที่ใช้ขับชุดไดรเวอร์ (DRIVER) ค่าโวลต์เตจที่จ่ายให้มอเตอร์จะใช้อ้างอิงกับกราวด์เสมอ

2. เพอร์มาเนนท์แมกเนต (PM) จะเป็นสเตปเปอร์มอเตอร์แบบที่ใช้ตัวโรเตอร์ทำด้วยแม่เหล็กถาวร สเตปเปอร์มอเตอร์แบบนี้ จะใช้ลักษณะการหมุนแบบไบโพลาร์ (BIPOLAR) ซึ่งลักษณะการทำงานจะต้องจ่ายไฟบวกลบเข้าแต่ละเฟสของมอเตอร์โดยตรง

3. ไฮบริดสเตปเปอร์มอเตอร์ (HSM) จะเป็นแบบผสมระหว่าง (PM) และ (VR) จำนวนซี่ฟันของโรเตอร์และ สเตเตอร์จะไม่เท่ากัน สเตปเปอร์มอเตอร์แบบนี้จะมีลักษณะการทำงานที่ซับซ้อน จึงเป็นแบบที่ไม่ค่อยนิยมใช้งานเท่าใดนัก



รูปที่ 2-8 แสดงถึง วงจรขับ STEPPER MOTOR แบบต่าง ๆ

5. วิธีการกระตุ้นเฟส

โดยทั่วไปวงจรที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ จะนิยมใช้ทั้ง 2 แบบนี้คือ แบบไบโพลาร์ หรือ CHOPPER จะใช้กับสเตปเปอร์มอเตอร์ที่เป็นชนิด PM และแบบยูนิโพลาร์ จะใช้กับชนิด VR ส่วนการขับเคลื่อนของสเตปเปอร์มอเตอร์ชนิด HSM จะมีวงจรการขับที่แตกต่างออกไป เนื่องจากคุณสมบัติของมอเตอร์ชนิดนี้ สามารถทำงานตามกระแสได้ทั้งสองทิศทาง (สลับขั้วไฟบวกลบที่จ่ายให้กับมอเตอร์)

วิธีการกระตุ้นเฟส มี 3 วิธี ได้แก่

1. ซิงเกิลเฟส (SINGLE PHASE EXITATION) เป็นการกระตุ้นแบบเฟสเดี่ยว ตามสัญญาณพัลส์ที่ป้อนเข้าสู่ขับเคลื่อนมอเตอร์

PHASE		PULSE							
A	1	0	0	0	1	0	0	0	
B	0	1	0	0	0	1	0	0	
C	0	0	1	0	0	0	1	0	
D	0	0	0	1	0	0	0	1	

2. ทูเฟส (TWO PHASE EXITATION) การกระตุ้นเป็นแบบที่ละสองเฟสคู่พร้อมกัน

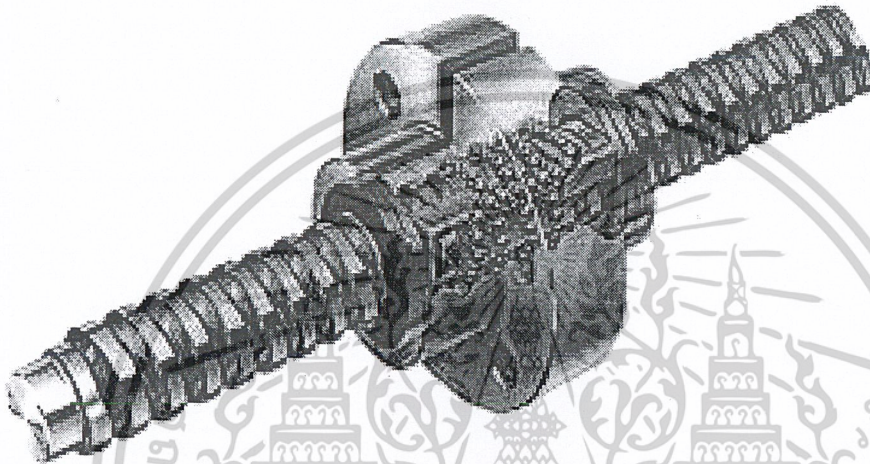
PHASE		PULSE							
A	1	0	0	1	1	0	0	1	
B	1	1	0	0	1	1	0	0	
C	0	1	1	0	0	1	1	0	
D	0	0	1	1	0	0	1	1	

3. ฮาล์ฟสเตป (HALF STEP EXITATION) แบบกึ่งสเตป จะเป็นการรวมรูปแบบการหมุนของทั้งสองแบบไว้ในแบบเดียวกัน

PHASE		PULSE							
A	1	1	0	0	0	0	0	1	
B	0	1	1	1	0	0	0	0	
C	0	0	0	1	1	1	0	0	
D	0	0	0	0	0	1	1	1	

วิธีการกระตุ่นเฟสทั้ง 3 แบบนี้จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกวิธีการกระตุ่นจึงจำเป็นที่จะต้องพิจารณา เพื่อให้เหมาะสมกับงานนั้น ๆ การกระตุ่นแบบ ชิงเกลเฟส จะเป็นแบบที่มีความเที่ยงตรงของตำแหน่งงานสูง แต่จะมีแรงบิด (Torque) น้อย ส่วนการกระตุ่นแบบทูลเฟส มีความเที่ยงตรงของตำแหน่งน้อยกว่าแบบแรก แต่มีแรงบิดสูงกว่า และการกระตุ่นแบบฮาล์ฟสเตปเป็นแบบที่มีความเที่ยงตรงของตำแหน่งน้อยมาก แต่จะมีแรงบิดสูงเช่นกัน

2.3 บอลสกรูส่งกำลัง



รูปที่ 2-9 แสดงถึง รูปร่างภายในของบอลสกรู

1. สาเหตุที่เลือกใช้บอลสกรูส่งกำลัง

ข้อดี

1. มีประสิทธิภาพมากกว่า 90 %
2. มีความเที่ยงตรงสูง
3. แทบจะไม่ต้องพิจารณาถึงความร้อนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความเสียดทาน
4. เคลื่อนที่ได้ราบเรียบ
5. สามารถการขจัดปัญหา Backlash ได้ดี

ข้อเสีย

1. ต้องการน้ำมันหล่อลื่นเพื่อยืดอายุการใช้งาน
2. สิ่งแปลกปลอมจากภายนอกมีผลต่ออายุการใช้งาน
3. ความแข็งแรงน้อยกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การออกแบบเพื่อเลือกขนาดสกรูส่งกำลัง จะมีเงื่อนไขและสมการที่เกี่ยวข้อง ดังนี้
- 1. มีภาระสูงสุดไม่เกิน 2 กิโลกรัม
 - 2. ระยะเคลื่อนที่สูงสุดในแต่ละแกนของบอลสกรูเท่ากับ 210 มิลลิเมตร
 - 3. ความเร็วของมอเตอร์สูงสุดเท่ากับ 1.8 รอบต่อวินาที
- สมการหาคำสั่งและแรงบิดของมอเตอร์

$$P = IV = Tw \tag{2.1}$$

$$w = 2(\pi)nT / 60 \tag{2.2}$$

สมการหาขนาดของสกรูส่งกำลัง

$$d_{max} = M_{max} C / I \tag{2.3}$$

$$t = Tr / J \tag{2.4}$$

$$t_y = 0.6 d_y \tag{2.5}$$

$$1/N = ((t/t_y)^2 + (d_{max} / d_y)^{2.1/2}) \tag{2.6}$$

สัญลักษณ์

P	คือ	กำลังขับของมอเตอร์
I	คือ	กระแสไฟฟ้า
V	คือ	แรงดันไฟฟ้า
w	คือ	ความเร็วเชิงมุม
n	คือ	ความเร็วรอบ
d _y	คือ	ความต้านแรงดึงคราก (Yield Strength)
N	คือ	ค่าความปลอดภัย
M	คือ	โมเมนต์ดัด
C	คือ	ระยะจากแกนสะเทิน ไปยังผิวนอกสุด
I	คือ	โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่
R	คือ	รัศมีของสกรูส่งกำลัง
J	คือ	โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้วของพื้นที่
t	คือ	ความเค้นเฉือน
t _y	คือ	ความเค้นเฉือนคราก

การคำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆ

1. หากำลังขับของสเตปป์มอเตอร์

$$\text{จากข้อมูล } I = 1.2 \text{ A}$$

$$V = 6 \text{ Vdc}$$

$$P = IV$$

$$= 1.2 \times 6$$

$$= 7.2 \text{ W}$$

2. หาทอร์กของสเตปป์มอเตอร์

$$P = T\omega = \{2(\pi)nT\} / \text{eff motor}$$

กำหนดให้ประสิทธิภาพมอเตอร์ เท่ากับ 0.85

$$7.2 = (2 \times 3.14 \times 1.8 \times T) / 0.85$$

$$T = 541.3 \text{ N.mm}$$

3. การคำนวณหาขนาดสกรูส่งกำลัง

สกรูตัวล่างรับ Load ทั้งหมด = น้ำหนักของชุดเคลื่อนตัวบนทั้งหมด + น้ำหนักภายนอก +
น้ำหนักตัวเคลื่อนตัวล่าง + น้ำหนักของตัวสกรูเอง

$$= 5 + 2$$

$$= 7 \text{ kg.}$$

$$\text{จาก } d_y = 58 \text{ ksi}$$

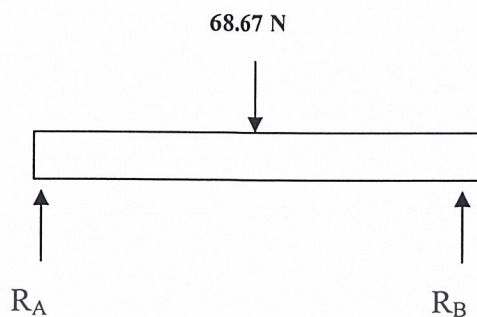
$$= 58 \times 6.895$$

$$= 400 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{จาก } d_{\max} = M_{\max} C / I$$

จะต้องการ $M_{\max}$ ก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

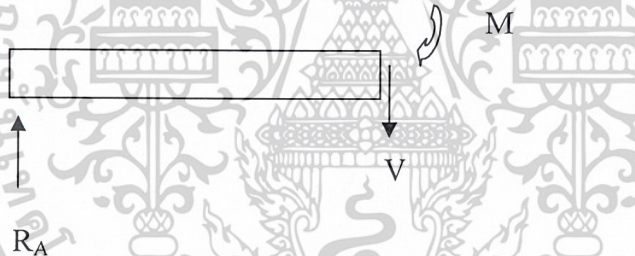
หา $M_{\max}$ 

$$F_y = 0, R_A + R_B = 68.67 \text{ N}$$

$$M_A = 0, 68.67 \times 105 = R_B \times 210$$

$$R_B = 34.335 \text{ N}$$

$M_{\max}$ จะเกิดขึ้นบริเวณตรงกลางของคาน



$$F_y = 0, V = 34.335 \text{ N}$$

$$M_A = 0, M = 34.335 \times 105 = 3605.175 \text{ mm}$$

$$d_{\max} = M_{\max} C / I$$

$$= \{3605.175 \times (d/2)\} / \{(\pi)d^4/64\}$$

$$= 36722.011 / d^3$$

$$t = Tr / J$$

$$= 16T / (\pi)d^3$$

$$= \{16 \times 541.3\} / 3.14d^3$$

$$= 2756.818 / d^3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 t_y &= 0.6 d_y \\
 &= 0.6 \times 400 \\
 &= 240 \text{ N.mm}
 \end{aligned}$$

จากทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด

$$1/N = ((t/t_y)^2 + (d_{\max}/d_y)^2)^{1/2}$$

$$\text{เมื่อ } N = 3.3$$

นำค่าที่คำนวณได้แทนลงในสมการนี้ จะได้

$$D = 6.733 \text{ mm}$$

จากขนาดระบุที่ต่ำที่สุดจากตารางของเกลียวสเกลี่ขมคางหมู คือ $D = 8 \text{ mm}$

เนื่องจาก ราคาของสกรูส่งกำลังตามท้องตลาด มีราคาที่สูงมาก ประกอบกับขนาดระบุของสกรูที่ต้องการหาได้ยาก ดังนั้น ในโครงการนี้ เลือกใช้สกรูส่งกำลังที่หาได้ง่าย และผ่านการใช้งานมาแล้วซึ่งมีราคาถูกกว่ามาก

ขนาดระบุที่ใช้ คือ $D = 16 \text{ mm}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

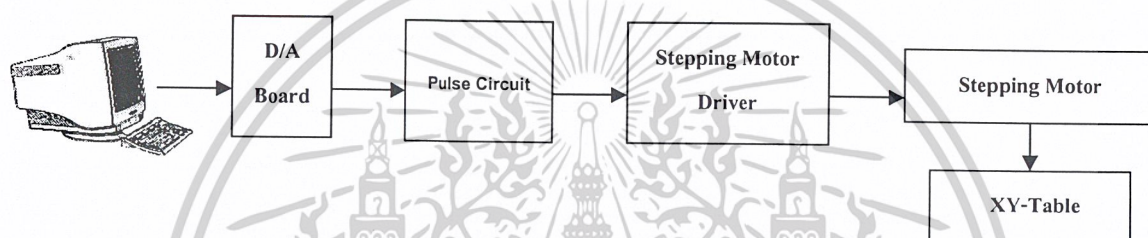
บทที่ 3

ระบบควบคุม

การออกแบบระบบควบคุมของโต๊ะงานเคลื่อนที่ ประกอบด้วย การเขียน โปรแกรมควบคุม และ การออกแบบ วงจรพัลส์ซึ่งจะต้องมีเงื่อนไขในการออกแบบ ดังนี้

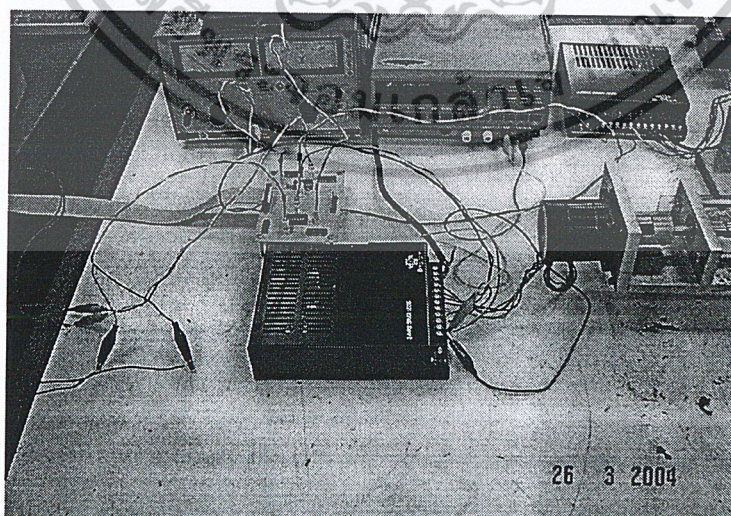
1. เป็นวงจบบแบบไม่มีการป้อนกลับ (Open Loop)
2. ภาษาที่ใช้ในการเขียน โปรแกรมระบบควบคุม คือ ภาษาซี

3.1 ส่วนประกอบของระบบควบคุมตำแหน่งโต๊ะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน



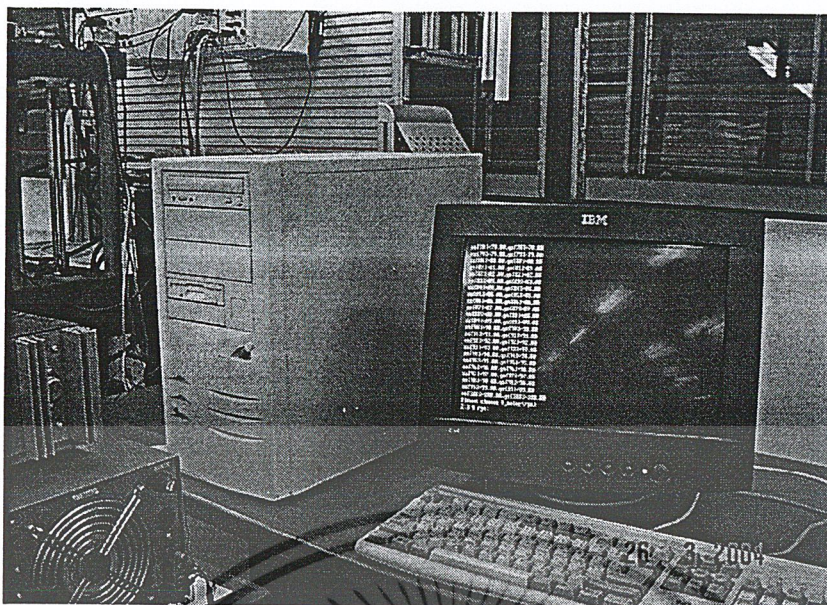
รูปที่ 3-1 แสดงถึง ส่วนประกอบของระบบควบคุมตำแหน่งโต๊ะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน

รูปที่ 3-1 แสดงถึง ส่วนประกอบของระบบควบคุมตำแหน่งโต๊ะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน ซึ่งจะประกอบด้วย คอมพิวเตอร์ที่จะใช้เพื่อควบคุมตำแหน่งของโต๊ะงานที่เขียนขึ้นด้วยโปรแกรมภาษาซี โดยเชื่อมต่อผ่านทาง D/A Board ซึ่งจะป้อนแรงดันไฟฟ้า 0-5 โวลต์ ไปยังวงจรกำเนิดพัลส์ที่ทำหน้าที่สร้างความถี่ในช่วง 0-1300 Hz ให้แก่ชุด Driver ของมอเตอร์เพื่อขับสเตปป์มอเตอร์ให้หมุน โดยมอเตอร์มีกำลังขับขนาด 7.2 W



รูปที่ 3-2 แสดงถึง ระบบควบคุมตำแหน่งโต๊ะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-3 แสดงถึง คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมโต๊ะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน

3.2 โปรแกรมควบคุมเส้นทางเดิน

1. สาเหตุที่เลือกใช้ภาษาซี (C Language Programming) ในการเขียนระบบควบคุม

1. เป็นภาษาระดับกลาง กล่าวคือ มีลักษณะคล้ายกับประโยคทางภาษาอังกฤษ
2. สามารถทำงานได้เร็ว
3. ใช้เวลาในการศึกษาและเขียนโปรแกรมไม่มากนัก
4. เป็นภาษาที่ใช้เขียนระบบปฏิบัติการยูนิกซ์ (UNIX Operating System) ซึ่งเป็นระบบปฏิบัติการใน

ระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ที่แพร่หลายในปัจจุบัน

5. เป็นภาษาที่สามารถประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง เช่น

- โปรแกรมระบบ (Operating System)
- โปรแกรมประยุกต์ใช้งาน (Application Program)
- โปรแกรมอรรถประโยชน์ (Utilities Program)
- โปรแกรมทางด้านงานควบคุม (Control Program)

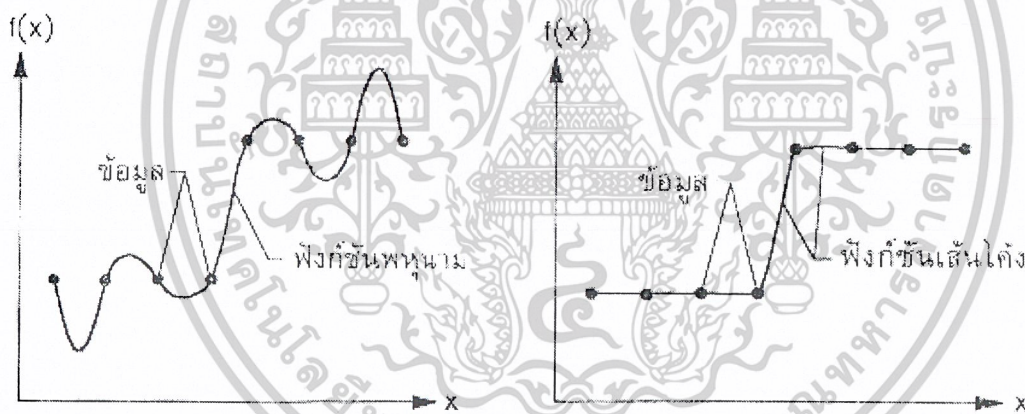
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทฤษฎีที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมควบคุมเส้นทางเดิน

การประมาณค่าในช่วงด้วยเส้นโค้ง

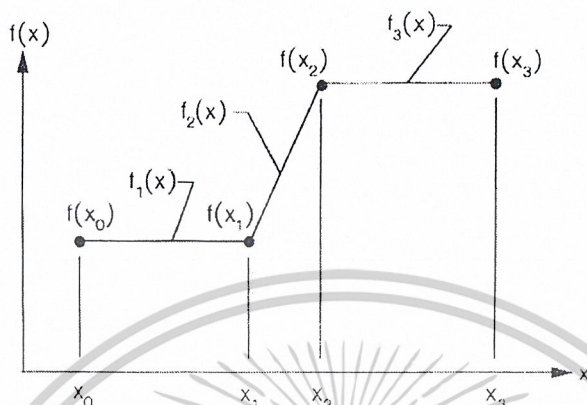
จากวิธีการประมาณค่าในช่วงโดยการใช้อย่างต่างจากการแบ่งย่อยของนิวตัน และโดยการใช้ฟังก์ชันพหุนามของลากรองจ์ ดังที่เราได้ศึกษาในหัวข้อที่ผ่านมาในบทนี้วิธีการทั้งสองก่อให้เกิดฟังก์ชันพหุนามที่ลากผ่านทุกข้อมูลที่กำหนดมาให้ สมมติว่าเรามีข้อมูลทั้งหมด 8 ข้อมูลที่มีลักษณะการกระจายที่อยู่ในรูปแบบของขั้นบันได (step function) ดังแสดงในรูปที่ 3-4 โดยข้อมูลดังกล่าวอาจเป็นข้อมูลที่ไดจากการวัดความหนาแน่นของอากาศหน้าปีกเครื่องบินเร็วกว่าเสียงและหากเราใช้ฟังก์ชันพหุนามที่จำเป็นต้องลากผ่านข้อมูลเหล่านี้ เราจะพบว่าฟังก์ชันพหุนามที่ประคิษฐ์ขึ้น ได้จะมีการกระจายที่เกิดการเบี่ยงเบนไปจากลักษณะของการกระจายที่ควรจะเป็นดังแสดงในรูปที่ 3-4 (ก) สาเหตุที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์เช่นนี้ ก็เพราะว่า เราพยายามสร้างฟังก์ชันพหุนามเพียงฟังก์ชันเดียวโดยบังคับให้ลากผ่านข้อมูลทั้ง 8 ข้อมูลที่กำหนดให้นี้ รายละเอียดของปรากฏการณ์ดังกล่าวเราจะได้ศึกษากันโดยละเอียดในตัวอย่างต่อไป

เพื่อปรับปรุงแก้ไขปรากฏการณ์ของการกระจายที่ไม่เหมาะสมดังกล่าว ในหัวข้อนี้เราจะมาศึกษาการประคิษฐ์ฟังก์ชันเส้นโค้ง (spline function) ที่เราจะใช้เชื่อมต่อระหว่างข้อมูลที่ละ 2 ข้อมูล ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการใช้ฟังก์ชันเส้นโค้งต่าง ๆ เหล่านี้มาเชื่อมต่อกัน จะก่อให้เกิดลักษณะของการกระจายในภาพรวมที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3-4 (ข)



รูปที่ 3-4 แสดงถึง ลักษณะการกระจายของฟังก์ชันพหุนามอันดับสูงและการใช้ฟังก์ชันเส้นโค้งสำหรับข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันขั้นบันได

1. การประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น การสร้างฟังก์ชันโดยเชื่อมต่อข้อมูลด้วยการใช้เส้นตรง (linear spline) จัดว่าเป็นวิธีที่ได้สะดวกที่สุด รูปที่ 3-5 แสดงการเชื่อมต่อข้อมูล 4 ข้อมูล ด้วยฟังก์ชันเส้นตรง 3 ฟังก์ชัน



รูปที่ 3-5 แสดงถึง การประมาณค่าในช่วงโดยใช้ฟังก์ชันเส้นตรง

ฟังก์ชันเส้นตรงทั้งสามที่เชื่อมต่อข้อมูลเหล่านี้ คือ

$$f_1(x) = f(x_0) + m_1(x - x_0) \quad x_0 \leq x \leq x_1 \quad (3.1a)$$

$$f_2(x) = f(x_1) + m_2(x - x_1) \quad x_1 \leq x \leq x_2 \quad (3.1b)$$

$$f_3(x) = f(x_2) + m_3(x - x_2) \quad x_2 \leq x \leq x_3 \quad (3.1c)$$

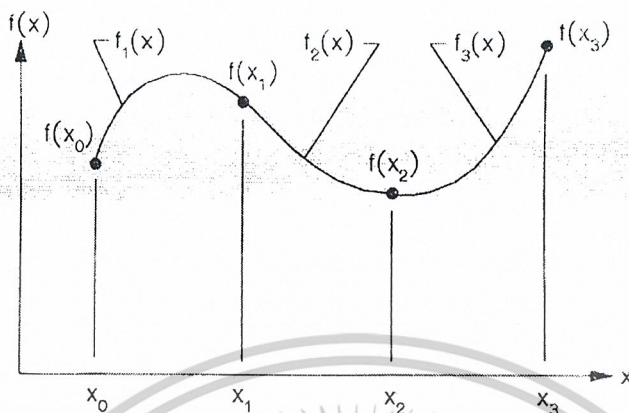
โดย

$$m_i = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{x_{i+1} - x_i} \quad (3.2)$$

แทนค่าความชันของฟังก์ชันเส้นตรงเหล่านี้ โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ประมาณค่าในช่วงเชิงเส้นสำหรับปัญหาทั่วไปที่ประกอบด้วย $n+1$ ข้อมูลสามารถประดิษฐ์ขึ้นได้โดยง่ายเช่นกัน ซึ่งในที่นี้จะละไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การประมาณค่าในช่วงกำลังสอง การสร้างฟังก์ชันเพื่อเชื่อมต่อข้อมูลด้วยการใช้เส้นโค้งกำลังสอง (quadratic spline) สามารถทำได้โดยไม่ยากนัก รูปที่ 3-6 แสดงข้อมูล 4 ข้อมูลที่ถูกเชื่อมต่อด้วยฟังก์ชันกำลังสอง 3 ฟังก์ชัน



รูปที่ 3-6 แสดงถึงการประมาณค่าในช่วงโดยใช้ฟังก์ชันกำลังสอง

ฟังก์ชันกำลังสองที่จำเป็นต้องหาซึ่งเชื่อมต่อข้อมูลเหล่านี้ คือ

$$f_1(x) = a_1x^2 + b_1x + c_1 \quad x_0 \leq x \leq x_1 \quad (3.3a)$$

$$f_2(x) = a_2x^2 + b_2x + c_2 \quad x_1 \leq x \leq x_2 \quad (3.3b)$$

$$f_3(x) = a_3x^2 + b_3x + c_3 \quad x_2 \leq x \leq x_3 \quad (3.3c)$$

โดย $a_i, b_i, c_i, i = 1, 2, 3$ เป็นค่าคงตัวที่ไม่รู้ค่า ซึ่งในที่นี้มีทั้งหมด 9 ค่า และสามารถคำนวณหาได้จากเงื่อนไขดังต่อไปนี้

(ก) ที่จุดต่อภายในใด ๆ ฟังก์ชันทั้ง 2 ด้านที่เชื่อมเข้าหากันที่จุดต่อภายในจุดใดจุดหนึ่งจำเป็นต้องมีค่าเท่ากันที่ตำแหน่งของจุดต่อ นั่น เช่น ที่จุดต่อ x_1 เงื่อนไขที่เกิดขึ้นนี้ คือ

$$f_1(x_1) = a_1x_1^2 + b_1x_1 + c_1 = f(x_1) \quad (3.4a)$$

$$\text{และ} \quad f_2(x_1) = a_2x_1^2 + b_2x_1 + c_2 = f(x_2) \quad (3.4b)$$

ในกรณีของรูปที่ 3-6 ที่มีจุดต่อภายใน 2 จุด ดังนั้นจึงเกิดเงื่อนไขเช่นนี้ 4 เงื่อนไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) ฟังก์ชันแรกต้องผ่านข้อมูลแรกที่ x_0 นั่นคือ

$$f_1(x_0) = a_1 x_0^2 + b_1 x_0 + c_1 = f(x_0) \quad (3.5a)$$

และฟังก์ชันท้ายต้องผ่านข้อมูลท้ายที่ x_3 นั่นคือ

$$f_3(x_3) = a_3 x_3^2 + b_3 x_3 + c_3 = f(x_3) \quad (3.5b)$$

นั่นคือ ก่อให้เกิดเงื่อนไขเพิ่มขึ้นอีก 2 เงื่อนไข

(ค) ที่จุดต่อภายในใด ๆ ค่าความชันของฟังก์ชันทั้ง 2 ด้านของจุดต่อต้องมีค่าเท่ากันที่ตำแหน่งของจุดต่อนั้น เช่น ที่จุดต่อ x_1 เงื่อนไขที่เกิดขึ้น คือ

$$f_1'(x_1) = f_2'(x_1) \quad (3.6a)$$

$$2a_1 x_1 + b_1 = 2a_2 x_1 + b_2 \quad (3.6b)$$

ดังเช่นในกรณีของรูปที่ 3-6 จะมีเงื่อนไขเช่นนี้อยู่ 2 เงื่อนไข

ดังนั้นจำนวนเงื่อนไขที่เกิดขึ้นทั้งหมดในกรณีของรูปที่ 3-6 คือ $4 + 2 + 2 = 8$ เงื่อนไข แต่เนื่องจากเรามีค่าคงตัวที่ไม่รู้ค่าทั้งหมด 9 ค่า ซึ่งเกินกว่าเงื่อนไขที่มีอยู่ 1 ค่า ดังนั้นเพื่อให้แก้ปัญหานี้ได้ เราอาจกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ a_1 ให้มีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งมีความหมายเช่นเดียวกันกับการกำหนดให้ฟังก์ชัน $f_1(x)$ แรกนั้นมีลักษณะการกระจายแบบเชิงเส้นตรงในรูปแบบเช่นเดียวกันกับดังที่อธิบายในหัวข้อ 3.2.2 นั่นคือ ในขั้นตอนท้ายสุด ตัวไม่รู้ค่าที่เหลืออยู่ 8 ค่านี้สามารถคำนวณได้จากระบบสมการที่ประกอบด้วย 8 สมการย่อยจากเงื่อนไขทั้งหมดดังกล่าว ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ c_1 \\ a_2 \\ b_2 \\ c_2 \\ a_3 \\ b_3 \\ c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \end{bmatrix} \quad (8 \times 8) \quad (8 \times 8) \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับปัญหาโดยทั่วไปที่ประกอบด้วยข้อมูลทั้งหมด $n+1$ ข้อมูล เราจำเป็นต้องประดิษฐ์ฟังก์ชันกำลังสองทั้งหมด n ฟังก์ชัน นั่นคือ $f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)$ และเนื่องจากแต่ละฟังก์ชันกำลังสองต่างประกอบด้วยค่าคงตัวที่ไม่รู้ค่า 3 ค่า ดังนั้นปัญหาโดยทั่วไป จึงประกอบด้วยค่าคงตัวทั้งหมด $3n$ ค่า เราสามารถใช้เงื่อนไขต่าง ๆ ดังที่อธิบายในข้อ (ก) – (ค) ซึ่งจะให้เงื่อนไขรวมทั้งสิ้น $2(n-1) + 2 + (n-1) = 3n-1$ เงื่อนไขในทำนองเดียวกันหากเรากำหนดให้ฟังก์ชันแรกมีการกระจายแบบเชิงเส้นกล่าวคือ $a_1 = 0$ ดังนั้นปัญหาโดยทั่วไปจึงประกอบด้วยค่าคงตัวที่ไม่รู้ค่า $3n-1$ ค่า ซึ่งสามารถคำนวณได้จากเงื่อนไขทั้งหมด $3n-1$ เงื่อนไขที่มีอยู่ดังกล่าว

ความเข้าใจในขั้นตอนดังที่ได้อธิบายมานี้ สามารถนำไปประดิษฐ์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้โดยการสร้างระบบสมการ (3.7) จากเงื่อนไขต่าง ๆ ดังแสดงในสมการ (3.4) – (3.6) ระบบสมการที่สร้างขึ้นมานี้จะประกอบด้วย $3n-1$ สมการย่อย เช่น หากปัญหาประกอบด้วยข้อมูลทั้งหมด 20 ข้อมูล ($n+1 = 20$) ระบบสมการย่อยที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วย 56 สมการย่อย เป็นต้น ซึ่งสามารถแก้ได้โดยตรงโดยการโปรแกรมย่อยต่าง ๆ ที่ใช้แก้ระบบสมการดังที่ได้อธิบายในบทที่ 3 จากนั้นค่าคงตัวที่ไม่รู้ค่าที่คำนวณได้จากการแก้ระบบสมการนี้ จึงนำไปใช้เพื่อหาค่าประมาณค่าในช่วงของข้อมูลต่าง ๆ ที่ต้องการ

3. การประมาณค่าในช่วงกำลังสาม การสร้างฟังก์ชันเพื่อให้เชื่อมต่อข้อมูลด้วยการใช้เส้นโค้งกำลังสาม (cubic spline) สามารถทำได้ในทำนองเดียวกันกับการใช้เส้นโค้งกำลังสอง ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อที่แล้ว การใช้เส้นโค้งกำลังสามนี้มีข้อดี เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นโค้งกำลังสอง กล่าวคือ ในช่วงระหว่างจุด 2 จุด ที่กำหนดให้ เส้นโค้งกำลังสองจะมีลักษณะการกระจายแบบเว้าเข้าหรือเว้าออกอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น ในขณะที่เส้นโค้งกำลังสามสามารถมีลักษณะการกระจายแบบเว้าเข้าและเว้าออกที่ต่อเนื่องกันในช่วงระหว่างจุด 2 จุด ที่กำหนดให้ นั่นคือเส้นโค้งกำลังสามจึงเป็นที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปในการคำนวณค่าประมาณในช่วงข้อมูล เนื่องจากมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของการกระจายที่ดีกว่า

หากเรามีข้อมูลทั้งหมด 4 ข้อมูลดังเช่นแสดงในรูปที่ 3-6 ฟังก์ชันกำลังสาม ที่จำเป็นต้องคำนวณหาซึ่งเชื่อมต่อข้อมูลเหล่านี้ คือ

$$f_1(x) = a_1x^3 + b_1x^2 + c_1x + d_1 \quad x_0 \leq x \leq x_1 \quad (3.8a)$$

$$f_2(x) = a_2x^3 + b_2x^2 + c_2x + d_2 \quad x_1 \leq x \leq x_2 \quad (3.8b)$$

$$f_3(x) = a_3x^3 + b_3x^2 + c_3x + d_3 \quad x_2 \leq x \leq x_3 \quad (3.8c)$$

โดย $a_i, b_i, c_i, d_i, i = 1, 2, 3$ เป็นค่าคงตัวที่ไม่รู้ค่า ซึ่งในที่นี้มีทั้งหมด 12 ค่า และสามารถคำนวณได้จากเงื่อนไขดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) ที่จุดต่อภายในใด ๆ ฟังก์ชันจาก 2 ด้านที่เชื่อมเข้าหากันที่จุดต่อจำเป็นต้องมีค่าเท่ากันที่ตำแหน่งของจุดนั้น เช่น ที่จุดต่อ x_1 เงื่อนไขที่เกิดขึ้นคือ

$$f_1(x_1) = a_1x_1^3 + b_1x_1^2 + c_1x_1 + d_1 = f(x_1) \quad (3.9a)$$

และ $f_2(x_1) = a_2x_1^3 + b_2x_1^2 + c_2x_1 + d_2 = f(x_2) \quad (3.9b)$

ในกรณีของรูปที่ 3-6 ที่มีจุดต่อที่อยู่ภายใน 2 จุด ดังนั้น จึงเกิดเงื่อนไขเช่นนี้ 4 เงื่อนไข

(ข) ฟังก์ชันแรกต้องผ่านข้อมูลแรกที่ x_0 นั่นคือ

$$f_1(x_0) = a_1x_0^3 + b_1x_0^2 + c_1x_0 + d_1 = f(x_0) \quad (3.10a)$$

และฟังก์ชันท้ายต้องผ่านข้อมูลท้ายที่ x_3 นั่นคือ

$$f_3(x_3) = a_3x_3^3 + b_3x_3^2 + c_3x_3 + d_3 = f(x_3) \quad (3.10b)$$

นั่นคือ ก่อให้เกิดเงื่อนไขเพิ่มขึ้นอีก 2 เงื่อนไข

(ค) ที่จุดต่อภายในใด ๆ ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (first derivative) ซึ่งมีความหมายถึงค่าของความชันของฟังก์ชัน ทั้ง 2 ด้านของจุดต่อ ต้องมีค่าเท่ากันที่ตำแหน่งของจุดต่อนั้น เช่น ที่จุดต่อ x_1 เงื่อนไขที่เกิดขึ้นนี้คือ

$$f_1'(x_1) = f_2'(x_1) \quad (3.11a)$$

$$3a_1x_1^2 + 2b_1x_1 + c_1 = 3a_2x_1^2 + 2b_2x_1 + c_2 \quad (3.11b)$$

ดังนั้นในรูปที่ 3-6 นี้จะประกอบด้วยเงื่อนไขเช่นนี้อยู่ 2 เงื่อนไข

(ง) ที่จุดต่อภายในใด ๆ ค่าอนุพันธ์อันดับสอง (second derivative) ของฟังก์ชันทั้ง 2 ด้านของจุดต่อต้องมีค่าเท่ากันที่ตำแหน่งของจุดต่อนั้น เช่น ที่จุดต่อ x_1 เงื่อนไขนี้คือ

$$f_1''(x_1) = f_2''(x_1) \quad (3.12a)$$

$$6a_1x_1 + 2b_1 = 6a_2x_1 + 2b_2 \quad (3.12b)$$

ซึ่งในรูปที่ 3-6 นี้ ประกอบด้วยเงื่อนไขเช่นนี้อยู่ 2 เงื่อนไข

(จ) ค่าอนุพันธ์อันดับสองของฟังก์ชันที่ตำแหน่งจุดปลายทั้งสอง นั่นคือที่ x_0 และ x_3 นั้น มีค่าเท่ากับศูนย์

$$f_1''(x_0) = f_3''(x_3) = 0 \quad (3.12c)$$

ซึ่งก่อให้เกิดเงื่อนไขเพิ่มขึ้นอีก 2 เงื่อนไข

ดังนั้นจากรูปที่ 3-6 ซึ่งประกอบด้วย 4 ข้อมูล และ 3 ฟังก์ชันกำลังสาม โดยมีตัวคงที่ที่ไม่รู้ค่าทั้งหมด 12 ตัว และจากเงื่อนไขดังที่ได้อธิบายในข้อ (ก) – (จ) ซึ่งมีทั้งหมด $4 + 2 + 2 + 2 + 2 = 12$ เงื่อนไข ดังนั้นจึงก่อให้เกิดระบบสมการซึ่งประกอบด้วย 12 สมการย่อยที่สามารถนำไปสู่ผลลัพธ์ของค่าคงตัวที่ไม่รู้ค่าเหล่านี้ได้ ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}_{(12 \times 12)} \begin{Bmatrix} a1 \\ b1 \\ c1 \\ d1 \\ \vdots \\ a3 \\ b3 \\ c3 \\ d3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{Bmatrix}_{(12 \times 1)} \quad (3.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับปัญหาโดยทั่วไปที่ประกอบด้วย $n+1$ ข้อมูล เราจำเป็นต้องประดิษฐ์ฟังก์ชันกำลังสามทั้งหมด n ฟังก์ชัน นั่นคือ $f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)$ และเนื่องจากแต่ละฟังก์ชันต่างประกอบด้วยค่าคงตัวที่ไม่รู้ค่า 4 ค่า ดังนั้นปัญหาโดยทั่วไปจึงประกอบด้วยค่าคงตัวทั้งหมด $4n$ ค่า จากเงื่อนไขทั้งหมดดังที่ได้อธิบายในข้อ (ก) – (จ) เราจะมีเงื่อนไขรวมทั้งสิ้น $2(n-1)+2+(n-1)+(n-1)+2 = 4n$ เงื่อนไข ซึ่งหมายความว่าเราสามารถสร้างระบบสมการที่ประกอบด้วย $4n$ สมการย่อยที่จะนำไปสู่ผลลัพธ์ของค่าคงตัวที่ไม่รู้ค่าทั้งหมด $4n$ ค่าได้ และเมื่อได้ค่าคงตัวเหล่านี้แล้วเราสามารถแทนกลับลงในฟังก์ชันกำลังสามต่าง ๆ ดังแสดงในสมการ (2.42) เพื่อการประมาณค่าในช่วงของข้อมูลใด ๆ ที่ต้องการ

จากกระบวนการดังที่อธิบายมาข้างต้นนี้ หากเราต้องการสร้างฟังก์ชันกำลังสามทั้งหมด n ฟังก์ชัน เราจำเป็นต้องแก้ระบบสมการที่ประกอบด้วย $4n$ สมการย่อยซึ่งจัดได้ว่าเป็นจำนวนค่อนข้างมากทีเดียว กระบวนการที่จะอธิบายดังต่อไปนี้นี้จะหลีกเลี่ยงการแก้ระบบสมการที่ประกอบด้วยสมการย่อยจำนวนมากดังกล่าว โดยจะแก้ระบบสมการซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยเพียง $n-1$ สมการ กระบวนการดังกล่าวนี้จะประดิษฐ์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์พร้อมยกตัวอย่างการใช้งานโดยละเอียด

กระบวนการใหม่นี้ตั้งอยู่บนหลักการที่ว่า หากเราหาค่าอนุพันธ์อันดับสองของฟังก์ชันกำลังสามดังเช่นที่อยู่ในรูปแบบของสมการ (3.8) จะก่อให้เกิดฟังก์ชันเชิงเส้น ตรงที่อยู่ในรูปแบบดังเช่นแสดงในสมการ (3.12) นั่นคือ เราสามารถกล่าวได้ว่าลักษณะการกระจายของค่าอนุพันธ์อันดับสองของฟังก์ชันกำลังสามนั้นอยู่ในรูปแบบเชิงเส้นตรง ซึ่งเข้าทำนองการกระจายเชิงเส้นตรงของลากรองจ์ และสามารถเขียนให้อยู่ในดังนี้

$$f_i''(x) = f''(x_{i-1}) \frac{x - x_i}{x_{i-1} - x_i} + f''(x_i) \frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \quad (3.14)$$

โดย $i = 1, 2, \dots, n$ หากเราอินทิเกรตสมการ (3.14) นี้ เราก็จะได้ฟังก์ชัน $f_i(x)$ ที่เราต้องการ ซึ่งใช้ได้ระหว่างตำแหน่ง x_{i-1} และ x_i แต่ในขณะเดียวกันจะเกิดค่าคงที่จากการอินทิเกรตขึ้นมา 2 ค่า ซึ่งค่าคงที่นี้สามารถหาได้จากเงื่อนไขที่ว่า

$$\text{ที่ตำแหน่ง } x_{i-1}, \quad f_i(x_{i-1}) = f(x_{i-1}) \quad (3.15a)$$

$$\text{และที่ตำแหน่ง } x_i, \quad f_i(x_i) = f(x_i) \quad (3.15b)$$

เมื่อได้ค่าคงที่จากการอินทิเกรตทั้ง 2 ค่านี้แล้วแทนกลับลงในฟังก์ชัน $f_i(x)$ จะได้ผลลัพธ์ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 f_i(x) &= \frac{f''(x_{i-1})}{6(x_i - x_{i-1})} (x_i - x)^3 + \frac{f''(x_i)}{6(x_i - x_{i-1})} (x - x_{i-1})^3 \\
 &+ \left[\frac{f(x_{i-1})}{(x_i - x_{i-1})} - \frac{(x_i - x_{i-1})f''(x_{i-1})}{6} \right] (x_i - x) \\
 &+ \left[\frac{f(x_i)}{(x_i - x_{i-1})} - \frac{(x_i - x_{i-1})f''(x_i)}{6} \right] (x_i - x_{i-1})
 \end{aligned} \quad (3.16)$$

ทางด้านขวาของสมการ (3.16) นี้ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าเพียง 2 ค่า นั่นคือ ค่าอนุพันธ์อันดับสองของฟังก์ชันนั้นที่ตำแหน่ง x_{i-1} และ x_i เนื่องจากที่จุดต่อภายในใด ๆ ค่าของความชันทั้ง 2 ด้านของจุดต่อต้องมีค่าเท่ากันที่ตำแหน่งของจุดต่อนั้น ดังเช่นแสดงในสมการ (3.11) นั่นคือ

$$f_{i-1}'(x_i) = f_i'(x_i) \quad (3.17)$$

ดังนั้น หากเราหาค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งของฟังก์ชัน $f_{i-1}(x)$ และ $f_i(x)$ จากสมการ (3.16) แล้วแทนลงในสมการ (3.17) เราจะได้

$$\begin{aligned}
 (x_i - x_{i-1}) f''(x_{i-1}) + 2(x_{i+1} - x_{i-1}) f''(x_i) + (x_{i+1} - x_i) f''(x_{i+1}) \\
 = \frac{6}{x_{i+1} - x_i} (f(x_{i-1}) - f(x_i)) + \frac{6}{x_i - x_{i-1}} (f(x_i) - f(x_{i+1}))
 \end{aligned} \quad (3.18)$$

สมการ (3.18) ที่ได้นี้ประกอบด้วยค่าอนุพันธ์อันดับสองที่ไม่รู้ค่าที่ตำแหน่ง x_{i-1}, x_i, x_{i+1} เนื่องจาก $i = 1, 2, \dots, n$ และค่าอนุพันธ์อันดับสองที่จุดปลายทั้งสองของข้อมูลทั้งหมดมีค่าเท่ากับศูนย์ดังเช่น แสดงในสมการ (3.12c) นั่นคือ

$$f''(x_0) = f''(x_n) = 0 \quad (3.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

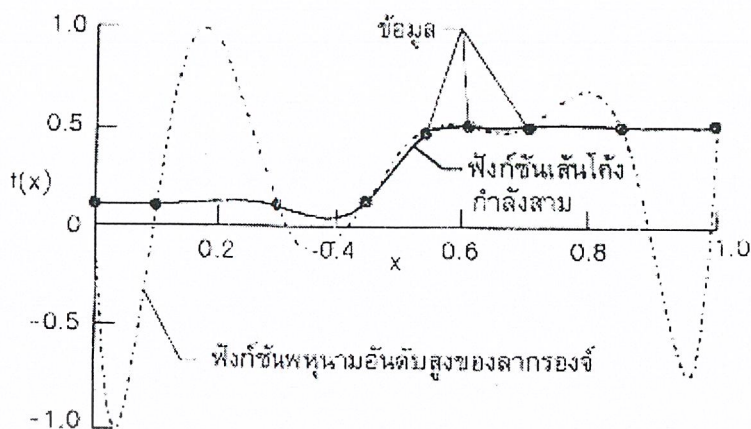
ดังนั้น ค่าอนุพันธ์อันดับสองที่ไม่รู้ค่าคือ $f''(x_1), f''(x_2), \dots, f''(x_{n-1})$ ซึ่งมีทั้งหมด $n-1$ ค่า และสามารถหาได้จากการเขียนสมการ (3.18) ขึ้นมาเป็นระบบสมการ ระบบสมการที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} x & & & & & \\ x & x & & & & \\ & x & x & & & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & & x & x & x \\ & & & & x & x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f''(x_1) \\ f''(x_2) \\ f''(x_3) \\ \vdots \\ f''(x_{n-2}) \\ f''(x_{n-1}) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x \\ x \\ x \\ \vdots \\ x \\ x \end{Bmatrix} \quad (3.20)$$

โดยเครื่องหมาย x ระบุค่าตัวเลขที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ เมทริกซ์จัตุรัสที่อยู่ทางด้านซ้ายของระบบสมการ (3.20) นี้เป็นเมทริกซ์ที่สัมพันธ์ทุกตัวต่างมีค่าเท่ากับศูนย์ยกเว้นสัมประสิทธิ์ตามแนวเส้นทแยงมุมทั้งสาม (tridiagonal matrix) ระบบสมการดังกล่าวสามารถแก้เพื่อหาผลลัพธ์ได้โดยง่าย เช่น โดยการใช้วิธีการกำจัดแบบเกาส์ดังที่จะแสดงในตัวอย่างต่อไป

ค่าอนุพันธ์อันดับสองที่ได้จากการแก้ระบบสมการ (3.20) เมื่อแทนกลับลงในสมการ (3.20) จะก่อให้เกิดฟังก์ชันเส้นโค้งกำลังสาม ซึ่งสามารถนำไปหาค่าประมาณในช่วงที่อยู่ระหว่างตำแหน่ง x_{i-1} และ x_i เพื่อให้เกิดความเข้าใจในวิธีการนี้ยิ่งขึ้น เราจะมาศึกษาปัญหาการประมาณค่าในช่วงดังกล่าวต่อไป ซึ่งเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสูง และฟังก์ชันเส้นโค้งกำลังสาม

ลักษณะการกระจาย ของฟังก์ชันเส้นโค้ง กำลังสาม ที่คำนวณได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับฟังก์ชันพหุนามอันดับสูงของลากรองจ์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในรูปที่ 2-11 จากลักษณะของข้อมูลทั้ง 9 ข้อมูล ที่กำหนดให้ แสดงให้เห็นว่า การใช้ฟังก์ชันเส้นโค้งกำลังสามก่อให้เกิดลักษณะของผลลัพธ์ที่มีการกระจายที่สมเหตุสมผล เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะการกระจายฟังก์ชันพหุนามอันดับสูงของลากรองจ์ซึ่งเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมากที่เดียวระหว่างช่วงของข้อมูลผลลัพธ์ที่นี้ ยังบ่งบอกเป็นนัยว่า ความเข้าใจในข้อมูลและลักษณะของปัญหานั้นเป็นสิ่งจำเป็น เมื่อทราบลักษณะของปัญหาว่าควรเป็นเช่นไรแล้ว ความเข้าใจในการเลือกใช้ฟังก์ชันที่ถูกต้องเหมาะสมกับปัญหานั้นจึงเป็นสิ่งที่สำคัญตามมาก ตัวอย่างนี้จึงเป็นอีกตัวอย่างหนึ่งที่แสดงถึงความสำคัญในความเข้าใจพื้นฐานของระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในแบบต่าง ๆ เพื่อที่สามารถนำไปใช้ได้ถูกต้อง และเหมาะสมกับปัญหานั้น ๆ



รูปที่ 3-7 แสดงถึง การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสูงอื่นๆ (ลากรองจ์) กับ ฟังก์ชันเส้นโค้งกำลังสาม

บทสรุป

ในเนื้อหาส่วนนี้ เราได้ศึกษาระเบียบวิธีการประมาณค่าในช่วงที่นิยมใช้กัน โดยทั่วไปหลายวิธีการอันได้แก่ วิธีการใช้ผลต่างจากการแบ่งย่อยของนิวตัน วิธีการใช้ฟังก์ชันพหุนามของลากรองจ์ และวิธีการประมาณค่าในช่วงโดยเส้นโค้ง ซึ่งในแต่ละระเบียบวิธีการเรายังได้ศึกษาถึงลู่ไปในรายละเอียดที่เป็นขั้นเป็นตอน โดยเริ่มจากการประมาณค่าในช่วงด้วยการใช้ฟังก์ชันที่อยู่ในรูปแบบที่ง่ายที่สุดขึ้นไปจนถึงรูปแบบทั่ว ๆ ไป ในแต่ละระเบียบวิธีการ เราได้ศึกษาตัวอย่างประกอบพร้อมการประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อให้เกิดความเข้าใจที่แท้จริง และในขณะเดียวกันสามารถนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์เหล่านี้ไปใช้งานได้อย่างถูกต้อง

ในภาพรวมวิธีการใช้ผลต่างจากการแบ่งย่อยของนิวตัน และ วิธีการใช้ฟังก์ชันพหุนามของลากรองจ์ต่างก่อให้เกิดฟังก์ชันพหุนามอันดับสูงที่ลากผ่านข้อมูลต่าง ๆ เราได้พบว่าสำหรับข้อมูลบางชุดดังเช่นในตัวอย่างต่าง ๆ ที่ใช้อธิบายหัวข้อดังกล่าว การใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีอันดับสูงขึ้นจะก่อให้เกิดการประมาณค่าในช่วงที่ให้ผลลัพธ์ที่เที่ยงตรงมากขึ้น เรายังพบว่าการประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับทั้งสองวิธีการนี้สามารถทำได้โดยง่ายเช่นกัน ในขณะเดียวกันเรายังได้พบอีกว่ามีข้อมูลบางชุดที่ฟังก์ชันพหุนามอาจก่อให้เกิดความผิดพลาดจากความเป็นจริงไปมาก ซึ่งเราอาจแก้ไขได้โดยใช้ฟังก์ชันเส้นโค้งที่มีลักษณะต่าง ๆ กัน ให้เชื่อมต่อข้อมูลที่ละคู่แทนที่จะใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับสูงเพียงฟังก์ชันเดียว เพื่อให้ลากผ่านทุกข้อมูลที่มีทั้งหมด

การได้เรียนรู้ลักษณะการกระจายของฟังก์ชันในรูปแบบต่าง ๆ กันในบทนี้รวมทั้งการได้เข้าใจถึงข้อดีและข้อเสียของวิธีการต่าง ๆ นอกจากจะช่วยให้เราตัดสินใจเลือกใช้วิธีการประมาณในช่วงที่เหมาะสมกับปัญหาต่าง ๆ ได้แล้ว ความเข้าใจในลักษณะการกระจายของฟังก์ชันเหล่านี้โดยถ่องแท้ จะเป็นพื้นฐานที่สำคัญและมีผลต่อการปรับปรุงความเที่ยงตรงของผลลัพธ์ที่คำนวณได้สำหรับระเบียบวิธีเชิงตัวเลขอื่น ๆ ในระดับสูงขึ้นไป อาทิเช่น ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่เราจะทำการศึกษาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. คำสั่งที่สำคัญที่ใช้ในการควบคุม โต้ะงานเคลื่อนที่

Output (ADDRESS,DATA); เป็นคำสั่งที่ใช้ในการส่งข้อมูลขนาด 8 บิต ไปยังพอร์ตแอดเดรสที่กำหนดโดยในที่นี้กำหนดให้ พอร์ตแอดเดรสมีค่าเป็น 0x220 และใช้ค่านี้อ้างอิงตลอดการใช้งาน

Delay (msec); เป็นคำสั่งที่ใช้ในการหน่วงเวลา ซึ่งมีความละเอียดอยู่ในระดับหน่วย มิลลิวินาที

Clock (); เป็นคำสั่งที่ใช้ในการรับค่าเวลาปัจจุบันจาก CPU และใช้เป็นส่วนประกอบประกอบสำคัญของฟังก์ชันจับเวลา

สำหรับในส่วนของโปรแกรมนั้นถูกจัดเก็บไว้ในไฟล์ข้อมูลที่มีชื่อว่า xy - table ซึ่งในการทำงานของโปรแกรมนั้นจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

1. ส่วนกำหนดเส้นทาง จะเป็นส่วนที่รับค่าตำแหน่งคู่พิกัด (x,y) หรือ ค่ารัศมีในส่วนของวงกลมมาจากแป้นพิมพ์ และทำการวิเคราะห์เส้นทางตามรูปแบบทางเดินที่ผู้ใช้เลือก โดยทำการแบ่งช่วงจุดที่กำหนดนั้นออกเป็นจุดย่อยในกรณีของการเคลื่อนที่แบบเส้นโค้ง เพื่อให้ได้เส้นโค้งที่มีความราบเรียบ

2. ส่วนประมวลผล จะทำการรับค่าจุดย่อยนั้นมาครั้งละ 1 คู่ เพื่อทำการวิเคราะห์ คำนวณเวลา ทิศทางการหมุนของมอเตอร์ และความเร็วที่เหมาะสม โดยใช้หลักการว่า การเคลื่อนที่ระหว่างจุด 2 จุด เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ตามแนวแกน x และแนวแกน y จะต้องเท่ากัน โดยการนำค่าความแตกต่างของระยะทางตามแนวแกนที่มากกว่ามาหารด้วยความเร็วรอบมอเตอร์สูงสุดที่ผู้ใช้เลือกไว้ เพื่อให้ได้เวลาที่ใช้ และนำค่าเวลานี้ไปคำนวณหาความเร็วรอบมอเตอร์ของอีกแกนหนึ่ง และนำค่าความเร็วรอบมอเตอร์ที่ได้นั้น ไปเปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ จากนั้นจึงส่งค่าแรงดันไฟฟ้างกล่าวและเวลาไปยังส่วนควบคุม

3. ส่วนควบคุม ทำการรับค่าแรงดันไฟฟ้าจากส่วนประมวลผล และทำการแปลงค่าแรงดันไฟฟ้านั้นให้เป็นเลขฐาน 2 ออกไปทางพอร์ตแอดเดรส base+4 เพื่อขับมอเตอร์ในแนวแกน x และ base+6 เพื่อขับมอเตอร์ในแนวแกน y โดยทำการหน่วงค่าดังกล่าวตามเวลาที่คำนวณได้ในส่วนประมวลผล

4. SOURCE CODE ของโปรแกรมควบคุมเส้นทางเดิน ดูได้จากภาคผนวกท้ายเล่ม

3.3 วงจรพัลส์

1. การออกแบบวงจร สำหรับการออกแบบวงจรพัลส์นั้น เราจะเลือกใช้ไอซี เบอร์ 4046 Phase Locked Loop ซึ่งมีหน้าที่ทำหน้าที่สร้างความถี่ที่เราเรียกว่า VCO (Voltage Control Oscillator) ในย่านความถี่ต่ำได้ตามต้องการ ไอซี เบอร์ 4046 นี้สามารถคำนวณหาความถี่ได้จาก

$$f_{\min} = 1/\{R_2(C_1 + 32 \text{ pF})\} \quad (5.1)$$

$$f_{\max} = \{1/R_1(C_1 + 32 \text{ pF})\} + f_{\min} \quad (5.2)$$

เมื่อ $10K < R_1 < 1M$

$10K < R_2 < 1M$

$100pF < C_1 < 10000pF$

และ ถ้า $R_2 = \text{Infinity}$ แล้ว

$V_{CO_{in}} = 2.5 \text{ V} - 7.5 \text{ V}, R_1 > 400 \text{ kilo Ohm.}$

$V_{DD} = 10 \text{ Vdc}$

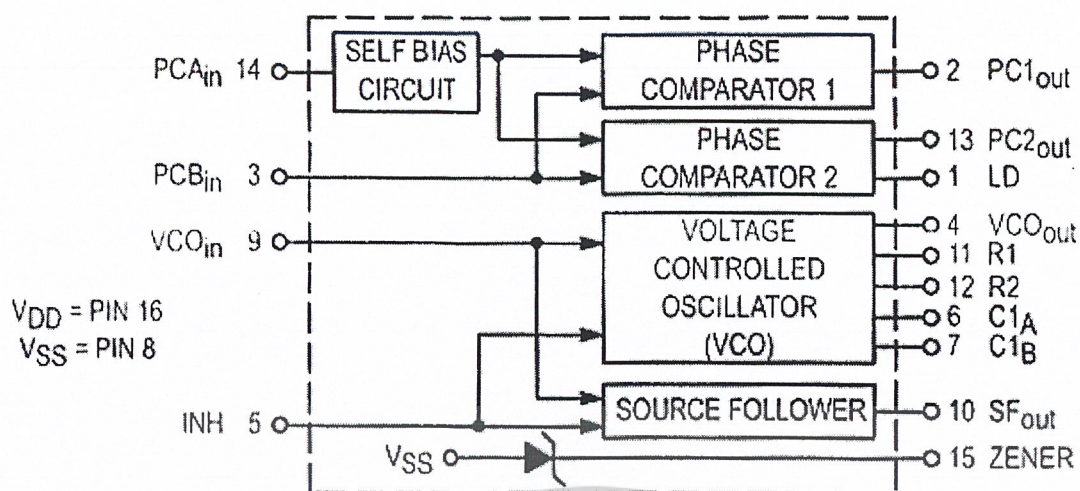
จากการคำนวณโดยการแทนค่าลงในสมการที่ 5.1-5.2 เราจะได้ว่า

$$C_1 = 10000 \text{ pF}$$

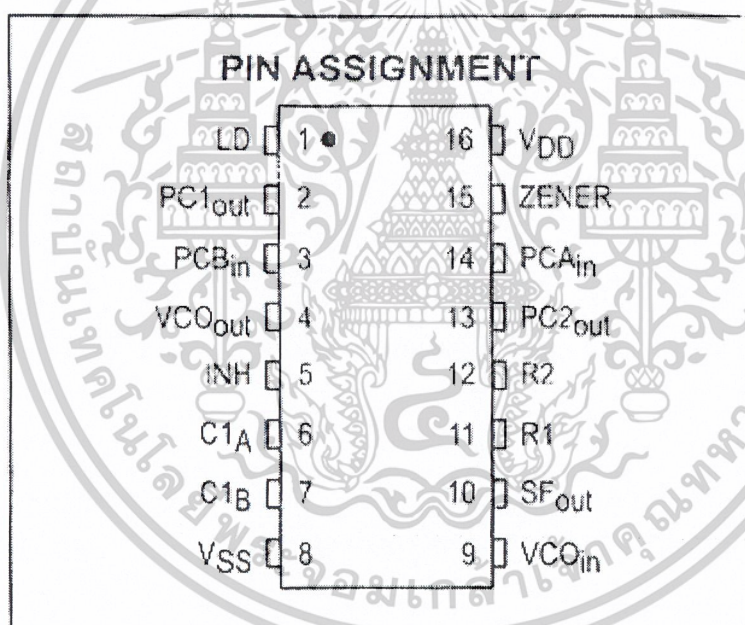
$$R_1 = 750 \text{ kilo Ohm.}$$

$$R_2 = \text{Infinity}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-8 แสดงถึง บล็อกไดอะแกรมของไอซี เบอร์ 4046 Phase Locked Loop



รูปที่ 3-9 แสดงถึง การต่อวงจรพัลส์ที่ขาไอซี ณ ตำแหน่งต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ข้อมูลจำเพาะของไอซี

1. ค่าพิกัดสูงสุด

ดูตารางที่ 5.1 ในคู่มือไอซีทุกเบอร์จะต้องให้ตารางแสดงค่าพิกัดสูงสุด (maximum rating) ของไอซีไว้ การใช้งานไอซีให้ปลอดภัยจะต้องใช้ไอซีไม่ได้รับแรงดันมากเกินไปที่พิกัดที่กำหนดไว้ ตารางที่ 5.1 เป็นตัวอย่างของพิกัดสูงสุดของ CMOS เบอร์หนึ่ง

ตารางที่ 3-1 พิกัดสูงสุดของไอซี CMOS

MAXIMUM RATINGS* (Voltages Referenced to V_{SS})

Rating	Symbol	Value	Unit
DC Supply Voltage	V_{DD}	- 0.5 to + 18	Vdc
Input Voltage, All Inputs	V_{in}	- 0.5 to $V_{DD} + 0.5$	Vdc
DC Input Current, per Pin	I_{in}	± 10	mAdc
Power Dissipation, per Package†	P_D	500	mW
Operating Temperature Range	T_A	- 55 to + 125	°C
Storage Temperature Range	T_{stg}	- 65 to + 150	°C

* Maximum Ratings are those values beyond which damage to the device may occur.

† Temperature Derating:

Plastic "P and D/DW" Packages: - 7.0 mW/°C From 65°C To 125°C

Ceramic "L" Packages: - 12 mW/°C From 100°C To 125°C

* ตัวถัง AL และ CL เป็นแบบเซรามิก CP เป็นแบบพลาสติก (จากคู่มือของโมโตโรลา)

1.1 แหล่งจ่ายไฟตรง แหล่งจ่ายไฟตรง (DC supply voltage) ที่ป้อนเข้าที่ระหว่างขา V_{DD} และขา V_{CC} นั้น จะต้องมียุ่ในระหว่างพิกัดที่กำหนดให้ ตามตารางที่ 5.1 จะเห็นว่าแรงจ่ายไฟไม่ควรสูงเกิน 18 โวลต์ นอกจากนั้นถ้ามีการป้อนแรงดันผิดขั้ว ไม่ควรป้อนแรงดันเข้าขั้วแหล่งจ่ายไฟต่ำกว่า - 0.5 โวลต์ แรงดันแหล่งจ่ายไฟที่บริษัท แนะนำจะอยู่ในช่วง + 3.0 ถึง + 15.0 โวลต์เท่านั้น

1.2 แรงดันขาเข้าที่ขาต่าง ๆ เป็นค่าแรงดันสูงสุด และ ต่ำสุดที่จะป้อนเข้าขาอินพุตใดขาหนึ่งของไอซีระดับแรงดันต้องอยู่ในช่วงที่กำหนด คือ ไม่เกิน $V_{DD} + 0.5$ โวลต์ และ ไม่ต่ำกว่า - 0.5 โวลต์ เช่น ใช้ $V_{DD} = 12$ โวลต์ ก็ไม่ควรป้อนแรงดันเกิน 12.5 โวลต์ หรือต่ำกว่า - 0.5 โวลต์ เป็นต้น

1.3 กระแสสูงสุด ค่านี้เป็นค่าที่บอกว่ากระแสสูงสุดที่จะจ่ายเข้า หรือจ่ายออกตลอดเวลาจากขาของไอซีต้องไม่เกิน 10 มิลลิแอมป์ ค่านี้ไม่ได้หมายถึงการจ่ายกระแสขนาดนี้ทุก ๆ ขาของไอซีในเวลาเดียวกัน เป็นค่าบอกเฉพาะขาใดขาหนึ่งเท่านั้น ขาแหล่งจ่ายไฟก็รวมอยู่ด้วย ปกติค่ากระแสนี้จะสูงขึ้นถ้าเป็นไอซีที่เป็นบัฟเฟอร์หรือตัวขับ

1.4 อุณหภูมิใช้งานและอุณหภูมิเก็บรักษา ในขณะที่ใช้งานไอซีไม่ควรใช้งานในบริเวณที่ร้อนผิดปกติ ไอซีจะแบ่งออกเป็น 2 เกรด สำหรับใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน เช่น เกรด AL ใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิ - 55°C ถึง + 125°C ส่วนเกรด CL/CP ซึ่งตัวถังเป็นพลาสติกจะใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิ - 40°C ถึง + 85°C CMOS จะมีช่วงอุณหภูมิใช้งานได้กว้างและสูงกว่า TTL

ส่วนอุณหภูมิการเก็บรักษานั้นหมายถึง ถ้าเราเก็บไอซีไว้เฉย ๆ ยังไม่ได้ไม่นำออกมาต่อวงจร ก็ไม่ควรเก็บไว้ในที่ที่มีอุณหภูมิสูงเกินไป ช่วงอุณหภูมิเก็บรักษาจากตารางจะได้ - 65°C ถึง + 150°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ช่วงแรงดันใช้งานที่แนะนำ แม้บริษัทผู้ผลิตจะกำหนดพิคสูงสุดให้แล้วก็ตาม แต่เพื่อให้ใช้งานไอซีได้อย่างปลอดภัยไร้ปัญหา มักจะแนะนำช่วงแรงดันที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานมาไว้

2. ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า ต่อไปจะอธิบายถึงลักษณะสมบัติของขาอินพุต และเอาต์พุตของไอซี ลองดูค่าต่าง ๆ ใน ตารางที่ 5.2 ซึ่งเป็นลักษณะสมบัติของไอซี CMOS

2.1 ระดับแรงดันขาออก (V_{OL} และ V_{OH}) เมื่อสัญญาณออกเป็น 0 ระดับแรงดันเรียกว่า V_{OL} และเมื่อสัญญาณออกเป็น 1 ระดับแรงดันเรียกว่า V_{OH} เงื่อนไขของแรงดันขาเข้า V_{in} ในขณะนั้นอาจจะเป็น V_{DD} หรือ 0 โวลต์ แล้วแต่ว่าเป็นเกตอะไร V_{OL} และ V_{OH} ยังขึ้นอยู่กับแรงดันแหล่งจ่ายไฟ V_{DD} ด้วย เช่น จากตารางที่ 5.2 ถ้า $V_{DD} = 5$ โวลต์ V_{OL} จะมีค่าต่ำกว่า 0.05 โวลต์ และ V_{OH} จะมีค่าสูงกว่า 4.95 โวลต์ การอ่านตารางตรงนี้จะต้องเข้าใจอย่างหนึ่งก็คือ เงื่อนไข $V_{in} = V_{DD}$ หรือ 0 โวลต์ แสดงว่าในขณะนั้นสัญญาณเข้าป้อนเข้ามาอย่างเต็มที่ ถ้าเราป้อน $V_{in} = 4$ โวลต์ซึ่งก็หมายถึง “1” เหมือนกัน แต่อาจจะไม่ได้ V_{OL} ต่ำกว่า 0.05 โวลต์ และ V_{OH} สูงกว่า 4.95 โวลต์ก็ได้

2.2 ระดับแรงดันสัญญาณเข้า (V_{IL} และ V_{IH}) ระดับแรงดันที่ไอซียอมรับว่าเป็นสัญญาณ “0” เรียกว่า V_{IL} และระดับแรงดันของสัญญาณ “1” เรียกว่า V_{IH} ในตารางที่ 5.2 จะแสดงค่าระดับแรงดันอินพุตที่จะทำให้เอาต์พุตให้ “0” หรือ “1” แน่ ๆ ตามชนิดของเกต ตัวอย่างเช่นเกต NAND ใช้ $V_{DD} = 5$ โวลต์ เพื่อให้ได้เอาต์พุตเป็น “1” ซึ่งมีระดับแรงดัน 4.5 โวลต์ จะต้องป้อนสัญญาณ “0” ซึ่งมีระดับแรงดันสูงสุดไม่เกิน 1.5 โวลต์ หรือค่าทั่วไปไม่เกิน 2.25 โวลต์เป็นใช้ได้ และเพื่อให้เอาต์พุตของเกต NAND เป็น “0” ซึ่งมีระดับ 0.5 โวลต์ จะต้องป้อนสัญญาณ “1” เข้าทางอินพุต สัญญาณ “1” จะต้องมียกระดับแรงดันสูงกว่า 3.5 โวลต์ หรืออย่างน้อยต้องสูงกว่าค่าทั่วไป 2.75 โวลต์ จากตารางนี้ ถ้าเราใช้ค่าทั่วไป แสดงว่า CMOS สามารถใช้กับระดับแรงดันของสัญญาณ “0” = 0 ถึง 2.25 โวลต์ และ “1” = 2.75 ถึง 5 โวลต์ แสดงว่า CMOS เป็นไอซีที่สามารถใช้งานในระดับแรงดันที่กว้างมาก

2.3 กระแสขาออก (I_{OH} และ I_{OL}) ในตารางที่ 12.3 แยกให้ตัวเลขระหว่างตัวถังแบบ AL และแบบ CL/CP จากกัน เพราะตัวถังทั้งสองแบบนี้การระบายความร้อนที่ต่างกัน จึงมีตัวเลขแตกต่างกันเล็กน้อย จะขออธิบายเฉพาะตัวถัง AL เท่านั้น

เมื่อขาเอาต์พุตให้สัญญาณออกเป็น “1” จะมีกระแสจ่ายออกเรียกว่า I_{OH} (source current) และถ้าสัญญาณออกเป็น “0” จะรับกระแสเข้ามาเรียกว่า I_{OL} (sink current) ทิศทางของกระแสทั้งสองนี้จะตรงข้ามกัน จากในตารางจะเห็นว่า กระแสจ่ายออกจะมีค่าเป็นลบ

กรณีที่ $V_{DD} = 5$ โวลต์ เมื่อเอาต์พุตเป็น “1” แรงดัน V_{OH} จะมีขนาดลดลงถ้าจ่าย I_{OH} ออกไปมาก ๆ ในตารางที่ 5.2 ได้ให้ข้อมูลกระแส I_{OH} ที่ $V_{OH} = 2.5$ โวลต์ ก็สามารถจ่ายกระแสจากขาเอาต์พุตออกไปได้อย่างน้อย 2.4 มิลลิแอมป์ หรือค่าเฉลี่ย 4.2 มิลลิแอมป์ ถ้าให้ V_{OH} ตกลงเล็กน้อยเหลือ 4.5 โวลต์ ก็สามารถจ่ายกระแสได้ 0.51 มิลลิแอมป์หรือค่าเฉลี่ย 0.88 มิลลิแอมป์

สำหรับกระแสไหลเข้า I_{OL} นั้น ยิ่งมีขนาดใหญ่มากขึ้นจะทำให้ V_{OL} สูงขึ้น ปกติ V_{OL} จะมีค่าประมาณ 0 โวลต์ ถ้ารับกระแส I_{OL} เข้ามา V_{OL} จะสูงขึ้น จากตารางที่ 5.2 ถ้าให้ $V_{OL} = 0.4$ จะสามารถรับกระแสได้อย่างน้อย 0.51 มิลลิแอมป์ หรือค่าเฉลี่ย 0.88 มิลลิแอมป์ จะเห็นว่ากระแสไหลเข้ามีค่าใกล้เคียงกับกระแสจ่ายออกที่ทำให้ $V_{OH} = 4.6$ โวลต์ ระดับแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไป 0.4 โวลต์เท่ากับแสดงว่า CMOS มีคุณสมบัติทางด้านกระแสเข้าออกสมมาตรกัน

2.4 กระแสอินพุต (I_{in}) จากตารางที่ 5.2 จะเห็นว่ากระแสเกือบจะไม่ไหลเข้าเกต CMOS เลยเมื่อ $V_{DD} = 15$ โวลต์ มีกระแสไหลเข้าสูงสุดเพียง 0.3 ไมโครแอมป์ หรือค่าเฉลี่ยเพียง 10 พิโคแอมป์เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ค่าเก็บประจุเข้า (C_{in}) ระหว่างขาอินพุตกับกราวด์จะมีค่าเก็บประจุอยู่ เป็นคุณสมบัติของเกต CMOS เอง เมื่อต่อเกตขานานกันหลายตัว ค่าเก็บประจุนี้จะเพิ่มขึ้นเหมือนการต่อตัวเก็บประจุขนานกัน จะมีผลทำให้ความเร็วในการถ่ายทอดสัญญาณช้าลงไป ค่าเก็บประจุของขาเข้าของเกต CMOS จะมีค่า 5 พิโคฟารัดต่อขาเข้าหนึ่งขา

2.6 กระแสที่ใช้ขณะไม่ทำงาน (I_{DD}) และกระแสที่ใช้ทั้งหมด (I_T) ถ้าสัญญาณที่อินพุตและเอาต์พุตไม่เปลี่ยนแปลง กระแสที่จ่ายจากแหล่งจ่ายไฟ V_{DD} มาที่ ไอซีเรียกว่า I_{DD} ปกติมีค่าสูงสุดไม่เกิน 4 ไมโครแอมป์ ซึ่งเป็นค่าน้อยมาก แสดงว่า CMOS กินไฟน้อย แต่ถ้าป้อนสัญญาณพัลส์เข้าที่เกต CMOS ทำให้อินพุตและเอาต์พุตเป็น “0” และ “1” สลับกันคือเริ่มการสวิตชิงคอนนี่ CMOS จะกินไฟมากขึ้น กระแสที่ใช้นั้นนอกจาก I_{DD} แล้ว ยังขึ้นกับความถี่ของการสวิตชิงด้วย จากตารางจะเห็นว่า เมื่อ $V_{DD} = 5$ โวลต์ป้อนพัลส์ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ เข้าไป จะทำให้เกิด CMOS แต่ละเกตกินกระแสถึง 0.3 ไมโครแอมป์ และจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ถ้าความถี่สูงขึ้น ตามสูตรดังนี้

$$I_T = 0.3 \mu A \times (\text{kHz}) + I_{DD}/N$$

I_T นี้จะเป็นกระแสที่ใช้ในขณะสวิตชิงของแต่ละเกต (N = จำนวนเกต) เช่น ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ แต่ละเกตจะกินกระแสถึง 0.3 มิลลิแอมป์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ ไอซี TTL ชนิด 74 LSxx แสดงว่า CMOS ไม่ได้กินไฟน้อยตามที่กล่าวกัน

ตารางที่ 3-2 ลักษณะสมบัติทางไฟของไอซี CMOS

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Voltages Referenced to V_{SS})

Characteristic	Symbol	V_{DD} Vdc	- 55°C		25°C			125°C		Unit
			Min	Max	Min	Typ	Max	Min	Max	
Output Voltage $V_{in} = V_{DD}$ or 0	“0” Level V_{OL}	5.0	—	0.05	—	0	0.05	—	0.05	Vdc
		10	—	0.05	—	0	0.05	—	0.05	
		15	—	0.05	—	0	0.05	—	0.05	
	“1” Level V_{OH}	5.0	4.95	—	4.95	5.0	—	4.95	—	Vdc
		10	9.95	—	9.95	10	—	9.95	—	
		15	14.95	—	14.95	15	—	14.95	—	
Input Voltage # ($V_O = 4.5$ or 0.5 Vdc) ($V_O = 9.0$ or 1.0 Vdc) ($V_O = 13.5$ or 1.5 Vdc)	“0” Level V_{IL}	5.0	—	1.5	—	2.25	1.5	—	1.5	Vdc
		10	—	3.0	—	4.50	3.0	—	3.0	
		15	—	4.0	—	6.75	4.0	—	4.0	
	“1” Level V_{IH}	5.0	3.5	—	3.5	2.75	—	3.5	—	Vdc
		10	7.0	—	7.0	5.50	—	7.0	—	
		15	11	—	11	8.25	—	11	—	
Output Drive Current ($V_{OH} = 2.5$ Vdc) ($V_{OH} = 4.6$ Vdc) ($V_{OH} = 9.5$ Vdc) ($V_{OH} = 13.5$ Vdc) ($V_{OL} = 0.4$ Vdc) ($V_{OL} = 0.5$ Vdc) ($V_{OL} = 1.5$ Vdc)	Source I_{OH}	5.0	-1.2	—	-1.0	-1.7	—	-0.7	—	mA
		5.0	-0.25	—	-0.2	-0.36	—	-0.14	—	
		10	-0.62	—	-0.5	-0.9	—	-0.35	—	
		15	-1.8	—	-1.5	-3.5	—	-1.1	—	
	Sink I_{OL}	5.0	0.64	—	0.51	0.88	—	0.36	—	mA
		10	1.6	—	1.3	2.25	—	0.9	—	
		15	4.2	—	3.4	8.8	—	2.4	—	
		15	—	—	—	—	—	—	—	
Input Current	I_{in}	15	—	± 0.1	—	± 0.00001	± 0.1	—	± 1.0	μA
Input Capacitance	C_{in}	—	—	—	—	5.0	7.5	—	—	pF
Quiescent Current (Per Package) $I_{inh} = PCA_{in} = V_{DD}$, Zener = $V_{CO_{in}} = 0$ V, $PCB_{in} = V_{DD}$ or 0 V, $I_{out} = 0$ μA	I_{DD}	5.0	—	5.0	—	0.005	5.0	—	150	μA
		10	—	10	—	0.010	10	—	300	
		15	—	20	—	0.015	20	—	600	
Total Supply Current† ($I_{inh} = “0”$, $f_O = 10$ kHz, $C_L = 50$ pF, $R_1 = 1.0$ M Ω , $R_2 = \infty$, and 50% Duty Cycle)	I_T	5.0 10 15	$I_T = (1.46 \mu A/kHz) f + I_{DD}$ $I_T = (2.91 \mu A/kHz) f + I_{DD}$ $I_T = (4.37 \mu A/kHz) f + I_{DD}$							mA

#Noise immunity specified for worst-case input combination.

Noise Margin for both “1” and “0” level = 1.0 Vdc min @ $V_{DD} = 5.0$ Vdc
2.0 Vdc min @ $V_{DD} = 10$ Vdc
2.5 Vdc min @ $V_{DD} = 15$ Vdc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ลักษณะสมบัติด้านสวิตชิง เมื่อป้อนสัญญาณพัลส์เข้าในวงจรดิจิตอลนั้น ไอซีต่าง ๆ จะให้สัญญาณ 0,1 สลับกันเรียกว่าเป็นการสวิตชิง (switching) ถ้าความถี่ของสัญญาณพัลส์ต่ำก็ไม่ค่อยมีปัญหาเรื่องเวลาขาขึ้น (rise time) และเวลาขาลง (fall time) ซึ่งจะทำให้การถ่ายทอดสัญญาณพัลส์เข้าไป แต่ถ้าความถี่ของพัลส์สูงขึ้น ปัญหาเหล่านี้จะเป็นปัญหาสำคัญ เราจะต้องเข้าใจลักษณะด้านสวิตชิงของไอซีเหล่านี้ วงจรที่ใช้พัลส์ความถี่สูง วงจรการเขียนและอ่านข้อมูล จากหน่วยความจำ เป็นต้น

ลักษณะสมบัติด้านสวิตชิงจะขึ้นอยู่กับวิธีการในการวัด เราจะต้องรู้ว่าผู้ผลิตวัดค่าต่าง ๆ โดยการทดสอบด้วยวงจรเช่นไร ปกติในคู่มือจะให้วงจรทดสอบมาด้วย ตารางที่ 5.3 เป็นตัวอย่างลักษณะสมบัติด้านสวิตชิง และรูปที่ 5-1 เป็นรูปวงจรที่ใช้ในการวัด

ตารางที่ 3-3 ลักษณะสมบัติด้านสวิตชิงของ CMOS

ELECTRICAL CHARACTERISTICS* ($C_L = 50$ pF, $T_A = 25^\circ\text{C}$)

Characteristic	Symbol	V_{DD} V_{dc}	Minimum	Typical	Maximum	Units
			Device		Device	
Output Rise Time $t_{TLH} = (3.0 \text{ ns/pF}) C_L + 30 \text{ ns}$ $t_{TLH} = (1.5 \text{ ns/pF}) C_L + 15 \text{ ns}$ $t_{TLH} = (1.1 \text{ ns/pF}) C_L + 10 \text{ ns}$	t_{TLH}	5.0 10 15	— — —	180 90 65	350 150 110	ns
Output Fall Time $t_{THL} = (1.5 \text{ ns/pF}) C_L + 25 \text{ ns}$ $t_{THL} = (0.75 \text{ ns/pF}) C_L + 12.5 \text{ ns}$ $t_{THL} = (0.55 \text{ ns/pF}) C_L + 9.5 \text{ ns}$	t_{THL}	5.0 10 15	— — —	100 50 37	175 75 55	ns

PHASE COMPARATORS 1 and 2

Input Resistance — PC_{Ain}	R_{in}	5.0	1.0	2.0	—	M Ω
		10	0.2	0.4	—	
		15	0.1	0.2	—	
— PC_{Bin}	R_{in}	15	150	1500	—	M Ω
Minimum Input Sensitivity AC Coupled — PC_{Ain} C series = 1000 pF, $f = 50$ kHz	V_{in}	5.0	—	200	300	mV p-p
		10	—	400	800	
		15	—	700	1050	
DC Coupled — PC_{Ain} , PC_{Bin}	—	5 to 15	See Noise Immunity			

3.1 เวลาขาขึ้น เมื่อป้อนพัลส์เกิดทำให้เอาต์พุตเปลี่ยนจาก 0 โวลต์เป็น V_{DD} นั้น ช่วงเวลาที่ใช้จาก 10 เปอร์เซ็นต์ของ V_{DD} จนถึง 90 เปอร์เซ็นต์ของ V_{DD} เราเรียกว่าเวลาขาขึ้น มีอักษรย่อคือ t_r จากตารางที่ 5.3 จะเห็นว่าถ้าป้อนพัลส์ที่มีเวลาขาขึ้น 20 นาโนวินาที ผ่านเกต CMOS จะได้สัญญาณพัลส์เอาต์พุตที่มี t_r ต่ำสุดตั้งแต่ 40 นาโนวินาที จนกระทั่งถึงสูงสุด 200 นาโนวินาที แสดงว่า CMOS ทำงานได้ไม่เร็วนัก

3.2 เวลาขาลง มีความหมายตรงข้ามกับ t_r เป็น กรณีที่พัลส์เปลี่ยนจาก V_{DD} เป็น 0 โวลต์ เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแรงดันจาก 90 เปอร์เซ็นต์ของ V_{DD} มาเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ของ V_{DD} จะใช้เวลา t_f จากตารางจะเห็นว่า t_f มีค่าใกล้เคียงกับ t_r

3.3 เวลาหน่วงในการถ่ายตลัญญาน

ให้ดูความหมายของเวลาหน่วงในการถ่ายตลัญญาน

สัญญานจากรูปที่ 5-1 เวลาหน่วงมี 2 ค่า คือ t_{PLH} กับ t_{PHL} t_{PLH} คือ เวลาหน่วงทางด้านขาขึ้นของพัลส์เอาต์พุต โดยวัดจากจุดกึ่งกลาง (50 เปอร์เซ็นต์ V_{DD}) ของพัลส์ขาเข้าถึงพัลส์ขาออก ส่วน t_{PHL} คือ เวลาหน่วงทางด้านขาลงของพัลส์ของเอาต์พุต โดยวัดที่จุดกึ่งกลางเช่นเดียวกัน จากตารางจะเห็นว่าค่าทั้งสองมีค่าเท่ากัน แต่เวลาหน่วงจะขึ้นอยู่กับแรงดันแหล่งจ่ายไฟ และจำนวนอินพุตของเกต แหล่งจ่ายไฟยิ่งต่ำยิ่งให้เวลาหน่วงมีค่ามากขึ้น และถ้าจำนวนอินพุตมากขึ้น เวลาหน่วงก็มากขึ้นด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

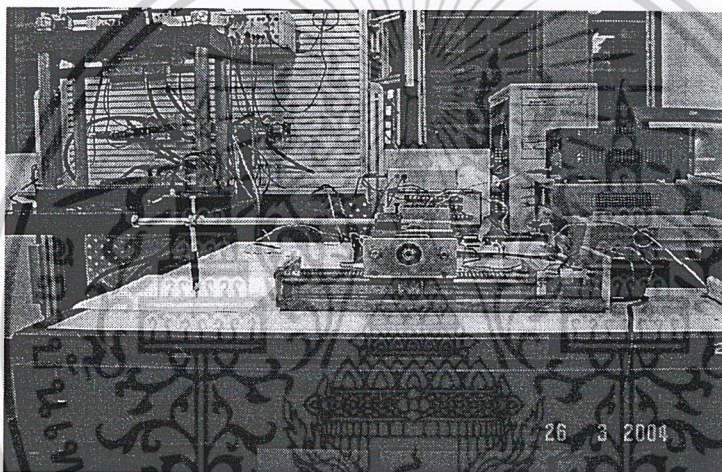
บทที่ 4

รูปแบบและผลการทดลอง

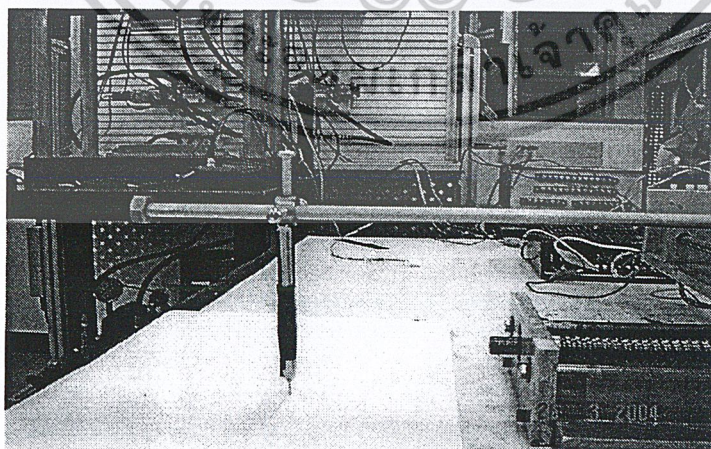
4.1 รูปแบบการทดลอง

เมื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์ทั้งระบบแล้ว เราจะทำการทดสอบไจงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกนโดยการป้อนพิกัดค่า X และค่า Y จากเส้นทางเดินที่เราต้องการ ผ่านทางแป้นคีย์บอร์ด สัญญาณพัลส์ที่ถูกสร้างขึ้นก็จะทำให้มอเตอร์หมุน ตัวเคลื่อนทั้ง 2 แกน ก็เลื่อนไปยังพิกัดต่างๆที่ได้ป้อนค่าไว้ จากนั้นจึงทดลองเปลี่ยนเส้นทางเดินที่ซับซ้อนขึ้นอีก

4.2 ชุดทดลอง



รูปที่ 4-1 แสดงถึง ชุดทดลองที่ใช้ในโครงการนี้



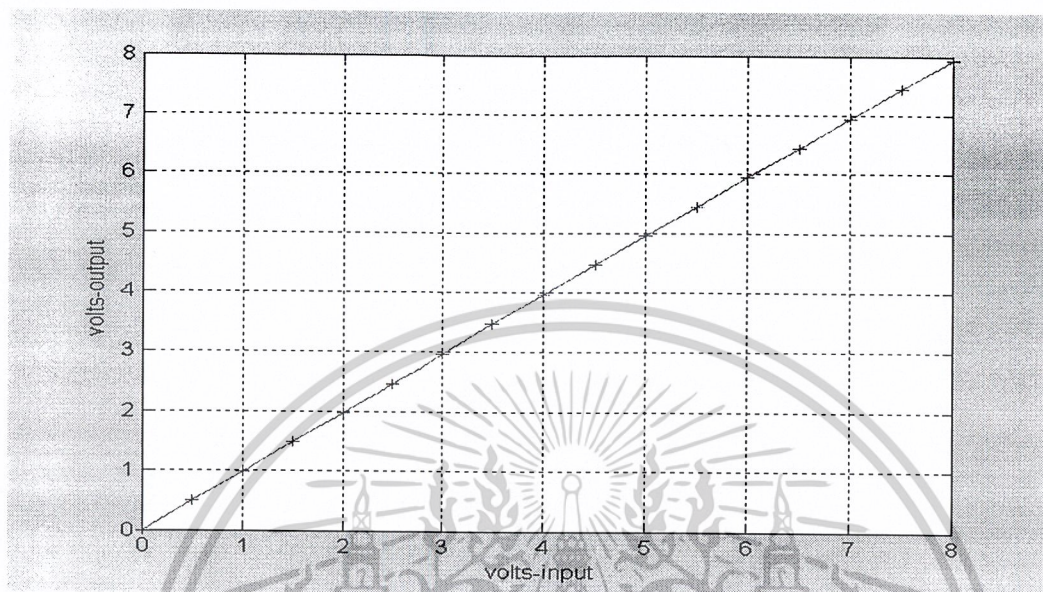
รูปที่ 4-2 แสดงถึง ชุดทดลองที่ใช้ในโครงการนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดลอง

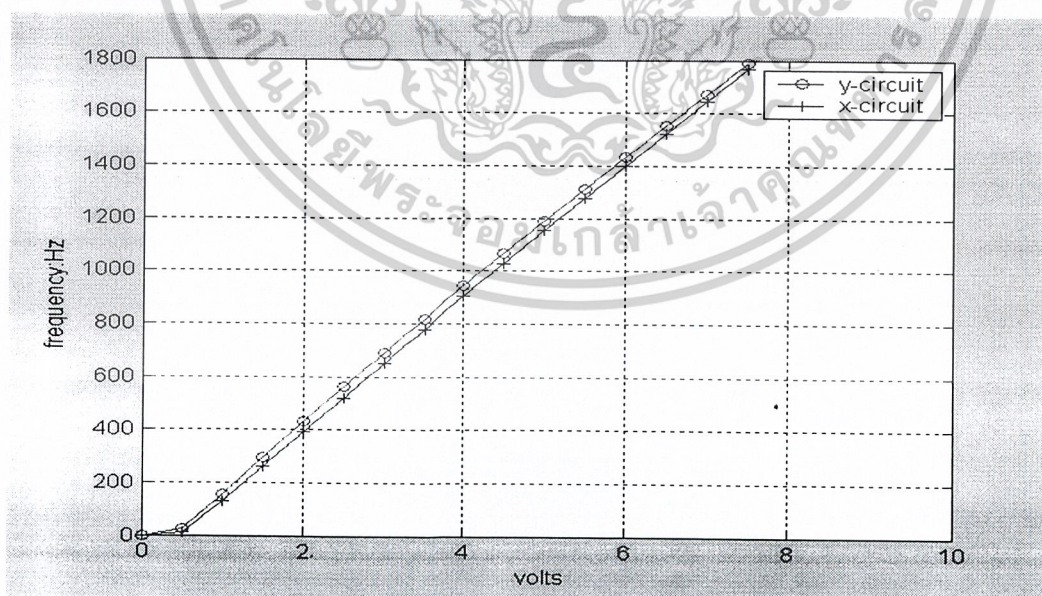
1. เมื่อพิจารณาแยกแต่ละส่วนของระบบ

1. D/A



รูปที่ 4-3 แสดงถึง กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้

2. วงจรพัลส์

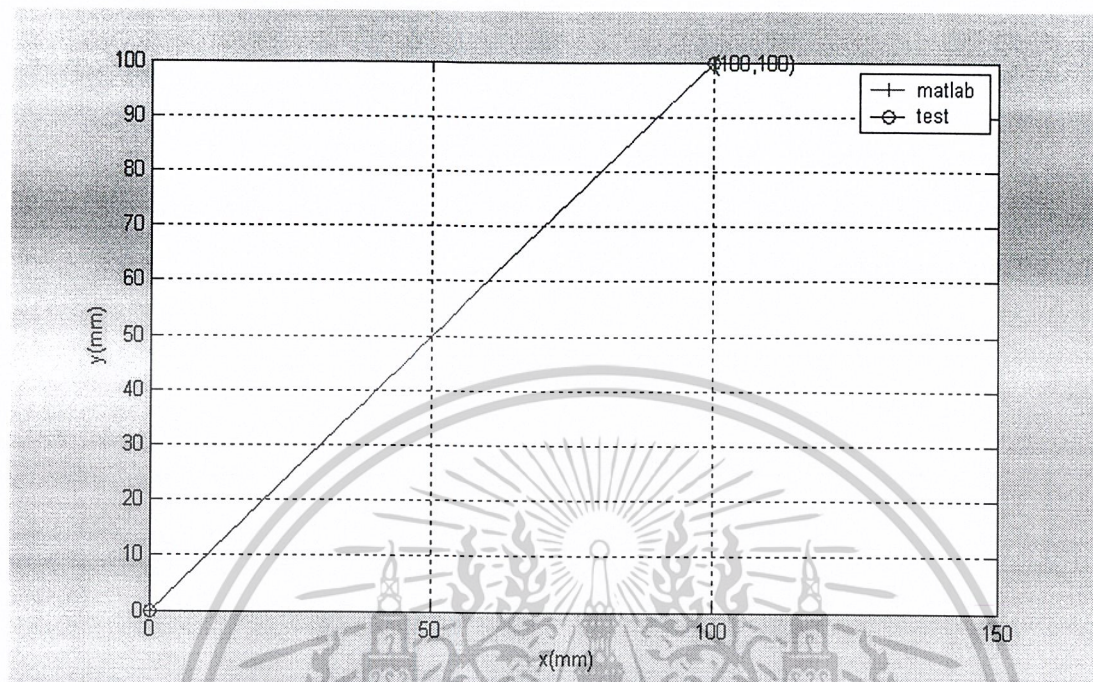


รูปที่ 4-4 แสดงถึง กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่ที่ได้ กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

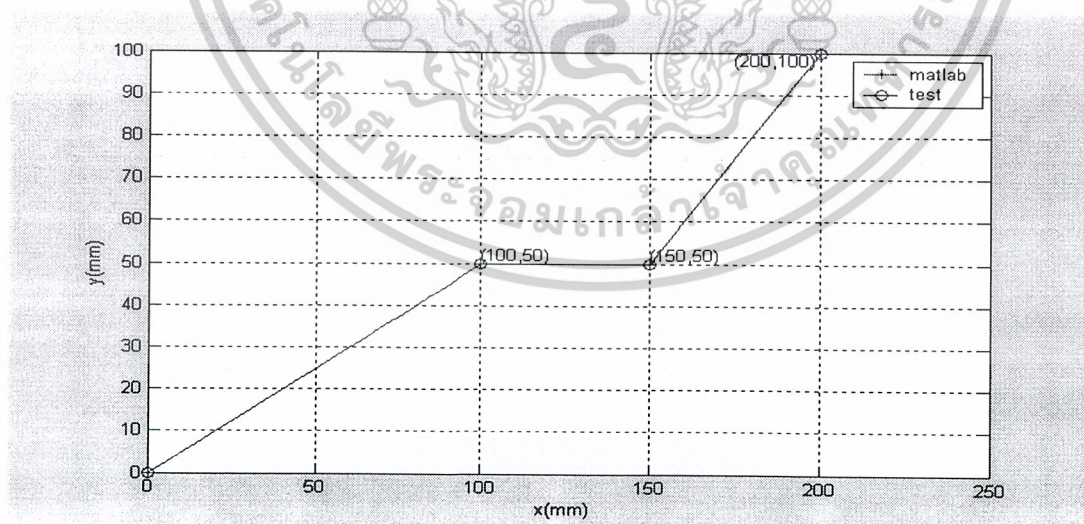
2. เมื่อพิจารณาทั้งระบบโดยไม่มีภาระ

1. เส้นทางเดินเป็นฟังก์ชันเส้นตรง



รูปที่ 4-5 แสดงถึง กราฟเปรียบเทียบเส้นทางเดินที่ได้ กับ เส้นทางเดินที่ต้องการ (ฟังก์ชันเส้นตรง)

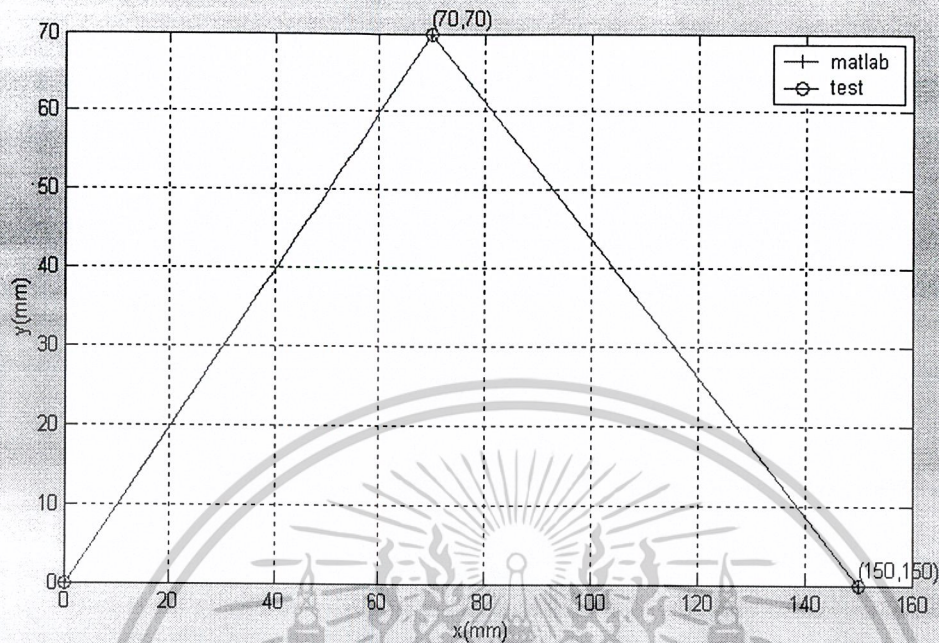
2. เส้นทางเดินเป็นฟังก์ชันขั้นบันได



รูปที่ 4-6 แสดงถึง กราฟเปรียบเทียบเส้นทางเดินที่ได้ กับ เส้นทางเดินที่ต้องการ (ฟังก์ชันขั้นบันได)

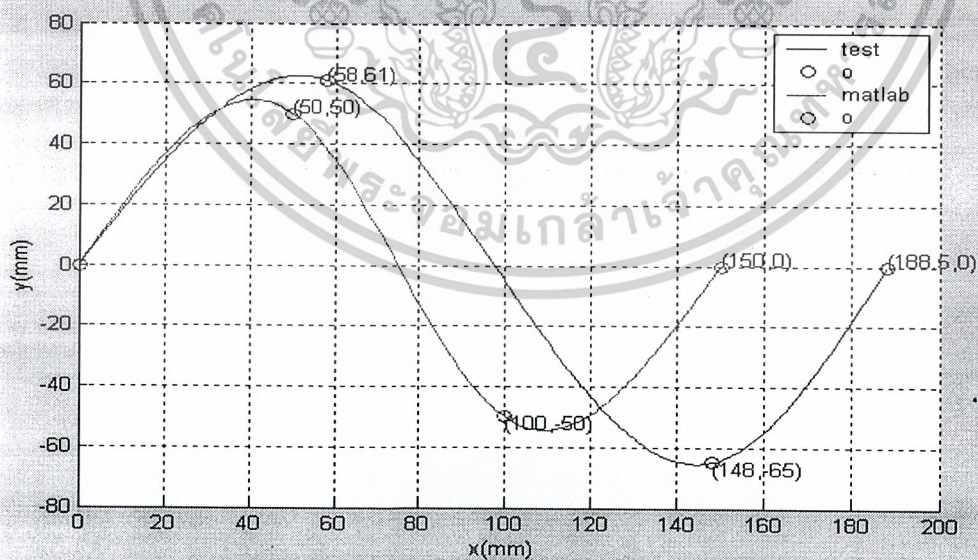
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เส้นทางเดินเป็นฟังก์ชันขั้นบันไดแบบรูปปิด



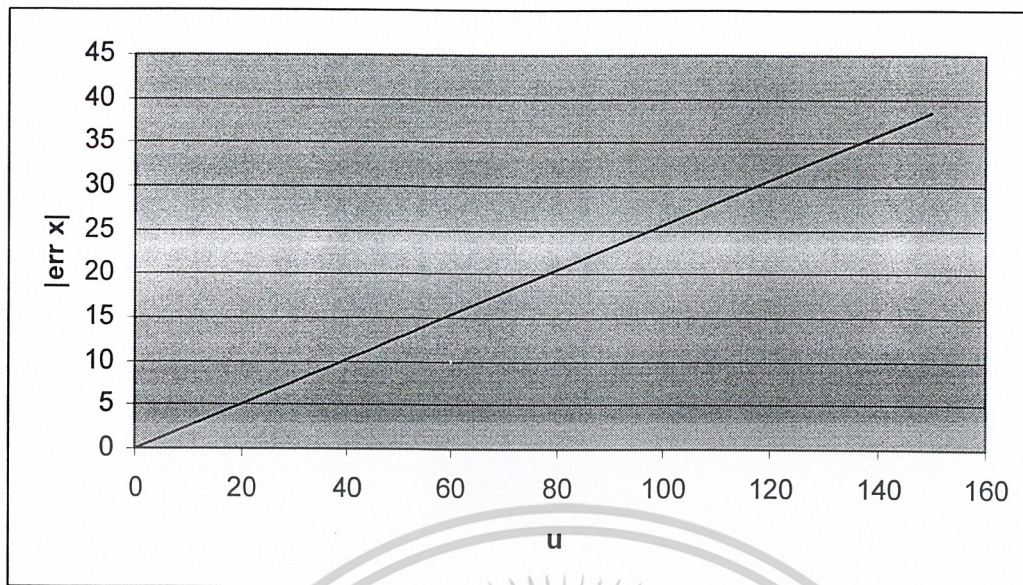
รูปที่ 4-7 แสดงถึง กราฟเปรียบเทียบเส้นทางเดินที่ได้ กับเส้นทางเดินที่ต้องการ (รูปปิด)

4. เส้นทางเดินเป็นฟังก์ชันเส้นโค้ง Cubic Spline

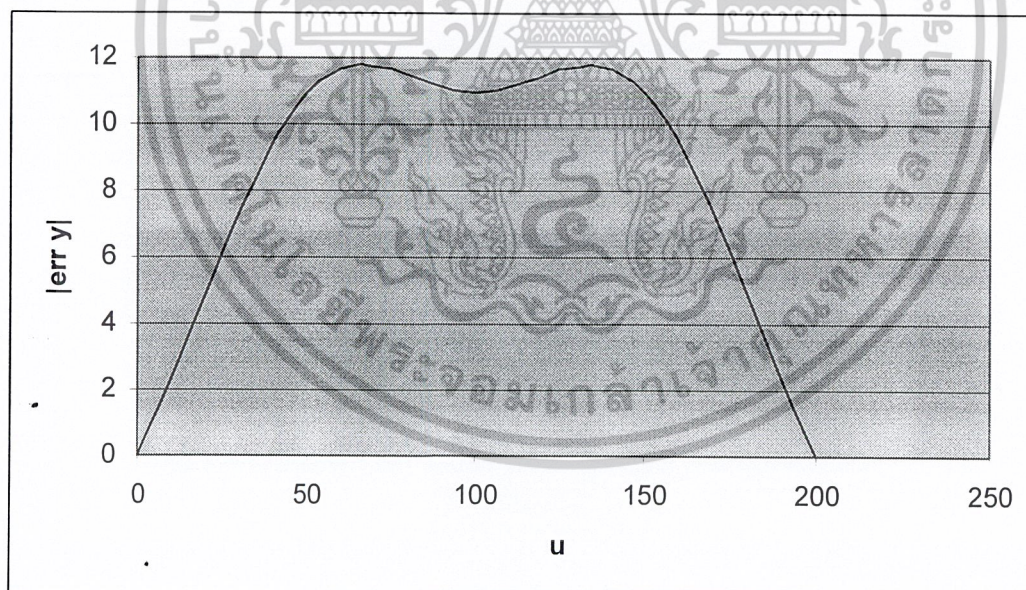


รูปที่ 4-8 แสดงถึง กราฟเปรียบเทียบเส้นทางเดินที่ได้ กับ เส้นทางเดินที่ต้องการ (Cubic Spline)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

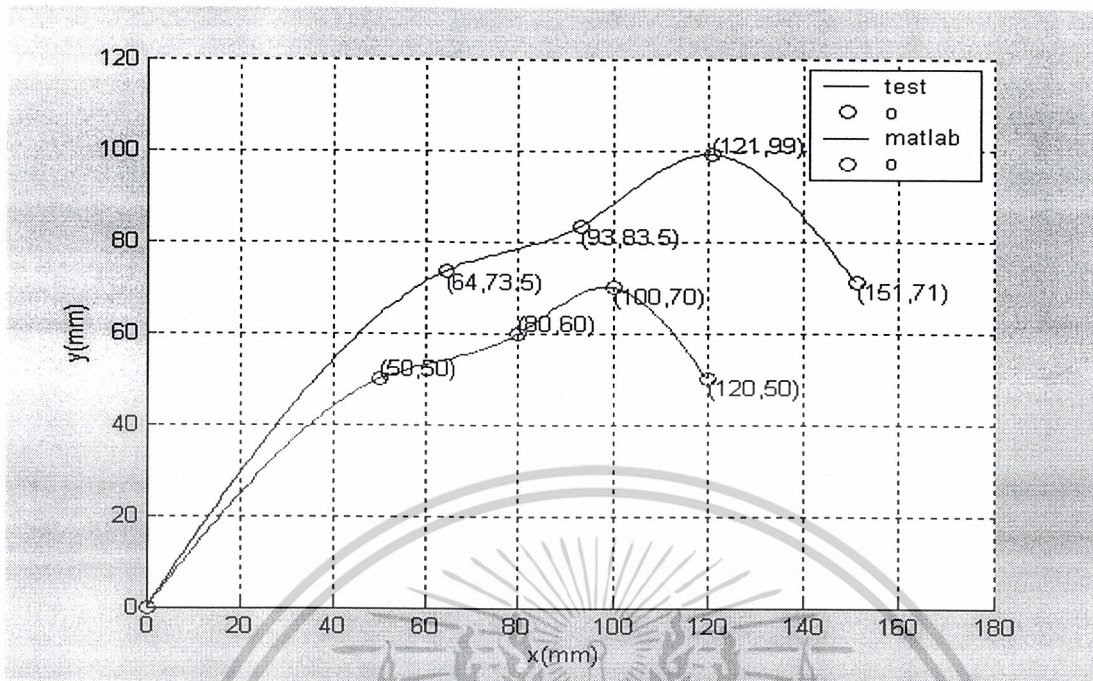


รูปที่ 4-9 แสดงถึง กราฟค่าความคลาดเคลื่อนรวมในแนวแกน X ของฟังก์ชันเส้นโค้ง Cubic Spline
กับ ระยะจริง (U Parametric) ของรูปที่ 4 - 8

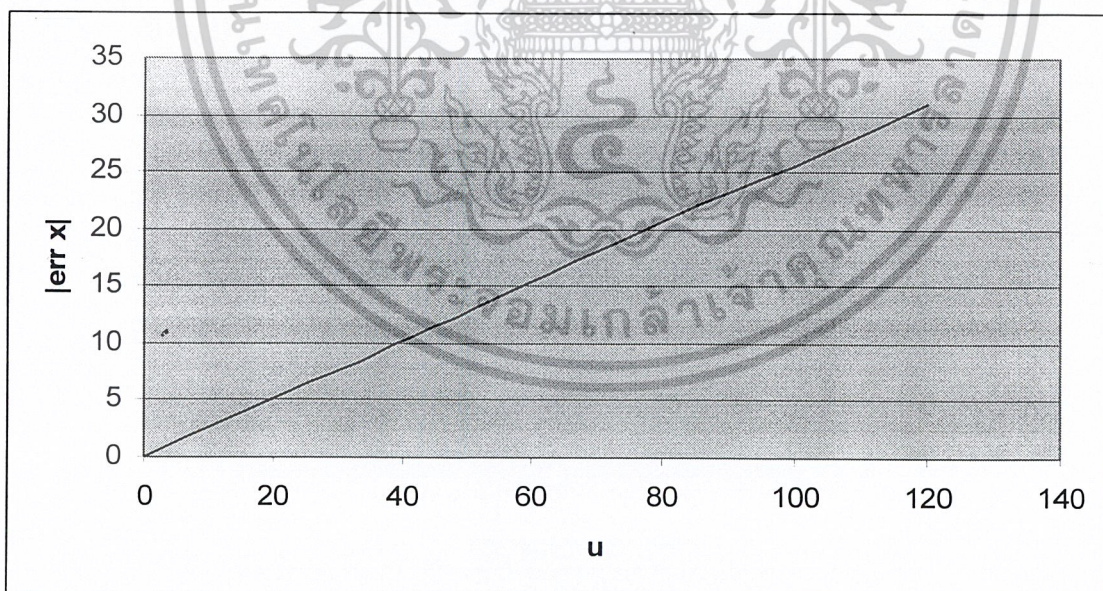


รูปที่ 4-10 แสดงถึง กราฟค่าความคลาดเคลื่อนรวมในแนวแกน Y ของฟังก์ชันเส้นโค้ง Cubic Spline
กับ ระยะจริง (U Parametric) ของรูปที่ 4 - 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

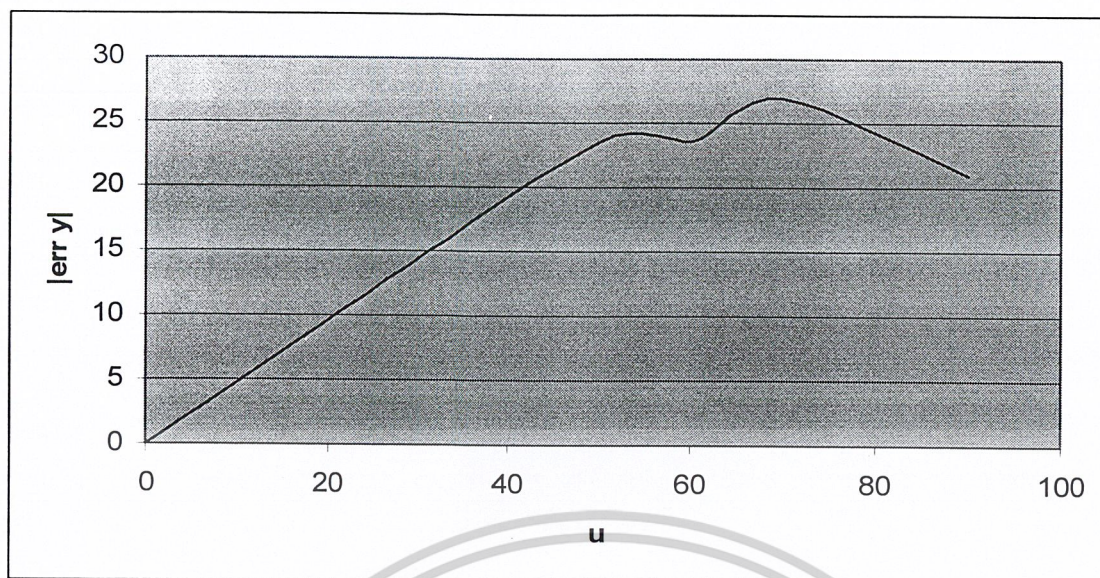


รูปที่ 4-11 แสดงถึง กราฟเปรียบเทียบเส้นทางเดินที่ได้ กับ เส้นทางเดินที่ต้องการ (Cubic Spline)



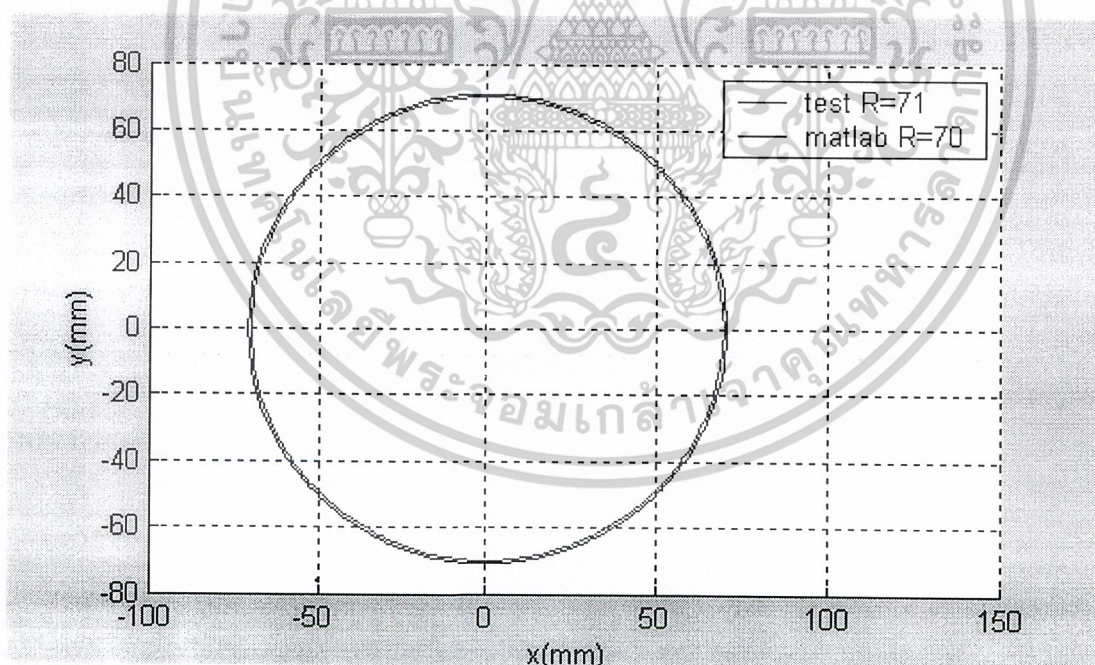
รูปที่ 4-12 แสดงถึง กราฟค่าความคลาดเคลื่อนรวมในแนวแกน X ของฟังก์ชันเส้นโค้ง Cubic Spline
กับ ระยะจริง (U Parametric) ของรูปที่ 4 - 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-13 แสดงถึง กราฟค่าความคลาดเคลื่อนรวมในแนวแกน Y ของฟังก์ชันเส้นโค้ง Cubic Spline กับ ระยะจริง (U Parametric) ของรูปที่ 4 - 11

5. เส้นทางเดินเป็นฟังก์ชันวงกลม



รูปที่ 4-14 แสดงถึง กราฟเปรียบเทียบเส้นทางเดินที่ได้กับเส้นทางเดินที่ต้องการ (ฟังก์ชันวงกลม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

5.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากรูปที่ 4-3 จะได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ต้องกรกับแรงดันไฟฟ้าที่ได้ มีความสัมพันธ์เป็นลักษณะเชิงเส้น

จากรูปที่ 4-4 จะได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่ได้ กับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนมีความสัมพันธ์เป็นลักษณะเชิงเส้นในช่วงแรงดัน 0.41-7 V

จากรูปที่ 4-5 ถ้าโตะงานเคลื่อนที่ในลักษณะเส้นตรงเพียงหนึ่งช่วงจากจุด (0 , 0) ถึงจุด (100,100) จะไม่มีค่าความคลาดเคลื่อนในแนวแกน x ส่วนในแนวแกน y แทบจะไม่มีค่าความคลาดเคลื่อน

จากรูปที่ 4-6 และ 4-7 ถ้าโตะงานเคลื่อนที่ในลักษณะของขั้นบันได 3 ช่วง จะมีค่าความคลาดเคลื่อนรวมในแนวแกน x ประมาณ 2.1 มิลลิเมตร และค่าความคลาดเคลื่อนรวมในแนวแกน y ประมาณ 3 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4-8, 4-11, 4-14 ถ้าโตะงานเคลื่อนที่ในลักษณะของเส้นโค้ง หรือ วงกลมซึ่งจะมีจำนวนช่วงที่มากทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนในแนวแกน x และ y มีค่าเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4-9 และ 4-12 จะเห็นได้ว่า ค่าความคลาดเคลื่อนรวมในแนวแกน x มีความสัมพันธ์เป็นลักษณะเชิงเส้นและเป็นฟังก์ชันเพิ่ม

จากรูปที่ 4-10 และ 4-13 จะเห็นได้ว่า ค่าความคลาดเคลื่อนรวมในแนวแกน y มีลักษณะการเพิ่มและลดอันเนื่องมาจากการหมุนของมอเตอร์ในแนวแกนซึ่งมีการหมุนในหลายทิศทางนั่นเอง

ดังนั้นในการสั่งโตะงานให้เคลื่อนที่ในลักษณะเส้นตรง จะมีค่าความแม่นยำสูง และค่าความผิดพลาดต่ำ และค่าความผิดพลาดนี้จะสูงขึ้นตามจำนวนช่วงของเส้นตรง ซึ่งค่าความผิดพลาดจะขึ้นอยู่กับค่าความเร็วของโตะงาน และค่าความคลาดเคลื่อนของเวลาในการทำงานของโตะงาน

ในกรณีของการเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้งค่าความผิดพลาดจะขึ้นอยู่กับระยะทางของแกน x เนื่องจากจำนวนช่วงของการเคลื่อนที่ที่ถูกแบ่งออกตามแนวแกน x เป็นช่วง ช่วงละ 1 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้เส้นโค้งที่มีความราบเรียบแต่ถ้าระยะทางของแกน x ยิ่งมาก จำนวนช่วงก็ยิ่งมาก ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนของเวลาก็จะมากตามไปด้วย เช่นเดียวกับในกรณีของวงกลมถ้ารัศมีของวงกลมยิ่งมากเท่าใด ค่าความผิดพลาดก็จะยิ่งมากขึ้นตามจำนวนช่วงเช่นเดียวกัน

5.2 สรุปผลการทดลอง

โครงการนี้สามารถสร้างและออกแบบโตะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน ที่เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางเดินที่ต้องการได้ โดยที่ความแม่นยำของโตะงานเคลื่อนที่แบบ 2 แกน จะขึ้นอยู่กับ ความซับซ้อนของเส้นทางเดินและจำนวนช่วงที่แบ่งให้กับเส้นทางเดิน

5.3 ปัญหาที่พบขณะดำเนินงานและแนวทางแก้ไข

1. ความยาวของโต๊ะงานมีระยะการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 210 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นระยะทางที่ค่อนข้างสั้นต่อการเคลื่อนที่ ทำให้ต้องระมัดระวังการควบคุมตำแหน่งของการเคลื่อนที่เป็นอย่างมาก ทั้งนี้เพื่อมิให้เกิดการการกระทบกับตัวกันชน ซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายต่อสเปปิ้งมอเตอร์ได้ ดังนั้นจึงควรเพิ่มระยะการเคลื่อนที่ให้มากขึ้น
2. วงจรพัลส์ควรมีความเสถียรมากขึ้น เนื่องจากความไม่คงที่ของความถี่
3. เนื่องจากฟังก์ชันเวลาของตัวซอฟต์แวร์ไม่สัมพันธ์ กับ ความเร็วของ CPU จึงทำให้การใช้คำสั่งควบคุมเวลาของซอฟต์แวร์ผิดพลาด ดังนั้นควรเลือกความเร็ว CPU และซอฟต์แวร์ที่มีความสัมพันธ์กัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- (1) ศ.ดร.วิทย์ อิงภากรณ์ และ รศ.ชาญ ถนัดงาน, 'การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม 1-2', บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่นจำกัด (มหาชน), กรุงเทพฯ, พ.ศ.2541
- (2) อัญชลี กาญจนเทพ, วิทยานิพนธ์ 'การควบคุมตำแหน่งของโต๊ะงานเคลื่อนที่แบบ 1 แกน', ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
- (3) www.thaiio.com
- (4) คอนสัน ปงผาบ, 'การเขียนโปรแกรมภาษาซีในงานควบคุม', สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., พ.ศ.2546



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


```

#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <time.h>
#include <math.h>
#include <dos.h>

#define base 0x220
#define clock_error 0
#define mm_round 5.025

extern void da1(float volts1,float volts2,float time);
extern void mydelay(float mtime);
extern void circle();
extern void spline();
extern void ellipse();
extern void linear();
extern void origin(float xi,float yi,float xn,float yn);

void main()
{
    int type;
    clrscr();
    printf("Please choose type of drawing");
    printf("\n1.LINEAR");
    printf("\n2.SPLINE");
    printf("\n3.CIRCLE");
    printf("\n4.ELLIPSE");
    do
    { printf("\nSELECT:");
      scanf("%d",&type);
      if (type<1||type>4)
          {printf("\n'FUCK YOU'Select again");
            type=0;
          }
    }while(type==0);
    switch(type)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{ case 1: linear() ;break;
  case 2: spline() ;break;
  case 3: circle() ;break;
  case 4: ellipse() ;break;
}
}

void driving_motor(float x1,float y1,float x2,float y2,float v)
{
  float distance_x,distance_y,N_round_x,N_round_y,vx,vy,time;
  float v_ratio,voltsx,voltsy;

  printf("\n%0.2f,%0.2f and %0.2f,%0.2f",x1,y1,x2,y2);
  distance_x=x2-x1;
  distance_y=y2-y1;
  if(distance_x>=0&&distance_y>=0)
    output(base+13,0);
  if(distance_x>=0&&distance_y<0)
    {output(base+13,2);
     distance_y=-distance_y;
    }
  if(distance_x<0&&distance_y>=0)
    {output(base+13,1);
     distance_x=-distance_x;
    }
  if(distance_x<0&&distance_y<0)
    {output(base+13,3);
     distance_x=-distance_x;
     distance_y=-distance_y;
    }

  delay(10);

  N_round_x=distance_x/mm_round;
  N_round_y=distance_y/mm_round;
  if (distance_x==0)
    { vx=0;
      vy=v;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


```

        time=N_round_y*1000/vy;
    }
    if(distance_y==0)
    {
        vy=0;
        vx=v;
        time=N_round_x*1000/vx;
    }
    if(distance_x!=0&&distance_y!=0)
    {
        if (distance_x>distance_y)
        {
            vx=v;
            time=(N_round_x/vx)*1000;
            v_ratio=(distance_y/distance_x);
            vy=v_ratio*v;
        }
        if (distance_y==distance_x)
        {
            vx=v;
            vy=v;
            time=(N_round_x/vx)*1000;
        }
        if (distance_y>distance_x)
        {
            vy=v;
            time=(N_round_y/vy)*1000;
            v_ratio=(distance_x/distance_y);
            vx=v_ratio*v;
        }
    }

    voltsx=3.768-(3.228*(4-vx)/3.9625);
    voltsy=3.311-(2.9612*(4-vy)/3.9475);
    printf("\nvoltsx,voltsy,time\n");
    printf("%0.2f ,%0.2f ,%f\n\n",voltsx,voltsy,time/1000);

    da1(voltsx,voltsy,time);

}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void da1(float volts1,float volts2,float time)                // D/A channel 1
{
    int idata1,idata2;
    float v_comp1,v_comp2;
    float mult=10.0/4095.0;                                // D/A range 0-10 V.
    v_comp1= 0.02067*volts1-0.00035;
    v_comp2= 0.02067*volts2-0.00035;
    volts1=volts1+v_comp1;                                // compensate for circuit loading
    volts2=volts2+v_comp2;
    idata1=(int)(volts1/mult);
    idata2=(int)(volts2/mult);
    if(idata1<0) idata1=0;
    if(idata2<0) idata2=0;
    if(idata1>4095) idata1=4095;
    if(idata2>4095) idata2=4095;

    outport(base+4,idata1);                                // x move
    outport(base+6,idata2);                                // y move
    mydelay(time);
}

void mydelay(float mtime)
{
    clock_t end,start;

    end=clock()+(mtime*CLK_TCK/1000)-(mtime*clock_error)/1000;
    while(clock())<=end;
}

void circle()
{ float r,y[1000],x[1000],xx;
  int j,i,v,t,s,k;
  char chk;

  clrscr();
  printf("WELCOME TO CIRCLE DRAWING");

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


```

printf("\nPlease enter the radius of circle r(mm):");
scanf("%f",&r);
s=r+10;
t=(s/20.1)*1000;
outport(base+13,0);
delay(10);
da1(0,3.311,t);
da1(0.0,0.0,500);

do
{
    printf("Please choose V_motor(rps)\n");
    printf("2:3:4 rps:");    // v_motor max = 4 rps //
    scanf("%d",&v);
    if(v<2||v>4)
    {printf("V_motor is not valid");
      printf("\nPlease choose again\n");
      v=0;
    }
}
while(v==0);

j=0;
k=0;
r=r*0.8571428571;
for(xx=-r;xx<0;xx++)
{x[j]=xx;
 y[j]=sqrt(r*r-x[j]*x[j]);
 j=j+1;
 k=k+1;
}
x[j]=0;
y[j]=r;
j=j+1;
for(i=k-1;i>=0;i--)
{x[j]=-x[i];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

y[j]=y[i];
j=j+1;
}
for(i=1;i<=k;i++)
{
x[j]=-x[i];
y[j]=-y[i];
j=j+1;
}
for(i=k-1;i>=0;i--)
{
x[j]=x[i];
y[j]=-y[i];
j=j+1;
}
j=j-1;

for (i=0;i<=j;i++)
printf("x[%d]=%0.2f y[%d]=%0.2f\n",i,x[i],i,y[i]);
printf("Press y for start motor or press esc for exit program:");
do
{
chk=getch();
if(chk=='y'||chk=='Y')
{
for (i=0;i<=j-1;i++)
{
driving_motor(x[i],y[i],x[i+1],y[i+1],v);
}
da1(0.0,0.0,10);
printf("\nFinish");
getchar();
mydelay(1000);
}
else if(chk==27)
exit(0);
} while(chk!='y'&&chk!='Y');
getchar();

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


```

outport(base+13,2);

delay(10);

da1(0,3.311,t);

da1(0.0,0.0,2000);

}

void spline()
{
int n,i,xx,j,u,v;

float x[50],y[50],a[50],b[50],c[50],d[50],e[50],xs[1000],ys[1000];

float delta_x,d1,d2,dd,t1,t2,t3,t4,N_round_x,time,distance_x;

float distance_y,N_round_y;

char chk;

clrscr();

printf("WELCOME TO SPLINE DRAWING");

printf("\nPlease enter number of point n=");

scanf("%d",&n);

x[0]=0; y[0]=0;

printf("x[0]=0 y[0]=0\n");

for(i=1;i<=n;i++)
{ printf("x[%d]=",i);
scanf("%f",&x[i]);
printf("y[%d]=",i);
scanf("%f",&y[i]);
}

for(i=1;i<=n;i++)
{ a[i]=x[i]-x[i-1];
b[i]=2.0*(x[i+1]-x[i-1]);
c[i]=x[i+1]-x[i];
d[i]=6.0*(y[i+1]-y[i])/(x[i+1]-x[i])+6.0*(y[i-1]-y[i])/(x[i]-x[i-1]);
}

b[0]=1.0; c[0]=0.0; d[0]=0.0; a[n]=0.0; b[n]=1.0; d[n]=0.0;

for(i=1;i<=n;i++)
{ a[i]=a[i]/b[i-1];
b[i]=b[i]-a[i]*c[i-1];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}

for(i=1;i<=n;i++)
    d[i]=d[i]-a[i]*d[i-1];
e[n]=d[n]/b[n];
for(i=n-1;i>=0;i--)
    e[i]=(d[i]-c[i]*e[i+1])/b[i];
xx=0.0; j=0.0;
for(i=1;i<=n;i++)
{ delta_x=x[i]-x[i-1];
  u=1;
  while(u!=0)
  { if(delta_x==0)
    {j=j+1;
     xs[j]=x[i];
     ys[j]=y[i];
     u=0;
    }
  else
  { xs[j]=xx;
    d1=x[i]-xx;
    d2=xx-x[i-1];
    dd=x[i]-x[i-1];
    t1=e[i-1]*d1*d1*d1/(6.0*dd);
    t2=e[i]*d2*d2*d2/(6.0*dd);
    t3=(y[i-1]/dd-e[i-1]*dd/6.0)*d1;
    t4=(y[i]/dd-e[i]*dd/6.0)*d2;
    ys[j]=t1+t2+t3+t4;
    if(xs[j]==x[i])
      u=0;

    if(u!=0)
    {if(delta_x>0)
      {xx++;
       j++;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


```

    }
    }
}
}

for(i=0;i<=j;i++)
printf("xs[%d]=%0.2f,ys[%d]=%0.2f\n",i,xs[i],ys[i]);
do
{
    printf("Please choose V_motor(rps)\n");
    printf("2:3:4 rps:");    // v_motor max = 4 rps //
    scanf("%d",&v);
    if(v<2||v>4)
    {printf("V_motor is not valid");
    printf("\nPlease choose again\n");
    v=0;
    }
}
while(v==0);

printf("Press y for start motor or press esc for exit program:");
do
{
    chk=getch();
    if(chk=='y'||chk=='Y')
    {
        for(i=0;i<=j-1;i++)
        { driving_motor(xs[i],ys[i],xs[i+1],ys[i+1],v);}
        da1(0.0,0.0,10);
        origin(x[0],y[0],x[n],y[n]);
    }

    else if(chk==27)
        exit(0);
} while(chk!='y'&&chk!='Y');
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

getchar();

}

void ellipse()
{
    float a,b,x[1000],y[1000],xx,yy,s,t;
    int v,j,i,k;
    char chk;

    clrscr();
    da1(0.0,0.0,10);
    printf("WELCOME TO ELLIPSE DRAWING");
    printf("\nPlease enter x-range a=");
    scanf("%f",&a);
    printf("Please enter y-range b=");
    scanf("%f",&b);
    if(a>b)
    {
        s=b+1;
        t=(s/20.1)*1000;
        outport(base+13,0);
        delay(10);
        da1(0,3.311,t);
        da1(0.0,0.0,200);
    }
    if(b>a)
    {
        s=a+1;
        t=(s/20.1)*1000;
        outport(base+13,0);
        delay(10);
        da1(3.768,0,t);
        da1(0.0,0.0,200);
    }
    do
    {

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


```

printf("please choose V_motor(rps)\n");
printf("2:3:4 rps:");      // v_motor max = 4 rps //
scanf("%d",&v);
if(v<2||v>4)
{printf("V_motor is not valid");
printf("\nPlease choose again\n");
v=0;
}
}
while(v==0);
a=a*0.8571428571;
b=b*0.8571428571;
j=0;
k=0;
if (a>b)
{for(xx=-a;xx<0;xx++)
{
x[j]=xx;
y[j]=b*sqrt(1-(x[j]*x[j])/(a*a));
j=j+1;
k=k+1;
}
x[j]=0;
y[j]=b;
j=j+1;
for(i=k-1;i>=0;i--)
{
x[j]=-x[i];
y[j]=y[i];
j=j+1;
}
for(i=1;i<=k;i++)
{
x[j]=-x[i];
y[j]=-y[i];
j=j+1;
}
for(i=k-1;i>=0;i--)
{
x[j]=x[i];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        y[j]=-y[i];
        j=j+1;
    }
    j=j-1;
}

if (b>a)
{for(yy=-b;yy<0;yy++)
    {y[j]=yy;
    x[j]=a*sqrt(1-(y[j]*y[j])/(b*b));
    j=j+1;
    k=k+1;
    }
    y[j]=0;
    x[j]=a;
    j=j+1;
    for(i=k-1;i>=0;i--)
    {x[j]=-x[i];
    y[j]=y[i];
    j=j+1;
    }
    for(i=1;i<=k;i++)
    {x[j]=-x[i];
    y[j]=-y[i];
    j=j+1;
    }
    for(i=k-1;i>=0;i--)
    {x[j]=x[i];
    y[j]=-y[i];
    j=j+1;
    }
    j=j-1;
}

for (i=0;i<=j;i++)
    printf("x[%d]=%0.2f  y[%d]=%0.2f\n",i,x[i],i,y[i]);
printf("Press y for start motor or press esc for exit program:");
do

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


```

{
chk=getch();
if(chk=='y'||chk=='Y')
{
for (i=0;i<=j-1;i++)
{
driving_motor(x[i],y[i],x[i+1],y[i+1],v);
}
dal(0.0,0.0,10);
printf("\nFinish");
getchar();
mydelay(3000);
}
else if(chk==27)
exit(0);
} while(chk!='y'&&chk!='Y');
getchar();
if(a>b)
{
outport(base+13,2);
delay(10);
dal(0,3.311,t);
dal(0.0,0.0,2000);
}
if(b>a)
{
outport(base+13,1);
delay(10);
dal(3.768,0,t);
dal(0.0,0.0,2000);
}
}

```

```
void linear()
```

```

{ float x[100],y[100],distance_x,distance_y,vx,vy;
float N_round_x,N_round_y,time,voltsx,voltsy,v_ratio;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    int n,i,v;

    char chk,chk2;

    clock_t start,end;

    da1(0.0,0.0,100);

    clrscr();

    printf("WELCOME TO LINEAR DRAWING");

    printf("\nPlease enter the number of point n=");

    scanf("%d",&n);

    x[0]=0;
    y[0]=0;
    for(i=1;i<=n;i++)
    { printf("x[%d]=",i);
      scanf("%f",&x[i]);
      printf("y[%d]=",i);
      scanf("%f",&y[i]);
    }
    do
    {
      printf("Please choose V_motor(rps)\n");
      printf("2:3:4 rps\n");      // v_motor max = 5 rps //
      scanf("%d",&v);
      if(v<2||v>4)
      {printf("V_motor is not valid");
       printf("\nPlease choose again\n");
       v=0;
      }
    }

    while(v==0);

    do
    {
      printf("Press y for run program");
      printf("\nPress esc for exit program\n\n");
      chk=getch();

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


```

if(chk=='Y' || chk=='y')
{
    for(i=0;i<n;i++)
    {
        driving_motor(x[i],y[i],x[i+1],y[i+1],v);}
        da1(0.0,0.0,10);
        origin(x[0],y[0],x[n],y[n]);
    }
else if (chk==27)
exit(0);
else
{
    sound(5);
    delay(1000);
    nosound();

    }
while(chk!='y' && chk!='Y');
getchar();
}

void origin(float xi,float yi,float xn,float yn)
{
    float distance_x,distance_y;
    float N_round_x,N_round_y,time;
    char chk1;
    printf("\nReturn to origin press any key or ESC for exit program");
    chk1=getch();
    if(chk1==27)
    exit(0);
    distance_y=yi-yn;
    if(distance_y>0)
        outport(base+13,0);
    if(distance_y<0)
    {
        outport(base+13,2);
        distance_y=-distance_y;
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

delay(10);
N_round_y=distance_y/mm_round;
time=(N_round_y/4)*1000;
if(distance_y==0)
da1(0.0,0.0,0.0);
else
da1(0.0,3.311,time);
distance_x=xi-xn;
if(distance_x>0)
outport(base+13,0);
if(distance_x<0)
{outport(base+13,1);
distance_x=-distance_x;
}
delay(10);
N_round_x=distance_x/mm_round;
time=(N_round_x/4)*1000;
if(distance_x==0)
da1(0.0,0.0,0.0);
else
da1(3.768,0.0,time);

da1(0.0,0.0,10);
printf("\nFinish");
delay(3000);
}

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้