



ปีการศึกษา 2533

เครื่องเจาะแผ่นปรินท์ 3 ทิศทาง

โดย

1. นาย ประสิทธิ์ พิชฉนั่มโนมัย 301147
2. นาย ปรีคุณา สมทรัพย์ 301151
3. นาย พรชัย นิเวศน์รังสรรค์ 301174
4. นาย ภาสกร เวสสะโกศล 301210

อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ประสิทธิ์ คำพันธ์ม)

เครื่องเจาะแผ่นปรินท์ 3 ทิศทาง
(3-Direction Drilling Machine)

โดย

นาย ประสิทธิ์	พิพัฒน์มโนมัย	301147
นาย ปริญญา	สมทรัพย์	301151
นาย พรชัย	นิเวศน์รังสรรค์	301174
นาย ภาสกร	เวสสะโกศล	301210

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ประสิทธิ์ คำพันธ์

ปริญญาโท สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2533

เลขที่	ท. 33/45
เลขทะเบียน	027978
วัน, เดือน ปี	1 ค.ค. 34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

027978

บทคัดย่อ.

ปริญญินพนธ์นี้ เป็นส่วนหนึ่งในการประกอบการศึกษา ในระดับปริญญาตรี
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

เครื่องเจาะแผ่นปริ้นท์ 3 ทิศทาง เป็นเครื่องเจาะกึ่งอัตโนมัติควบคุม
ด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ Z80 ขับเคลื่อนด้วย Stepping Motor ทั้ง 3 ทิศทาง คือ
ตามแนวแกน X, Y, Z ใน Cartesian Coordinate ส่วนที่ใช้เคลื่อนที่แบ่งเป็น 2 ส่วน
คือ (1). ส่วนที่เคลื่อนที่ในระนาบ X-Y (2). ส่วนของหัวเจาะ ส่วนที่เคลื่อนที่ในระนาบ
X-Y จะนำส่วนของหัวเจาะไปยังตำแหน่งที่ต้องการและส่วนของหัวเจาะจะเคลื่อนที่ใน
แนวตั้ง (แกน Z) เพื่อเจาะชิ้นงาน เครื่องเจาะลักษณะนี้มีข้อดี คือ เครื่องจะมีขนาดเล็ก
กว่าแบบที่หัวเจาะอยู่กับที่ ในที่นี้จะเน้นถึงการคำนวณออกแบบชิ้นส่วนต่างๆ ยังไม่สามารถ
สรุปผลการสร้างเครื่องต้นแบบได้

หากมีข้อผิดพลาดประการใดเกิดข้ ทางคณะผู้จัดทำขออภัย ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

22 มี.ค. 2534

ABSTRACT

This thesis is a part of the Bachelor's degree of Mechanical Engineering Project .

The 3-directions printed circuit drilling machine is a semi-automatic machine . It is controlled by Z80 micro-processor and transmitted the power by stepping motor in 3-directions (X,Y,Z) . It consists of two parts : (1) X-Y plane driver for moving the chuck to the drilling position . (2) Chuck driver, for moving the chuck up and down (Z-direction) to drill a hole. The aspect of this machine has an advantage over the ordinary drilling machine because of the smaller size working table and the chuck moves in vertical direction only . This project stress in designing the parts and selecting the material . There need to be further design the improvement of the machine to make it run perfectly .

staff

March 22, 1991.

บทคัดย่อ

คำนำ

1. บทนำ

ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่เกี่ยวกับการวิจัย	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
ขอบเขตของการศึกษา วิจัย พัฒนา และทำงาน	2
แผนและทิศทางการดำเนินงาน	2

2. การควบคุมเชิงเลข

อะไรคือการควบคุมเชิงเลข	3
ส่วนประกอบพื้นฐานของ NC	3
ระบบการกำหนดตำแหน่งและการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร	4
การแบ่งประเภทของเครื่องจักรควบคุมเชิงเลข	5
- แบ่งตามลักษณะการเคลื่อนที่	6
- แบ่งตามโครงสร้างอุปกรณ์ควบคุม	9
- แบ่งตามโปรแกรม	10
- แบ่งตามประเภทวงจรควบคุม	13

3. อุปกรณ์ในการสร้าง

Stepping Motor	15
- ข้อดีและข้อเสียของ Stepping Motor	15
- ชนิดของ Stepping Motor	16
- คุณสมบัติในการทำงานของ Stepping Motor	16
- Stepping Motor ชนิดโซลินอยด์ แรช แอท	21
- Stepping Motor ชนิดความเหนียวนำแปรผันได้	22
- Stepping Motor ชนิดแม่เหล็กถาวร	32
- Stepping Motor ชนิดไฮบริดจ์	36
- Stepping Motor ชนิดเครื่องกลไฟฟ้า	41
- Stepping Motor ชนิดไฮดรอลิกส์ไฟฟ้า	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุม Backlash

- Backlash คืออะไร 45
- การแก้ปัญหา Backlash ในสกรูส่งกำลัง 46
- การลด Backlash ในเฟืองตรง 55
- ข้อเสนอแนะสำหรับการควบคุม Backlash 70

4. ทฤษฎีการทำงานของวงจร

- บล็อกไดอะแกรม 71
- วงจrintเตอร์เฟส 74
- วงจรควบคุม 75
- วงจรขับมอเตอร์ 80
- วงจรควบคุมมอเตอร์ 81
- โปรแกรมควบคุมการทำงานของ Stepping Motor 83

5. การคำนวณและการเลือกส่วนต่าง ๆ

- การคำนวณและการเลือก 87

6. สรุป

- ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น 99
- ข้อเสนอแนะ 99

ภาคผนวก

ตาราง

- 1 ค่าตัวประกอบรูปแบบของลูอิส 101
- 2 ค่าความเค้นสถิตย้ใช้งานสำหรับใช้กับสมการของลูอิส 102
- 3 คุณสมบัติทางกลของเหล็กหล่อบางชนิด 103
- 4 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาและเหล็กกล้าผสม (ชั้นทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25 mm) 104
- 5 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าที่ชุบแข็งได้ 106
- 6 คุณสมบัติทางกลของทองแดงผสมเหล็กหล่อบางชนิด 107
- 7 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยประมาณ 108
- 8 มิติมูลฐานของเกลียวสี่เหลี่ยมคางหมูตามมาตรฐาน ISO 2904-1977(E) 109

ข้อมูลเกี่ยวกับ Stepping Motor

115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ	121
หนังสืออ้างอิง	122
Drawing	123



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่เกี่ยวกับการวิจัย

ในปัจจุบันการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มีการแข่งขันกันอย่างมาก ทั้งในด้านราคาต้นทุนการผลิต คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ออกสู่ท้องตลาด ความสามารถในการผลิต ให้ทันกับความต้องการของตลาด ฯลฯ ซึ่งจากสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้มีการพัฒนาเกี่ยวกับกระบวนการผลิต ความสามารถของเครื่องจักรในด้านความเที่ยงตรงและความรวดเร็ว โดยเครื่องจักรต่าง ๆ เหล่านี้ต้องนำเข้าจากต่างประเทศปีละเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นผลให้ประเทศไทยต้องขาดดุลการค้ากับต่างประเทศต่อปีสูงมาก เครื่องจักรเหล่านี้เช่น เครื่อง CNC ซึ่งเป็นเครื่องจักรที่อาศัยการทำงานที่ใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมมีอยู่หลายชนิด และเครื่องจักรหนึ่งในจำนวนนั้นที่ใช้ในการเจาะแผ่นวงจรพิมพ์ ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

เครื่องเจาะแผ่นวงจรพิมพ์ (แผ่นปริ้นท์) ที่ใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมในปัจจุบัน ต้องนำเข้าจากต่างประเทศในราคาที่สูงมาก ทั้งราคาเครื่อง อุปกรณ์ประกอบต่าง ๆ รวมทั้งผู้มีความรู้ความสามารถในการซ่อมบำรุงก็มีจำนวนน้อยมาก โดยมากจะเป็นผู้เชี่ยวชาญจากต่างประเทศ ดังนั้นหากมีการพัฒนาทางเทคโนโลยีด้านนี้ขึ้นมาในประเทศแล้ว เชื่อแน่ว่าจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการผลิตในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ของไทยดีขึ้น ในขณะที่ต้นทุนการผลิตต่ำลง นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดอุตสาหกรรมส่งออกของไทยเพิ่มขึ้นอีกด้วย

สำหรับความสำคัญอีกประการหนึ่งของการวิจัยนี้คือ การสร้างเครื่องเจาะที่ใช้หัวเจาะในการเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นเครื่องเจาะที่ประหยัดเนื้อที่ในการทำงานมากกว่าเครื่องเจาะแบบใช้ส่วนฐานเคลื่อนที่ ทำให้มีความคล่องตัวสูงในการทำงาน การวิจัยในครั้งนี้นอกจากจะเป็นใช้สำหรับเครื่องเจาะแผ่นวงจรพิมพ์แล้ว ยังสามารถนำไปพัฒนาใช้กับเครื่องจักรอื่นซึ่งมีลักษณะการทำงานใกล้เคียงได้ เช่น เครื่องกัดกรึงแผ่นวงจรพิมพ์อัตโนมัติ เครื่องเจาะซึ่งใช้กับงานที่ต้องการแรงบิดสูง (เจาะแผ่นเหล็ก) ฯลฯ อันจะเป็นผลทำให้ลดการนำเข้าได้เป็นอย่างดี ซึ่งนับได้ว่ามีผลกระทบโดยตรงต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศ

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาและวิจัยระบบขับเคลื่อนและส่งกำลังที่ทำงานได้อย่างแม่นยำ
2. เพื่อศึกษาและปรับปรุงระบบการควบคุมเครื่องจักรกลด้วยไมโครโปรเซสเซอร์
3. เพื่อหาข้อผิดพลาดของสกรูส่งกำลัง

3. ขอบเขตของการศึกษา วิจัย พัฒนา และทำงาน

1. ศึกษาระบบการทำงานของเครื่องเจาะแผ่นปรีนซ์
2. ศึกษาการขับเคลื่อนที่สามารถควบคุมตำแหน่งได้
3. ออกแบบการติดตั้งชุดขับเคลื่อนและชุดหัวเจาะ
4. ติดตั้งระบบส่งกำลังที่ใช้สกรู

4. แผนและทิศทางการดำเนินงาน

1. ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับ Stepping Motor
2. ศึกษาและเลือกระบบที่เหมาะสมของระบบขับเคลื่อนและระบบควบคุม
3. ศึกษาและออกแบบวงจรขับเคลื่อน Stepping Motor
4. สร้างชุดหัวเจาะ ชุดเคลื่อนที่ตามแนวระนาบ X-Y
5. จัดทำรายงาน สรุป และเสนอแนะ

บทที่ 2

การควบคุมเชิงเลข

1. อะไรคือการควบคุมเชิงเลข

การควบคุมเชิงเลข (NC) คือ รูปแบบของระบบการควบคุมอัตโนมัติที่สามารถโปรแกรมได้ โดยที่อุปกรณ์ในการทำงานจะถูกควบคุมในรูปของตัวเลข ตัวอักษร และสัญลักษณ์อื่น ๆ ตัวเลข ตัวอักษร และสัญลักษณ์จะรวมกันเป็น Code ที่เหมาะสมในการสร้างเป็นโปรแกรมโครงสร้างที่เป็นส่วนเฉพาะของชิ้นส่วนหรืองาน เมื่อเปลี่ยนงานใหม่โปรแกรมที่เขียนก็จะถูกเปลี่ยน ด้วยความสามารถในการเปลี่ยนโปรแกรมทำให้ NC เหมาะสมกับการผลิตที่มีอัตราการผลิตต่ำจนถึงปานกลาง มันจะเป็นการง่ายในการเขียนโปรแกรมใหม่แทนที่จะเปลี่ยนเครื่องมือหลักในการทำงาน

คุณสมบัติพิเศษของการควบคุมเชิงเลขก็คือ สามารถควบคุมงานที่มีขบวนการทำงานที่เปลี่ยนแปลงอย่างกว้างขวาง เราจะแบ่งประโยชน์ของการประยุกต์ใช้งานเป็น 2 ส่วน คือ

1. ในส่วนของการประยุกต์ใช้งานกับเครื่องจักรกล
2. ในส่วนที่ไม่เกี่ยวกับเครื่องจักรกล เช่น การประกอบ การเขียนแบบ และการตรวจสอบ

การประยุกต์ใช้งานของ NC โดยทั่วไปก็คือ การควบคุมทิศทางที่สัมพันธ์กันของมิตติดตั้งกับชิ้นงานที่ต้องการตัด

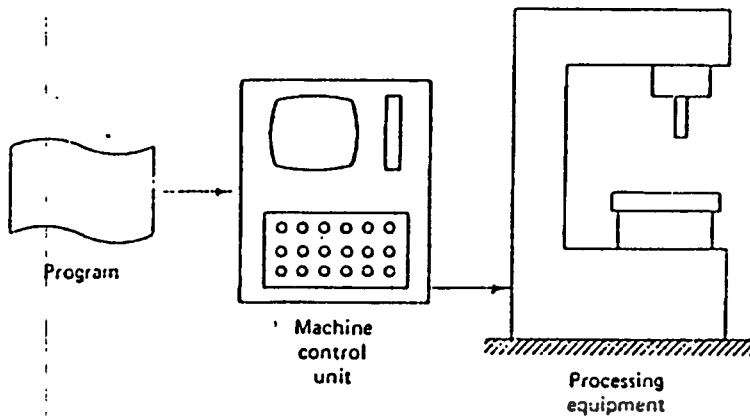
2. ส่วนประกอบพื้นฐานของ NC

ระบบการควบคุมเชิงเลขจะประกอบด้วยส่วนประกอบพื้นฐาน 3 ส่วน คือ

1. โปรแกรมในการทำงาน
2. หน่วยควบคุมเครื่องจักรกล
3. เครื่องมือเครื่องจักรในการทำงาน

ความสัมพันธ์โดยทั่วไป ระหว่างองค์ประกอบทั้ง 3 ส่วน แสดงดังรูป 2.1

โปรแกรมการทำงานจะถูกป้อนเข้าสู่หน่วยควบคุม ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์ทำงานตามต้องการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบพื้นฐานของระบบ NC

3. ระบบการกำหนดตำแหน่งและการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร

ในการเขียนโปรแกรม NC จำเป็นจะต้องตั้งแกนการเคลื่อนที่ที่เป็นมาตรฐานเพื่อที่จะสามารถกำหนดทิศทางที่สัมพันธ์กันของอุปกรณ์กับชิ้นงาน

1. จุดอ้างอิงเริ่มต้นที่คงที่กับจุดอ้างอิงเริ่มต้นที่เปลี่ยนแปลงได้

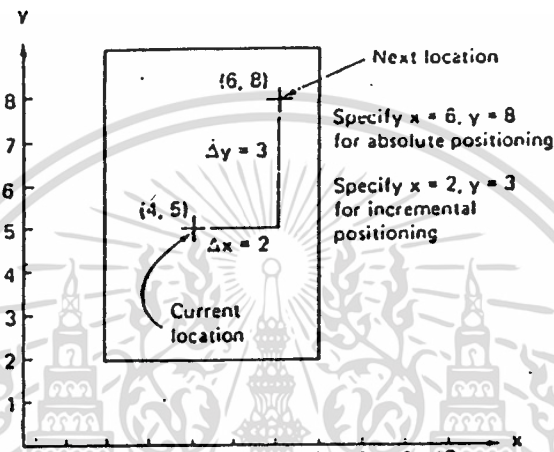
จุดประสงค์ของระบบจุดอ้างอิงตำแหน่ง (Coordinate) ก็คือเพื่อให้รู้ตำแหน่งของมิตตัดที่สัมพันธ์กับงานโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเครื่องจักรชนิด NC ผู้เขียนโปรแกรมสามารถเลือกกำหนดตำแหน่งได้หลายอย่าง โดยที่ทางเลือกแต่ละทางจะขึ้นอยู่กับจุดอ้างอิงเริ่มต้นที่คงที่ กับจุดอ้างอิงเริ่มต้นที่สามารถกำหนดได้

ในกรณีของจุดอ้างอิงเริ่มต้นที่คงที่ จุดเริ่มต้นจะอยู่ในตำแหน่งเดิมบนแท่นของเครื่องจักร เมื่อเราต้องการจะเคลื่อนที่ในทิศตะวันตกเฉียงใต้ของแท่นเครื่อง ตำแหน่งต่าง ๆ จะถูกกำหนดโดยตำแหน่งบนแกน X และ Y ซึ่งสัมพันธ์กับจุดอ้างอิงเริ่มต้นที่คงที่

วิธีที่สองคือวิธีที่เครื่องจักร NC สมัยใหม่ใช้กัน ก็คือการกำหนดจุดอ้างอิงเริ่มต้นที่เปลี่ยนแปลงได้ (Floating Zero) ผู้เขียนโปรแกรมจะเป็นผู้ตัดสินใจในการกำหนดจุดอ้างอิงตัวนี้ว่าให้อยู่ที่ใดเพื่อให้สะดวกกับการเขียนโปรแกรม ตัวอย่างเช่นชิ้นงานที่มีลักษณะสมมาตรจุดอ้างอิงก็ควรจะต้องอยู่ที่จุดกึ่งกลางของแกนสมมาตร

2. จุดอ้างอิงตำแหน่งแบบสัมบูรณ์กับการกำหนดตำแหน่งแบบจุดถึงจุด

ผู้เขียนโปรแกรมสามารถเลือกเขียนโปรแกรมโดยใช้ระบบจุดอ้างอิงตำแหน่งแบบสัมบูรณ์หรือแบบจุดถึงจุดอย่างใดอย่างหนึ่ง จุดอ้างอิงตำแหน่งแบบสัมบูรณ์ หมายถึง ตำแหน่งของมิตตัด ณ เวลาใด จะถูกกำหนดจากตำแหน่งจุดอ้างอิง เริ่มต้นที่กำหนดขึ้น เช่น ถ้ารูที่ถูกเจาะอยู่ที่ตำแหน่งทางแกน $x = +6.000$ และ $y = +8.000$ ส่วนวิธีจากจุดถึงจุด การเคลื่อนที่ของมิตตัดจะอ้างอิงจากจุดก่อนหน้า



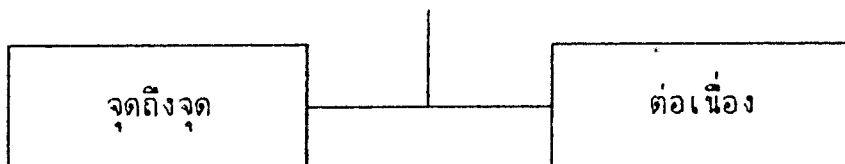
รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะของระบบทั้ง 2

4. การแบ่งประเภทของเครื่องจักรการควบคุมเชิงเลข

การจัดแบ่งประเภทของเครื่องจักรควบคุมเชิงเลข แบ่งได้เป็น 4 ลักษณะด้วยกัน

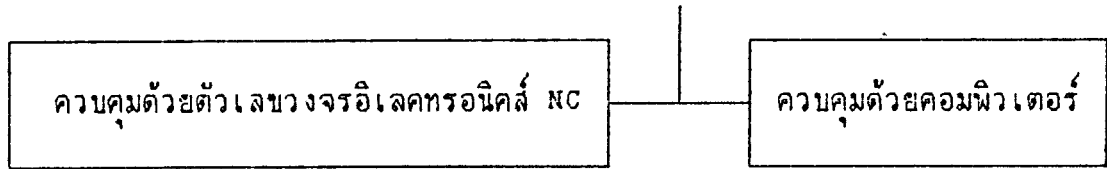
คือ

1. แบ่งตามลักษณะการเคลื่อนที่

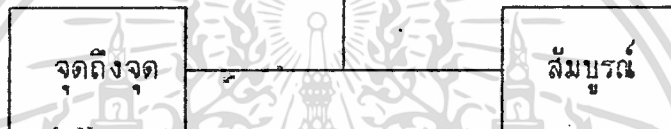


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

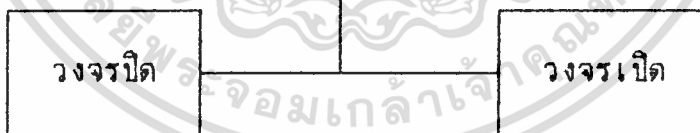
2. แบ่งตามโครงสร้างอุปกรณ์ควบคุม



3. แบ่งตามโปรแกรม



4. แบ่งตามประเภทของวงจรถวลควบคุม

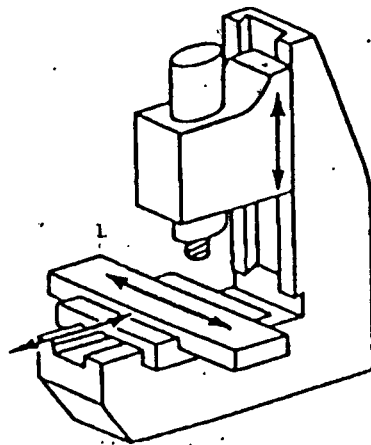


1. แบ่งตามลักษณะการเคลื่อนที่ คือ

1. จุดถึงจุด (Point To Point)

ลักษณะที่ง่ายที่สุด และพบเห็นกันอยู่ประจำสำหรับการเคลื่อนที่จุดถึงจุด (Point To Point) ก็คือ เครื่องเจาะซึ่งประกอบไปด้วย Cross Slide Table ดังรูป 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

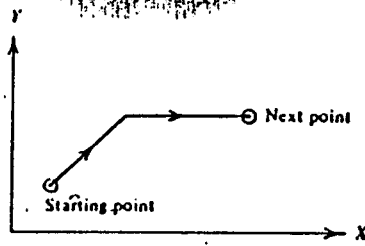


รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร

สำหรับหลักการการทำงานของการเคลื่อนที่แบบจุดถึงจุด (Point To Point) มีดังต่อไปนี้ กล่าวคือ ชิ้นงานจะเคลื่อนที่ไปตามแนวแกนของการเคลื่อนที่จนกระทั่งจุดศูนย์กลางของรูที่จะเจาะอยู่ต่ำกว่าดอกสว่าน (Drill) จากนั้นสว่านก็จะเคลื่อนที่ลงมายังชิ้นงาน (ด้วยความเร็วแกนและอัตราป้อนซึ่งสามารถควบคุมหรือคงที่) รูถูกเจาะและเมื่อทำการเจาะเสร็จเรียบร้อยแล้วสว่านจะเคลื่อนที่ขึ้นอย่างรวดเร็ว ชิ้นงานเคลื่อนที่ไปยังจุดใหม่ที่ต้องการเจาะ และเครื่องก็ทำตามขั้นตอนดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งจะได้ว่าระบบการเคลื่อนที่แบบนี้เหมาะสมกับเครื่องจักรประเภทเครื่องเจาะ

ดังนั้นสามารถที่จะสรุปได้ว่า การเคลื่อนที่นี้ชิ้นงานจะเคลื่อนที่สัมพันธ์กับดอกสว่านจนถึงจุดที่ต้องการที่กำหนดไว้แล้วก็จะหยุดการเคลื่อนที่ มิติตัดก็ทำงานจนได้งานที่ต้องการ หลังจากเสร็จสิ้นการทำงาน ชิ้นงานก็เคลื่อนที่ไปยังจุดต่อไป และรอบการทำงานนี้จะทำงานซ้ำ ๆ กันอย่างนั้นจนได้ชิ้นงานที่ต้องการ

ในระบบการเคลื่อนที่จุดถึงจุด เส้นทางเดินของมิติตัดและอัตราการป้อนขณะเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งนั้นไม่มีความจำเป็น ดังนั้นในระบบนี้ต้องการเพียงตัวนับตำแหน่ง (Position Counter) สำหรับควบคุมตำแหน่งสุดท้ายของการเคลื่อนที่ ดังนั้นเส้นทางเดินจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดสุดท้ายนั้น สามารถมีได้มากมาย และไม่จำเพาะเจาะจงดังแสดงตามรูป 2.4

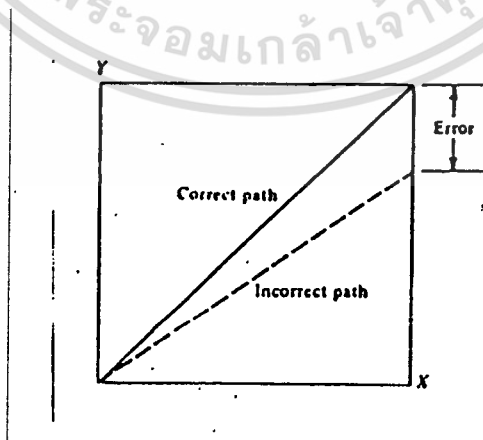


รูปที่ 2.4 เส้นทางเดินสำหรับระบบจุดถึงจุด (Point to Point)

2. แบบต่อเนื่อง

ในระบบการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่อง มีดัดจะทำการตัดขณะที่แต่ละแกนเคลื่อนที่ยกตัวอย่าง เช่น เครื่องหมุนกัด (Milling Machine) แกนทุกแกนจะเคลื่อนที่ไปพร้อม ๆ กันโดยที่แต่ละแกนจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่าง ๆ กัน เมื่อต้องการการเคลื่อนที่ที่ไม่ใช่เส้นตรง ความเร็วแต่ละแกนจะเปลี่ยนไปในแต่ละแกนเพื่อที่จะได้เส้นทางตามที่ต้องการ ยกตัวอย่าง เช่น การตัดที่เป็นส่วนโค้ง ความเร็วของแกนหนึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าอัตรามุม Sine ขณะเดียวกันอีกแกนหนึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าอัตรามุม Cosine

ในเครื่องจักรที่ทำงานแบบนี้ สิ่งสำคัญที่จะเกิดขึ้นก็คือค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้น ณ จุดสุดท้ายของการเคลื่อนที่แต่ละช่วง ทั้งนี้เพราะเป็นผลจากอัตราส่วนระหว่างความเร็วแกนที่ต้องการเพื่อที่จะให้ได้เส้นทางที่ต้องการและในขณะเดียวกันก็ต้องคำนึงถึงผลของอัตราป้อน (Feed) ที่จะมีต่อพื้นผิวชิ้นงาน ดังรูป 2.5



รูปที่ 2.5 ผลของความผิดพลาดของความเร็วที่มีต่อตำแหน่งในระบบการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแต่ละแกนของการเคลื่อนที่นั้น จะประกอบด้วยวงจรถมคุมตำแหน่ง และตัวนับขนาดที่จะเคลื่อนที่ ตำแหน่งจะถูกป้อนเข้าสู่หน่วยประมวลผล (Data Processing Unit) เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ได้ถูกต้องตามต้องการ

2. แบ่งตามโครงสร้างอุปกรณ์ควบคุม



1. ควบคุมด้วยตัวเลขวงจรถมคุมอิเล็กทรอนิกส์ (Numerical Control)

ระบบควบคุมด้วยตัวเลขวงจรถมคุมอิเล็กทรอนิกส์ ใช้การควบคุมด้วยระบบ Hardware ซึ่งมีพื้นฐานอยู่บนเทคโนโลยีทางด้านวงจรไฟฟ้า (Digital Controller) ที่ใช้ใน Hardware ระบบ NC นั้นจะทำการส่งแบบแรงดันไฟฟ้า (Voltage Pulse) โดยที่แต่ละ Pulse จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ 1 BLU

$$\text{PULSE} = \text{BLU}$$

โดยที่ลูกคลื่นนี้สามารถที่จะไปทำการขับ Stepping Motor ในระบบเปิด (Open Loop Control) หรือเซอร์โวมอเตอร์กระแสตรง (Dc Servomotor) ในระบบปิด (Closed Loop Control) จำนวนพัลส์ (Pulse Frequency) จะมีค่าเท่ากับความเร็วของการเคลื่อนที่

2. ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ (Computerized Numerical Control)

ระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์นั้นจะใช้มินิคอมพิวเตอร์ (Minicomputer) ควบคุมการทำงานแทนที่จะใช้การควบคุมแบบ NC จึงทำให้มีประสิทธิภาพและความสามารถในการทำงานเพิ่มมากขึ้นและมีความยืดหยุ่น (Flexibility) อีกทั้งเอื้ออำนวยให้สามารถทำการแก้ไขโปรแกรมได้สะดวกรวดเร็วยิ่งขึ้น

ในคอมพิวเตอร์ ข้อมูลและรายละเอียดต่าง ๆ จะถูกจัดเรียง ทำการคำนวณ และเก็บไว้ในรูปแบบเลขฐานสอง (Binary Word) โดยที่แต่ละคำ (Word) จะประกอบด้วยจำนวนบิต (BIT) คงที่ ซึ่งจำนวนบิตที่ใช้กันส่วนมากมี 8 บิต และ 16 บิต ในระบบของ CNC นี้ 1 บิต จะแทน 1 BLU ดังนั้น

$$\text{BIT} = \text{BLU}$$

ตัวอย่างเช่น ถ้าเราใช้คอมพิวเตอร์ 16 บิต ดังนั้นจะแทนการเคลื่อนที่ได้ทั้งหมด $2^{16} = 65,536$ ตำแหน่ง (รวมตำแหน่ง 0 ด้วย) สมมติว่า BLU = 0.01 mm ดังนั้นตัวเลข 65,536 จะแทนระยะทางการเคลื่อนที่ได้ = 655.36 mm

ในอุตสาหกรรมการผลิต CNC นั้น ได้ทำการออกแบบเครื่องมาหลายรูปแบบ แต่ระบบที่ง่ายที่สุด และใช้กันอยู่ก็คือ การออกแบบให้ค่าของ Pulse มีค่าเท่ากับ BIT ดังนั้นจะได้สมการข้างล่างดังนี้

$$\text{BIT} = \text{PULSE} = \text{BLU}$$

ข้อแตกต่างที่เห็นอย่างชัดเจนระหว่าง NC กับ CNC ก็คือ วิธีการอ่านพินซ์เทป (Punch Tape) จะอ่านทีละบล็อก (Block) เมื่ออ่านแต่ละบล็อก การทำงานก็จะเสร็จในแต่ละช่วง และเมื่อทำขั้นตอนนี้ต่อไป เทปก็จะถูกอ่านไปอีก 1 บล็อก ส่วนในระบบ CNC พินซ์เทปจะถูกอ่านเพียงครั้งเดียว และข้อมูลถูกส่งไปเก็บที่หน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ ก่อนที่จะทำการตัด และขณะที่เครื่องทำงาน โปรแกรมควบคุม (Control Program) จะนำข้อมูลที่เก็บอยู่ในหน่วยความจำมาใช้ และวิธีนี้ความผิดพลาดในการอ่านข้อมูลจะไม่เกิดขึ้น

3. แบ่งตามโปรแกรม

1. อินครีเมนทอล (Incremental)

ในระบบอินครีเมนทอลนี้ หลักการก็คือ จุดสุดท้ายของขั้นตอนการทำงานก่อนหน้าจะเป็นจุดอ้างอิงสำหรับขั้นตอนการทำงานถัดไป ข้อมูลของขนาดที่ป้อนเข้าไปนั้นเป็นขนาดที่เพิ่มขึ้นจากจุดอ้างอิง พิจารณาจากรูป 2.6 จะเห็นว่ามีรูสำหรับเจาะทั้งหมด 5 รู ระยะต่าง ๆ ของรูที่ห่างจากจุด 0 ดังรูป เมื่อทำการคำนวณระยะห่างระหว่างรูแล้วจะได้คำสั่งสำหรับตำแหน่งของแกน X ดังนี้

คำสั่งที่ได้

X +500

X +200

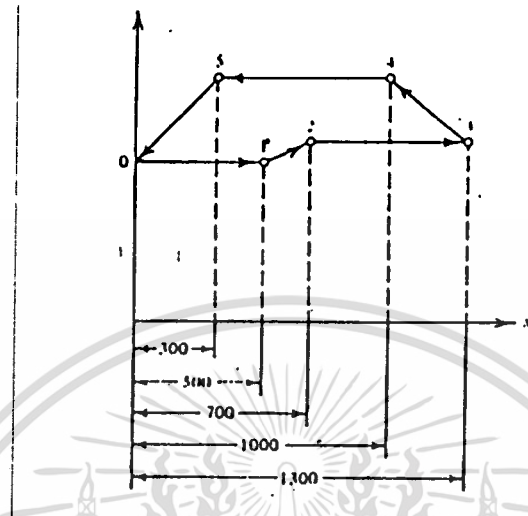
X +600

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X -300

X -700

X -300



รูปที่ 2.6 ส่วนต่าง ๆ ที่จะเจาะ

เมื่อพิจารณาระบบอินครีเมนทอล (Incremental) ทั้งระบบ วิธีการป้อนข้อมูล และอุปกรณ์สำหรับป้อนข้อมูล เป็นแบบอินครีเมนทอล อุปกรณ์ป้อนกลับเป็นแบบ Rotary Encoder ซึ่งจะส่งสัญญาณ (Pulse) ออกมา และแต่ละ Pulse = 1 BLU

2. ระบบสัมบูรณ์ (Absolute)

ในระบบสัมบูรณ์ คำสั่งสำหรับการเคลื่อนที่ทุกคำสั่งจะอ้างอิงกับจุดอ้างอิงเพียงจุดเดียว ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นโดยเรียกจุดนี้ว่าจุดศูนย์ (Zero Point) และจุดศูนย์ที่ว่านี้อาจจะอยู่นอกชิ้นงานหรือว่าอยู่ที่มุมหนึ่งของชิ้นงาน ถ้าใช้อุปกรณ์สำหรับจับยึดชิ้นงานร่วมด้วย ยิ่งเป็นการสะดวกที่จะเลือกจุดศูนย์ให้อยู่บนอุปกรณ์สำหรับจับชิ้นงาน (Fixture) และจากรูป 2.6 เราสามารถเขียนคำสั่งสำหรับการเคลื่อนที่ได้ดังนี้

X +500

X +700

X +1300

X +1000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X +300

X 0

และที่จริงแล้วระบบสัมบูรณ์ยังสามารถที่จะแบ่งย่อยลงไปได้อีก 2 ระบบ คือ

1. Pure Absolute

เป็นระบบที่ทั้งการเขียนโปรแกรมขนาด และสัญญาณป้อนกลับ จะอ้างอิงจุดใดจุดหนึ่ง และระบบป้อนกลับที่ใช้นั้นจะต้องให้ข้อมูลของตำแหน่งออกมาในลักษณะสัมบูรณ์ (Absolute) อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับกลับ เช่น Multichannel Digital Encoder แต่เนื่องจากอุปกรณ์นี้ราคาแพงมาก ดังนั้นระบบนี้จะใช้กับงานที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง เช่น โต๊ะหมุน (Rotary Table)

2. Absolute Programming System

ก็มีลักษณะที่เหมือนกับ Pure Absolute แต่จะมีข้อแตกต่างกันเพียงข้อเดียวคือ ระบบป้อนกลับนั้นจะใช้อุปกรณ์ที่ทำการส่งสัญญาณแบบอินครีเมนทอล (Incremental) ซึ่งโดยทั่ว ๆ ไป แล้วระบบนี้จะเป็นระบบที่นิยมใช้มาก

ข้อได้เปรียบที่เห็นได้ชัดในการใช้ระบบสัมบูรณ์ (Incremental) ก็คือ เมื่อระบบการทำงานเกิดการขัดจังหวะขึ้น เช่น มิดตัดหัก ในระบบสัมบูรณ์เราสามารถที่จะเปลี่ยนเครื่องมือตัดและทำการตัดต่อไปได้ง่าย และรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากเราได้อ้างอิงการตัดจากจุดใดจุดหนึ่ง แต่สำหรับระบบ Incremental จะเสียเวลาและทำได้ยากกว่า ส่วนอีกข้อหนึ่งก็คือ ในระบบ Absolute นั้น การแก้ไขเปลี่ยนแปลงขนาดจะกระทำได้ง่ายกว่า ทั้งนี้เนื่องจากเหตุที่กล่าวไปแล้วว่า การเขียนโปรแกรมเราจะอ้างอิงจากจุดใดจุดหนึ่งซึ่งก็คือ จุดศูนย์ (Zero Point) เสมอ

อย่างไรก็ตามระบบ Incremental ก็มีข้อได้เปรียบระบบ Absolute ดังนี้

1. การตรวจสอบว่าโปรแกรมทำงานได้ถูกต้อง จะทำการตรวจสอบได้ง่ายกว่า ทั้งนี้เพราะว่าถ้าทำงานครบรอบแล้วจุดสุดท้ายก็จะกลับมาที่จุดเริ่มต้น และผลรวมของคำสั่งจะมีค่าเท่ากับศูนย์

2. ในงานที่เป็นแบบสมมาตรนั้น การใช้โปรแกรมแบบอินครีเมนทอล ให้ความสะดวกในการทำงานมากกว่าโดยใช้การโปรแกรมคำสั่ง Mirror Image

4. แบ่งตามประเภทวงจรรควบคุม

1. วงจเปิด (Open Loop)

ระบบวงจเปิด คือ ระบบที่ออกแบบมาโดยปราศจากการป้อนกลับ (Feedback) ดังนั้นตัวขับ (Actuator) ที่ใช้จะต้องสามารถควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ได้ โดยส่วนมากแล้วจะใช้ Stepping Motor เป็นตัวขับเคลื่อน โดยที่ Stepping Motor จะทำงานดังนี้ คือ เมื่อมีอินพุต (Input) เข้ามาเป็นคลื่นไฟฟ้า (Electric Pulse) Stepping Motor จะทำการเปลี่ยนคลื่นไฟฟ้านี้เป็นการเคลื่อนที่ที่เป็นสัดส่วนกัน กล่าวคือ หนึ่งลูกคลื่นจะทำให้มอเตอร์เคลื่อนที่ไปหนึ่งสเต็ป ดังนั้นการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับความสามารถของมอเตอร์ที่จะรักษาระดับการเคลื่อนที่ เพื่อไม่ให้ผิด Step (Loose Step) ได้มากนักน้อยเพียงใด หลักการทำงานดังรูป 2.7



รูปที่ 2.7 ระบบควบคุมแบบวงจเปิด

จากความรู้ที่เราทราบแล้วว่า การเคลื่อนที่ 1 Step เท่ากับ การเคลื่อนที่ 1 BLU ดังนั้นจำนวน Step ต่อเวลา ก็คือความเร็วของการเคลื่อนที่

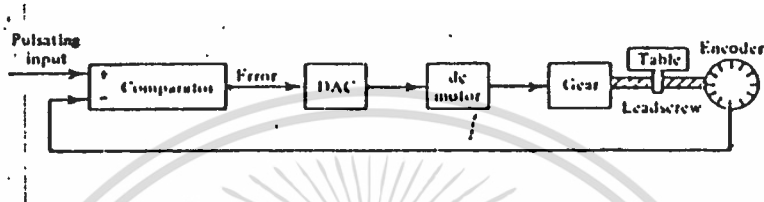
2. วงจปิด (Close Loop)

ระบบวงจปิด คือ ระบบที่ออกแบบโดยมีตัวป้อนกลับ (Feedback) โดยที่ระบบจะกระทำการวัดระยะที่เคลื่อนที่ และความเร็วของการเคลื่อนที่ในแต่ละแกน จากนั้นจะทำการเปรียบเทียบกันค่าที่ต้องการ ผลต่างระหว่างค่าทั้ง 2 เรียกว่า ค่าผิดพลาด (Error) ดังนั้นตัวควบคุมจะถูกออกแบบเพื่อที่จะขจัดหรือลดค่าผิดพลาดลงให้น้อยที่สุด โดยปกติแล้วระบบนี้จะเป็นระบบป้อนกลับที่มีค่าลบ

ในระบบควบคุมด้วยตัวเลข (NC System) ทั้งข้อมูลที่ส่งเข้า (Input) และข้อมูลที่ป้อนกลับ (Feedback) ถูกส่งในรูปลำดับของ Pulse โดยแต่ละ Pulse มีค่าเท่ากับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BLU เช่น 0.01 มิลลิเมตร ตัวเปรียบเทียบทางไฟฟ้า (Digital Comparater) เป็นตัวเปรียบเทียบสัญญาณที่ป้อนกลับ (Feedback) และได้ค่าผิดพลาด (Error) และส่งไปยังตัวแปลงสัญญาณจาก Digital เป็น Analog ซึ่งตัวแปลงสัญญาณนี้ เรียกว่า Digital To Analog Convertor (DAC) ซึ่งค่าที่ได้นี้จะใช้ขับมอเตอร์ เพื่อให้ได้ตำแหน่งและความเร็วที่ต้องการ

อุปกรณ์ในการป้อนกลับ (จะกล่าวรายละเอียดของอุปกรณ์ในบทต่อไป) ในที่นี้ใช้ Incremental Encoder ดังรูป 2.8



รูปที่ 2.8 ระบบควบคุมวงจรมอเตอร์

จากรูป 2.8 จะเห็นว่า Encoder ประกอบอยู่กับเกลียวนำของแต่ละแกน และจะส่งข้อมูลป้อนกลับไปยังตัวเปรียบเทียบ

Encoder ประกอบด้วย จานหมุน (Disk) ซึ่งแบ่งเป็นส่วน ๆ และทั้ง 2 ข้างของจานหมุนจะมีหลอดไฟ และตัวรับแสง เมื่อจานหมุนเคลื่อนที่จะทำให้เกิดความเข้มของแสงต่าง ๆ ตกลงบนตัวรับแสง และให้ Pulse ออกมา โดยที่อัตรา Pulse ต่อเวลา คือ จำนวนรอบต่อเวลาของเกลียวนำ (Lead Screw)

คุณสมบัติที่สำคัญของ Stepping Motor คือ ความเร็วที่มากที่สุดจะขึ้นอยู่กับ Load Torque แรงบิดยิ่งมากเท่าไรความถี่สูงสุดที่ให้กับมอเตอร์ก็ยิ่งน้อยลง Stepping Motor ไม่สามารถที่จะใช้กับเครื่องจักรที่ Load Torque เปลี่ยนแปลง เพราะว่า Load Torque ยิ่งมากยิ่งทำให้มอเตอร์เดินผิด Step และผลที่ตามมา คือ ความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ ในระบบการตัดแบบต่อเนื่อง (Contouring) ภาวะที่เกิดจากแรงตัดขึ้นอยู่กับสภาพการตัด ดังนั้น Stepping Motor ไม่สามารถใช้กับระบบการตัดแบบต่อเนื่อง ดังนั้น Stepping Motor สามารถใช้กับระบบการตัดด้วยเลเซอร์ และระบบจุดต่อจุด ซึ่งถือว่าแรงบิดที่เกิดจากมอเตอร์คงที่ หุ่นยนต์อุตสาหกรรมและระบบการตัดต่อเนื่อง เช่น เครื่องกลึง เครื่องหมุนกัด ต้องการระบบการควบคุมแบบปิดเพื่อควบคุมตำแหน่ง และ ความเร็วให้ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

อุปกรณ์ในการสร้าง

STEPPING MOTOR

Stepping Motor เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าแบบพิเศษ ซึ่งเมื่อป้อนไฟ DC ให้กับขดลวดสเตเตอร์ จะเกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้าหลักตัวโรเตอร์ ทำให้มอเตอร์หมุนตามค่า Step Angle บางครั้งจึงเรียกมอเตอร์แบบนี้ว่า Pulse Motor เพราะเมื่อถูกควบคุมอย่างเหมาะสมแล้ว จำนวน Step ที่หมุนไปของ Stepping Motor ต้อง เท่ากับ จำนวนของ Pulse ที่ป้อนเข้ามา แต่ละ Pulse จะหมุนแกนโรเตอร์ไป 1 Step

ในสมัยก่อน Stepping Motor เป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกลที่ต่ำกว่า AC และ DC Motor แต่เมื่อไม่นานมานี้ Stepping Motor ได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูง และถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในวงการอุตสาหกรรม ส่วนมากใช้เป็นอุปกรณ์ Peripheral ของคอมพิวเตอร์ เช่น Printer เครื่องเล่นเทป เครื่องอ่านการ์ด เป็นต้น นอกจากนี้ Stepping Motor ยังถูกนำมาใช้ในระบบควบคุมเชิงเลข ระบบควบคุมเครื่องมือและเครื่องจักร ระบบควบคุมกระบวนการ และอีกหลาย ๆ ระบบในอุตสาหกรรม

1. ข้อดีและข้อเสียของ Stepping Motor

ข้อดี คือ

1. สามารถที่จะถูกขับเคลื่อนแบบเปิด คือไม่มีสัญญาณป้อนกลับ ไม่มีปัญหาเรื่องเสถียรภาพ
2. ไม่มีความผิดพลาดของตำแหน่งแบบสะสม
3. มีการตอบสนองต่อสัญญาณป้อนเข้าแบบ Digital
4. มีกลไกอย่างง่าย ต้องการการบำรุงรักษาเล็กน้อย หรือไม่ต้องการเลย
5. ปราศจากความสกปรก
6. ใช้กับแผ่นระบายความร้อนได้ง่าย
7. สามารถที่จะถูกหยุดทันทีโดยไม่เสียหาย
8. ทนทานและแข็งแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสีย คือ

1. มี Step Angle คงที่
2. มีประสิทธิภาพต่ำเมื่อใช้กับวงจรมอเตอร์เคลื่อนแบบธรรมดา
3. มี Overshoot สูง และการสั่นของการตอบสนองที่ให้กับ Step
4. ความสามารถที่จำกัดในการรับภาระที่มีความเฉื่อยสูง
5. ภาระเนื่องจากความเสียดทานจะไปเพิ่มความผิดพลาดของตำแหน่งการควบคุมแบบเปิด แม้ว่าความผิดพลาดจะไม่สะสม
6. กำลังที่ได้ออกมาและขนาดมีอยู่จำกัด

2. ชนิดของ Stepping Motor

โดยทั่วไปแล้วสามารถจัดได้เป็น 6 ประเภท คือ

1. โซลินอยด์ - แรชเชท (Solenoid - Ratchet Type)
2. ความเหนี่ยวนำที่เปลี่ยนแปลงได้ (Variable - Reluctance , VR)
3. แม่เหล็กถาวร (Permanent - Magnet , PM)
4. ไฮบริด (Hybrid or Synchronous Inductor)
5. เครื่องกลไฟฟ้า (Electromechanical)
6. ไฮดรอลิกไฟฟ้า (Electrohydraulic)

3. คุณสมบัติในการทำงานของ Stepping Motor

รีโซลูชัน (Resolution)

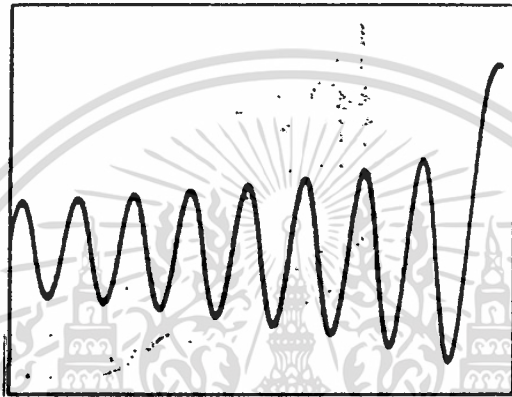
ค่ารีโซลูชันของ Stepping Motor ถูกแสดงในเทอมของ Step ต่อ รอบ หรือ Step Angle หรือ Step Increment มีหน่วยเป็นองศา สำหรับลิเนียร์มอเตอร์ มีหน่วยเป็นนิ้วหรือมิลลิเมตร สำหรับมอเตอร์ส่วนใหญ่ ค่ารีโซลูชันไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้

การตอบสนองแบบ Single Step

เมื่อเฟสหนึ่งของมอเตอร์ถูกกระตุ้นในช่วงระยะเวลาใดเวลาหนึ่ง มอเตอร์จะไปอยู่ที่ตำแหน่งหน่วง (Detent Position) เมื่อเฟสนั้นไม่ถูกกระตุ้น เฟสต่อไปจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกกระตุ้น มอเตอร์จะหมุนไปข้างหน้า 1 Step การตอบสนองของโรเตอร์เมื่อเทียบกับเวลา ถูกกำหนดให้เป็นการตอบสนองแบบ Single Step ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญต่อการบอกความเร็วการเคลื่อนที่ของ Stepping Motor ว่ามีความเร็วเท่าไร , การสิ้นของการตอบสนอง (คุณสมบัติในการลดการสั่น) และความแม่นยำของ Step Angle Stepping Motor มีการตอบสนองที่ค่อนข้างสั้น เมื่อกระตุ้นขดลวดเฟส ดังนั้นจึงจำเป็นต้องลดหรือทำให้การสั่นหมดไป การตอบสนองแบบ Single Step โดยทั่วไปของ Stepping Motor แสดงไว้ในรูป 3.1



รูปที่ 3.1 การตอบสนองแบบ Single Step ของ Stepping Motor

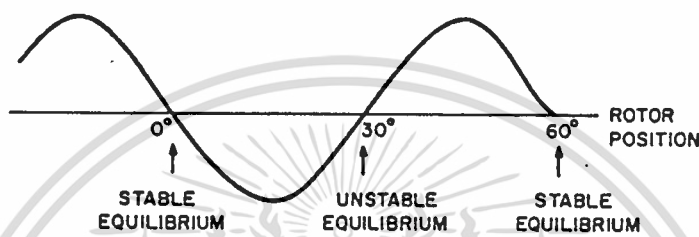
ความแม่นยำ (Accuracy)

ตำแหน่ง Step ของ Stepping Motor ตัวหนึ่ง ถูกกำหนดด้วยขนาดของส่วนประกอบหลายส่วน และการประกอบขึ้นมาระหว่างการออกแบบ และการสร้างความเผื่อในขนาดของส่วนประกอบเหล่านี้ ทำให้เกิดความเผื่อในตำแหน่ง Step จากตำแหน่งที่ถูกต้องในแง่ของตัวเลข สิ่งนี้เราเรียกว่า ความแม่นยำของ Stepping Motor ถูกแสดงเป็นค่าความผิดพลาดเชิงมุมสูงสุดในตำแหน่งใด ๆ เช่นเดียวกับเปอร์เซ็นต์ของมุมในหนึ่ง Step หรือขนาดเชิงมุม

ความผิดพลาดของตำแหน่งที่เกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มประกอบขึ้นส่วน เป็นความผิดพลาดที่ไม่สะสม มันเกิดขึ้นภายใต้ทุก ๆ สภาพของภาวะ

Holding or Static Torque

กราฟเส้นโค้งของ Holding Torque ได้แสดงไว้ในกราฟรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นเส้นโค้งของเฟสหนึ่งใน Stepping Motor แกนตั้งแทนค่า Holding Torque แกนนอนแทนระยะขจัดของโรเตอร์ ค่า Holding Torque จะทำในทิศทางที่ทำให้โรเตอร์กลับมาตำแหน่งเริ่มต้น หรือยึดให้อยู่ในตำแหน่งที่มีการขจัดศูนย์ หรือตำแหน่งหนึ่ง



รูปที่ 3.2 กราฟเส้นโค้งของ Holding Torque เฟสหนึ่งใน Stepping Motor

เส้นโค้งของ Holding Torque มีความสำคัญในการที่จะกำหนดแรงบิดช่วงขณะของมอเตอร์ได้

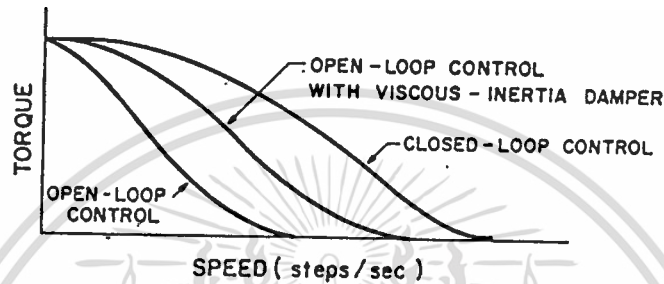
Dynamic Torque or Pull-Out Torque

Pull Out Torque บอกให้ทราบถึง ค่าแรงบิดเนื่องจากความเสียดทานสูงสุด เมื่อเคลื่อนที่ในสภาวะคงที่ สามารถใส่ภาระให้แก่ Stepping Motor ที่ความเร็วที่สอดคล้องกัน หรือ อัตราการ Stepping โดยไม่ทำให้โรเตอร์เกิดสภาวะที่ชุก Pulse ที่ป้อนเข้ามา ไม่พร้อมกับการหยุดซึ่งเกิดขึ้นที่มอเตอร์

กราฟเส้นโค้ง Pull-Out Torque ของ Stepping Motor ไม่ได้กำหนดจุดทำงานและไม่ได้แสดงความสัมพันธ์ของ Transfer Function ซึ่งต่างไปจากกรณีของ DC Motor เส้นโค้งนี้ทำให้กำหนดง่ายขึ้น กล่าวคือ บริเวณที่อยู่ภายในกราฟเส้นโค้งของแรงบิด-ความเร็ว จะเป็นบริเวณที่มอเตอร์จะทำงานได้อย่างพอใจ ส่วนบริเวณที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ภายนอกจะเป็นบริเวณที่มอเตอร์ไม่สามารถทำงานได้เลย สำหรับสภาพการกระตุ้น และสภาพการควบคุมแบบหนึ่ง

รูปที่ 3.3 แสดงให้เห็น ชุดตัวอย่างของกราฟเส้นโค้งแรงบิด-ความเร็ว ของ Stepping Motor ภายใต้สภาพการควบคุมชนิดต่าง ๆ ดังนั้นเราจะเห็นได้ว่า Stepping Motor สามารถที่จะให้ลักษณะการทำงานที่อยู่ในระดับดีบ้างไม่ตีบ้าง ขึ้นอยู่กับ วิธีการขับเคลื่อนเป็นอย่างไร



รูปที่ 3.3 ชุดตัวอย่างของเส้นโค้งแรงบิด-ความเร็ว ของ Stepping Motor

ดังที่แสดงไว้ในรูป 3.3 Stepping Motor โดยทั่วไปแล้วให้แรงบิดสูงสุดที่ ตำแหน่งหยุด เมื่ออัตราของ Pulse ที่ป้อนเข้าเพิ่มขึ้น ความเหนียวนำของขดลวดจะป้องกันกระแสเฟส ที่สภาวะสม่ำเสมอของมัน เมื่อเฟสอยู่ในสภาวะปิดหรือเปิด และแรงบิดของมอเตอร์ลดลง Pull Out Torque ลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ความเร็วของมอเตอร์เพิ่มขึ้น เมื่อมอเตอร์ถูกขับเคลื่อนด้วยลำดับของ Pulse โดยไม่มีสัญญาณป้อนกลับ (การควบคุมแบบเปิด) การต่อ Viscous-Inertia Damper กับแกนมอเตอร์ โดยปกติแล้วจะช่วยให้ปรับปรุงคุณสมบัติของ แรงบิด-ความเร็ว การควบคุมแบบปิดยิ่งทำให้คุณสมบัติของแรงบิด-ความเร็ว ดียิ่งขึ้น

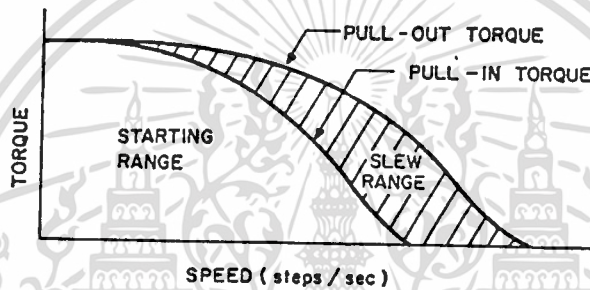
ข้อจำกัดของกราฟเส้นโค้ง แรงบิด-ความเร็ว คือ สมมติให้ความเร็วคงที่ สิ่งนี้ใกล้เคียงความเป็นจริง ที่ความเร็วของการ stepping หลาย ๆ ร้อย step ต่อ วินาที หรือมากกว่านั้น อัตราการ stepping ต่ำ เกิดขึ้นที่ตอนเริ่มต้นและตอนหยุด ในช่วงนี้ มอเตอร์ถูกเรียกว่า อยู่ใน Stepping Mode แม้แต่ที่ความเร็วสูง ความเร็วชั่วขณะที่แท้จริงจะไม่คงที่ แต่จะขึ้น ๆ ลง ๆ ไปที่ละ step

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวิธีการควบคุมแบบเปิด Stepping Motor ต้องทำงานที่แรงบิดต่ำกว่าแรงบิดสูงสุด ซึ่งต้องมั่นใจว่ามอเตอร์ไม่มีการหยุดอย่างกะทันหัน หรือพลาด Step ไป ในวิธีการควบคุมแบบปิด มอเตอร์สามารถที่จะทำงานใกล้เคียงหรือเท่ากับ Dynamic Torque สูงสุด

Pull-In Torque

ค่า Pull-In Torque ของ Stepping Motor คือ ค่าแรงบิดภาระเนื่องจากความเสียดทานที่มอเตอร์สามารถที่เริ่มการทำงาน และขับเคลื่อนได้ โดยไม่ผิด step ที่อัตราของ Pulse ที่ต้องการ



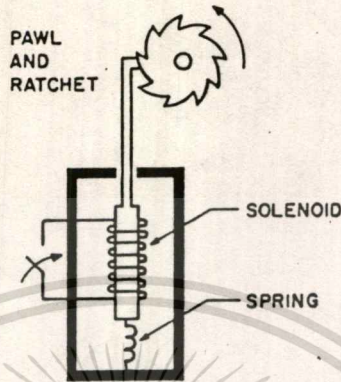
รูปที่ 3.4 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่าง Pull-In Torque และ Pull-Out Torque ของ Stepping Motor

จากรูปที่ 3.4 ขอบเขตความเร็วอยู่ระหว่างกราฟเส้นโค้ง Pull-In Torque และ Pull-Out Torque ซึ่งเรียกว่า "Slew Range" Slew Range แสดงถึงบริเวณของการทำงานที่ไม่เสถียรของมอเตอร์ ที่ได้ออกแบบเป็นอย่างดีแล้ว มอเตอร์จะออกจากการทำงาน และหยุดการทำงานใน Slew Range จะต้องอยู่ใกล้กับกราฟเส้นโค้ง Pull-In Torque หรือ Pull-Out Torque

Stepping Motor ชนิดโซลินอยด์ แรช แอท

(Solenoid Ratchet Type of Step Motor)

เป็นมอเตอร์ที่มีหลักการทำงานที่ง่ายที่สุด ประกอบด้วยโซลินอยด์ที่เป็นสปริงดึงกลับ เชื่อมต่อกับเพลลาโดยผ่านลิ้นสปริง (Pawl) และซี่เฟืองดังรูป 3.5 และ 3.6



รูปที่ 3.5 แผนผังของ Stepping Motor แบบโซลินอยด์ แรช-แอท



รูปที่ 3.6 ลักษณะของ Stepping Motor แบบโซลินอยด์ แรช-แอท

หลักการ คือ แต่ละครั้งที่โซลินอยด์ถูกกระตุ้น มันก็จะดึงลิ้นสปริงลงมาบนเพลลา เมื่อขดลวดไม่ถูกกระตุ้น สปริงดึงกลับจะหมุนเพลลาไปข้างหน้าหนึ่ง step รูป 3.5 ได้แสดงให้เห็นว่ามอเตอร์สามารถหมุนได้ทางเดียวเท่านั้น แต่มันก็สามารถที่จะหมุนสองทิศทางได้โดยใช้ลิ้นสปริงและซี่เฟือง 2 ชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีและข้อเสียของ Stepping Motor ชนิด โพลีนอยด์ แรชแอก คือ

ข้อดี คือ

1. มี Holding Torque สูง
2. ไม่มีการแกว่ง (Oscillations)
3. แรงบิดที่ได้ต่อราคามีค่าสูง
4. ราคาต่ำ
5. ไม่ต้องใช้กำลังจากภายนอกทำให้เกิด Holding Torque
6. ใช้กำลังเฉพาะขณะที่หมุนทีละ Step เท่านั้น

ข้อเสีย คือ

1. อัตราการหมุนช้า
2. อายุการใช้งานจำกัดเนื่องจากมีชิ้นส่วนที่เสียดหยาบมาก
3. หมุนได้ทิศทางเดียวหรือไม่เช่นนั้นก็หมุนได้สองทิศทางเท่านั้น
4. มีเสียงดังในขณะหมุน

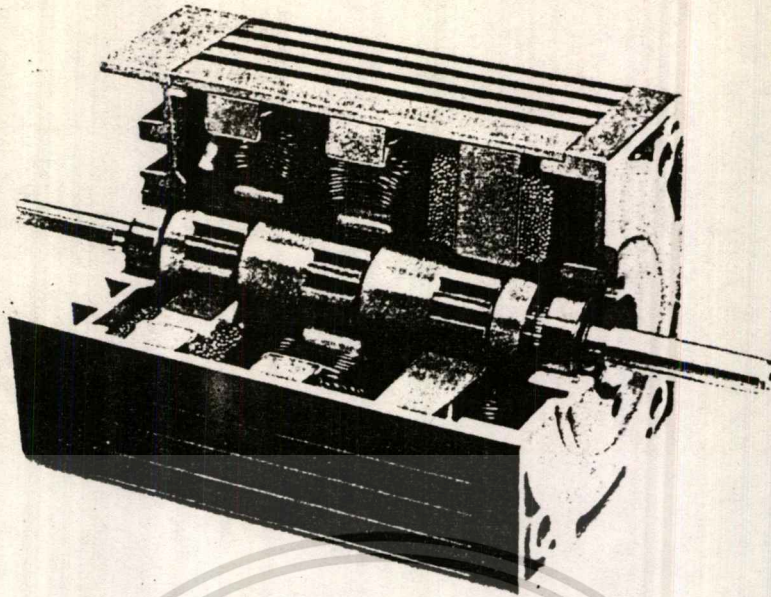
Stepping Motor ชนิดความเหนี่ยวนำแปรผันได้ (Variable Reluctance of Step Motor)

Stepping Motor ชนิดความเหนี่ยวนำแปรผันได้ เป็นชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม แบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ มอเตอร์ชนิดมีสเตเตอร์หลายกลุ่ม (Multiple-Stator-Stack) แสดงไว้ในรูป 3.7 และมอเตอร์ชนิดมีสเตเตอร์กลุ่มเดี่ยว (Single-Stator-Stack-Motor) ดังแสดงไว้ในรูป 3.8

Stepping Motor ชนิดสเตเตอร์หลายกลุ่ม

Stepping Motor ชนิดความเหนี่ยวนำแปรผันได้ ส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างเป็นแบบสเตเตอร์หลายกลุ่ม ซึ่งมักจะมีรูปแบบโครงสร้างแบบ 3 เฟส และ 4 เฟส ในปัจจุบันนี้ Stepping Motor ที่มีโครงสร้างแบบสเตเตอร์หลายกลุ่ม ได้รับความนิยมน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ Stepping Motor ที่มีโครงสร้างแบบสเตเตอร์กลุ่มเดี่ยว เนื่องจากราคาในการผลิตสูง

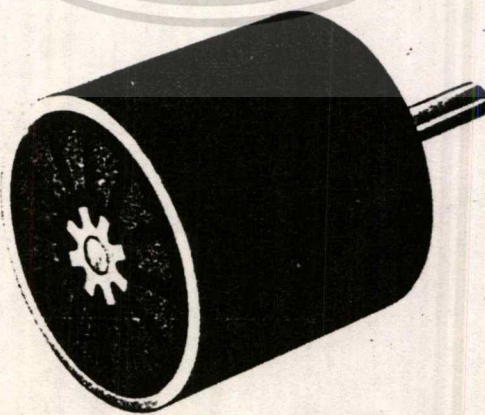
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 Stepping Motor แบบสเตเตอร์หลายกลุ่ม

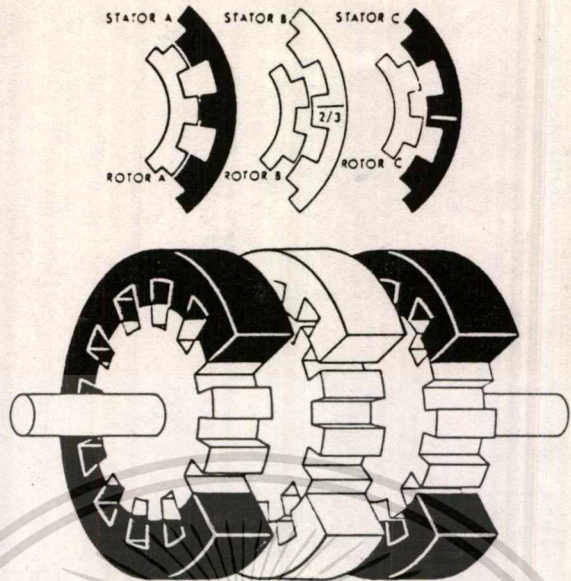
รูปที่ 3.7 เป็นรูปของมอเตอร์แบบสเตเตอร์หลายกลุ่ม 3 เฟส มีสเตเตอร์และโรเตอร์ 3 ชุด ที่มีความเป็นอิสระต่อกันทางไฟฟ้า ติดตั้งบนเพลลาเดียวกัน ชุดสเตเตอร์และโรเตอร์ แต่ละชุดมีจำนวนฟันและระยะห่างของฟันเท่ากัน สเตเตอร์ถูกยึดเข้าไว้ด้วยกันโดยวิธีทางกล แต่เป็นอิสระต่อกันในทางไฟฟ้าและแม่เหล็ก ส่วนโรเตอร์นั้นจะถูกยึดให้ติดแน่นกับเพลลา แต่จะเป็นอิสระต่อกันในทางแม่เหล็ก

เพื่อที่จะทำให้โรเตอร์หมุน สเตเตอร์หรือโรเตอร์จะต้องเหลื่อมกันในแนวรัศมีกับกลุ่มอื่น สำหรับมอเตอร์ 3 เฟสในรูปที่ 3.7 กลุ่มของสเตเตอร์นั้นเหลื่อมกัน 1 ใน 3 เท่าของระยะระหว่างฟัน ในขณะที่โรเตอร์ทั้งหมดอยู่ตรงกัน



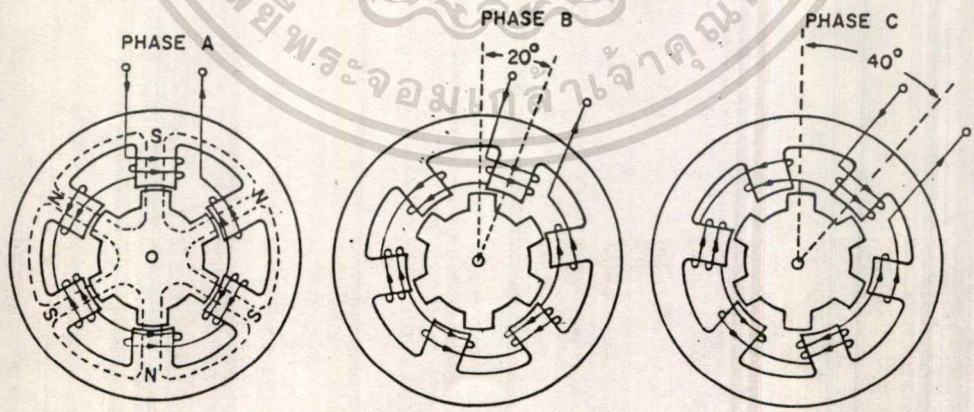
รูปที่ 3.8 Stepping Motor แบบสเตเตอร์กลุ่มเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แผนผังการจัดเรียงของฟันใน Stepping Motor แบบสเตเตอร์หลายกลุ่ม 3 เฟส

เพื่อความสะดวกในการอธิบาย รูปที่ 3.10 แสดงการจัดเรียงขดลวดและฟันของ Stepping Motor แบบสเตเตอร์หลายกลุ่ม 3 เฟส ที่แต่ละกลุ่มมี 6 ฟัน ฟันของโรเตอร์ตรงกันหมด แต่ฟันของสเตเตอร์เหลื่อมกัน 1 ใน 3 เท่าของระยะห่างระหว่างฟัน หรือ 20 องศา



รูปที่ 3.10 การจัดเรียงขดลวดและฟันของ Stepping Motor แบบสเตเตอร์หลายกลุ่ม 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

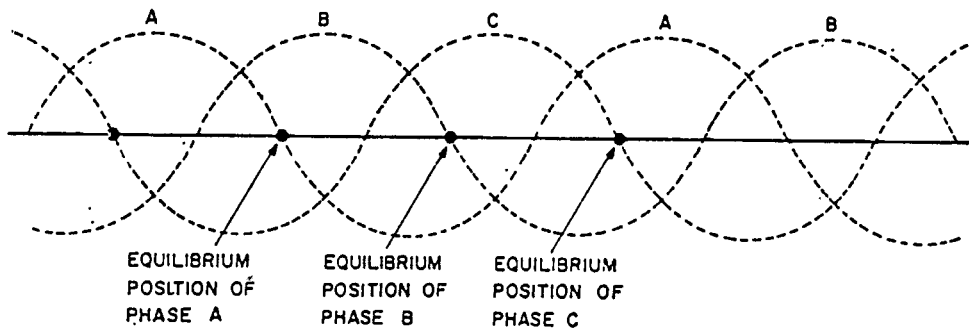
เมื่อขดลวดของเฟส A ถูกกระตุ้นด้วยไฟกระแสตรง ฟันโรเตอร์จะเข้าหาตำแหน่งที่มีความเหนี่ยวนำน้อยที่สุด และจัดให้อยู่ตรงกับสเตเตอร์ของเฟส A มีเส้นแรงแม่เหล็กแสดงไว้ในรูป 3.10 ตำแหน่งของโรเตอร์ภายใต้สภาวะนี้ สามารถที่จะหยุดได้ว่าอยู่ในตำแหน่งสมดุลที่เสถียร หรือตำแหน่งหนึ่งของเฟส A ถ้าให้แรงบิดภายนอกแก่เฟลาโรเตอร์ พร้อมกับกับเฟส A ถูกกระตุ้น ทำให้ฟันของโรเตอร์และสเตเตอร์ไม่ตรงกัน จะเกิดแรงบิดหักล้างเพื่อให้โรเตอร์กลับไปสู่ตำแหน่งสมดุลเสถียร นั่นก็คือ ค่า Holding Torque แปรไปตามความมากน้อยของการเอียงศูนย์ ระหว่างฟันของสเตเตอร์และฟันของโรเตอร์ของเฟสที่ถูกกระตุ้นอยู่ เมื่อให้แรงบิดภายนอกเพิ่มขึ้นการเอียงศูนย์ก็เพิ่มขึ้นอีกจนถึงค่า Holding Torque สูงสุด ถ้าการเอียงศูนย์เกินจุดนี้ค่า Holding Torque จะลดลงเข้าหาศูนย์ ซึ่งเป็นตำแหน่งสมดุลไม่เสถียร (Unstable Equilibrium Position)



รูปที่ 3.11 แสดงกราฟเส้นโค้งของตัวอย่าง Holding Torque เมื่อเฟส A ถูกกระตุ้น

โดยทั่วไปแล้วกราฟเส้นโค้งของ Holding Torque จะไม่เป็นรูปซ้ำ รูปร่างของมันขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น รูปร่างของฟัน ขนาดของช่องว่างอากาศ ระดับของการกระตุ้น เป็นต้น

เมื่อ 3 เฟสของมอเตอร์ถูกกระตุ้นแยกจากกัน ค่า Holding Torque จะมีรูปร่างเลื่อนออกจากอีกเฟสไป 1 ใน 3 เท่าของระยะห่างของฟันนั่นคือ ตำแหน่งหนึ่งของเฟส B อยู่ห่างออกไปจากเฟส A เป็น 1 ใน 3 เท่าของระยะห่างของฟัน ตำแหน่งหนึ่งของเฟส C อยู่ห่างจากเฟส A ไป 2 ใน 3 เท่าของระยะห่างของฟัน เมื่อมีการหมุนในทิศทางเดียวกัน ดังรูป 3.12



รูปที่ 3.12 กราฟเส้นโค้งของ Holding Torque

แต่ละเฟสของ Stepping Motor 3 เฟส

ในทางทฤษฎีแล้ว ทั้ง 3 เฟส ถูกกระตุ้นพร้อม ๆ กัน ค่า Holding Torque สุกติจะมีค่าเป็นศูนย์ ถ้าความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับตำแหน่งโรเตอร์เป็นแบบ Sine ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Step ที่ต้องการ N (จำนวน Step ต่อรอบ) คือ

$$N = Tn$$

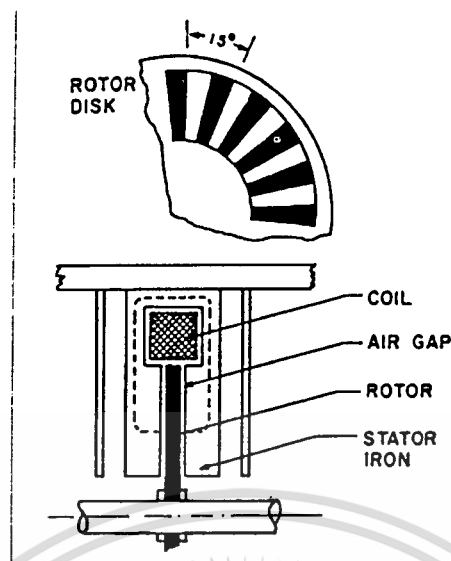
เมื่อ T = จำนวนฟันต่อเฟส
 n = จำนวนเฟส

มุมของ Step ที่มีหน่วยเป็นองศา ต่อ 1 Step หาได้จาก

$$R = 360 \setminus Tn \quad (\text{องศา/Step})$$

Stepping Motor ชนิดนี้สามารถที่จะทำให้มีคุณสมบัติสูงขึ้น และแรงบิดที่ได้สูงขึ้น โดยการให้ช่องอากาศที่อยู่ในแวนอน ทำให้เราสามารถที่จะเพิ่มจำนวนเฟสได้ กราฟเส้นโค้งแรงบิดของแต่ละเฟสจะเข้ามาใกล้ชิดกัน เมื่อเทียบกับตำแหน่งของโรเตอร์ มอเตอร์จะหมุนด้วยความนุ่มนวล โดยใช้แรงบิดสุกติที่ได้มาจากการตัดต่อกระตุ้นให้แก่เฟสต่าง ๆ รูปร่างของโรเตอร์จะเป็นแผ่นบาง (Disk) ดังรูป 3.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 แผนผังของสเตเตอร์และโรเตอร์ของเฟส ๗ หนึ่งในของ Stepping Motor ที่ใช้ช่องว่างอากาศในแนวนอน

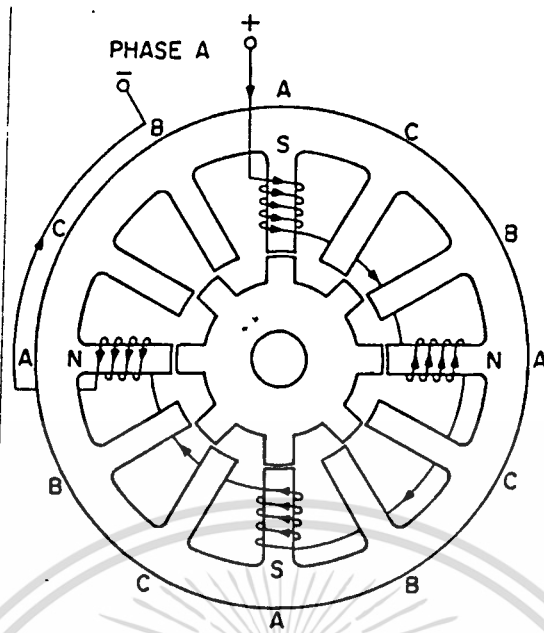
แม้ว่า Stepping Motor แบบสเตเตอร์หลายกลุ่มจะมีต้นทุนในการผลิตสูงมาก แต่มันสามารถที่จะทำงานด้วยความเร็วสูงถึง 30,000 รอบต่อนาที

Stepping Motor ความเหนียวนำแปรผันได้ แบบสเตเตอร์กลุ่มเดียว

เป็นมอเตอร์ที่มีขนาดกระทัดรัดและสร้างได้ง่าย Stepping Motor แบบสเตเตอร์กลุ่มเดียวมีกลุ่มฟันของสเตเตอร์และโรเตอร์กลุ่มเดียวที่ตรงศูนย์กลาง อย่างไรก็ตามจำนวนของสเตเตอร์และโรเตอร์จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องแตกต่างกัน

จากรูปที่ 3.14 สเตเตอร์มี 12 ฟัน ในขณะที่โรเตอร์มี 8 ฟัน มอเตอร์ถูกฟันในลักษณะ 4 เฟส มีการให้ไฟกระแสตรงให้กับเฟส A เท่านั้น ฟันของโรเตอร์และฟันของสเตเตอร์จะตรงกัน 4 ฟัน เมื่อเฟส B ถูกกระตุ้น เฟส A ออกจากกระตุ้น โรเตอร์หมุนไป 15 องศาตามเข็มนาฬิกา ฟันของโรเตอร์อีก 4 ฟันก็จะตรงศูนย์กลางกับฟันของสเตเตอร์ 4 ฟันของเฟส B เมื่อกระตุ้นเฟส C จะทำให้โรเตอร์หมุนในทิศทางเข็มนาฬิกาไป 15 องศา หลักการที่ใช้คือ การให้ฟันของโรเตอร์หาเส้นทางที่ความเหนียวต่ำที่สุดไปตามฟันของสเตเตอร์ของเฟสที่ถูกกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 แผนผังของ Stepping Motor ความเห็นยวนำแปรผันได้
แบบสเตเตอร์กลุ่มเดียว 3 เฟส

ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนฟันของโรเตอร์กับสเตเตอร์ คือ

$$N_s = N_r + p$$

- เมื่อ N_s = จำนวนฟันของสเตเตอร์
- N_r = จำนวนฟันของโรเตอร์
- p = จำนวนฟันของสเตเตอร์ต่อเฟส

มุมของ Step R มีหน่วยเป็นองศาต่อ step ได้มาจาก

$$R = 360/N$$

- เมื่อ N = จำนวนสเตปต่อรอบ
- และ $N = \left| \frac{N_r N_s}{(N_s - N_r)} \right|$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ N เป็นจำนวนของเฟส

$$N_p = pn$$

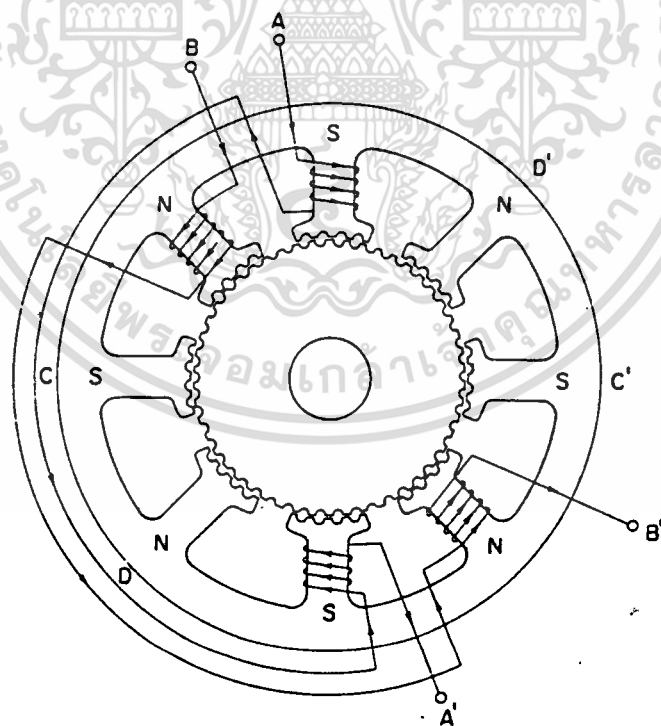
เพราะฉะนั้นเราจะได้

$$p = N/n(n-1) \quad \text{เมื่อ } N_p > N_r$$

$$p = N/n(n+1) \quad \text{เมื่อ } N_r > N_p$$

เมื่อ p จะต้องเป็นจำนวนเต็มบวก (Integer)

มอเตอร์ที่มีจำนวนฟันมาก เมื่อสร้างตามรูปที่ 3.14 จะสร้างได้ยาก ในการทำงานจริงจะใช้มอเตอร์ที่รูปร่างตามรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15.แผนผังของ Stepping Motor ความเห็นยวนำแปรผันได้
แบบสเตเตอร์กลุ่มเดียว 4 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.15 มอเตอร์ที่แสดงไว้นี้มี 1.8 องศา ต่อ Step หรือ 200 Step ต่อ รอบ จำนวนฟันของโรเตอร์ คือ 50 ฟัน จำนวนฟันของสเตเตอร์ คือ 40 ฟัน แต่ระยะห่างของฟันเป็นระยะห่างสำหรับ 48 ฟัน จำนวนฟันที่หายไปนั้นเกิดขึ้นจากความตั้งใจ ด้วยเหตุผลในการนำไปใช้งาน ฟันที่อยู่ตรงกลางของขั้วสเตเตอร์ของเฟส A และ B เยื้องศูนย์กลาง 1 ใน 8 เท่าของระยะห่างของฟันสเตเตอร์ เมื่อเทียบกับฟันของโรเตอร์ที่คร่อมมันอยู่ เช่นเดียวกัน เมื่อ 2 เฟสถูกกระตุ้นพร้อม ๆ กัน จะไม่มีฟันของสเตเตอร์ไปตรงกับฟันของโรเตอร์บนเฟสที่ถูกกระตุ้น (C และ D) ซึ่งเยื้องศูนย์กลางอย่างสมบูรณ์ เมื่อเทียบกับฟันของโรเตอร์ ในการทำให้มอเตอร์หมุนไปข้างหน้า เฟส A จะต้องไม่ถูกกระตุ้น เฟส C ถูกกระตุ้น ในขณะที่เฟส B ยังถูกกระตุ้นอยู่ไม่เปลี่ยนแปลง โรเตอร์ของมอเตอร์ในรูปที่ 3.15 จะหมุนไปในทิศทางเข็มนาฬิกา 1 ใน 4 เท่าของระยะห่างของฟันสเตเตอร์ ซึ่งคือ 1.8 องศา

จำนวนฟันของสเตเตอร์ N_s และจำนวนฟันของโรเตอร์ N_r สัมพันธ์กันดังสมการนี้

$$N_r = kN_s + \alpha$$

เมื่อ k = จำนวนเต็มบวก
และ α = จำนวนขั้วต่อเฟส

ข้อดีและข้อเสียของ Stepping Motor ความเห็นส่วนตัว

มอเตอร์ 3 เฟส

ข้อดี คือ

1. ประสิทธิภาพสูงกว่ามอเตอร์ 4 เฟส
2. ใช้สายไฟน้อยกว่า
3. ใช้อิเล็กทรอนิกส์ควบคุมได้ง่ายกว่า เพราะมีจำนวนเฟสที่จะเปลี่ยนน้อยกว่า
4. แรงบิดสูงกว่ามอเตอร์ 4 เฟส ที่ขนาดเท่า ๆ กัน

ข้อเสีย คือ

1. การที่จะหวังความเร็วทำได้ยากกว่า
2. การตอบสนองมีการแกว่งมากกว่า
3. ให้แรงบิดที่เกือบเท่ากัน ไม่ว่าจะใช้การกระตุ้นแบบเฟสเดียวหรือสองเฟสติดกัน

มอเตอร์ 4 เฟส

ข้อดี คือ

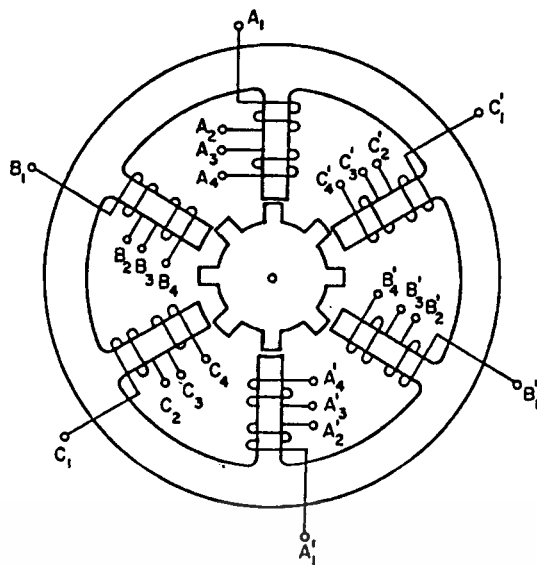
1. มีการหวังความเร็วที่ดีกว่า
2. การตอบสนองมีการแกว่งน้อยกว่า
3. มีความเฉื่อยของโรเตอร์น้อยกว่า เนื่องจากฟันของโรเตอร์น้อยกว่า
4. ได้แรงบิดได้ในขอบเขตระยะขจัดของโรเตอร์ที่กว้างกว่า
5. ได้แรงบิดที่สูงกว่า เมื่อใช้การกระตุ้นแบบ 2 เฟส

ข้อเสีย คือ

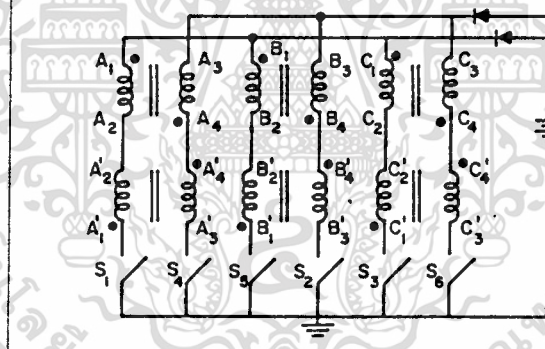
1. ประสิทธิภาพต่ำกว่า
2. มีสายไฟที่จะนำมาต่อมากกว่า
3. ใช้การควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์มากกว่า

Stepping Motor ความเห็นวนำแปรผันได้ที่ใช้กับการพันแบบไบฟีลาร์
(Bifilar Windings)

Stepping Motor ความเห็นวนำแปรผันได้ ที่ได้อธิบายมาแล้วทั้งหมดมีขดลวด
เดียวบนแต่ละขั้ว การพันแบบไบฟีลาร์ คือ พันขดลวด 2 ขด ที่มีความเป็นแม่เหล็กตรง
กันข้ามกันบนขั้วเดียวกัน การกระทำเช่นนี้ทำให้ได้แรงบิดมากขึ้นและการหวังความเร็วดี
ขึ้น แต่มีข้อเสียคือ ใช้สายไฟต่อเข้ากับมอเตอร์มากขึ้น ใช้ทรานซิสเตอร์ในวงจรควบคุม
มากขึ้น



รูปที่ 3.16 Stepping Motor ความเหนียวนำแปดฟันได้ แบบสเตเตอร์
กลุ่มเดียว 3 เฟส และใช้การพันแบบไบพอลาร์

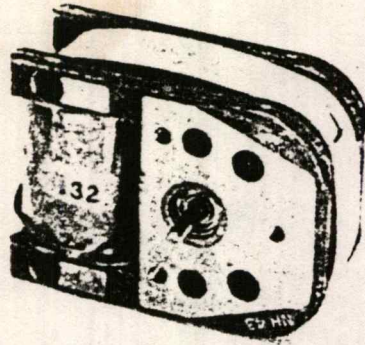


รูปที่ 3.17 วิธีการหนึ่งในการต่อขดลวดไบพอลาร์ใน
Stepping Motor ความเหนียวนำแปดฟันได้

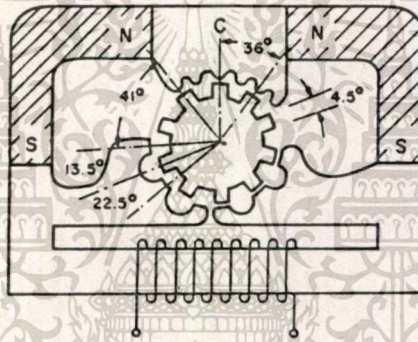
Stepping Motor ชนิดแม่เหล็กถาวร

แม่เหล็กถาวรได้ถูกนำมาใช้ใน Stepping Motor สำหรับจุดมุ่งหมายต่าง ๆ โดยทั่วไปแล้ว แม่เหล็กถาวรจะถูกติดตั้งไว้ทั้งสเตเตอร์และโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 Stepping Motor แบบสเตเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร



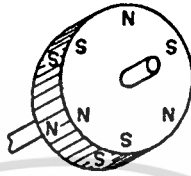
รูปที่ 3.19 แผนผังของ Stepping Motor แบบสเตเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร

รูปที่ 3.19 แสดงมอเตอร์ที่มีโรเตอร์ 10 ฟัน ดังนั้นระยะห่างของฟัน คือ 36 องศา สเตเตอร์มีฟัน 3 กลุ่ม กลุ่ม A และ B มีระยะห่างของฟัน 36 องศา ฟันบน 2 กลุ่มนี้ ถูกจัดด้วยเหมือนกัน เมื่อกลุ่มหนึ่งตรงศูนย์กลางกับฟันโรเตอร์ อีกกลุ่มหนึ่งจะเยื้องศูนย์กลางสมบูรณ์ ฟันบนสเตเตอร์ C มีระยะห่างของฟัน 18 องศา ตำแหน่งสัมพันธ์ของฟันโรเตอร์และสเตเตอร์ทั้งหมดแสดงไว้ในรูป 3.19

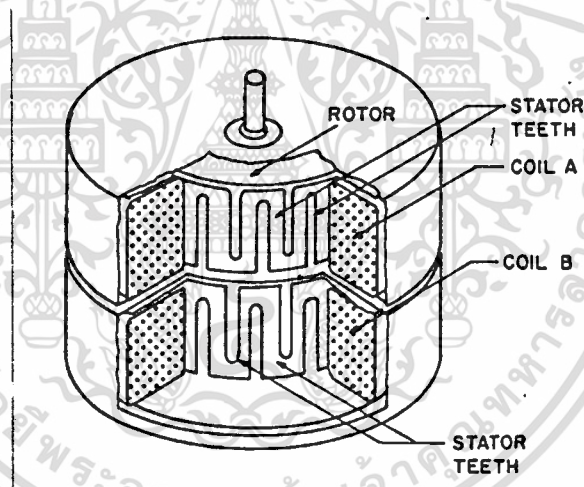
Stepping Motor นี้มีข้อดีคือ ค่า Holding Torque สูง นอกจากนี้โครงสร้างยังง่าย ข้อเสียคือ มอเตอร์สามารถหมุนไปในทิศทางเดียวเท่านั้น และความเร็วสูงสุดของมอเตอร์ไม่สูงมาก

มอเตอร์แบบโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร

เป็นมอเตอร์ที่ลักษณะโครงสร้างง่ายไม่ซับซ้อน มีโรเตอร์ที่เป็นแม่เหล็กในแนวรัศมี รูปที่ 3.20 แสดงโรเตอร์ที่เป็นแม่เหล็ก มี 6 ขั้วตามเส้นรอบวง มีสเตเตอร์ 2 หรือ 4 ส่วน แต่ละส่วนมีขดลวดไบพอลาร์ รูปที่ 3.21 แสดงรูปตัดของมอเตอร์แบบโรเตอร์แม่เหล็กถาวรมีสเตเตอร์ 2 ตัว เมื่อแต่ละสเตเตอร์มีขดลวดไบพอลาร์ 1 ชุด ดังนั้นมอเตอร์ที่มี 2 สเตเตอร์ ก็คือ มอเตอร์ที่มี 4 เฟส



รูปที่ 3.20 แสดงโรเตอร์ของ Stepping Motor
แบบโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร

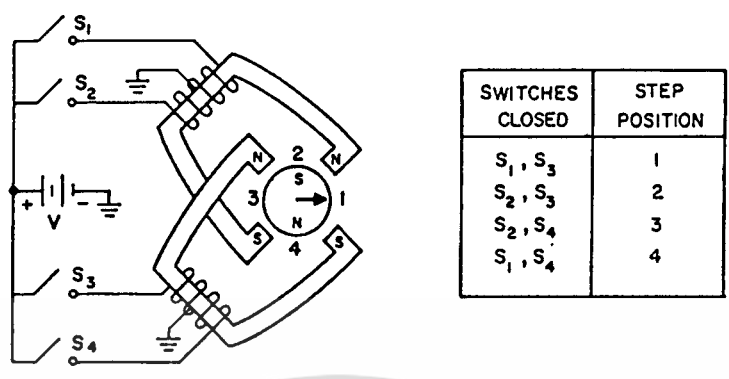


รูปที่ 3.21 รูปตัดของมอเตอร์แบบโรเตอร์แม่เหล็กถาวร มี 2 สเตเตอร์

วิธีการขับเคลื่อนที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.22 เป็นการขับเคลื่อนแบบขั้วเดียว (Unipolar Drive) เพราะว่าการแสไฟฟ้าที่ป้อนมีเพียงขั้วเดียว ซึ่งใช้ได้กับขดลวดไบพอลาร์ในมอเตอร์ อีกนัยหนึ่งขดลวดไบพอลาร์ของมอเตอร์ไม่ได้ต่อกันภายใน ดังนั้นมอเตอร์ที่ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.21 จะมีขดลวด 8 เส้นพันอยู่ ดังนั้นวิธีอีกหนึ่งของการขับเคลื่อนมอเตอร์ ก็คือ ต่อขดลวดไบพอลาร์ในแต่ละสเตเตอร์ขนานกัน ดังนั้นใช้สวิตช์ 2 ตัวเท่านั้น วิธีนี้เรียกว่า " วิธีการขับเคลื่อนแบบไบพอลาร์ (Bifilar Drive) "

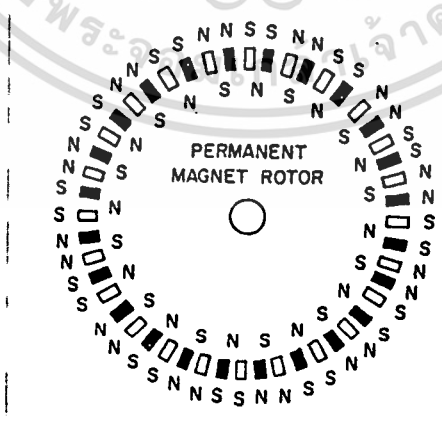
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟฟ้าป้อนให้กับขดลวดต้องมีขั้วบวกและลบ สเตเตอร์เฟสสามารรถที่จะถูกพันด้วยขดลวดเส้นเดียวสำหรับการขับเคลื่อนแบบไบฟิลาาร์



รูปที่ 3.22 แสดงแผนผังของ Stepping Motor แบบโรเตอร์แม่เหล็กถาวรแบบง่าย

รูปที่ 3.23 แสดงแผนผังของมอเตอร์ที่มี 24 ขั้ว บนโรเตอร์แม่เหล็กถาวร และสเตเตอร์ 2 ส่วน แต่ละส่วนของสเตเตอร์มี 24 ฟัน ที่แบ่งเท่า ๆ กันรอบ ๆ เส้นรอบวงของสเตเตอร์ ฟันระหว่างสเตเตอร์ทั้งสอง ถูกแยกออกจากกันด้วยระยะทางที่เท่ากับครึ่งหนึ่งของระยะทางระหว่างฟันของสเตเตอร์แต่ละตัว และ ในรูปที่ 3.23 ฟันของสเตเตอร์ส่วนหนึ่งถูกให้เป็นแถบสีขาว และฟันของสเตเตอร์อีกส่วนหนึ่งให้เป็นแถบสีดำ



รูปที่ 3.23 แผนผังของ Stepping Motor แบบโรเตอร์แม่เหล็กถาวร มี 24 ขั้ว และสเตเตอร์ 2 ส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไป มุมของ Step หามาจาก

$$R = 360/N \quad \text{องศา}$$

เมื่อ N เป็นจำนวนทั้งหมดของฟันบนส่วนของสเตเตอร์ หรือ

$$R = 360/2PQ \quad \text{องศา}$$

เมื่อ P = จำนวนของคู่ขั้วของโรเตอร์

Q = จำนวนของส่วนของสเตเตอร์

ข้อดีและข้อเสียของ Stepping Motor แบบโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร

ข้อดี คือ

1. ให้ค่า Holding Torque พร้อมกับขดลวดที่ออกจากการกระตุ้น
2. อัตราส่วนค่า Holding Torque ต่อขนาดสูง
3. ใช้กำลังน้อยในการทำงาน
4. มีโครงสร้างง่าย
5. การหน่วงความเร็วดี
6. ราคาต่ำ

ข้อเสีย คือ

1. อัตราส่วนแรงบิดต่อความเฉื่อยของโรเตอร์ต่ำ
2. ความเข้มสนามแม่เหล็กอาจเปลี่ยนแปลงได้
3. ค่า Back emf สูง และความเร็วสูงสุดต่ำ
4. ไม่เหมาะสำหรับมุมของ Step น้อย ๆ

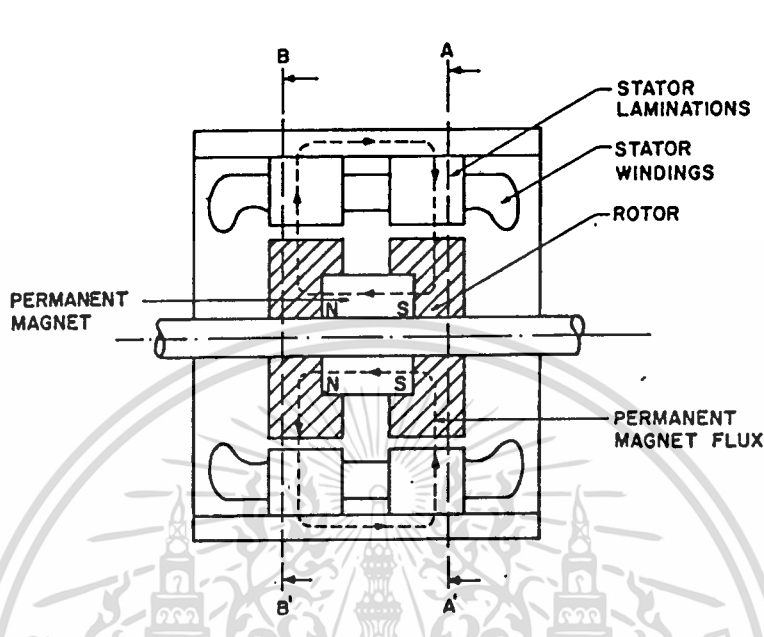
Stepping Motor ชนิดไฮบริดจ์ (Hybrid Step Motor)

เป็นมอเตอร์ที่ทำงานภายใต้หลักการร่วมกันของแม่เหล็กถาวรกับความเหนี่ยวนำแปรผันได้ ถูกออกแบบให้เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 2 เฟสกระตุ้นพร้อมกันสำหรับงานที่ใช้ความเร็วต่ำ และยังสามารถใช้ในการหมุนเป็น Step ถ้าขดลวดเฟสถูกกระตุ้นด้วย

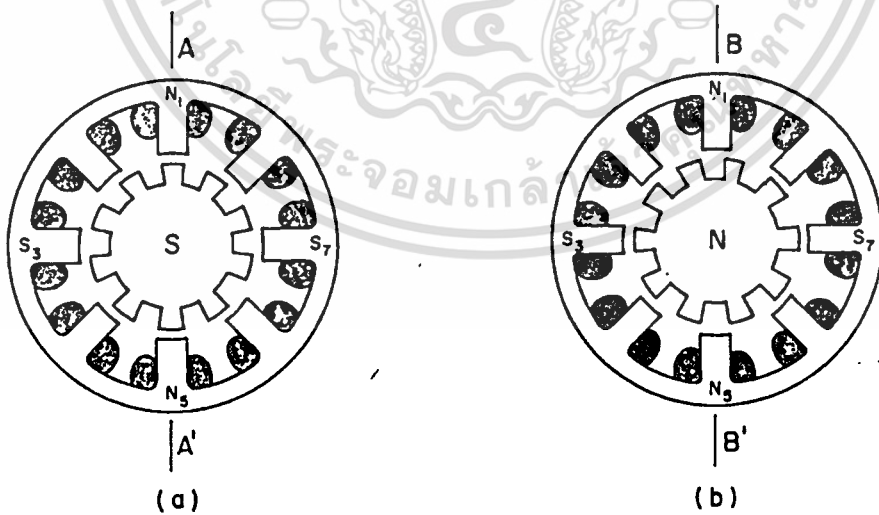
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pulse ไฟฟ้ากระแสตรง

หลักการของการทำงานและโครงสร้างของ Stepping Motor ชนิดไฮบริดจ์ มีแผนผังในรูปที่ 3.24 และ 3.25



รูปที่ 3.24 รูปตามแกนของ Stepping Motor ชนิดไฮบริดจ์



รูปที่ 3.25 รูปตัดของ Stepping Motor ชนิดไฮบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.24 โรเตอร์มีแม่เหล็กถาวรตามแนวแกนที่จะสร้างสนามแม่เหล็กทิศทางเดียว โรเตอร์ประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนหนึ่งถูกทำให้เป็นแม่เหล็กขั้วใต้ และอีกส่วนหนึ่งเป็นขั้วเหนือ ฟันบนแต่ละส่วนของโรเตอร์ถูกแบ่งเท่า ๆ กัน แต่ฟันบน 2 ส่วนเอียงศูนย์กลางกันเทียบกันเองแล้ว มีระยะเท่ากับ 1 ใน 2 เท่าของระยะห่างของฟันบนโรเตอร์ และรูปที่ 3.25 แสดงสเตเตอร์ซึ่งมี 8 ขั้ว โดยทั่วไปแล้วระยะห่างของฟันสเตเตอร์จะต่างกับระยะห่างของฟันโรเตอร์ สเตเตอร์สามารถที่จะพันแบบไบโพลาร์หรือขดลวดเดียวก็ได้

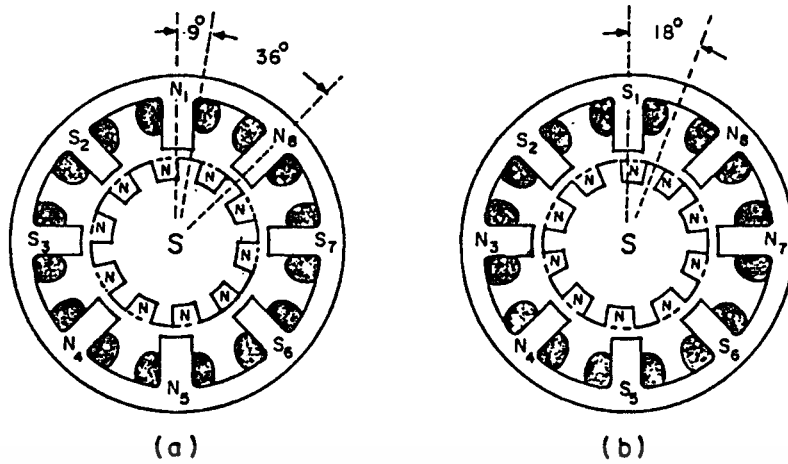
ลักษณะพิเศษของมอเตอร์ชนิดไฮบริดจ์ แสดงไว้ในรูปที่ 3.25 ฟันบนโรเตอร์ที่อยู่ตรงกันข้ามกันเพียง 2 ฟัน ที่ ตรงศูนย์กลางกันอย่างสมบูรณ์กับฟันของสเตเตอร์ที่ห่างกัน 180 องศา ในขณะที่เดียวกัน ฟันของโรเตอร์และสเตเตอร์ที่มุม 90 องศา ห่างจากฟันที่ตรงศูนย์กลางกันจะเอียงศูนย์กลางกันอย่างสมบูรณ์

รูปที่ 3.25(a) แสดงให้เห็นว่า เมื่อ 2 เฟสถูกกระตุ้น 4 ขั้วที่อยู่สลับกัน ถูกกระตุ้นให้เป็นขั้ว โรเตอร์อยู่ที่ตำแหน่งหนึ่ง เมื่อการกระตุ้นย้ายจากเฟสหนึ่งไปยังอีกเฟสหนึ่ง โรเตอร์จะหมุนตามเข็มหรือทวนเข็มนาฬิกาไป 9 องศา ทิศทางของการหมุนขึ้นอยู่กับขั้วแม่เหล็กในกรณีนี้จะสามารถหามุมของ step ได้จาก

$$\begin{aligned} N &= \left| \frac{N_r N_s}{N_r - N_s} \right| \\ &= \left| \frac{8 * 10}{8 - 10} \right| \\ &= 40 \text{ Step ต่อ รอบ.} \end{aligned}$$

ดังนั้น มุมของ step คือ 9 องศา

รูปที่ 3.26(a) และ 3.26(b) แสดงวิธีการควบคุมแบบ 2 เฟสติดของสเตเตอร์เดียวกัน โรเตอร์ 2 ส่วน ถูกเชื่อมกันด้วยส่วน BB' เช่นเดียวกับ ด้านหลังของส่วน AA' ให้ขั้ว N_1, S_2, N_3 และ S_4 เป็นของเฟส ๆ หนึ่ง ในขณะที่ S_2, N_3, S_4 และ N_1 เป็นของอีกเฟสหนึ่ง รูปที่ 3.26(b) แสดงให้เห็นว่า ขั้ว N_1, S_2, N_3 และ S_4 ถูกกลับขั้วโดยผ่านการเปลี่ยนเฟส โรเตอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาไป 9 องศา

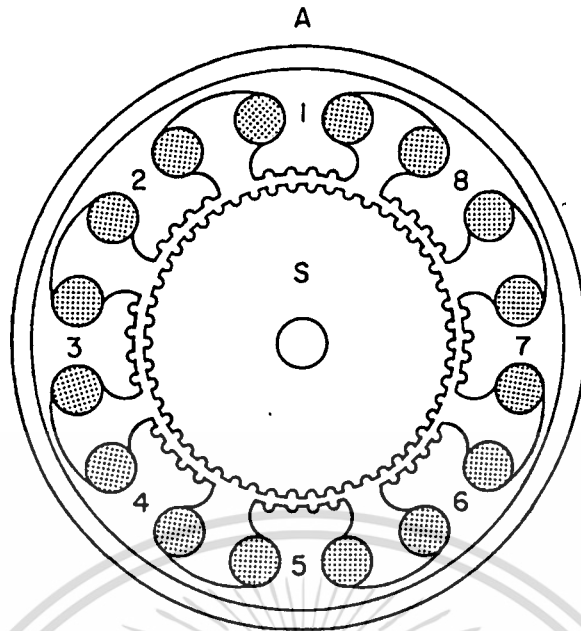


รูปที่ 3.26 ตำแหน่งโรเตอร์ของวิธีควบคุมแบบ 2 เฟสติดของ
Stepping Motor ชนิดไฮบริดจ์

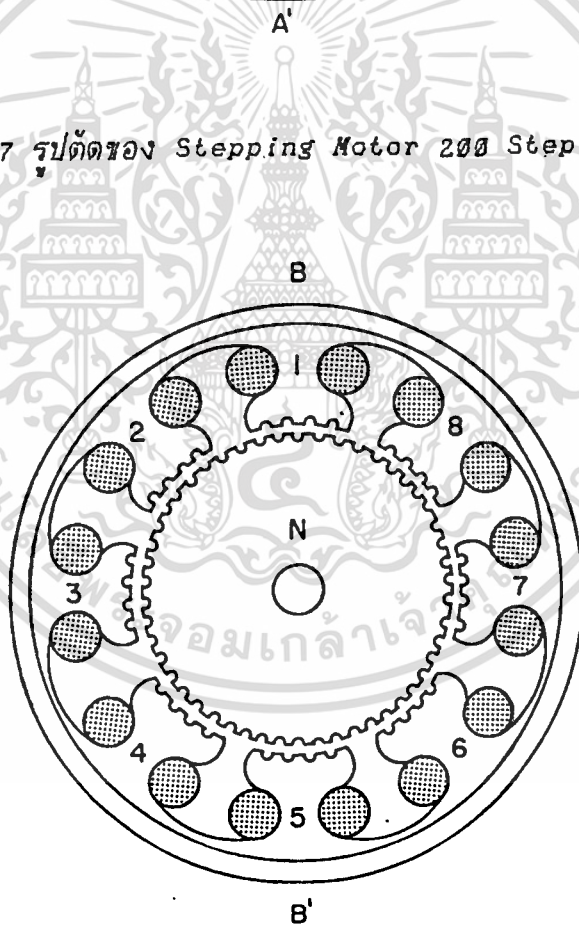
การเปลี่ยนเฟสสามารถที่จะใช้การนับเคลื่อนแบบนิ้วเดียวกับขดลวดไบฟีลาร์ หรือ การนับเคลื่อนแบบไบฟีลาร์กับขดลวดเดี่ยวก็ได้

รูปที่ 3.27 และ 3.28 แสดงรูปตัดของ Stepping Motor 200 Step ซึ่งมีฟันของสเตเตอร์ 48 ฟัน และฟันของโรเตอร์ 50 ฟัน ในรูปที่ 3.27 ฟันหนึ่งของโรเตอร์ ตรงศูนย์กลางกับฟันกลางของส่วนที่ยื่นออกมาของขั้ว 1 เช่นเดียวกับส่วนที่ยื่นออกมาของขั้ว 5 ฟันกลางของขั้ว 3 และ 7 เป็น 1 ใน 2 ของระยะห่างของฟันโรเตอร์ที่ห่างจาก ฟันของโรเตอร์ที่ใกล้ที่สุด มีค่าความเหินยวนำสูงสุด

รูปที่ 3.28 ฟันกลางของขั้ว 3 และ 7 ตรงศูนย์กลางกัน และฟันกลางของขั้ว 1 และ 5 อยู่ที่ตำแหน่งความเหินยวนำสูงสุดเทียบกับฟันของโรเตอร์



รูปที่ 3.27 รูปตัดของ Stepping Motor 200 Step ต่อ รอบ



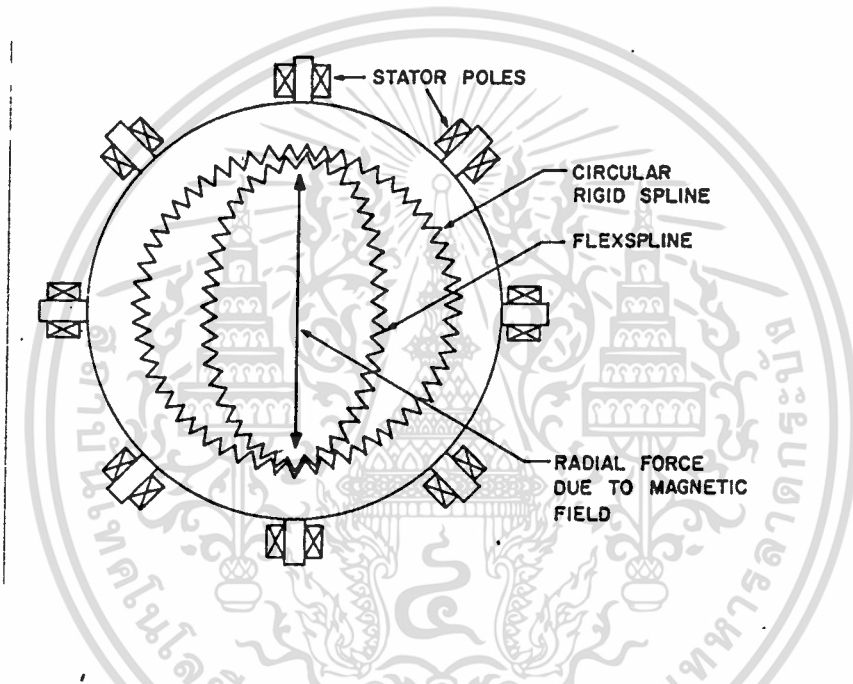
รูปที่ 3.28 รูปตัดของ Stepping Motor 200 Step ต่อ รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Stepping Motor ชนิดเครื่องกลไฟฟ้า

เป็นมอเตอร์ที่ใช้เฟืองประสิทธิภาพสูงมีระยะห่างของฟันต่าง ๆ กัน และสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่เป็นวงกลม หรือ โพลีนอยด์ เพื่อที่จะให้แรงบิดมาก ๆ ออกมา และมุมของ Step น้อย แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทที่เป็นที่รู้จักกันดี คือ

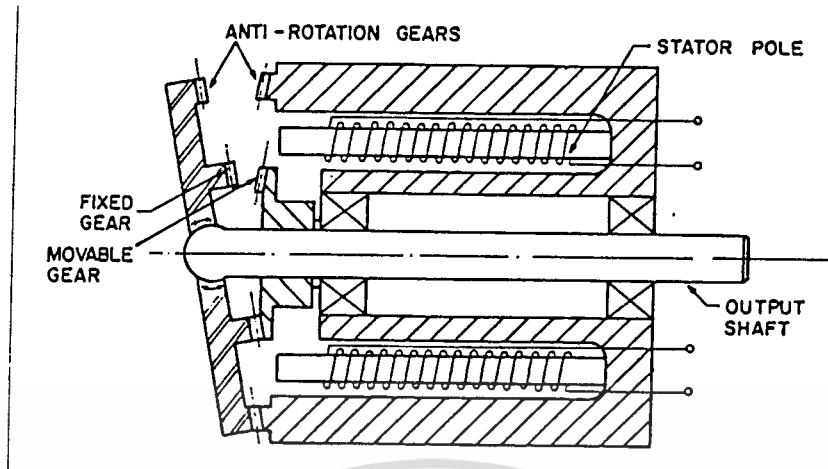
แบบแรกคือ Responsyn Step Motor มีหลักการทำงานและโครงสร้างแสดงไว้ในรูปที่ 3.29 โดยพื้นฐานแล้ว มอเตอร์นี้ใช้หลักการการขับเคลื่อนแบบอาร์โมนิค โดยการเปลี่ยนเครื่องกำเนิดคลื่นเป็นสเตเตอร์ที่ฟันด้วยลวดทองแดง สเตเตอร์นี้ถูกกระตุ้นเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่เป็นวงกลม ซึ่งมีหน้าที่เช่นเดียวกับเครื่องกำเนิดคลื่น



รูปที่ 3.29 แผนผังของ Stepping Motor ชนิด Responsyn

เมื่อขนาดของฟันสามารถที่จะทำให้เล็กมาก ๆ ได้ ขนาด Step ของมอเตอร์สามารถทำให้มีขนาดเล็กมาก ๆ มุมของ Step ของ Responsyn Step Motor อยู่ในขอบเขต 480 ถึง 2000 Step ต่อรอบ

ส่วนอีกแบบหนึ่งนั้น แสดงไว้ในรูปที่ 3.30 ซึ่งใช้เฟือง 2 ตัวขบกันด้วยจำนวนฟันที่แตกต่างกัน มอเตอร์มีขดลวดที่พันตามแนวแกนซึ่งสามารถที่จะกระตุ้นเป็นลำดับก่อนหลังเพื่อผลิตสนามแม่เหล็กที่หมุนเป็นวงกลมได้



รูปที่ 3.30 ชิ้นส่วนพื้นฐานของ Stepping Motor ชนิดเครื่องกลไฟฟ้า

ข้อดีและข้อเสียของสเตปป์ชนิดเครื่องกลไฟฟ้า

ข้อดี คือ

1. อัตราส่วนแรงบิดต่อความเฉื่อยสูง
2. ใช้กับภาระที่มีความเฉื่อยสูงได้ดี
3. มีอัตราของ Step ในหน่วย Step ต่อวินาที สูง
4. มีการหมุนที่ได้จังหวะภายใต้สภาพการทำงานปกติ
5. มีการสั่นน้อยและการหน่วงความเร็วดี
6. มุมของ Step น้อยมาก
7. หมุนได้ 2 ทิศทาง

ข้อเสีย คือ

1. ความเร็วที่ได้ขึ้นอยู่กับมุมของ Step น้อย
2. การชนกันของเฟืองทำให้เกิดการเสียหายกับอุปกรณ์
3. ต้องการการหล่อลื่นเป็นระยะ ๆ

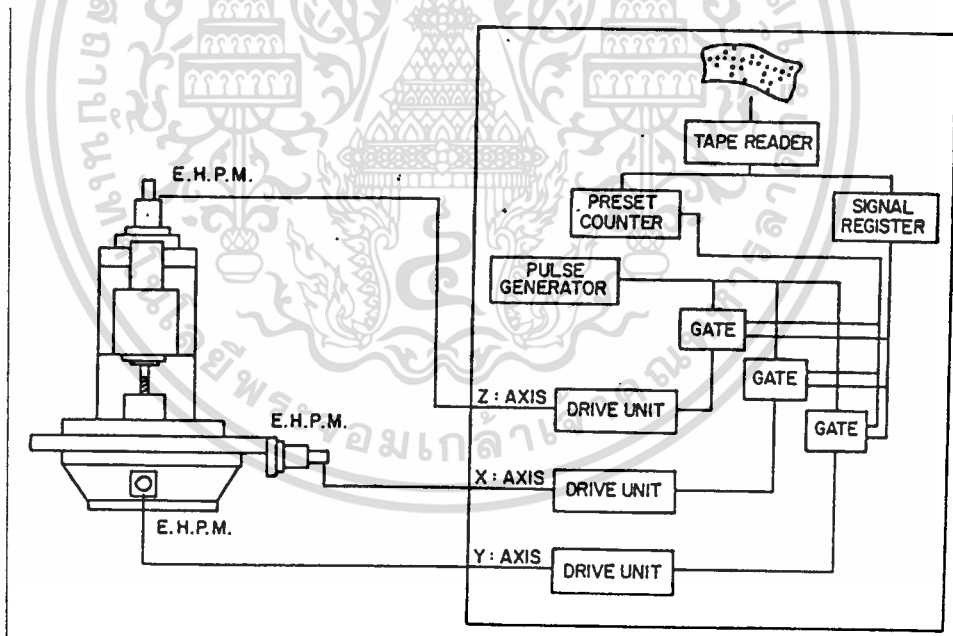
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Stepping Motor แบบไฮดรอลิกส์ไฟฟ้า (Electrohydraulic Step Motor)

ในความพยายามที่จะเพิ่มกำลังของ Stepping Motor โดยวิธีการทางกลหรือทางไฟฟ้า (Electromechanical) อย่างไรก็ตามวิธีที่ใช้เพิ่มกำลังที่ได้ผลดีมากในปัจจุบันก็คือ มอเตอร์ไฮดรอลิกส์

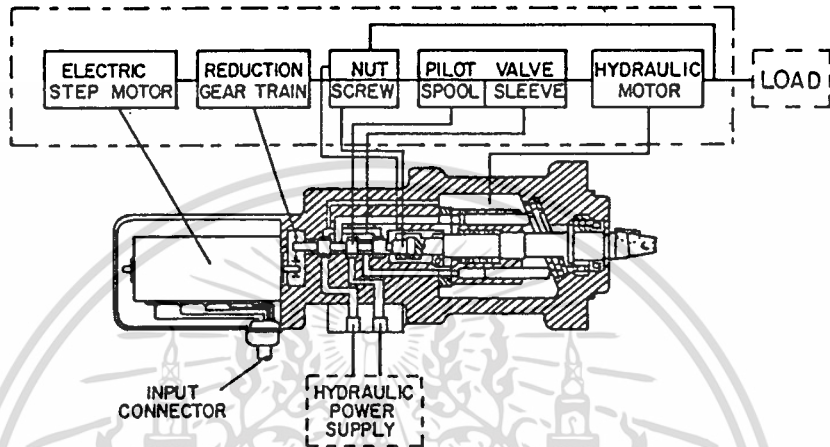
Stepping Motor แบบไฮดรอลิกส์ไฟฟ้า เป็นระบบควบคุมการเคลื่อนที่ ซึ่งประกอบด้วย Stepping Motor ที่มีความเที่ยงตรงและอุปกรณ์เพิ่มแรงบิด โดยใช้วิธีการทางไฮดรอลิกส์ Stepping Motor ชนิดนี้ได้ถูกนำไปใช้ในงานที่ใช้กำลังสูง เช่น งานขนส่งวัสดุ งานเชื่อม เป็นต้น

รูปที่ 3.31 แสดงแผนภาพของเครื่องเจาะ NC ซึ่งใช้ Stepping Motor แบบไฮดรอลิกส์ไฟฟ้าทั้ง 3 แกน ระบบนี้ถูกออกแบบสำหรับการควบคุมของโต๊ะและหัวเจาะ ที่รวดเร็วและแม่นยำ โดยทั่วไปแล้วจะมีจำนวน Step ที่ต้องการเป็น 200 , 240 หรือ 250 Step ต่อรอบ ให้กำลังออกมาได้สูงถึง 20 กำลังม้า



รูปที่ 3.31

Stepping Motor แบบไฮดรอลิกส์ไฟฟ้าประกอบด้วย 3 ส่วนพื้นฐาน คือ Stepping Motor เซอโววาล์ว และมอเตอร์ไฮดรอลิกส์ ทั้ง 3 ส่วนนี้ทำงานอิสระต่อกัน เมื่อนำมารวมกัน มอเตอร์ไฮดรอลิกส์ใช้ในการทำให้ Stepping Motor มีความแม่นยำ แต่ได้แรงบิดออกมาเป็นหลายร้อยเท่าของ Stepping Motor



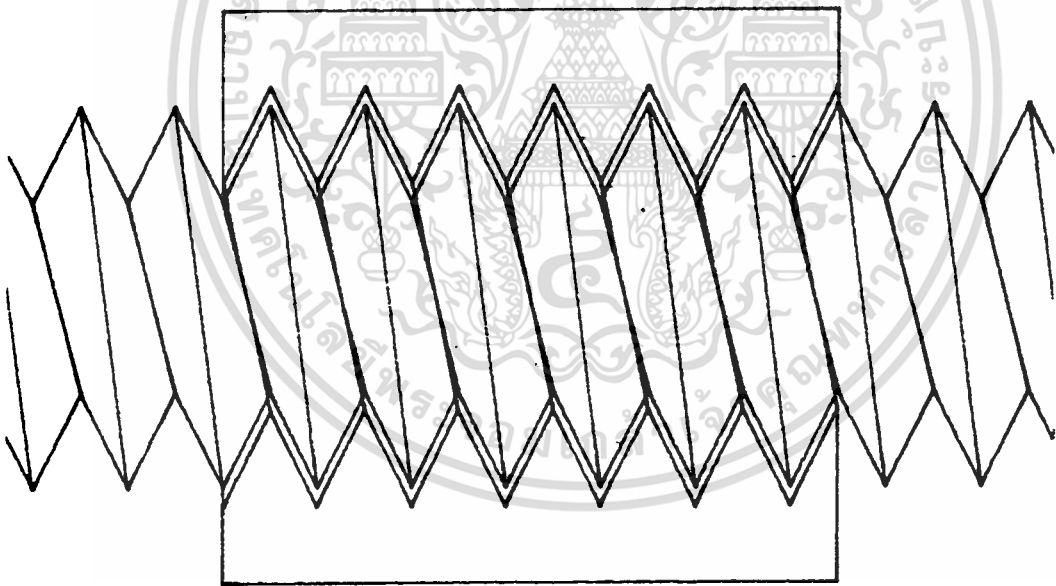
รูปที่ 3.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Backlash คืออะไร

Backlash ในความหมายของเฟืองตรง คือ ผลต่างระหว่างความกว้างของช่องว่างระหว่างฟันเฟืองหนึ่งกับความกว้างของฟันเฟืองอีกอันหนึ่งที่ขบกัน โดยวัดตามแนวเส้นวงกลมพิตซ์ ฉะนั้นในการขับเคลื่อนเฟืองที่มี Backlash เฟืองขับจะสามารถหมุนไปได้เป็นมุมเล็กน้อยก่อนที่เฟืองตามจะหมุนไป Backlash จำเป็นต้องมีอยู่เสมอ ทั้งนี้เพื่อให้มีช่องว่างสำหรับน้ำมันหล่อลื่น และเพื่อให้เฟืองสามารถขยายตัวได้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ตลอดจนมีเผื่อเอาไว้สำหรับความผิดพลาดในการตัดรูปร่างของฟันเฟือง

Backlash ในความหมายของสกรูส่งกำลัง คือ ผลต่างระหว่างหน้าสัมผัสเกลียวในของนัทกับหน้าสัมผัสเกลียวนอกของสกรูส่งกำลัง ซึ่ง Backlash จำเป็นต้องมีเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายต่อเกลียว

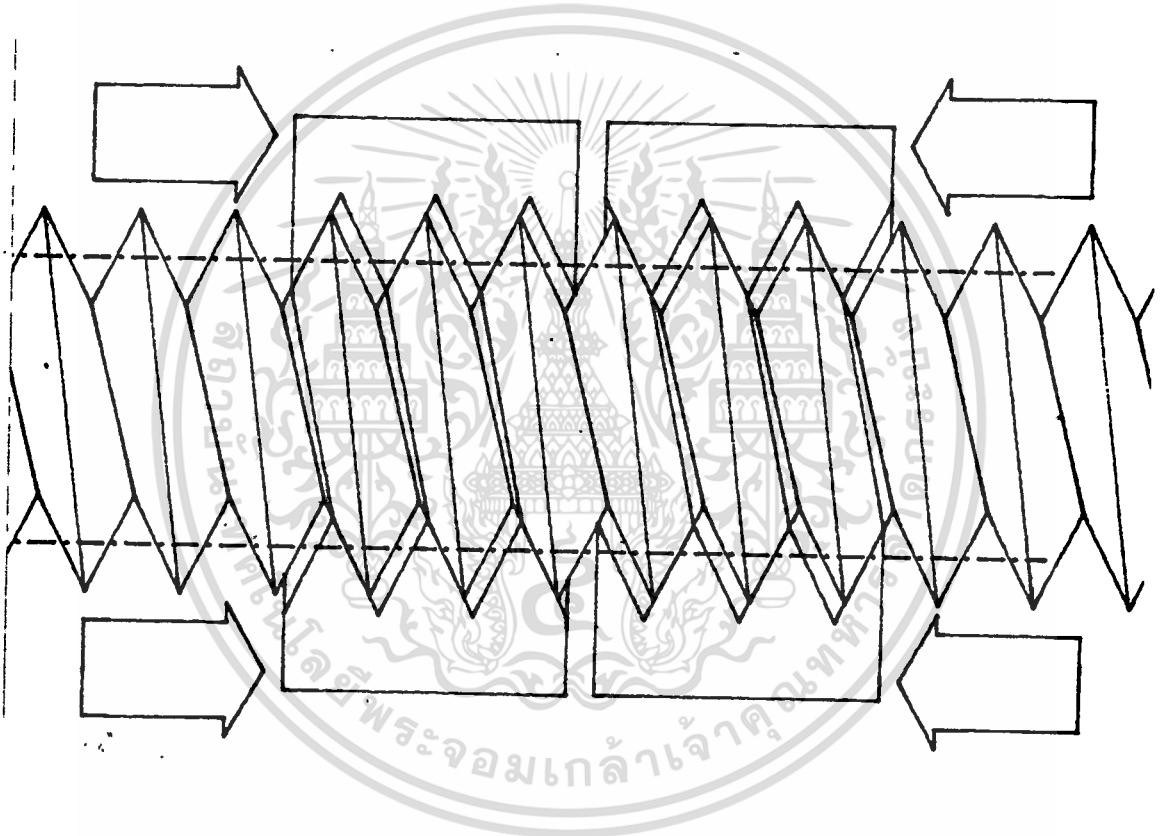


รูปที่ 3.33 แสดงการเกิด Backlash ในสกรูส่งกำลัง

Backlash มีความสำคัญต่อการส่งกำลังเนื่องจากมันจะทำให้เกิดการสูญเสียในการเคลื่อนที่ คือ มีระยะที่เฟืองขับหรือสกรูส่งกำลังเคลื่อนที่แต่ไม่สัมพันธ์กับเฟืองตามหรือนัท สิ่งนี้จะทำให้เกิดความไม่เที่ยงตรงของเฟือง จึงจำเป็นที่จะต้องหาวิธีลดหรือกำจัด Backlash

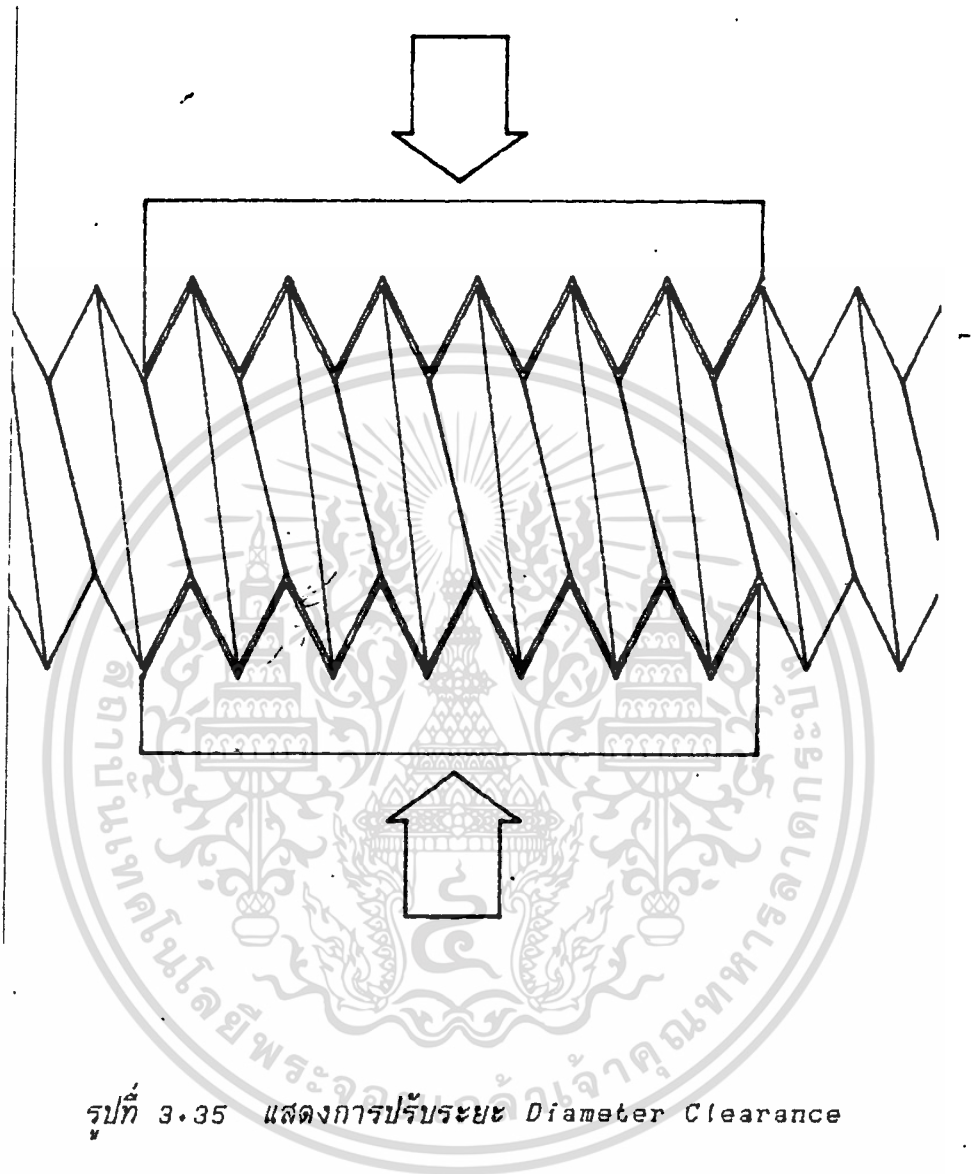
การแก้ปัญหา Backlash ในสกรูส่งกำลัง

การแก้ปัญหา Backlash ในสกรูส่งกำลังสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะคือ
(1) ใช้ความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของสกรูและนัทตามแนวขนานกับแกนเกลียว



รูปที่ 3.34 แสดงการใช้ความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของสกรู และนัทตามแนวขนานกับแกนเกลียว

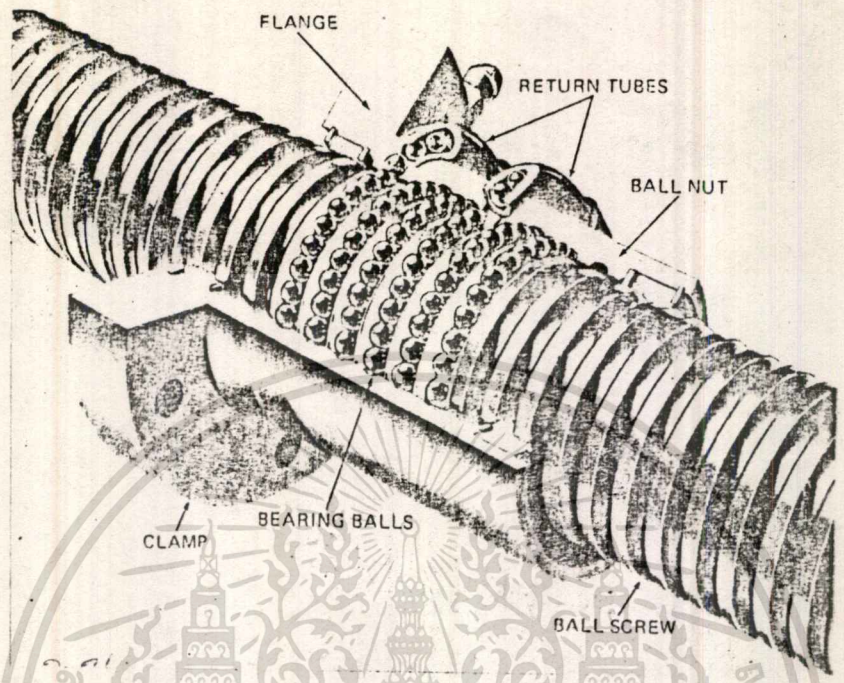
(2) ปรับระยะ Diameter Clearance ในการลด Backlash



รูปที่ 3.35 แสดงการปรับระยะ Diameter Clearance

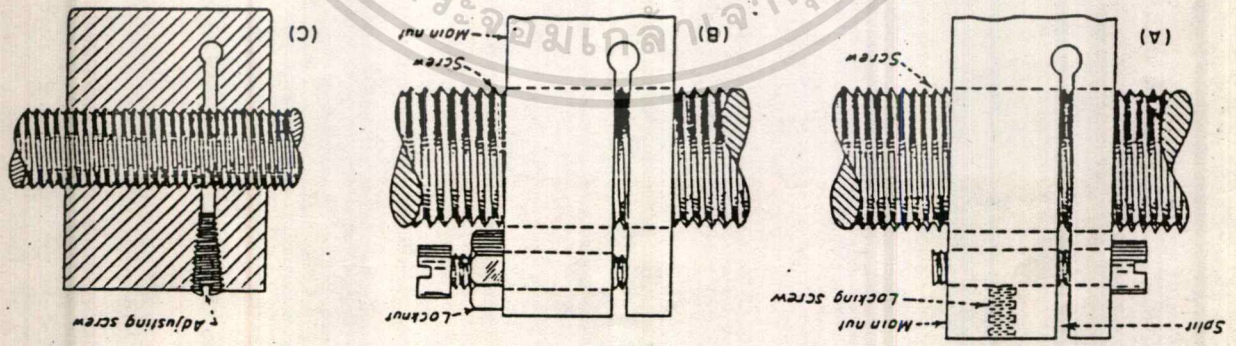
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) ไขเกลียวลูกปืน (Ball screw)



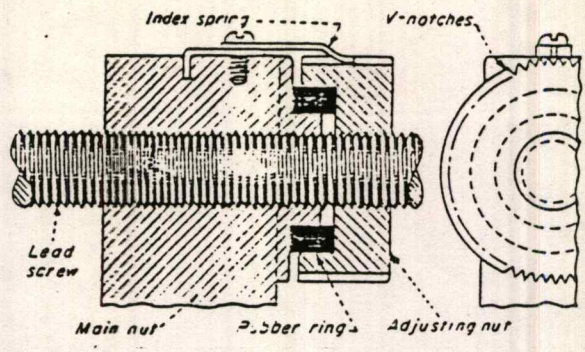
รูปที่ 3.36 แสดงเกลียวลูกปืน

ตัวอย่างของ (1) แสดงไว้ในรูปที่ 3.37 , 3.38 , 3.39 , 3.40 , 3.41
3.42 , 3.43

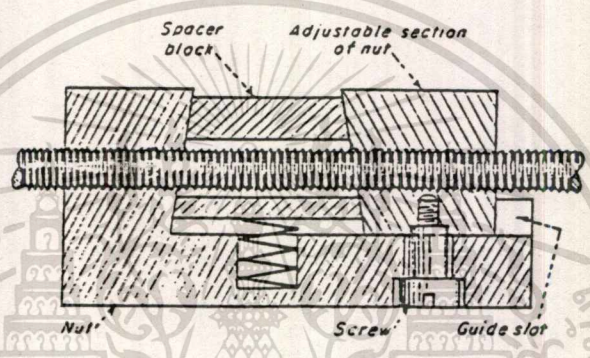


รูปที่ 3.37 แสดงการไขนัทที่เป็นร่อง (Slotted Nut) 3 แบบ

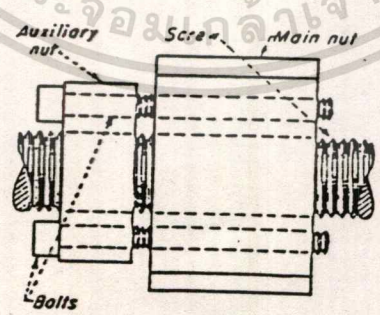
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.38 แสดงนัทปรับระยะ (Adjusting Nut) กับสปริงในการลด Backlash

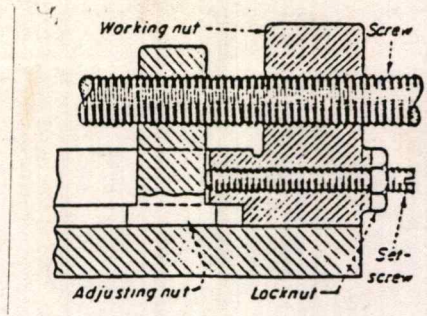


รูปที่ 3.39 แสดงการใช้สปริงตันสเป (หรือปรับระยะแบบเรียว (Tapered Spacer Block) ขึ้น ทำให้เกิดแรงดันส่วนของนัทที่สามารถปรับระยะได้ (Adjustable Section of Nut) ที่มีสปริงตันอยู่

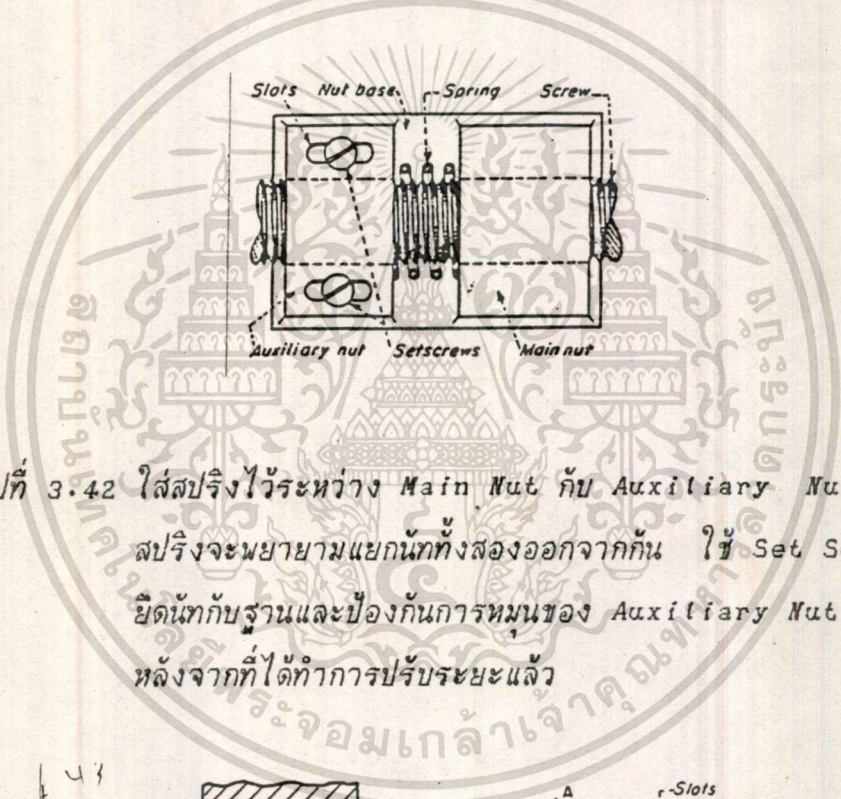


รูปที่ 3.40 ใช้ Auxiliary Nut หนึ่งตัวหรือสองตัวยึดเข้ากับ Main Nut โดยใช้สกรู ซึ่งจะดึงให้นัททั้งสองเข้าหากัน

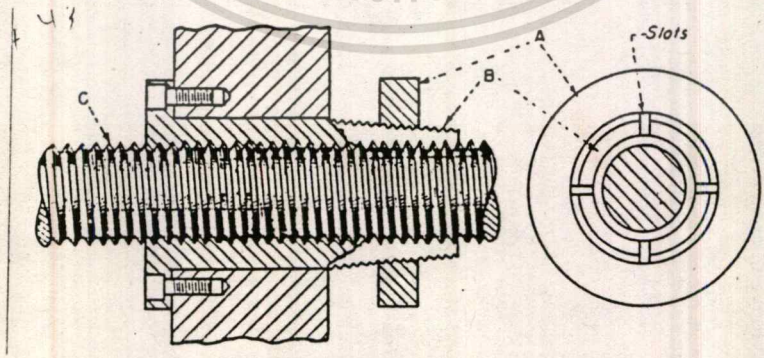
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.41 ใช้ขันปรับระยะในการปรับ Backlash ในแนวแกนของสกรู
ส่งกำลัง ซึ่งใช้ Set Screw ล็อคให้ได้ระยะที่ต้องการ



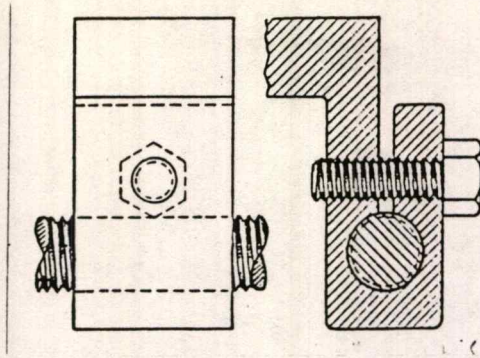
รูปที่ 3.42 ใส่สปริงไว้ระหว่าง Main Nut กับ Auxiliary Nut
สปริงจะพยายามแยกกันทั้งสองออกจากกัน ใช้ Set Screw
ยึดเข้ากับฐานและป้องกันการหมุนของ Auxiliary Nut
หลังจากที่ได้ทำการปรับระยะแล้ว



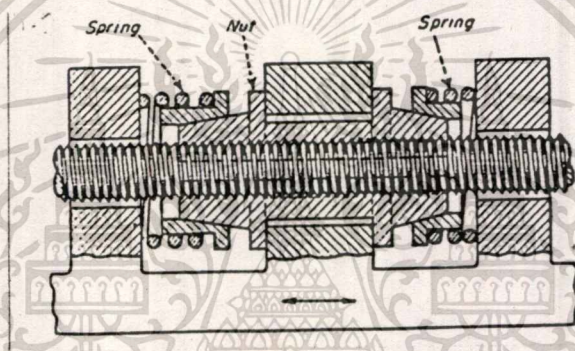
รูปที่ 3.43 นัท A ถูกหมุนไปตามนัท B เพื่อกำจัด Backlash
ระหว่างนัท B กับนัท C โดยใช้ร่อง 4 ร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

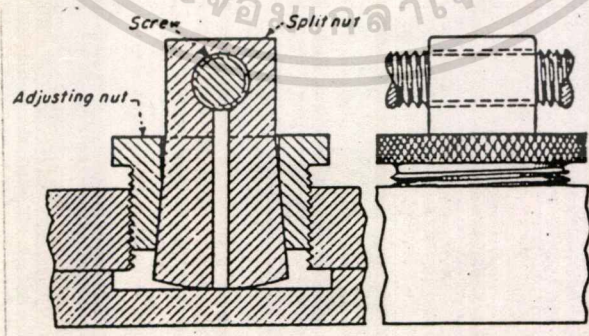
ตัวอย่างของ (2) แสดงไว้ในรูปที่ 3.44 , 3.45 , 3.46 , 3.47 และ 3.48



รูปที่ 3.44 แสดงการใช้ Clamp ในการลดระยะห่างระหว่างรัศมีของนัทและสกรู

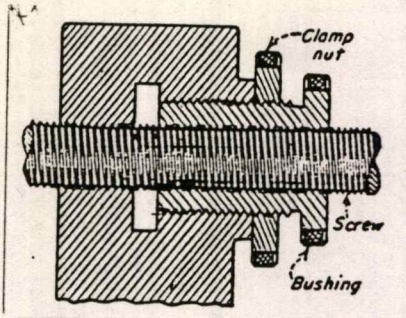


รูปที่ 3.45 การปรับ Backlash แบบอัตโนมัติโดยใช้แรงสปริงดันส่วนที่เป็นสล็อตเข้าไปในแนวรัศมี

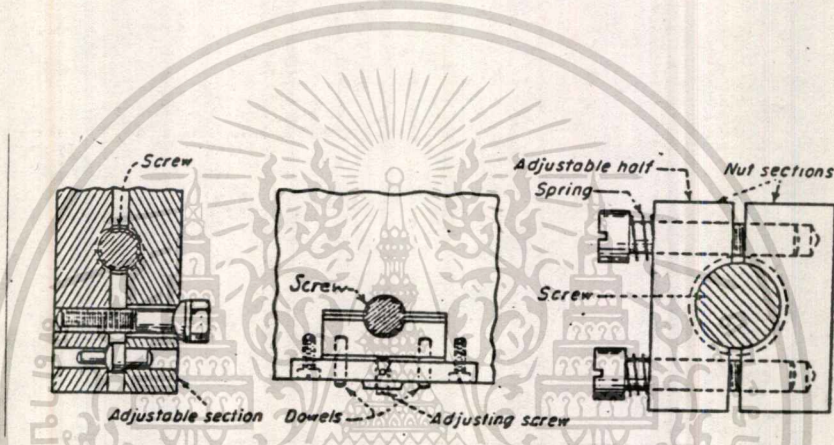


รูปที่ 3.46 เพื่อปรับระยะนัทให้แน่นเข้า ใช้ Split Nut ดันนัทให้มีระยะห่างของรัศมีลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.47 Clamp Nut ใช้สำหรับยึดขั้วปรับระยะเอาไว้



รูปที่ 3.48 โครงสร้างตัวอย่างของการใช้เทในการปรับระยะในแนวรัศมีของสกรูส่งกำลัง

ข้อดีและข้อควรระมัดระวังของ (3)

ข้อดี

1. มีความเที่ยงตรงและเชื่อถือได้สูง

เนื่องจากเกลียวลูกปืนได้ผ่านขั้นตอนการผลิตโดยเครื่องจักรที่มีประสิทธิภาพและความเที่ยงตรงสูงอีกทั้งยังใช้วัสดุที่มีสมบัติเหมาะสมในการทำเครื่องมือกลจึงทำให้เกลียวลูกปืนที่ได้มีความเที่ยงตรงและเชื่อถือได้สูง

2. มีประสิทธิภาพการถ่ายกำลังสูง

ในเกลียวลูกปืนจะมีประสิทธิภาพในการถ่ายกำลังได้เกือบเทียบเท่าเกลียว Acme แต่ใช้แรงบิดเพียงสองในสามของเกลียว Acme เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การขยับของลูกปืนในแนวแกนต่ำ

ด้วยลักษณะการออกแบบร่องลูกปืนให้เป็นแบบ โกธิคอาร์ช แซบ จึงทำให้การเคลื่อนที่ของลูกปืนมีความเที่ยงตรงสูงและราบเรียบดีขึ้น

4. มีความเที่ยงตรงที่การป้อนละเอียด

ด้วยความเสียดทานที่ต่ำอันเนื่องมาจากหน้าที่สัมผัสของลูกปืนเป็นผลให้แรงที่จะขยับในตอนเริ่มต้นการเคลื่อนที่มีค่าต่ำส่งผลให้ลดการเกิด สติ๊ก สลิป จึงทำให้มีความเที่ยงตรงสูงในการป้อนละเอียด

5. การซ่อมบำรุงรักษาง่าย

เพียงแต่ใช้สารหล่อลื่นในบางครั้งคราวเท่านั้นในสภาวะการทำงานปกติ

6. สามารถใช้งานที่ความเร็วรอบสูงได้

ด้วยประสิทธิภาพการถ่ายกำลังได้สูง จึงทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสมีค่าต่ำและสามารถใช้งานที่ความเร็วรอบสูงๆได้

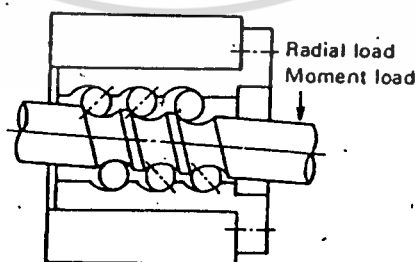
7. มีค่า Backlash ต่ำ

ในเกลียวลูกปืนถ้าเป็นแบบแป้นเกลียวเดี่ยวสามารถลด Backlash ได้โดยใช้ลูกปืนมีขนาดใหญ่กว่าร่องเกลียวลูกปืน แต่ถ้าเป็นแบบแป้นเกลียวคู่จะสามารถลด Backlash ได้โดยการให้ฟรีโหลดก่อน

ข้อควรระมัดระวัง

1. ภาระไม่สมดุล

ในการออกแบบต้องระมัดระวังไม่ให้แรงในแนวรัศมีกับโมเมนต์กระทำเยื้องศูนย์ เพราะจะทำให้เกิดการรับแรงมากเกินไปเฉพาะจุดเป็นผลให้เกิดการสึกหรออย่างรวดเร็วขึ้นได้



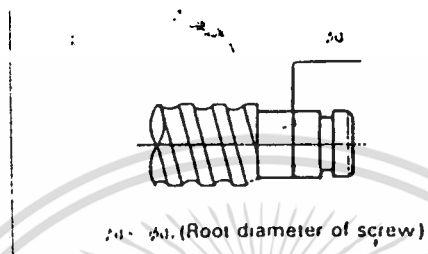
รูปที่ 3.49 ภาระในแนวรัศมีและโมเมนต์

2. การติดตั้งที่จะทำให้เกิดความเที่ยงตรงสูง

ในการติดตั้งเกลียวลูกปืนลงบนเครื่องเพื่อให้มีความเที่ยงตรงสูงนั้นต้องระมัดระวังในการติดตั้งให้ส่วนต่างๆอยู่ในแนวเดียวกันอย่างเที่ยงตรง

3. ลักษณะของปลายเพลากลียวลูกปืน

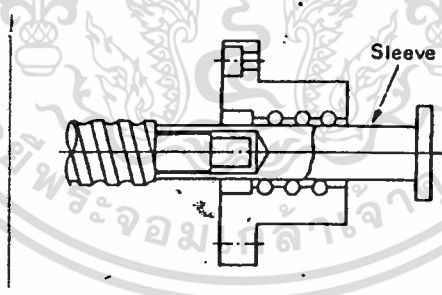
ในการออกแบบต้องให้เส้นผ่านศูนย์กลางรากของเกลียวมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายเพลากลียวลูกปืนเพื่อไม่ให้แป้นเกลียวลูกปืนหลุดออกมา



รูปที่ 3.50 ลักษณะของปลายเพลากลียวลูกปืน

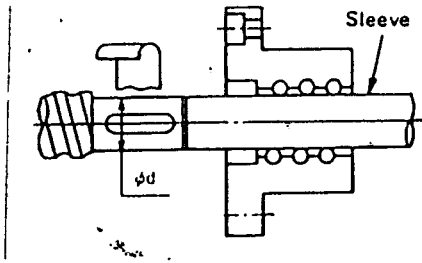
4. วิธีการเคลื่อนย้ายแป้นเกลียวลูกปืน

ถ้ามีความจำเป็นในการที่ต้องเคลื่อนย้ายแป้นเกลียวลูกปืนออกจากเพลาก็ต้องให้ปลอกสวมที่ปลายเพลาก่อนการเคลื่อนย้ายแป้นเกลียวลูกปืนออกมาตั้งรูป



รูปที่ 3.51 การเคลื่อนย้ายแป้นเกลียวลูกปืน

และในกรณีที่มีร่องลิมอยู่ที่ปลายเพลาโดยเส้นผ่านศูนย์กลางรากของเกลียวมีขนาดต่างจากเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลเพียงเล็กน้อย ในการเคลื่อนย้ายแป้นเกลียวลูกปืนออกให้นำเทปมาพันที่ร่องลิมก่อนและใช้ปลอกช่วยดังแสดงในรูป

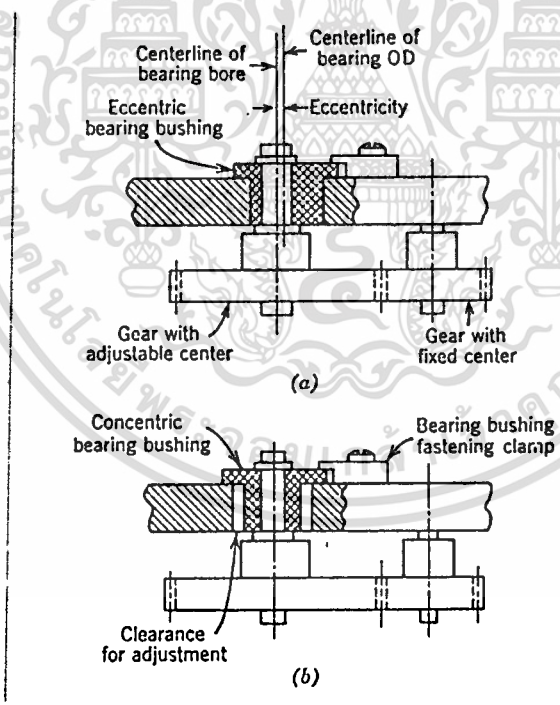


รูปที่ 3.52 การเคลื่อนย้ายเป็นเกลียวลูกปืน

การลด Backlash ในเฟืองตรง

การลด Backlash ในเฟืองตรงสามารถทำได้ 10 วิธีคือ

1. ปรับจุดศูนย์กลาง



รูปที่ 3.53 แสดงชิ้นส่วนที่ใช้ในการปรับจุดศูนย์กลาง

(a) Eccentric Bearing

(b) Floating Bearing

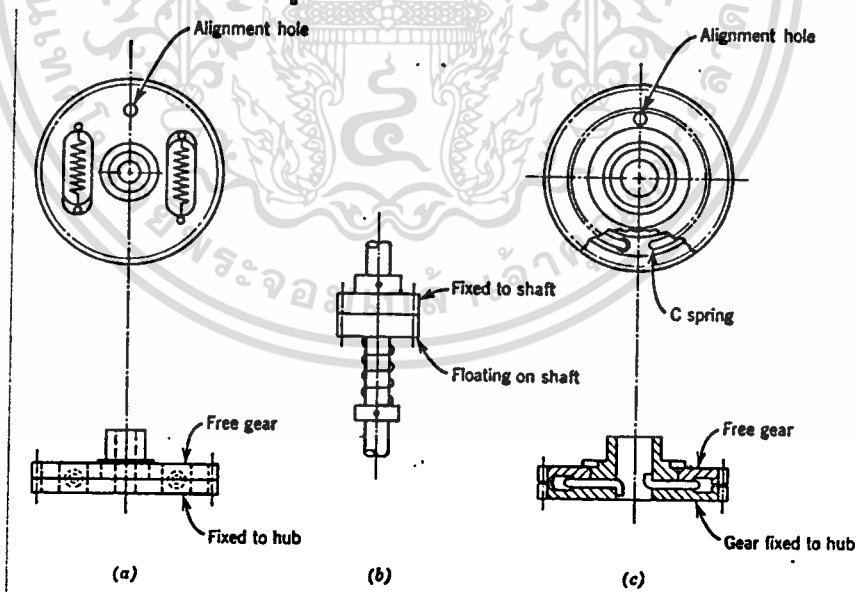
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับจุดศูนย์กลางมีประโยชน์มากเมื่อใช้ปรับเฟืองคู่สุดท้ายของชุดเฟือง ซึ่งใช้บ่อยในชุดเฟืองทด เพราะการขบกันของเฟืองคู่สุดท้ายมีผลมากที่สุดต่อ backlash ทั้งหมด

แม้ว่าการปรับจุดศูนย์กลางต้องให้ชิ้นส่วนในการประกอบมากขึ้น และค่าใช้จ่ายในการประกอบที่เพิ่มขึ้น แต่ให้ระยะเผื่อที่ตัดทิ้งได้มากขึ้นเพื่อเป็นการชดเชย การปรับจุดศูนย์กลางเป็นวิธีที่เป็นประโยชน์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับเฟืองที่ไม่ใช่เฟืองตรง เช่น เฟืองหนอน และ เฟืองเฉียงไขว้ ซึ่งเทคนิคอื่นไม่สามารถนำมาใช้ได้ อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของการปรับจุดศูนย์กลางมีอยู่หลายประการ คือ ต้องใช้การประกอบที่อาศัยความชำนาญในการปรับให้อยู่ในขอบเขต 0.0005 ถึง 0.001 นิ้ว ยิ่งไปกว่านั้นการปรับจุดศูนย์กลางใหม่ ตำแหน่งที่ได้จะไม่เหมือนกับตำแหน่งที่ปรับไว้ในตอนแรก การปรับจุดศูนย์กลางจึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่มีระยะ Backlash คงที่เท่านั้น

2. การใส่ไหลดสปริงให้กับเฟืองและชุดเฟือง

เฟืองแบบ Spring Load Scissor หรือ Split Gear เป็นตัวกำจัด Backlash ที่มีความน่าเชื่อถือมากและใช้อย่างแพร่หลาย การออกแบบส่วนใหญ่จะเป็นในรูป 3.54(a) อีก 2 แบบที่แตกต่างออกไป คือ สปริงแบบ c ซึ่งเหมาะสำหรับเฟืองขนาดเล็ก และสปริงรับแรงบิดสำหรับเพลานินเนียน ในรูปที่ 3.54(b) และ 3.54(c)



รูปที่ 3.54 Spring-loaded Scissor Gear มี 3 ชนิด คือ (a) สปริงรับแรงดึงและแรงอัด (b) สปริงรับแรงบิด (c) สปริงแบบ C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของเฟืองแบบ Spring-Loaded Scissor

1. ยอมให้ความเผื่อของแหล่งกำเนิด Backlash คงที่ เช่น ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลาง ขนาดเฟือง เป็นต้น ถ้าความผิดพลาดในการส่งกำลังยอมรับได้ จะยอมให้ความเผื่อของแหล่งกำเนิด Backlash ไม่คงที่ได้
2. Backlash ทั้งหมด (คงที่และไม่คงที่) ถูกกำจัดได้ตลอดโดยไม่คำนึงถึงความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับฟันและแบร็งของเพลลา
3. ผลของ Backlash ที่เกิดจากการขยายตัวที่แตกต่างกันถูกแก้ไขได้อย่างอัตโนมัติ
4. การประกอบง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับความละเอียดอ่อนของเทคนิคการปรับจุดศูนย์กลาง

ข้อเสีย

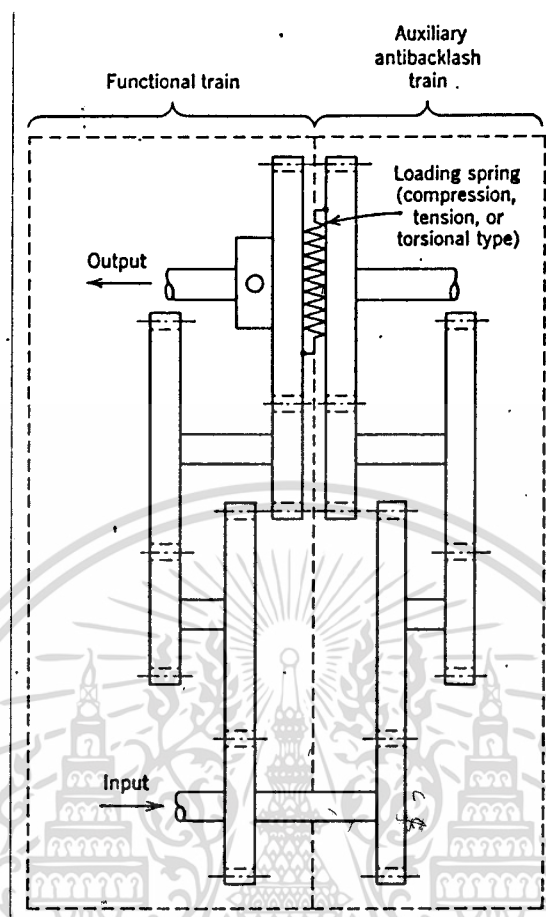
1. การใส่ภาระให้สปริงจะต้องมากกว่าภาระสูงสุดที่ส่งผ่านเฟือง ดังนั้นการนำไปใช้จึงจำกัดอยู่กับชุดเฟืองที่มีแรงบิดต่ำ
2. เฟืองและแบร็งถูกบ่อนการอย่างคงที่ ซึ่งจะเพิ่มความสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและลดอายุการใช้งาน
3. ผู้ที่ประกอบต้องมีความรับผิดชอบสูง เนื่องจากเฟืองเหล่านี้จะทำผิดพลาดที่ไปถ้ามีการให้ภาระแก่สปริงไม่เหมาะสม
4. อุปกรณ์ที่ใช้เฟืองคู่ ต้องการเฟืองที่มีหน้าสัมผัสกว้าง

3. ชุดเฟืองที่มี Auxiliary Antibacklash

การออกแบบอีกแบบหนึ่งที่ใช้กำจัด Backlash ทั้งหมดของชุดเฟืองโดยใช้ชุดเฟืองชุดที่ 2 ในรูป 3.55

รูปที่ 3.55 ประกอบด้วยชุดเฟือง 2 ชุด คือ ชุดเฟืองทำงาน (Functional Train) และ ชุดเฟืองแบบ Auxiliary Antibacklash เพลาส่งกำลังเข้าจะหมุนเฟือง 2 ตัว ที่มีรูปร่างเหมือนกัน หรือ เฟืองตัวเดียวที่ขบกับชุดเฟืองคู่ (Dual Trains) เพลาส่งกำลังออกจะต่อเข้ากับเฟืองที่ยึดติดกับที่ (Fixed Gear) และเฟืองที่ใส่สปริงซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของชุดเฟือง Antibacklash

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



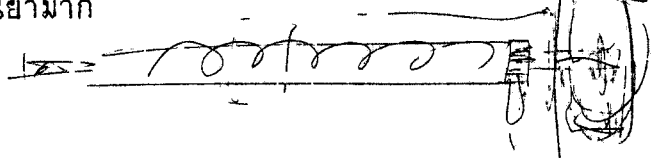
รูปที่ 3.55 แผนภาพของชุดเฟืองที่มี Auxiliary Antibacklash

ระหว่างเพลาส่งกำลังเข้าและส่งกำลังออก ชุดเฟืองทำงานถ่วงจำลองแบบออกมาเป็นชุดเฟือง Antibacklash การจำลองแบบในครั้งนี้อาจเป็นทั้งชุดเฟืองทั้ง 2 ต้องเหมือนกันหมด แต่อัตราส่วนความเร็วรวมจะต้องเหมือนกัน ชุดเฟือง Auxiliary ไม่จำเป็นต้องมีความแม่นยำเหมือนกับเฟืองทำงาน เนื่องจากมันเป็นเพียงชุดเฟืองที่รับภาระและไม่มีผลต่อความแม่นยำของตำแหน่ง เฟืองที่ใส่สปริงบนเพลาส่งกำลังออกถูกปรับภาระเพื่อให้ได้แรงบิดตามต้องการ เมื่อฟันเฟืองขบกัน ดังนั้นจึงเป็นการให้ภาระแก่เฟืองทั้งหมดของชุดเฟือง

ข้อดีของวิธีนี้คือการกำจัด Backlash ทั้งหมดด้วยสปริงตัวเดียว อย่างไรก็ตามงานส่วนใหญ่ไม่จำเป็นต้องใช้วิธีนี้ ข้อเสียส่วนใหญ่ คือ ใช้อุปกรณ์เป็นสองเท่าและต้องใช้เนื้อที่มากขึ้น

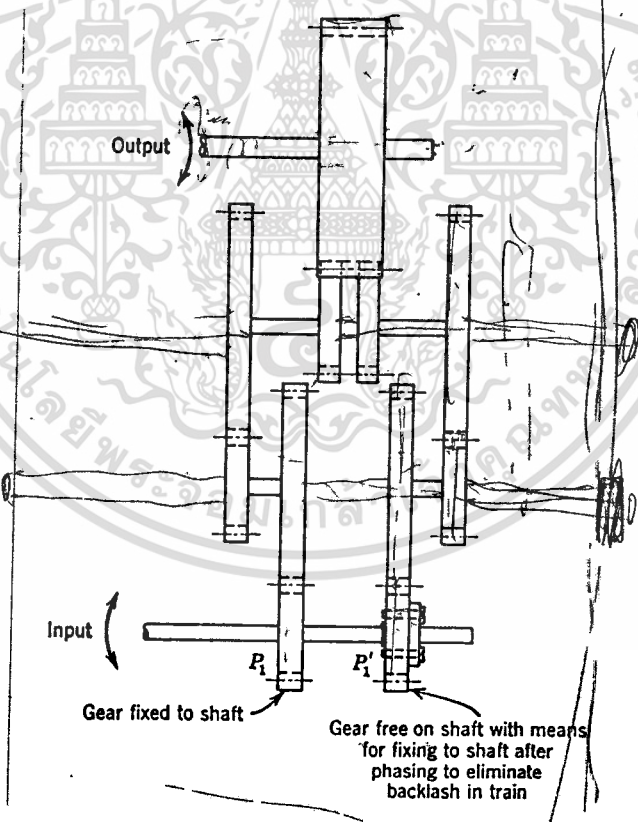
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบนี้ให้ประโยชน์มากเมื่อใช้กับชุดเฟืองความเร็วต่ำ เช่น ชุดเฟืองในคอมพิวเตอรื เป็นต้น มีการทำงานที่ต้องแม่นยำมาก



รูปแบบที่เปลี่ยนไป

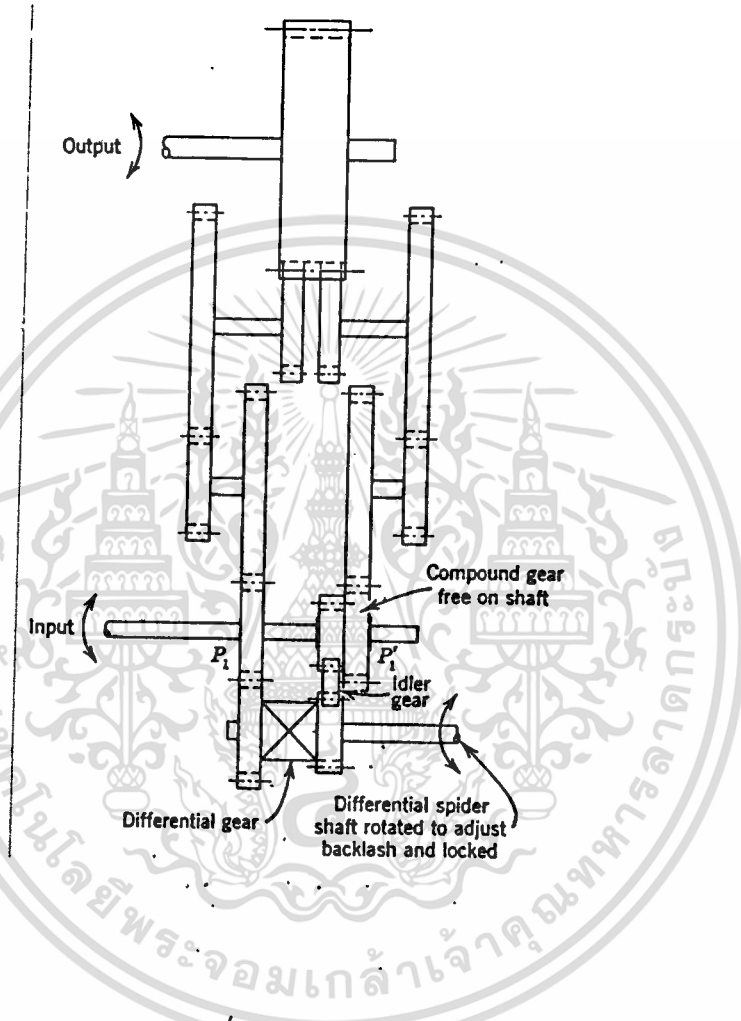
ถ้าเฟืองขับออกที่ใส่สปริง ถูกแทนที่ด้วยเฟืองที่มีหน้าสัมผัสกว้างพอที่จะขับเฟืองอื่น 2 ตัว (รูป 3.56) เฟืองรับกำลังเข้า P_1 และ P_1' ช่วยลดระยะ Backlash ของชุดเฟือง P_1 ถูกหมุนเพื่อลด Backlash และยึดอยู่กับที่ด้วยสกรู หรือ Clamp ทำให้บางทีถูกเรียกว่า "ชุดเฟืองล็อค" แม้ว่าการลด Backlash จะสามารถทำได้ที่ปลายทางออก แต่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นที่เพลาคความเร็วสูง เนื่องจากการขยายตัวของ Backlash Backlash ถูกควบคุมตลอดทั่วทั้งชุดเฟือง อัตราแรงบิดสูงและกำลังได้ถูกส่งผ่านทั้งสองชุดเฟือง ไม่เหมือนกับชุดเฟืองที่มีสปริงพ่วงต่อซึ่งเฟืองทั้งหมดต้องมีคุณภาพดีเพื่อจะจำกัด Backlash ที่ไม่คงที่



รูปที่ 3.56 ตัวกำจัด Backlash ที่ใช้ชุดเฟืองคู่แบบเฟสอยู่กับที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงชุดเฟืองล้อคือ ทำได้โดยใส่ชุดเฟืองดิฟเฟอเรนเชียลระหว่างฟัน
 เนียน P_1 และ P_1' ดังในรูป 3.57 พร้อมกับเฟืองหมุนเปล่า (Idler). เพื่อทำให้
 ทิศทางถูกต้อง การหมุนของเฟลาติฟเฟอเรนเชียลก็เพื่อลด Backlash ในชุดเฟืองทั้ง
 หมด

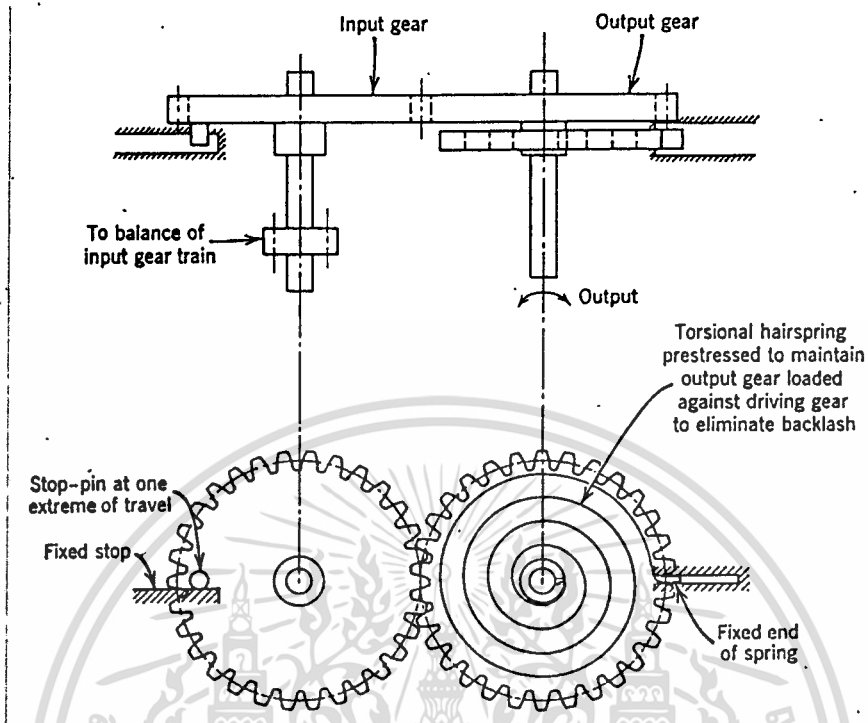


รูปที่ 3.57 ชุดเฟืองคู่ที่ Backlash ถูกควบคุมด้วยดิฟเฟอเรนเชียล

4. แฮร์สปริง (Hairsprings)

สำหรับชุดเฟืองที่มีมุมที่ต้องการนำเอาไปใช้อย่างจำกัด เช่น การขับเคลื่อนใน
 Potentiometer หรือ หน้าปัด เป็นไปได้ที่จะใช้แรงสปริงเดี่ยวโดยไม่ต้องมีชุดเฟือง
 Auxiliary โดยทั่วไปสปริงรับแรงบิดปลายด้านหนึ่งจะยึดแน่น (รูป 3.58)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.58 การกำจัด Backlash ด้วยแฮร์สปริง

แรงสปริงต้องมากกว่าภาระ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้อุปกรณ์ที่นำเอาสิ่งนี้มาประยุกต์มัก จะรับภาระได้น้อย เช่น อุปกรณ์ขนาดเล็ก สปริงก็ต้องเล็ก ดังนั้นจึงต้องใช้แฮร์สปริง เช่น สปริงที่ใช้ในกลไกนาฬิกา (โยนาฬิกา)

ข้อจำกัดแฮร์สปริงนอกเหนือจากส่งกำลังต่ำแล้ว สปริงรับแรงบิด (หรือชนิดอื่น) ถูกกำหนดให้ขดมีจำนวนรอบที่จำกัด อุปกรณ์ในการหยุดมักถูกเพิ่มเติมเข้าไปเพื่อป้องกัน ความเสียหายเนื่องจากการเคลื่อนที่เกินระยะยึด และใช้กับการหมุนมาก ๆ ซึ่งทำให้มีขอบ เขตของสปริงในการรับภาระกว้างอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

5. Spring-loaded Gear Centers

ทางเลือกอีกทางหนึ่งในการใช้ Spring-Loaded Gear คือ การให้ภาระที่จุดศูนย์กลาง ที่เคลื่อนที่ได้เพื่อให้เกิดการสัมผัสของฟันได้อย่างสนิท และ การกำจัด Backlash ฟินเนียนมักจะเป็นอุปกรณ์ที่อยู่ลอย ๆ ซึ่งทำให้ผลเนื่องจากแรงเฉื่อยต่ำสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดี เมื่อเปรียบเทียบกับเฟือง Scissor รุ่นเก่าคือ

- 1. การออกแบบเฟืองตรงธรรมดา ใช้เพียงความกว้างอย่างเดียว
- 2. การออกแบบไม่มีข้อจำกัดที่ใช้ได้กับเฟืองธรรมดา (Spur Gear) แต่ใช้ได้กับเฟืองทุกชนิด
- 3. แรงสปริงที่ใช้เป็นเพียงส่วนหนึ่งของแรงที่ถูกส่งผ่านฟันเฟือง ($F_u = F_t \tan \phi$)

ข้อเสีย คือ

- 1. ความจำเป็นของเพลาลอยเป็นอุปสรรคสำคัญในการออกแบบ
- 2. ความเสถียรของการใส่ภาระแก่สปริง ถูกจำกัดไว้สำหรับ Bearings สั้น ๆ
- 3. ไม่เสถียรหรือแม้ว่าจะเป็นไปได้ ในการใช้เพลากลางที่มีสปริงลอยของชุดเฟือง โดยไม่พบกับความยุ่งยากของแรงหลายแรงและผลของ Backlash
- 4. ความเสียหายเนื่องจากใส่ภาระแก่สปริง จะทำให้เกิด Backlash มากกว่าแบบ Scissor
- 5. ส่วนประกอบที่มี Backlash ไม่คงที่ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของเพลาลอยและเฟืองทั้งหมด ซึ่งความเฉื่อยของมันมากและสามารถจำกัดความเร็วได้
- 6. เฟืองประกบที่ยึดอยู่กับที่ (Fixed Split Gear)

การเปลี่ยนแปลงของการออกแบบเฟือง Antibacklash แบบ Scissor สำหรับงานที่ใช้แรงบิดสูง คือ การใช้ชิ้นส่วนที่เป็นเฟืองที่ยึดแน่นกับเฟืองอิสระโดยไม่ใช้สปริงแต่ใส่สลกรูล็อค เดือย หรือหมุด เพิ่มเติมเข้ามา เฟืองถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน ถูกปรับการขบเพื่อลดช่องว่างของฟัน งานที่ใช้แรงบิดสูง การลื่นของสลกรูเนื่องจากแรงเสียดทานยังไม่มีความแน่นอน เฟืองจะถูกใส่เดือยหรือหมุด การใส่เดือยเหมาะสมกว่าเนื่องจากการใช้หมุดสามารถทำให้เกิดการเลื่อนของชิ้นส่วน ทำให้แน่ใจว่าเฟืองถูกล็อคที่จุดแน่นที่สุดของการขบ

ข้อดี คือ

ไม่จำเป็นต้องให้ภาระแก่สปริง และ ความบกพร่องของมันในการส่งกำลังที่มีแรงบิดจำกัดและการรับภาระต่อเนื่องของเฟือง

ข้อเสีย คือ

1. แม้ว่าส่วนประกอบที่มี Backlash คงที่จะถูกกำจัด แต่ Backlash ไม่คงที่ ยังไม่ถูกกำจัด
2. การประกอบต้องใช้ทักษะเชิงช่าง ซึ่งต้องแน่ใจว่าปรับและลือคเฟืองอย่างเหมาะสม
3. ไม่สามารถที่จะสับเปลี่ยนชิ้นส่วนซึ่งกันและกันได้ เนื่องจากแต่ละชิ้นส่วนถูกตั้งไว้สำหรับระยะห่างระหว่างศูนย์กลางและความหนาเฟืองเฉพาะชิ้นส่วนนั้น
4. ถ้า Parameter กระทบต่อส่วนประกอบที่มี Backlash แปรตามการหมุนที่เปลี่ยนไป (เช่นการเปลี่ยน Bearing) อาจมีสิ่งแทรกแซงเกิดขึ้น เนื่องจากเฟืองประกอบที่ได้ถูกติดตั้งไว้ในตอนเริ่มแรกมีสภาพของการรวมกันของชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่แตกต่างกันไปจากสภาพของเฟืองในตอนนั้น

7. เฟืองที่ปรับความหนาของเฟืองได้ (Adjustable Tooth Thickness Gear)

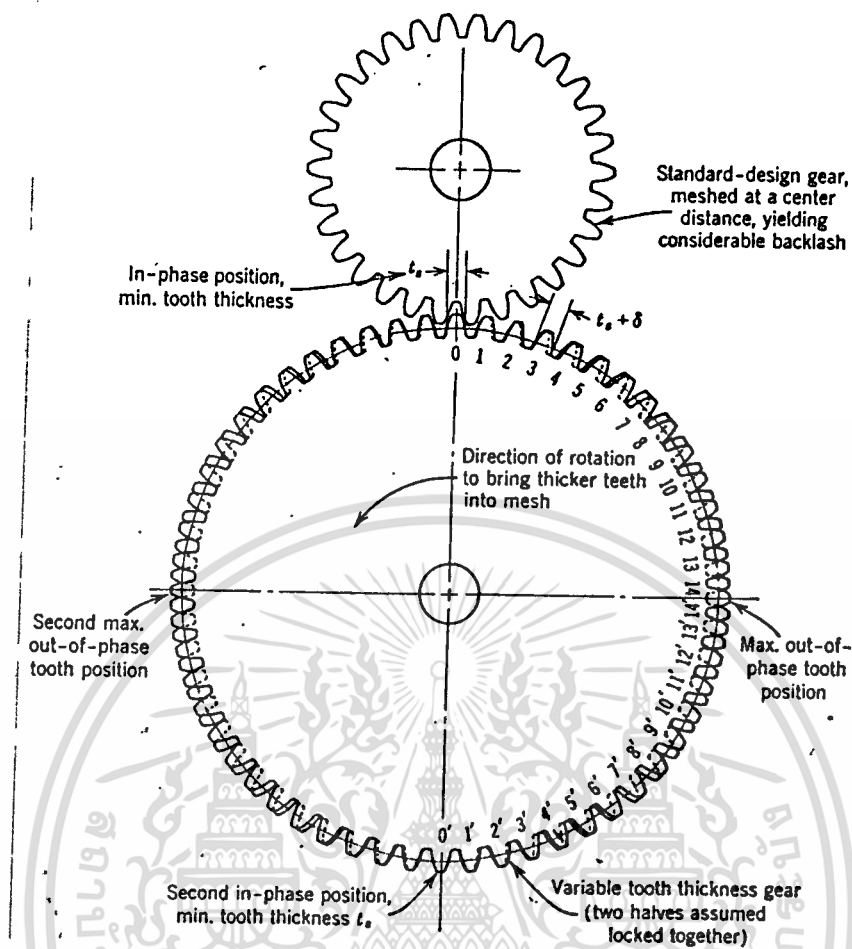
เทคนิคนี้ใช้ควบคุม Backlash ที่เหมาะสมกับภาระหนัก ถ้าครึ่งส่วนของเฟืองที่ประกบกัน มีจำนวนฟันซึ่งแตกต่างกัน 2 ฟัน หรือมากกว่าขบกับฟันเนียนอยู่ ทำให้เห็นระยะความหนาของเฟือง (เฟส) ที่เลื่อนจากฟันหนึ่งไปทับอีกฟันหนึ่ง ซึ่งจะอยู่ตรงเฟสกันทุก ๆ $360/\Delta N$ องศา และไม่ตรงคู่อย่างสมบูรณ์ตรงกึ่งกลางระหว่างจุดนั้น "ความหนาของฟันที่แท้จริง" คร่อมคู่ฟันที่ทับกัน คือ

เมื่อ

$$t_e = t_u + s$$

$$s = \frac{2n_e \Delta N t_u}{N}$$

- และ
- t_e : "ความหนาของฟันที่แท้จริง" ของคู่ฟันที่ทับกันโดยเฉพาะ
 - t_u : ความหนาฟันของฟันเดียว
 - s : ความหนาของฟันเพิ่มเนื่องจากขบกันผิดคู่
 - N : จำนวนฟันของเฟืองพื้นฐาน
 - ΔN : จำนวนฟันแตกต่างระหว่างเฟืองพื้นฐานกับเฟืองที่ทับ
 - n_e : จำนวนคู่ฟันที่ทับกับคู่ฟันที่ใกล้เคียงกับการตรงศูนย์กลางมากที่สุด



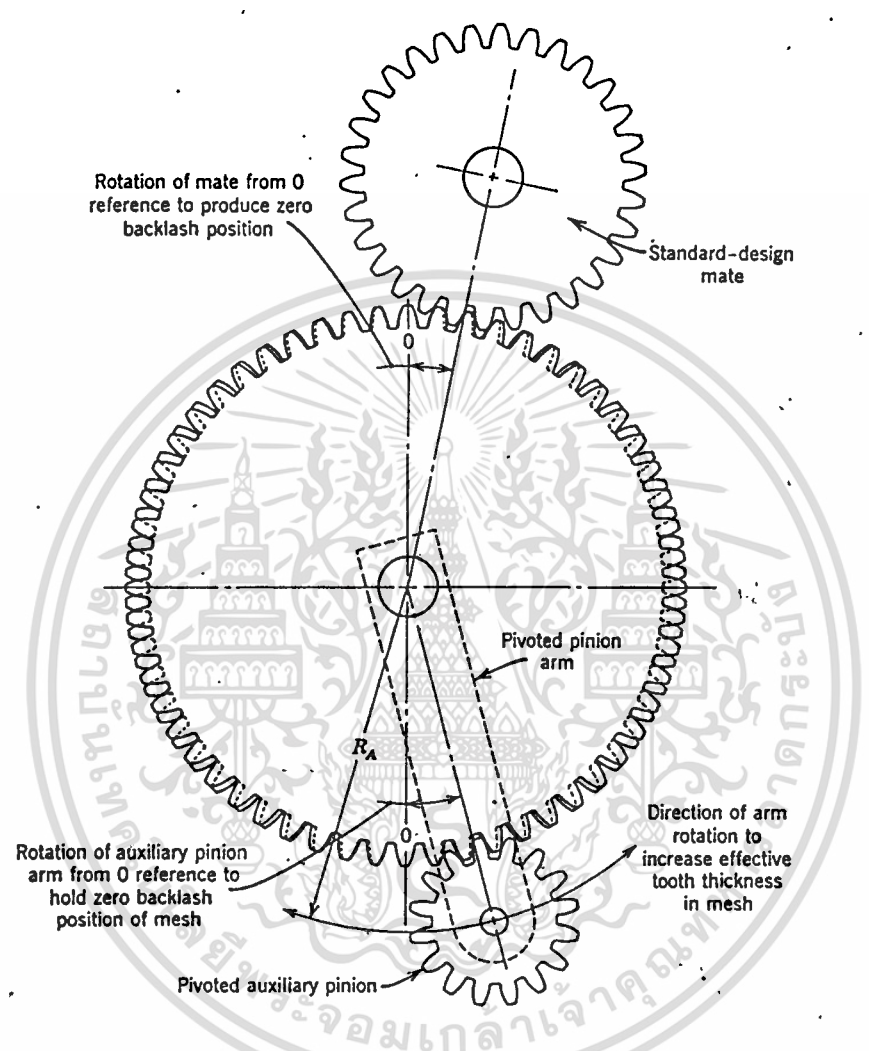
รูปที่ 3.59 ความหนาของฟันเฟืองที่ปรับความหนาได้
และขบอยู่กับคู่เฟืองของมัน

ดังนั้นมีการเปลี่ยนแปลง " ความหนาของฟันที่แท้จริง " ที่ละน้อยจากฟันถึงฟัน ตัวอย่างเช่น เฟือง 100 ฟัน มี 64 พิตซ์ มีเฟืองประกบ 102 ฟัน ซึ่งต่างกัน 0.001 จากฟันถึงฟัน อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงที่มีประโยชน์ต่อฟันเฟือง 2-3 ฟันที่ด้านใดด้านหนึ่งของคู่ฟันที่ขบกันเมื่อเฟืองตรงกัน การเปลี่ยนแปลงเป็นการทำงานที่ต่อเนื่องอย่างสม่ำเสมอ

พิจารณารูปที่ 3.59 เฟืองคู่ที่แตกต่างกัน ถูกลำมายึดเข้าด้วยกัน และคู่เฟืองที่ได้ ออกแบบตามมาตรฐานขบกันที่ฟัน "0" แต่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลาง สวมให้มี Backlash ถ้าคู่เฟืองมีความหนาของฟันที่แปรเปลี่ยนเมื่อถูกหมุน ฟันที่หนากว่าจะขบ และคู่เฟืองหนึ่งจะมี Backlash ทั้งหมด และเป็นไปได้ที่จะไม่มีการหมุนเกิดขึ้นต่อไป นั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือตำแหน่งความหนาของฟันสมมุติ (รูปที่ 3.60) คู่เฟืองสามารถที่จะถูกยึดไว้ที่ตำแหน่งนี้ด้วย Auxiliary Gear ฟันเนียนขบที่จัดห่างออกไป 180 องศา ซึ่ง "ความหนาของฟันที่แท้จริง" แสดงไว้ในรูป 3.60 และหมุนรอบจุดศูนย์กลางในตำแหน่งที่ไม่มี Backlash สิ่งที่จะทำให้ดีที่สดุคือการติดฟันเนียนเข้ากับแขนที่ยึดไว้กับจุดศูนย์กลางของเฟือง ดังรูป 3.60



รูปที่ 3.60 การกระทำเพื่อให้ความหนาของฟันที่ตีที่สดุ โดยให้ Auxiliary ฟันเนียนที่เลื่อนได้

สำหรับแขนล็อกฟันเนียนที่ตำแหน่งที่ตีที่สดุ เฟืองประกบและคู่ของมันจะขบกันด้วย Backlash สมมุติที่น้อยที่สุด Auxiliary ฟันเนียนที่ถูกยึดไว้จะกระทำหน้าที่จัดเฟสของเฟืองประกบเท่านั้น เมื่อ Auxiliary ฟันเนียน หมุนจากตำแหน่งศูนย์ ความหนาของฟันที่แท้จริงเพิ่มขึ้น มันไม่ได้มีวัตถุประสงค์อื่น ๆ อีก ยกเว้นว่ามันจะทำหน้าที่เป็นตัวหมุนแปลที่ส่งกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดี คือ

1. การปรับไม่เปลี่ยนแปลงง่าย (nonsensitive) การเคลื่อนที่ของแขนกลขยายอย่างมากเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลง Backlash ซึ่งยอมให้มีการตั้งที่มีความละเอียดมากของฟัน โดยใช้บุคคลที่ไม่ต้องมีความชำนาญ
2. ความสามารถในการส่งแรงบิดได้สูง เนื่องจากไม่ขึ้นอยู่กับสปริง
3. อายุการใช้งานของเฟืองมีระยะเวลานาน เพราะฟันถูกรับภาระจากแรงบิดที่ถูกส่งเท่านั้น
4. การตั้งค่า Backlash สามารถปรับใหม่ได้ทุกขณะ หรือกระทำได้ในขณะที่เฟืองกำลังหมุน

ข้อเสีย คือ

1. Auxiliary ฟิเนียน เป็นเฟืองพิเศษที่ต้องสามารถส่งแรงบิดได้สูงสุด
2. ความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องที่ใหญ่ ระหว่างเฟืองครั้งซิกนั้นต้องใช้แบบรีจิดี โดยทั่วไปแล้วมีคุณภาพดีกว่า Spring-Load Scissor Gear
3. Backlash ที่ไม่คงที่ ไม่ได้ถูกกำจัดเนื่องจากความหนาของฟันที่ปรับได้สามารถที่จะตั้งให้เป็นศูนย์ สำหรับจุดที่แน่นที่สุดของการขับ

การควบคุม Backlash นี้ ไม่ได้ให้ข้อดีสำหรับชุดเฟืองของอุปกรณ์ที่รับภาระน้อย แต่มันเหมาะสำหรับชุดเฟืองส่งกำลัง เมื่อเฟืองที่ถูกให้ภาระไม่สามารถใช้ได้ มีประโยชน์เมื่อเกิดการถอดชุดเฟืองบ่อย หรือ บางครั้งต้องการปรับตั้งการควบคุม Backlash ใหม่ ดังนั้นการทำงานที่ไม่เปลี่ยนแปลงง่ายของ Auxiliary ฟิเนียน ที่ถูกยึดไว้ยอมให้มีการปรับได้ง่ายด้วยบุคคลที่ไม่มีทักษะความชำนาญ

การขยายของผลเนื่องจากความหนาของฟัน ถูกแสดงด้วยการเคลื่อนที่ตามแนวเส้นรอบวงของจุดศูนย์กลางของ Auxiliary ฟิเนียน คือ อัตราส่วนของการเคลื่อนที่ของฟิเนียนกับระยะเลื่อนเฟสของฟัน ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 \text{[ตัวประกอบการขยาย]} &= \frac{\text{ระยะเลื่อนของ Auxiliary ฟิเนียน}}{\text{ระยะเลื่อนของเฟสของฟัน}} \\
 &= \frac{2rR_A}{\Delta Nr/P_d} = \frac{2P_d R_A}{\Delta N}
 \end{aligned}$$

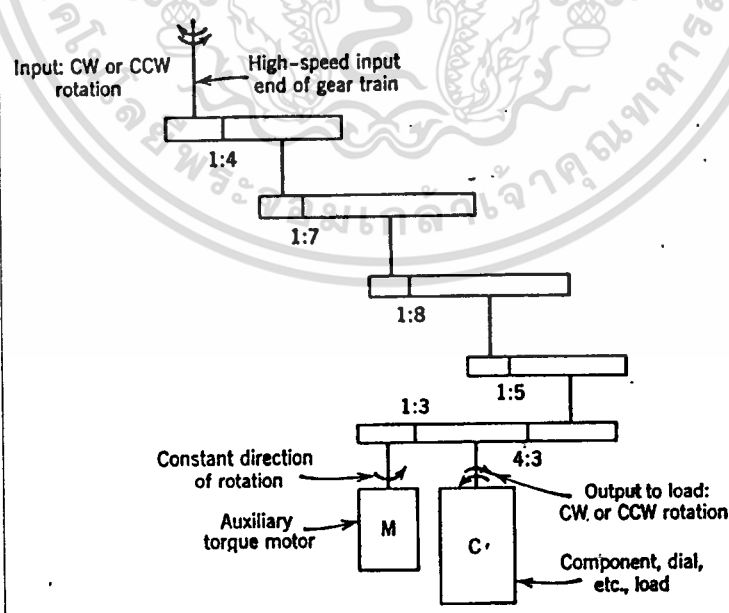
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ R_A = ระยะทางในแนวรัศมีจากจุดศูนย์กลางของเฟืองถึงจุดศูนย์กลาง Auxiliary ฟิเนียน

สำหรับการออกแบบที่เปลี่ยนแปลงได้ง่าย (Sensitive) $\Delta N = 2$ และตัวประกอบการขยาย = ผลคูณของเส้นผ่าศูนย์กลางพิตซ์กับรัศมีแบน

8. มอเตอร์ให้แรงบิดช่วย (Auxiliary Torque Motor)

อีกเทคนิคหนึ่งในการกำจัด Backlash คือ การใช้มอเตอร์ให้แรงบิดช่วยขนาดเล็ก ถูกป้อนกระแสไฟฟ้าอย่างคงที่ ซึ่งจะให้การระต่อการขบที่ด้านหนึ่งและลด Backlash อย่างไรก็ตามเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการขบชุดเฟืองกลับหลัง เทคนิคนี้ถูกกำหนดให้ใช้กับงานที่มีการทดเกียร์มาก ๆ ดังนั้นแรงบิดของมอเตอร์จึงต้องรับภาระหนักเนื่องจากแรงเสียดทานที่เกิดจากความเฉื่อยของขั้นตอนที่มีความเร็วสูงกว่า ดังนั้น Backlash ของขั้นตอนสุดท้ายเท่านั้นที่ถูกจำกัด แต่สิ่งนี้ก็เป็นที่พอใจแล้วเนื่องจากมันเป็นส่วนที่มี Backlash มากที่สุด สำหรับชุดเฟืองความเร็วสูงภาระของ Auxiliary Torque Motor ถูกเพิ่มขึ้น แต่ถูกตัดทิ้งด้วยเครื่องให้กำลัง (Prime Mover) ที่ด้านความเร็วสูงของชุดเฟือง แนวความคิดของแรงบิดมอเตอร์ถูกนำมาแสดงในลักษณะแผนภาพรูปที่ 3.61



รูปที่ 3.61 การกำจัด Backlash โดยใช้ Auxiliary Torque Motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีนี้เหมาะสมอย่างยิ่งกับชุดเฟืองที่มีการขบมากที่ด้านความเร็วต่ำ เทคนิคที่ให้ความสะดวกในการกำจัดหรือเพิ่มตัวกำจัด Backlash ที่เวลาใด ๆ เท่านั้น โดยการบิดสวิทช์ไฟฟ้า อย่างไรก็ตามวิธีนี้ก็สิ้นเปลืองเนื่องจากมอเตอร์พิเศษที่เพิ่มเข้ามา รวมทั้งเนื้อที่ในการติดตั้งและการใช้กำลังไฟฟ้า ยิ่งไปกว่านี้ยังไม่เหมาะสำหรับงานที่รับภาระหนักเมื่อ Auxiliary Torque Motor อาจจะทำหน้าที่ไม่เต็มที่ และการใช้อุปกรณ์ขนาดใหญ่ซึ่งมีการออกแบบไม่ดี

9. การเลือกชิ้นส่วนที่จะนำมาประกอบ (Selective Assembly)

วิธีนี้สามารถนำมาใช้เมื่อชุดเฟืองมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะใช้เลือกพารามิเตอร์แต่ละตัวที่มีผลต่อ Backlash ชิ้นส่วนต่าง ๆ จะถูกคัดออกในระหว่างการตรวจสอบและขณะประกอบ จะถูกเลือกมาเพื่อให้ได้สภาพของ Backlash ที่ต้องการ

ข้อดี คือ

1. เฟืองทั้งหมดอยู่ภายใต้การออกแบบที่ง่ายและเป็นมาตรฐาน
2. วิธีนี้ใช้ได้กับเฟืองทุกชนิดและทุกอัตราการรับภาระ

ข้อเสีย คือ

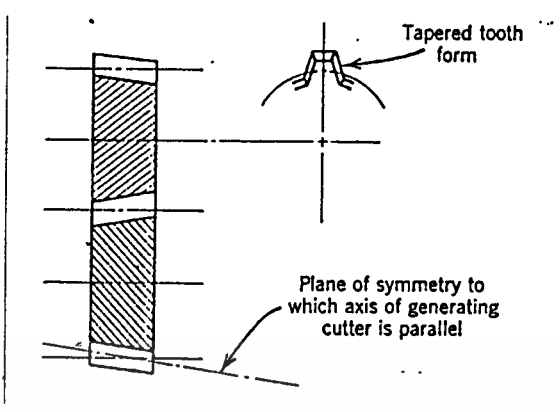
1. วิธีนี้ใช้กับอุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่
2. ราคาการประกอบและการตรวจสอบเพิ่มขึ้น
3. ส่วนประกอบที่มี Backlash แปรตามการหมุนจะไม่ถูกกำจัด
4. ชิ้นส่วนของเฟืองไม่สามารถแลกเปลี่ยนซึ่งกันและกันได้

10. Tapered

เฟืองชนิดนี้จะถูกนำไปใช้กับงานบางชนิดเท่านั้น ถ้าระยะห่างระหว่างใบมีดกับชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไปอย่างต่อเนื่อง เมื่อเครื่องมือถูกป้อนผ่าน Blank ของเฟือง ทำให้ได้เฟืองเรียวดังในรูป 3.62

ตามความยาวของพิทช์ทรงกระบอก เฟืองนี้มีความหนาของฟันไม่เท่ากัน เฟืองทั้ง 2 ขบเข้าด้วยกัน โดยการนำด้านที่มีความหนามากขบกับด้านที่มีความหนาน้อยของอีกเฟืองหนึ่งดังในรูป 3.62 เนื่องจากเฟืองเหล่านี้มีรูปร่างที่ลู่อเข้าระยะระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางสามารถเปลี่ยนแปลงได้ โดยไม่เกิดผลเสียต่อการทำงานของเฟือง

Backlash สามารถปรับได้อย่างสะดวกด้วยการเคลื่อนที่สัมพันธ์ตามแนวแกนของเฟือง



รูปที่ 3.62 การขบกันของเฟืองเรียว

ข้อดี คือ

- 1. Backlash ทั้งหมด ยกเว้น Backlash ของส่วนประกอบที่แปรตามการหมุนถูก

กำจัด

- 2. การปรับแต่งไม่ต้องใช้ความชำนาญมากเป็นพิเศษ
- 3. ชิ้นส่วนสามารถแลกเปลี่ยนซึ่งกันและกันได้
- 4. สามารถหาอัตราส่วนการสัมผัสเต็มที่ได้ โดยไม่คำนึงถึงความเผื่อของระยะ

ห่างระหว่างจุดศูนย์กลาง

ข้อเสีย คือ

- 1. สำหรับเครื่องจักรที่ใช้สร้างเฟืองที่เป็นมาตรฐานอยู่แล้วจะต้องนำมาดัดแปลงโดยการใส่อุปกรณ์พิเศษเข้าไป
- 2. ต้องมีการตรวจสอบการเข้าชุดกันของเฟืองหลัก
- 3. ต้องมีเนื้อที่สำหรับการเคลื่อนที่ในแนวแกนในการติดตั้ง

ข้อเสนอแนะสำหรับการควบคุม Backlash

การควบคุม Backlash นอกเหนือจากเทคนิคในการออกแบบแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่ต้องนำมาประกอบการตัดสินใจด้วยคือ

1. ผู้ออกแบบควรระลึกอยู่เสมอว่าเราสามารถที่จะใช้ระยะเพื่อกันแหล่งกำเนิด Backlash ที่ถูกควบคุม ยกตัวอย่างเช่น การเพื่อบขนาดของเฟือง ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางเฟือง ถือว่าสามารถตัดทิ้งได้ อย่างไรก็ตามต้องพิจารณาถึงธรรมชาติของแหล่งกำเนิด Backlash แต่ละแหล่งด้วย ตัวอย่างเช่นในการปรับจุดศูนย์กลางของเฟือง แหล่งกำเนิด Backlash ที่แปรตามการหมุนไม่สามารถกำจัดได้

2. ในการไม่คิดระยะเพื่อที่ให้ประโยชน์สูงสุดต่อการควบคุม Backlash ต้องมีการพิจารณาผลเสียที่เป็นไปได้ สำหรับจุดศูนย์กลางที่ถูกยึดและ Spring-Load Scissor Gear การเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างจุดศูนย์กลางมาก ๆ สามารถทำให้อัตราส่วนการสัมผัสต่ำเกินไป

3. การควบคุม Backlash ทำให้ค่า Backlash คงที่ และน่าเชื่อถือ เทคนิคในการควบคุมที่ดีที่สุด จะลด Backlash ลงได้

4. เทคนิคในการควบคุม Backlash มีประโยชน์อย่างยิ่งในชุดเฟืองที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง

บทที่ 4

ทฤษฎีการทำงานของวงจร

1. บล็อกไดอะแกรม

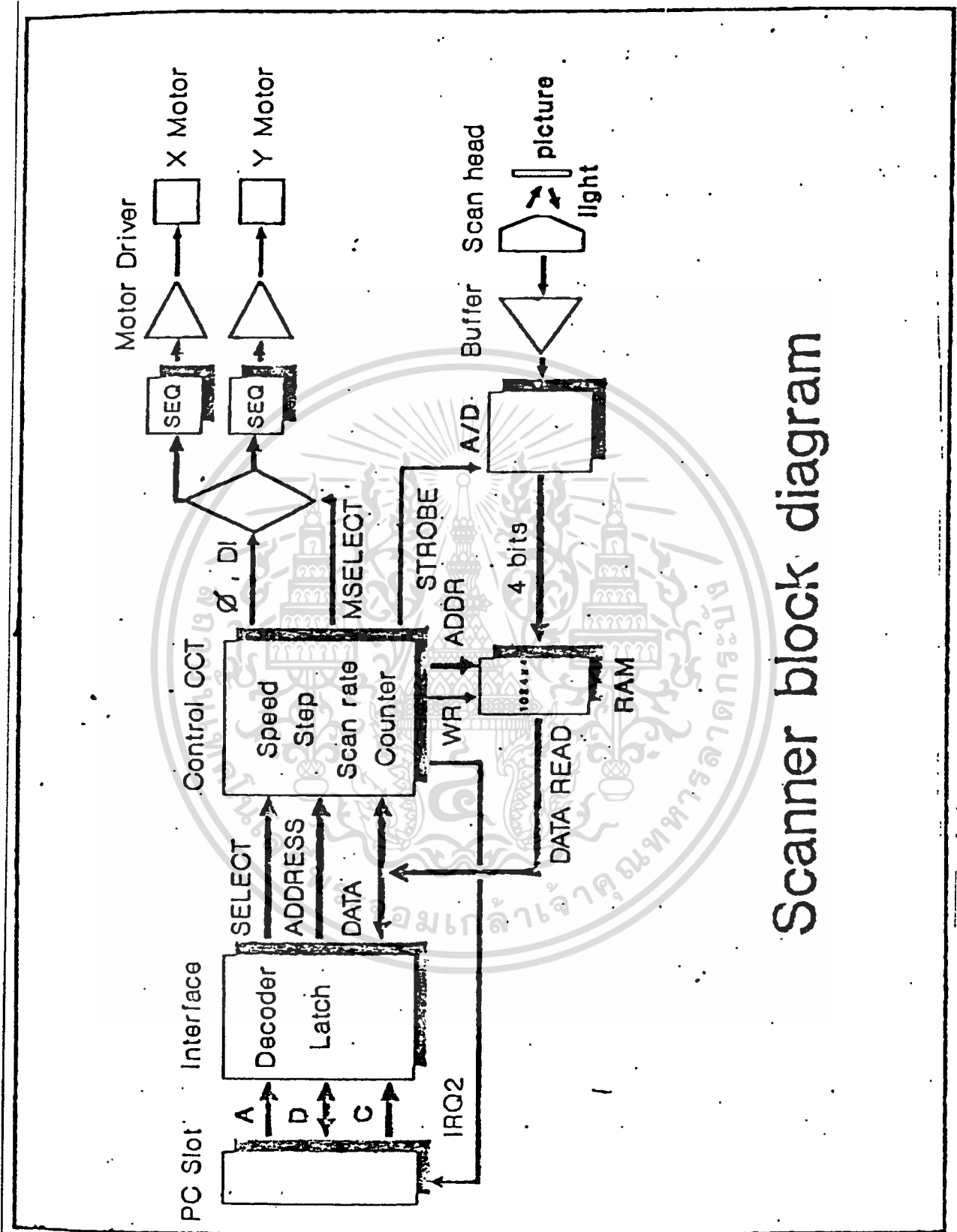
ประกอบด้วยส่วนที่อินเตอร์เฟสกับคอมพิวเตอร์ ส่วนที่ควบคุมการหมุนของมอเตอร์ และส่วนที่ทำหน้าที่อ่านข้อมูลมาเก็บไว้ในหน่วยความจำและส่วนแสดงผล Display

บล็อกไดอะแกรมแรกจาก PC Slot จะส่งสัญญาณมาให้วงจร Interface 3 ชุด คือ Address Data และ Interface ประกอบด้วย Decoder และ Latch ในส่วนควบคุมมอเตอร์จะมีการควบคุมทั้ง Speed , Step หรือ ความละเอียดของการสแกนทางแกน Y , Scan Rate หรือ ความละเอียดของการสแกนในทางแกน X และมี Counter ส่วนการควบคุมมอเตอร์จะสามารถควบคุมทั้งเฟสและทิศทางการหมุน และมีสัญญาณเลือกมอเตอร์ (Motor Select) เนื่องจากในการสแกนมอเตอร์จะสลับกับการหมุน คือ มอเตอร์ในแกน X หมุนไปจนครบ 1 บรรทัด มอเตอร์ในแกน Y จะหมุน 1 Step เพื่อเลื่อนบรรทัด และมอเตอร์ในแกน X จะหมุนเพื่อสแกนบรรทัดต่อไป สัญญาณที่ได้จากวงจร Control จะต้องผ่านวงจร Sequential เพื่อจัดลำดับของการกระตุ้นให้มอเตอร์ทำงาน และผ่านวงจร Driver เพื่อนับกระแสให้สูงเพื่อที่ทำให้มอเตอร์มีแรงบิดสูงพอที่จะขับส่วนต่าง ๆ ของแท่นสแกน ให้เคลื่อนที่ไปตามที่เราต้องการ

ในส่วนของหัวสแกนจะแปลงสัญญาณภาพมาอยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้า และผ่าน A/D เก็บสัญญาณไว้ใน RAM และส่งกลับไปแสดงบนจอ Display

การอ่านภาพใช้หัวสแกนที่เป็นอุปกรณ์ประเภท ออปโตคัปเปออร์ ซึ่งประกอบด้วย โฟโตไดโอดและโฟโตทรานซิสเตอร์ ซึ่งโฟโตไดโอดจะส่งแสงอินฟาเรดไปยังภาพ และโฟโตทรานซิสเตอร์จะเป็นตัวรับแสงที่สะท้อนภาพ ซึ่งปริมาณแสงสะท้อนขึ้นอยู่กับ

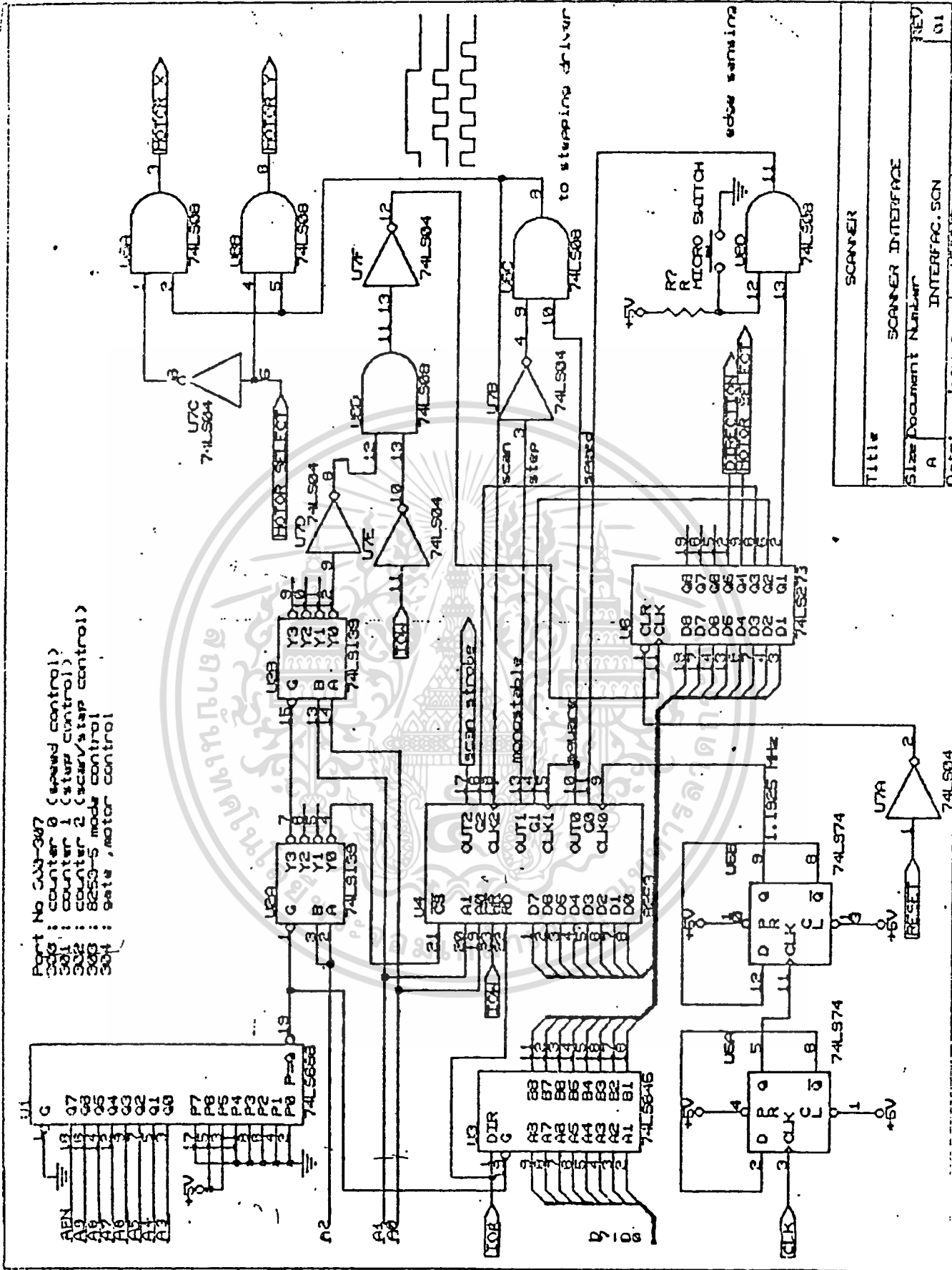
1. พื้นผิวของกระดาษ ถ้าขรุขระมากปริมาณแสงสะท้อนจะน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษผิวเรียบ
2. ระยะระหว่างภาพ กับ ออปโตคัปเปออร์ ปริมาณแสงจะได้สูงสุดเมื่อภาพอยู่ห่างจาก ออปโตคัปเปออร์ เท่ากับระยะโฟกัส
3. สีของภาพ พื้นผิวสีขาวจะสะท้อนแสงมากกว่าพื้นผิวสีดำ



Scanner block diagram

รูปที่ 2.1 Scanner Block Diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 Scanner Interface

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SCANNER	
Title	SCANNER INTERFACE
Size Document Number	INTERFAC.SCN
Date:	JANUARY 1988
REV	01

2. วงจรอินเทอร์เฟส

เป็นวงจรเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอมพิวเตอร์หรือไมโครโปรเซสเซอร์สำหรับการติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกกับไมโครคอมพิวเตอร์ใช้ Address 10 เส้น โดย A9 ต้องเป็น 1 เมื่อต้องการให้เป็นเอาต์พุตพอร์ท (อินพุตพอร์ทจะไม่ขึ้นกับ A9) ดังนั้นจึงต้องเลือกพอร์ทเบอร์ 300H-307H และเพื่อความสะดวกในการออกแบบวงจรและเขียนโปรแกรม วงจรนี้ประกอบด้วย U1, U2, U3 โดย U1 (74 LS 688) ทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดพอร์ทใน 2 หลักแรก คือ 30 (0110 0000) และ U2, U3 จะเป็นตัว Decoder เพื่อเลือกเบอร์พอร์ทในหลักสุดท้ายคือ 0-7 (0000-0111)

การทำงานของ 74 LS 688 คือ เมื่อ A9-A3 (Q7-Q0) = P7-P0 จะให้ลอจิกเป็น "0" ซึ่งในวงจรนี้ถ้าต้องการให้เอาต์พุตเป็นลอจิก "0" จะต้องมีลอจิกดังนี้

ตาราง 4.1 แสดงการอ้างพอร์ท

A9	A8	A7	A6	A5	A4	A3
1	1	0	0	0	0	0

ซึ่งก็คือ การอ้างพอร์ทใน 2 หลักแรก เป็น 30 ดังที่กล่าวมาแล้ว สำหรับ U2 (74 LS 139) เป็น Decoder โดยขา A และ B จะต่อกับ A2 ซึ่งหมายความว่า ถ้า A2 เป็น 0 (A และ B = 0) Y0 จะมีลอจิกต่ำเมื่อ A2 เป็น 1 Y3 จะถูกเลือกแทนคือมีลอจิกต่ำ และไป Enable U2B ให้ถอดรหัส A1 และ A0 ออกเป็น 4 พอร์ทอีกที โดยพอร์ทต่างๆจะถูกใช้งาน ดังต่อไปนี้

ตาราง 4.2 แสดงหน้าที่ของพอร์ตต่าง ๆ (ส่วนพอร์ตเบอร์
305-307 จะไม่ได้ใช้)

PORT NO.	FUNCTION
300 H	วงจร Number 0 (Speed Control)
301 H	วงจร Number 1 (Step Control)
302 H	วงจร Number 2 (Scanrate Control)
303 H	8253-5 Mode Control
304 H	Motor Selected , Direction

ส่วนข้อมูลที่โปรแกรมจากไมโครคอมพิวเตอร์หรือไมโครโปรเซสเซอร์จะถูกส่งมายัง U3 (74 LS 645) ซึ่งเป็น Bus Transciever หรือ Buffer ซึ่งจะกำหนดทิศทางของข้อมูลได้ โดยถ้าขา \bar{E} เป็น 0 ข้อมูลจะถูกส่งจาก B ไปยัง A ถ้าเป็น 1 จะส่งจาก A ไปยัง B ในกรณีนี้ขา IOR จะเป็น 1 และขา G เป็นขา Enable

3. วงจรควบคุม

วงจรถูกประกอบด้วย U4, U5, U6, U7 และ U8 โดยจะเริ่มกล่าวถึง U6 ซึ่งเป็น Latch แบบ Positive-edge Triggered ก่อน โดยมีแผนภูมิเวลาดังรูป

เมื่อมีการ Out มาที่ Port 304 H ขา Y_0 ของ U2B เป็น 0 และ IOW เป็น 0 จะทำให้ขา 12 ของ U7F หรือขา CLK ของ U6 เป็น 1 ซึ่งทำให้เกิดสัญญาณขอบขาขึ้นไป Latch ข้อมูลใน U3 ไว้ ซึ่งแต่ละบิตจะนำไปควบคุมส่วนต่างๆ ดังนี้

ตาราง 4.3 แสดงการนำข้อมูลใน Latch ไปควบคุมส่วนต่าง ๆ

Q1	จะต่อไปยัง G0 ซึ่งจะควบคุมวงจร Number 0 ของ 8253
Q2	จะต่อไปยัง G1 ซึ่งจะควบคุมวงจร Number 1 ของ 8253
Q3	จะต่อไปยัง G2 ซึ่งจะควบคุมวงจร Number 2 ของ 8253
Q4	เป็นสัญญาณ Motor Select ถ้าเป็น 0 จะเลือกมอเตอร์ X เป็น 1 จะเลือกมอเตอร์ Y
Q5	Direction ใช้กำหนดทิศทางของมอเตอร์ ถ้าเป็น 0 จะหมุน CW ถ้าเป็น 1 จะหมุน CCW
Q6	Unused
Q7	Unused
Q8	Unused

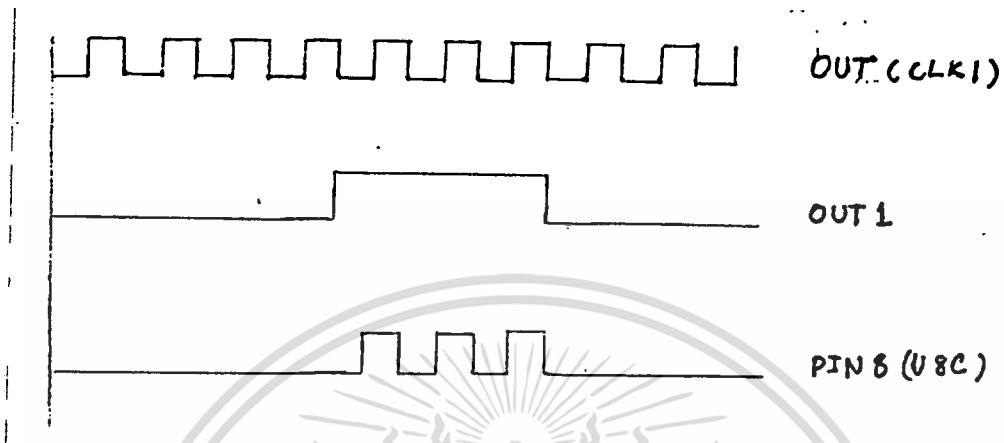
ส่วนสำคัญที่สุดของวงจรควบคุมนี้เกี่ยวกับวงจรถ่ายการใช้ 8253-5 Programable Intervaltimer ซึ่งมีวงจรมัน 16 BIT 3 ตัว สามารถโปรแกรมให้ทำงานได้อย่างอิสระถึง 6 โหมด รายละเอียดของไอซีเบอร์นี้จะอยู่ในส่วนหลังความถี่ที่ใช้งานได้สูงสุดประมาณ 4.77 KHz จะใช้ D-Flipflop 2 ตัวต่อเป็น Toggle สองภาค ซึ่งใช้หารความถี่จาก PC Slot จะได้ความถี่ประมาณ 1.1925 MHz นำไปต่อกับขา CLK ของ 8253 เพื่อเป็นความถี่มูลฐานให้วงจรมันต่อไป

วงจร Number 0 ของ 8253 จะถูกโปรแกรมโดย D7-D0 ให้เป็น Square Wave Generator (Mode 3) ให้ความถี่ที่ขา Out 0 ออกมา และจะต่อไปยัง CLK1 เพื่อเป็น Clock ให้วงจรมัน Number 1 ซึ่งถูกโปรแกรมเป็น Monostable (Mode 1) โดยความยาวของ Mode จะโปรแกรมได้เช่นกัน ดังนั้นจะเหมือนกับการนับพัลส์ที่ส่งมาจากวงจรมัน Number 0 โดยเริ่มนับที่ขอบขาขึ้นของขา Q1 ซึ่งเอาท์พุท Out1 จะไป And กับ Out 0 จะได้ Pulse Train ที่มีความถี่และจำนวน Pulse ตามต้องการ

สัญญาณจาก U8C จะต่อไปยังวงจรมันเลือก โดยเมื่อสัญญาณ Motor Select เป็น "0" จะผ่านสัญญาณจาก U8C นี้ไปยังวงจรมัน Sequencer ของมอเตอร์ X เมื่อสัญญาณ Motor Select เป็น "1" สัญญาณนี้จะถูกส่งไปยังวงจรมัน Sequencer ของแกน Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

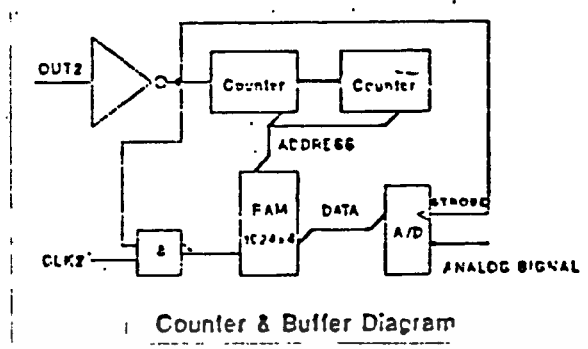
ส่วนสัญญาณจากวงจร Number 0 เป็นวงจร Speed ของ Motor และ สัญญาณจากวงจร Number 1 จะเป็นตัวควบคุม Step ส่วนในวงจร Number 2 จะถูกโปรแกรมให้อยู่ใน Mode 2 (Rate Generator) ซึ่งรับสัญญาณ CLK จากสัญญาณทริกของวงจร Sequencer ซึ่งจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3

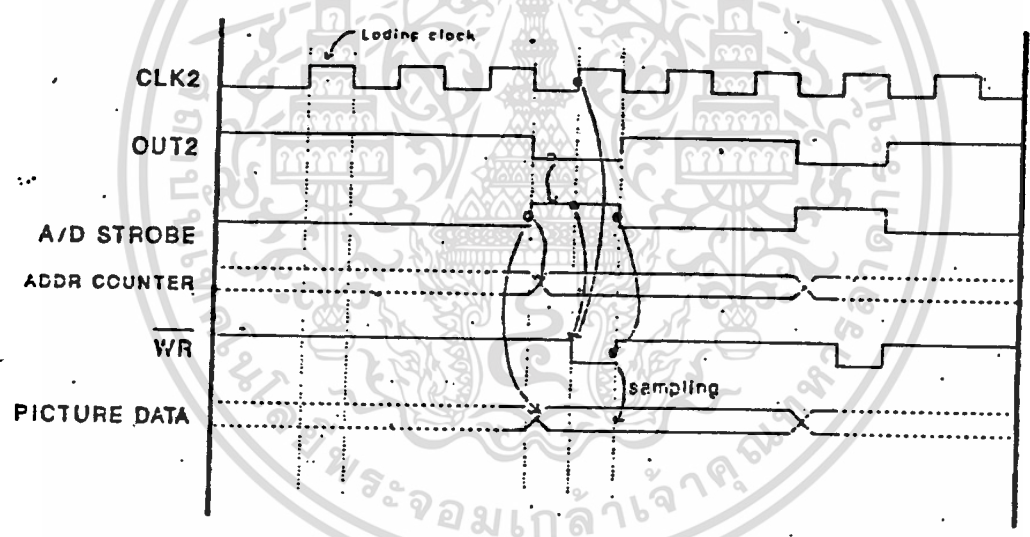
วงจรส่วนการเขียน และแปลงข้อมูลลงสู่ RAM ดังภาพ 4.4 อธิบายได้ว่าเมื่อมอเตอร์เคลื่อนไปเท่ากับ $n-1$ Step ขา Out 2 มีลอจิกเป็น 0 ซึ่งขอบขาลงจะไปทริกให้ Address Counter เพิ่มอีก 1 และไปยัง Strobe A/D ให้แปลงข้อมูลอนาลอกเป็นดิจิตอล 4 BIT ออกสู่ Data Bus ขณะที่ Out 2 ยังเป็น 0 อยู่ นั้น เมื่อสัญญาณ CLK ของวงจร Number 2 เกิดขอบขาขึ้น ขา WR จะถูกทริกเป็น 0, และกลับมาเป็น 1 เมื่อ CLK กับ Out 2 กลายเป็น 1 ทำให้เกิดการเขียนข้อมูลลงใน RAM ที่ขอบสัญญาณนี้ และสัญญาณนี้จะกลับเป็น 1 การทำงานข้างต้นจะเกิดขึ้นอีกจนสิ้นสุดการสแกนใน 1 Line ซึ่งโปรแกรมจะอ่านข้อมูลจาก RAM มาเก็บไว้ใน PC และจะเคลียร์ Address Counter เพื่อใช้เป็นทีเก็บข้อมูลชั่วคราวในบรรทัดต่อไป

สำหรับความจุของ RAM จะขึ้นกับความละเอียดของภาพใน 1 Line เช่นที่ ความละเอียด 1000 จุดต่อนิ้ว หรือ $8.5 \times 1000 = 850$ จุดต่อบรรทัด ดังนั้นจึงใช้ RAM ขนาด $1k \times 4 = 4k$ ก็พอ ถ้าต้องการความละเอียดมากกว่านี้ก็ต้องต่อ RAM เพิ่มให้ได้ความจุตามต้องการ



Counter & Buffer Diagram

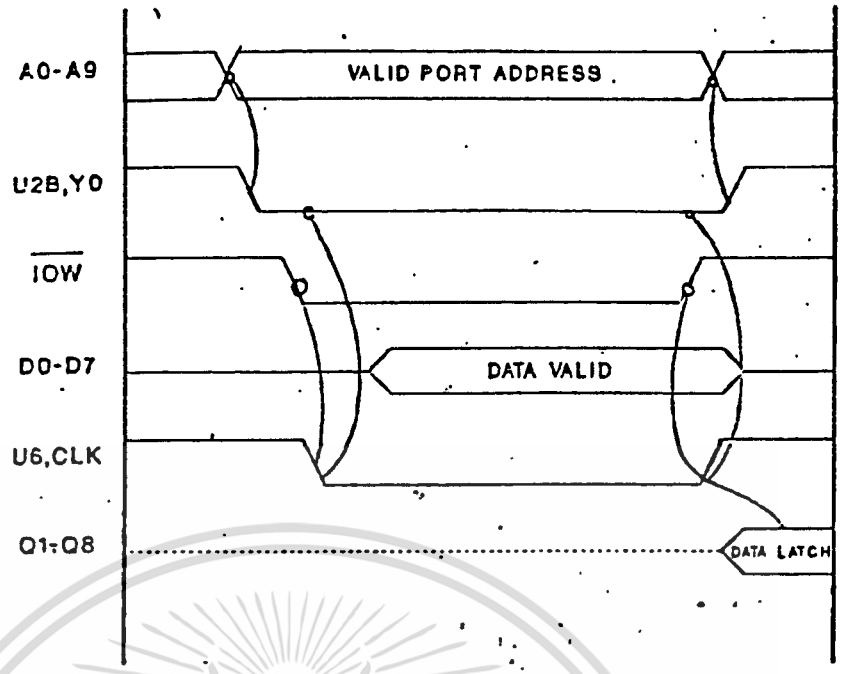
รูปที่ 4.4 แสดงการนำสัญญาณเข้าไปเก็บไว้ใน RAM



Scan Strobe Timing Diagram

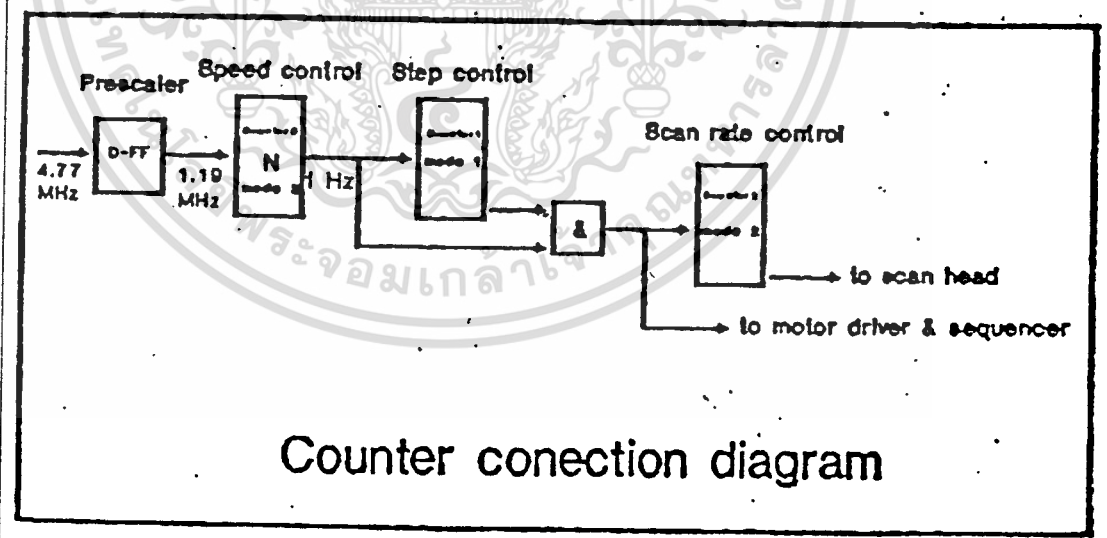
รูปที่ 4.5 แสดงแผนภูมิเวลาของการสแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Data Latch Timing Diagram

รูปที่ 4.6 แผนภูมิ เวลาแสดงการแลกข้อมูล



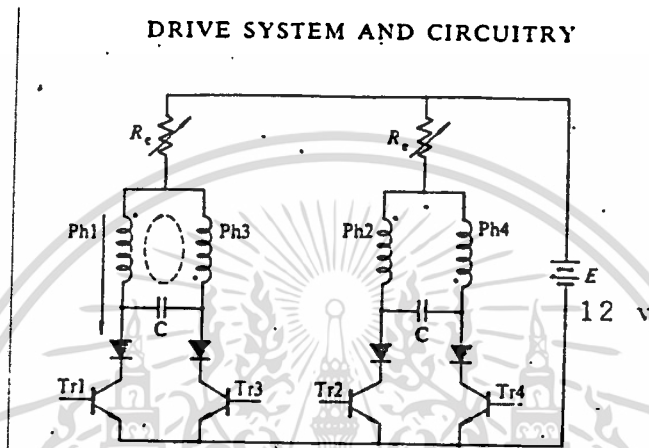
Counter conection diagram

รูปที่ 4.7 บล็อกไดอะแกรมแสดงการต่อวงจรนับของ 8253

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. วงจรขับมอเตอร์

Stepping Motor ที่ใช้นี้ต้องการไฟเลี้ยง 12 V ความต้านทานขดลวด 20 Ohms ดังนั้นจึงต้องขับกระแสให้ถึง 0.6 A และมีมุมต่อสลับเท่ากับ 1.8 องศา โดยจะกระตุ้นแบบสองเฟส เพื่อลดการสั่น (Damp) และเพิ่มแรงบิด เพื่อเพิ่มความแน่นของตำแหน่ง วงจรขับกระแสใช้วิธี Condensor Superior ดังรูปที่ 4.8



รูป 4.8 แสดงวงจรขับมอเตอร์

จากวงจรดังรูป กำหนดให้

$$E = 12 \text{ V}$$

$$R_c = 0.2 \text{ Ohms}$$

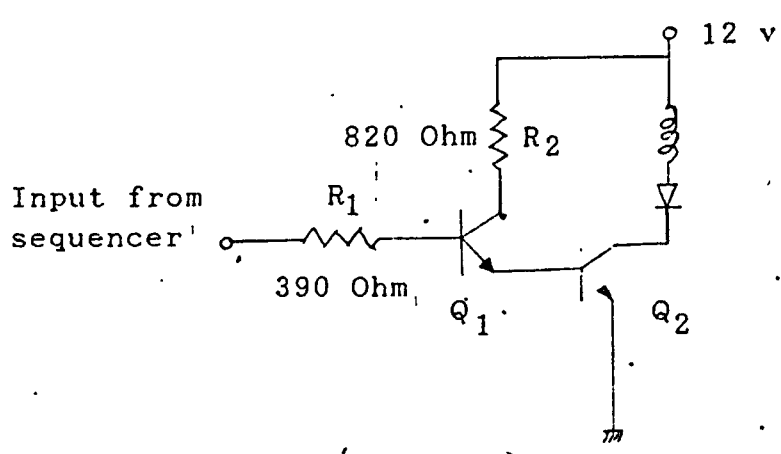
$$C = 2.22 \text{ } \mu\text{F}$$

Diode ใช้เบอร์ 1N4001

Tr ใช้เบอร์ TIP31

สำหรับ C ที่ต่อกับ PH1 และ PH3 จะเป็นตัวป้องกันทรานซิสเตอร์ ในช่วงที่มัน off โดยจะ Absorb กระแสจากขดลวด และทำหน้าที่เป็น Electrical Damper เพื่อให้กระแสไหลวน Loop และเกิด Joule Heat ในขดลวด ค่า C ยิ่งน้อยแรงบิดจะยิ่งมาก ในโครงการนี้จะใช้ค่า C ประมาณ 0.22 μF , 100 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดงวงจรขับกระแส

กระแสที่ต้องการคือ 0.6 A

Q1 2N2222 มีค่า $B_1 = 100$

Q2 TIP31 มีค่า $B_2 = 20$

I_{c2} คือ ค่ากระแสที่เราต้องการ

$$I_{b2} = 0.6 / 20 = 30 \text{ mA}$$

$$I_{b2} = b1 * I_{b1} = I_{c1}$$

$$I_{b1} = 30 / 100 = 0.3 \text{ mA}$$

I_{b1} คือ กระแสสูงสุดที่ได้จากวงจรควบคุมมอเตอร์

ถ้า $V_{on} = V_{max}$ ที่ได้จากวงจรควบคุม ซึ่งประมาณ 2.4 V

$$2.4 = 0.3R_1 + 0.6 + 0.6$$

$$R_1 = 400 \text{ Ohms} \text{ ดังนั้นจะให้ } R1 = 390 \text{ Ohms}$$

5. วงจรถวลคุมมอเตอร์ (Sequencer)

วงจรมีทำหน้าที่จัดลำดับการทริก Stepping Motor ให้หมุนไปตามทิศทางที่ต้องการด้วย Mode การทริกที่กำหนด ในโครงการนี้ใช้การทริกแบบสองเฟส แสดงวงจรมีรูปที่ 4.10

โปรแกรมควบคุมการทำงานของ Stepping Motor โดยใช้ Singleboard

PROGRAM_MAIN

```
                                ORG 2000H
                                LD  C,N
LOOP_0                          LD  B,M
LOOP_1                          CALL X_MOVE
                                OUT (07H),A
                                CALL DELAYTIME_1
                                LD  A,DATA_Y1
                                OUT (04H),A
                                CALL DELAYTIME_2
                                DJNZ LOOP_1
                                DEC  C
                                JR  NZ,LOOP_2
                                CALL DELAYTIME_3
LOOP_2                          LD  C,N
                                LD  B,M
LOOP_3                          OUT (07H),A
                                CALL DELAYTIME_1
                                LD  A,DATA_Y-1
                                OUT (04H),A
                                CALL DELAYTIME_2
                                DJNZ LOOP3
                                DEC  C
                                JR  NZ,LOOP2
                                END
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PROGRAM_MOVE_X

```

                                ORG 2050H
                                PUSH BC
                                LD C,03H
LOOP_PO                          LD B,FFH
LOOP_P1                          OUT (07H),A
                                CALL DELAYTIME_1
                                LD A,DATA_X1
                                OUT (04H),A
                                CALL DELAYTIME_2
                                DJNZ LOOP_P1
                                DEC C
                                JR NZ,LOOP_PO
                                CALL DELAYTIME_3
                                LD C,03H
LOOP_P2                          LD B,FFH
LOOP_P3                          OUT (07H),A
                                CALL DELAYTIME_1
                                LD A,DATA_X_1
                                OUT (04H),A
                                CALL DELAYTIME_2
                                DJNZ LOOP_P3
                                DEC C
                                JR NZ,LOOP_P2
                                CALL DELAYTIME_3
                                POP BC
                                RET
PROGRAM_DELAYTIME_1 ORG 3000H
                                PUSH BC

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

                                LD    C,N
LOOP_G1                        LD    B,M
LOOP_G0                        NOP
                                NOP
                                NOP
                                NOP
                                NOP
                                NOP
                                DJNZ LOOP_G0
                                DEC  C
                                JR   NZ,LOOP_G1
                                POP  BC
                                RET
PROGRAM_DELAYTIME_3
                                ORG  3020H
                                PUSH BC
                                LD   C,N
LOOP_G3                        LD   B,M
LOOP_G2                        NOP
                                NOP
                                NOP
                                CALL DELAYTIME_1
                                NOP
                                NOP
                                NOP
                                DJNZ LOOP_G2
                                DEC  C
                                JR   NZ,LOOP_G3
                                POP  BC
                                RET

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PROGRAM_DELAYTIME_3

```

                                ORG 3040H
                                PUSH BC
                                LD C,N
LOOP_G5                          LD B,M
LOOP_G4                          NOP
                                NOP
                                NOP
                                CALL DELAYTIME_2
                                NOP
                                NOP
                                NOP
                                DJNZ LOOP_G4
                                DEC C
                                JR NZ, LOOP_G5
                                POP BC
                                RET
DATA_X1                          EQU 03H
DATA_X-1                        EQU 13H
DATA_Y1                          EQU 0BH
DATA_Y-1                        EQU 1BH
N                                EQU AAH
M                                EQU BBH
DELAYTIME_1                      EQU 3000H
DELAYTIME_2                      EQU 3020H
DELAYTIME_3                      EQU 3040H
X_MOVE                          EQU 2050H
                                END

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การคำนวณและการเลือกในส่วนต่างๆ

D.C. motor ขั้วหัวเจาะ

จากสูตร

$$M = K f^{0.8} d^{1.8}$$

$$T = 2 K (f+d)^{0.8} + 625 d^2$$

$$P = \frac{M N}{63,025}$$

63,025

โดยที่

M : แรงตัดแบบโมเมนต์หรือแรงบิด (lb-ft)

T : แรงตัดแบบเบี่ยงเบน (lb)

P : แรงที่จำเป็นสำหรับการตัด (Hp)

N : จำนวน รอบต่อนาที (r/min)

f : อัตราการป้อน (in/r)

d : เส้นผ่านศูนย์กลางดอกสว่าน

ตารางค่า K

ชนิดวัสดุ	ความแข็ง BHN	K
เหล็กกล้า	200	24,000
เหล็กกล้า	300	31,000
เหล็กกล้า	400	34,000
Al	-	7,000
Mg ผสม	-	4,000
ทองเหลือง	-	14,000
ทองเหลือง-ตะกั่ว	-	7,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือกใช้ D.C. motor 20,000 r/min

$$\text{ถ้า อัตราการป้อน } 0.5 \text{ c.m/s} = \frac{0.5 \times 10^{-2}}{2.54 \times 10^{-2}} \text{ in/s}$$

$$\text{ขนาดดอกสว่าน } f \text{ m.m} = \frac{f \times 10^{-3}}{2.54 \times 10^{-2}} \text{ in}$$

$$K \text{ ของทองแดง} \approx K \text{ ของทองเหลือง-ตะกั่ว} = 7,000$$

จะได้

$$\begin{aligned} M &= K f^{0.8} d^{1.8} \\ &= 7,000 \left[\frac{0.5 \times 10^{-2}}{2.54 \times 10^{-2}} \times \frac{60}{20,000} \right]^{0.8} \left[\frac{10^{-3}}{2.54 \times 10^{-2}} \right]^{1.8} \\ &= 8.1188 \times 10^{-4} \text{ lb-ft} \\ &= 8.1188 \times 10^{-4} \times 1.355818 = 1.101 \times 10^{-3} \text{ N m} \\ T &= 2K f^{0.8} d^{0.8} + 625 d^2 \\ &= 2 \times 7,000 \left[\frac{0.5 \times 10^{-2}}{2.54 \times 10^{-2}} \times \frac{60}{20,000} \right]^{0.8} + 625 \left[\frac{10^{-3}}{2.54 \times 10^{-2}} \right]^2 \\ &= 110.432 \text{ lb} = 110.432 \times 4.44822 \text{ N} \\ &= 491.226 \text{ N} \\ P &= \frac{M N}{63,025} = \frac{8.1188 \times 10^{-4} \times 20,000}{63,025} \text{ Hp} \\ &= 2.576 \times 10^{-4} \text{ Hp} = 2.576 \times 10^{-4} \times 7.457 \times 10^2 \text{ Watt} \\ &= 0.192 \text{ Watt} \end{aligned}$$

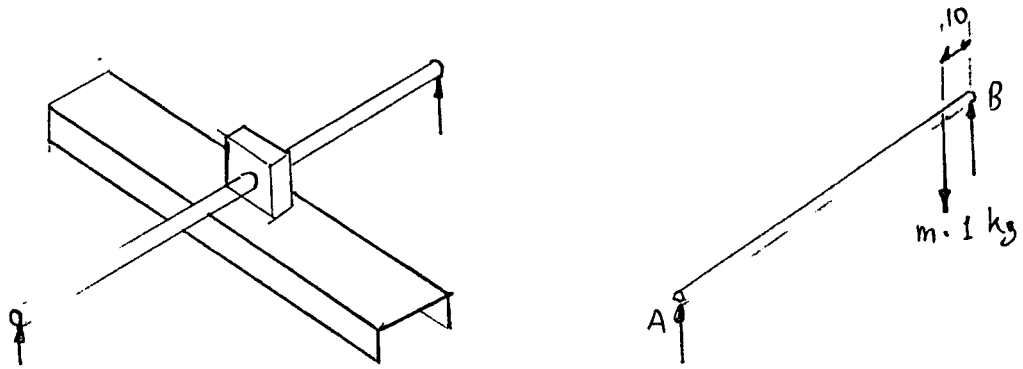
คำนวณผลกรับขุดหัวเจาะ

เลือกสกรูล่งกำลังสี่เหลี่ยมคางหมู M 10

ระยะพิตช์ 2 mm , เส้นผ่านศูนย์กลาง (d) 7.5 mm

ทำจากวัสดุ S 45C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จากตารางวัสดุ)

$$\sigma_u = 58 \times 10 \text{ N/mm}^2 = 580 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_v = 35 \times 10 \text{ N/mm}^2 = 350 \text{ N/mm}^2$$

$$M_{max} = X_{Aa} \times mg = 290 \times 1 \times 10 = 2,900 \text{ N mm}$$

จาก

$$I = \frac{\pi D^4}{64} \quad \text{และ} \quad C = \frac{d}{2}$$

$$\sigma_b = \frac{M C}{I} = \frac{2,900 \times 7.5/2}{\pi (7.5)^4}$$

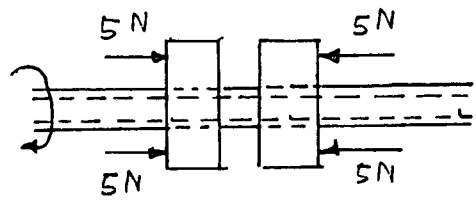
64

$$= 70 \text{ N/mm}^2$$

$$N = \frac{\sigma_v}{\sigma_b} = \frac{350}{70} = 5 \quad \text{ใช้ได้}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาโมเมนต์ของแรงบิดในสกรู



กำหนด ส.ป.ส ระหว่างผิวเกลียว (μ) = 0.3
 แรงกดรวมแก่ Backlask (ΣF) = ΣN
 = $(5+5) - [(-5)+(-5)]$
 = 20 N

จาก

$$F_f = \mu N = 0.3 \times 20 = 6 \text{ N}$$

$$T = \frac{F_f \cdot d}{2} = \frac{6 \times 8}{2} = 24 \text{ N mm}$$

กำหนด Safety factor = 3

$$T_{\text{แรงดึง}} = 3 \times 24 = 72 \text{ N mm}$$

$$= 720 \text{ g cm}$$

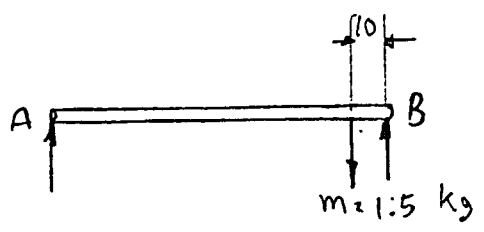
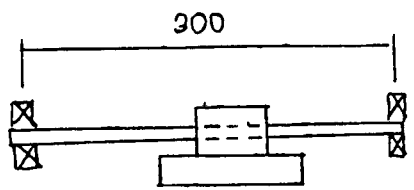
เลือกสกรูส่งกำลังสี่เหลี่ยมคางหมู M 8
 ระยะพิตซ์ 1.5 mm , เส้นผ่านศูนย์กลาง (d) 6.2 mm
 ทำจากวัสดุ S 45C

(จากตารางวัสดุ)

$$\sigma_u = 58 \times 10 \text{ N/mm}^2 = 580 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_y = 35 \times 10 \text{ N/mm}^2 = 350 \text{ N/mm}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$M_{max} = X_{Ao} \times mg = 290 \times 1.5 \times 10$$

$$= 4,350 \text{ N mm}$$

จาก

$$I = \frac{\pi D^4}{64} \text{ และ } C = \frac{d}{2}$$

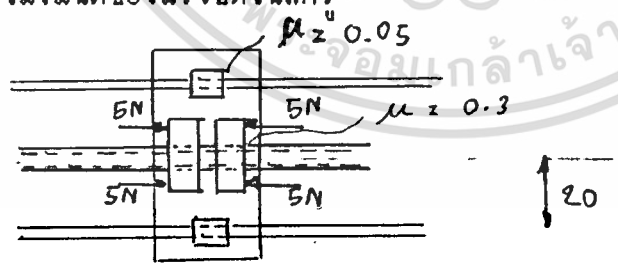
$$\sigma_b = \frac{M C}{I} = \frac{4,350 \times 6.2/2}{\frac{\pi (6.2)^4}{64}}$$

$$= 185.914 \text{ N/mm}^2$$

$$N = \frac{\sigma_y}{\sigma_b} = \frac{350}{185.914} = 1.88$$

ใช้ได้

หาโมเมนต์ของแรงบิดในสกร



กำหนด ส.ป.ส ระหว่างผิวเกลียว (μ) = 0.3

ส.ป.ส ระหว่างผิว Guide (μ_g) = 0.05

แรงกดรวมแก่ Backlask (ΣF) = ΣN

$$= (5+5) - [(-5) + (-5)]$$

$$= 20 \text{ N}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คิดที่สกรู

จาก

$$F_f = \mu N = 0.3 \times 20 = 6 \text{ N}$$

$$T = \frac{F_f \cdot d}{2} = \frac{6 \times 7}{2} = 21 \text{ N mm}$$

คิดที่ Guide

$$N = \frac{21}{20} + \frac{15}{3} \text{ N} = 6.05 \text{ N}$$

$$F_{f, g} = \mu_g N = 0.1 \times 6.05 = 0.605 \text{ N}$$

$$\Sigma F_{f, g} = 2 \times 0.605 = 1.21 \text{ N}$$

คิดรวม

$$\Sigma F_f = F_f + \Sigma F_{f, g} = 6 + 1.21 \text{ N} = 7.21 \text{ N}$$

$$T = \frac{\Sigma F_f \cdot d}{2} = \frac{7.21 \times 7}{2} = 25.235 \text{ N mm}$$

กำหนด Safety factor = 3

$$T_{ใช้งาน} = 3 \times 25.235 = 75.705 \text{ N mm}$$

$$= 757.05 \text{ g cm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วน Control Position

เลือกใช้ Stepper motor ชนิด SMR 40 - 48

รายละเอียด

จำนวน step	=	48 step	(7.5 องศา/step)
เส้นผ่านศูนย์กลาง	=	42 mm	
สูง	=	21.8 mm	
เส้นผ่านศูนย์กลางเพลาน้ำหนัก	=	3 mm	
น้ำหนัก	=	140 mm	
โมเมนต์แรงบิด	=	680 g cm	
ความต้านทานในขดลวด	=	12 Ω	
ความต่างศักย์	=	12 V	

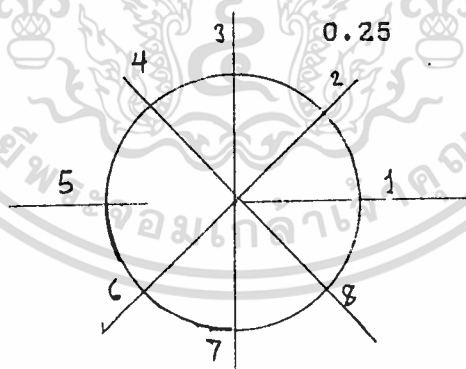
แกน X

ระยะพิทซ์ 2 mm

หมายความว่า สกรูหมุนไป 1 รอบ ทำให้ตำแหน่งตามแกนเปลี่ยนไป 2 mm

ต้องการความละเอียด 0.25 mm

ดังนั้น แบ่งสกรูออกเป็น $\frac{2}{0.25} = 8$ step



$$\begin{aligned} \text{อัตราทดของชุดเฟือง } m_w &= \frac{\text{จำนวน step ของ stepper motor}}{\text{จำนวน step ของ สกรู}} \\ &= \frac{48}{8} = 6 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือกใช้ เฟืองทองเหลือง ฟันเฟืองระบบ 20 FD (จากตารางวัสดุ)

$$\sigma_u = 40 \text{ ksi} = 40 \times 6.895 = 275.8 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_v = 18 \text{ ksi} = 18 \times 6.895 = 124.11 \text{ N/mm}^2$$

สมมติให้ฟันนิยามิ (N_u) = 10 ฟัน

จะได้ เฟือง (N_v) = $m_u N_u = 6 \times 10$
= 60 ฟัน

สมมติให้แรงกระทำที่ปลายฟัน (จากตารางค่าตัวประกอบรูปแบบของลูอิส)

$$Y_u = 0.201 \quad Y_v = 0.421$$

จาก $\sigma_u = \sigma_v = 275.8 \text{ N/mm}^2$

$$Y_u \sigma_u = 0.201 \times 275.8 = 55.436 \text{ N/mm}^2$$

$$Y_v \sigma_v = 0.421 \times 275.8 = 116.112 \text{ N/mm}^2$$

พบว่า $Y_u \sigma_u < Y_v \sigma_v$ ดังนั้นพิจารณาที่ ฟันนิยามิ

กำหนด $\omega = 2 \text{ rad/s}$

จาก ความเร็วพิคซ์ $V = \omega r = 2 \times 5 \times 10^{-3}$

$$= 0.01 \text{ m/s}$$

เพราะว่า $V < 10 \text{ m/s}$,

$$K_v = \frac{3 + V}{3} = \frac{3 + 0.01}{3} = 1.0033$$

$$F_u = \frac{T_{ใช้งาน}}{r} = \frac{72}{5} = 14.4 \text{ N}$$

$$F_v = K_v F_u = 14.4 \times 1.0033 = 14.45 \text{ N}$$

สมมติให้ $K_f = 1.5$, ความหนาของเฟือง $b = 8 \text{ mm}$

โมดูล $m = 1$

$$F_u = \frac{\sigma_u b Y_u m}{K_f} = \frac{275.8 \times 8 \times 0.201 \times 1}{1.5}$$

$$= 295.65 \text{ N}$$

เพราะว่า $F_u > F_v$ ดังนั้นสามารถใช้ตามที่กำหนดไว้

$$d_u = m N_u = 1 \times 10 = 10 \text{ mm}$$

$$d_v = m N_v = 1 \times 60 = 60 \text{ mm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

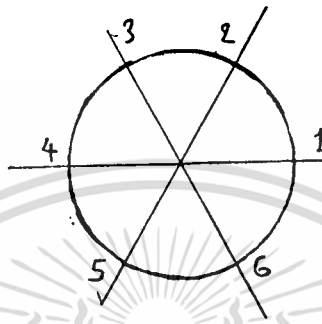
แกน ๗

ระยะพิตซ์ 1.5 mm

หมายความว่า สกรูหมุนไป 1 รอบ ทำให้ตำแหน่งตามแกนเปลี่ยนไป 1.5 mm

ต้องการความละเอียด 0.25 mm

ดังนั้น แบ่งสกรูออกเป็น $\frac{1.5}{0.25} = 6$ step



อัตราทดของชุดเฟือง $m_w = \frac{\text{จำนวน step ของ step motor}}{\text{จำนวน step ของ สกรู}}$

$= \frac{48}{6} = 8$

เลือกใช้ เฟืองทองเหลือง ฟันเฟืองระบบ 20 FD (จากตารางวัสดุ)

$\sigma_u = 40 \text{ ksi} = 40 \times 6.895 = 275.8 \text{ N/mm}^2$

$\sigma_y = 18 \text{ ksi} = 18 \times 6.895 = 124.11 \text{ N/mm}^2$

สมมุติให้พีเนียนมี (N_p) = 10 ฟัน

จะได้ เฟือง (N_g) = $m_w N_p = 8 \times 10$

= 80 ฟัน

สมมุติให้แรงกระทำที่ปลายฟัน (จากตารางค่าตัวประกอบรูปแบนของลูอิส)

$Y_u = 0.201 \quad Y_g = 0.421$

จาก $\sigma_u = \sigma_y = 275.8 \text{ N/mm}^2$

$$Y_{\sigma_{ps}} = 0.201 \times 275.8 = 55.436 \text{ N/mm}^2$$

$$Y_{\sigma_{ps}} = 0.421 \times 275.8 = 116.112 \text{ N/mm}^2$$

พบว่า $Y_{\sigma_{ps}} < Y_{\sigma_{ps}}$ ดังนั้นพิจารณาที่ $Y_{\sigma_{ps}}$

กำหนด $\omega = 2 \text{ rad/s}$

จาก ความเร็วพิทซ์ $V = \omega r = 2 \times 5 \times 10^{-3}$
 $= 0.01 \text{ m/s}$

เพราะว่า $V < 10 \text{ m/s}$,

$$K_v = \frac{3 + V}{3} = \frac{3 + 0.01}{3} = 1.0033$$

$$F_c = \frac{T_{\text{รับแรง}}}{r} = \frac{75.705}{5} = 15.141 \text{ N}$$

$$F_d = K_v F_c = 15.141 \times 1.0033 = 15.2 \text{ N}$$

สมมติให้ $K_f = 1.5$, ความหนาของเฟือง $b = 8 \text{ mm}$

โมดูล $m = 1$

$$F_b = \frac{\sigma_b b Y_m}{K_f} = \frac{275.8 \times 8 \times 0.201 \times 1}{1.5} = 295.65 \text{ N}$$

เพราะว่า $F_b > F_d$ ดังนั้นสามารถใช้ตามที่กำหนดไว้

$$d_p = m N_p = 1 \times 10 = 10 \text{ mm}$$

$$d_g = m N_g = 1 \times 60 = 60 \text{ mm}$$

เพลาลูกเบี้ยว

กำหนด $T = 1.101 \times 10^{-3} \text{ N m}$

$$R_u + R_v = 3 N \text{ ----- [I]}$$

รวมโมเมนต์ที่จุด A

$$\Sigma M = 0; (3 \times 70) - 140 \times R_u = 0$$

$$R_u = 1.5 N$$

แทนค่าใน [I]

$$R_v = 1.5 N$$

ดังนั้นโมเมนต์ดัดสูงสุด

$$M = 1.5 \times 70 = 105 N \cdot mm$$

เนื่องจากความเค้นดัด

$$\sigma_{max} = -\sigma_{min}$$

เพราะฉะนั้น

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} = 0$$

$$\sigma_n = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = \sigma_{max}$$

จากสมการ

$$\sigma_n = \frac{32 M}{\pi d^3} = \frac{32 \times 105}{\pi d^3} = \frac{1069.52}{d^3} N/mm^2$$

เนื่องจากโมเมนต์ดัดมีค่าคงที่ ทำให้ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากันตลอดรอบ

ผิวของเพลลา

ดังนั้น $\tau_n = 0$

$$\tau_m = \frac{16 T}{\pi d^3} = \frac{16 \times 1.101}{\pi d^3} = \frac{5.677}{d^3} N/mm^2$$

จากตาราง ง-1

$$\text{ได้ } K_c = K_{r_s} = 1.3$$

จากตาราง ข-1)

$$\sigma_u = 70 \text{ ksi} = 70 \times 6.895 = 482.65 N/mm^2$$

$$\sigma_v = 25 \text{ ksi} = 25 \times 6.895 = 172.375 N/mm^2$$

จากรูป ง-1

$$\text{ตัวประกอบผิว } K_u = 0.8$$

เพลลาต้องมีขนาดเล็กลงว่า 8 มม ;

$$K_v = 1.0$$

$$K_w = 1.0$$

$$\sigma_{su} = 0.5 \sigma_u = 0.5 \times 482.65 = 241.325 N/mm^2$$

$$\sigma_{su} = K_u K_v K_w \sigma_{su} = 0.8 \times 1 \times 1 \times 241.325$$

$$= 193.06 N/mm^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ทฤษฎีความเค้นสูงสุด

$$\tau_y = 0.5 \sigma_y = 0.5 \times 172.375 = 86.19 \text{ N/mm}^2$$

จากสมการ

$$\frac{1}{N} = \left[\left(\frac{\sigma_m + K_r \sigma_a}{\sigma_y} \right)^2 + \left(\frac{\tau_m + K_r \tau_a}{\tau_y} \right)^2 \right]$$

$$\sigma_m = \tau_m = 0$$

$$\frac{1}{N} = \left[\left(\frac{K_r \sigma_a}{\sigma_y} \right)^2 + \left(\frac{\tau_a}{\tau_y} \right)^2 \right]$$

ให้ $N = 1.5$

$$\frac{1}{1.5} = \left[\left(\frac{1.3 \times 1069.52}{193.46 \times d^3} \right)^2 + \left(\frac{5.607}{86.19 \times d^3} \right)^2 \right]$$

$$d = 2.064 \text{ mm}$$

เพราะฉะนั้น เลือกใช้เพลขนาด 5 mm



บทที่ 6

วิจารณ์

ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น

1. มีความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งเกิดขึ้น เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงจุดรวมมวล (C.G.) ของบางชิ้นส่วนตลอดเวลา
2. เกิดการเสียดสีของตัวนำ เป็นเหตุให้ต้องใช้แรงบิดของ Stepper motor มากขึ้น
3. ชุดแก้ Back lash ไม่สามารถทำงานได้ดังที่คาดไว้ เนื่องจากในขั้นตอนการสร้างใช้เครื่องมือที่ไม่ได้มาตรฐาน
4. ต้องใช้ทักษะในการใช้เครื่องมือมาก เนื่องจากเป็นงานที่ใช้ความละเอียดมาก
5. ไม่สามารถหา Stepper motor ตามชนิดที่ต้องการได้

ข้อเสนอแนะ

1. ในการแก้ไขความคลาดเคลื่อนของตำแหน่ง ควรเพิ่มตัวนำทางเพื่อบังคับให้ชิ้นส่วนนั้นเคลื่อนที่ในหนึ่งมิติเท่านั้น หรืออาจจะเปลี่ยนจากการใช้สกรูส่งกำลังมาใช้รอกและเส้นลวดแทน ซึ่งจะก่อให้เกิดสมดุลของแรงภายในชิ้นส่วนนั้นตลอดเวลา
2. ในการใช้เครื่องมือต่างๆ ควรปรึกษาผู้ที่มทักษะถึงเทคนิคต่างๆของเครื่องมือ
3. ควรเลือกใช้เครื่องมือที่ได้มาตรฐาน คือมีความผิดพลาดต่ำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค่าตัวประกอบรูปแบบของลูอิส

จำนวน ทิม	แรงกระทำที่ปลาย								แรงกระทำที่ใกล้ศูนย์กลาง			
	14½°FD		20°FD		20°Stub		25°		14½°FD		20°FD	
	Y	y	Y	y	Y	y	Y	y	Y	y	Y	y
10	0.176	0.056	0.201	0.064	0.261	0.083						
11	0.192	0.061	0.226	0.072	0.289	0.092						
12	0.210	0.067	0.245	0.078	0.311	0.099	0.242	0.077	0.355	0.113	0.415	0.133
13	0.223	0.071	0.264	0.083	0.324	0.103	0.258	0.082	0.377	0.120	0.443	0.141
14	0.236	0.075	0.276	0.088	0.339	0.108	0.270	0.086	0.399	0.127	0.468	0.149
15	0.245	0.078	0.289	0.092	0.349	0.111	0.286	0.091	0.415	0.133	0.490	0.156
16	0.255	0.081	0.295	0.094	0.360	0.115	0.298	0.095	0.430	0.137	0.503	0.160
17	0.264	0.084	0.302	0.096	0.368	0.117	0.311	0.099	0.446	0.142	0.512	0.163
18	0.270	0.086	0.308	0.098	0.377	0.120	0.324	0.103	0.459	0.146	0.522	0.167
19	0.277	0.088	0.314	0.100	0.386	0.123	0.336	0.107	0.471	0.150	0.534	0.170
20	0.283	0.090	0.320	0.102	0.393	0.125	0.349	0.111	0.481	0.153	0.544	0.173
21	0.289	0.092	0.326	0.104	0.399	0.127	0.365	0.116	0.490	0.156	0.553	0.177
22	0.292	0.093	0.330	0.105	0.404	0.129	0.377	0.120	0.496	0.158	0.559	0.178
23	0.296	0.094	0.333	0.106	0.408	0.130	0.390	0.124	0.502	0.160	0.565	0.180
24	0.302	0.096	0.337	0.107	0.411	0.132	0.403	0.128	0.509	0.162	0.572	0.183
25	0.305	0.097	0.340	0.108	0.416	0.133	0.415	0.132	0.515	0.164	0.580	0.184
26	0.308	0.098	0.344	0.109	0.421	0.135	0.428	0.136	0.522	0.166	0.584	0.186
27	0.311	0.099	0.348	0.111	0.426	0.136	0.418	0.133	0.528	0.168	0.588	0.187
28	0.314	0.100	0.352	0.112	0.430	0.137	0.409	0.130	0.534	0.170	0.592	0.189
29	0.316	0.101	0.355	0.113	0.434	0.138	0.412	0.131	0.537	0.171	0.599	0.191
30	0.318	0.101	0.358	0.114	0.437	0.139	0.418	0.133	0.540	0.172	0.606	0.193
31	0.320	0.101	0.361	0.115	0.440	0.140	0.421	0.134	0.554	0.173	0.611	0.195
32	0.322	0.101	0.364	0.116	0.443	0.141	0.428	0.136	0.547	0.174	0.617	0.196
33	0.324	0.103	0.367	0.117	0.445	0.142	0.430	0.137	0.550	0.175	0.623	0.198
34	0.326	0.104	0.371	0.118	0.447	0.142	0.434	0.138	0.553	0.177	0.628	0.200
35	0.327	0.104	0.373	0.119	0.449	0.143	0.437	0.139	0.556	0.177	0.633	0.201
36	0.329	0.105	0.377	0.120	0.451	0.144	0.443	0.141	0.559	0.178	0.639	0.203
37	0.330	0.105	0.380	0.121	0.454	0.144	0.446	0.142	0.563	0.179	0.645	0.205
38	0.333	0.106	0.384	0.122	0.455	0.145	0.450	0.143	0.565	0.180	0.650	0.207
39	0.335	0.107	0.386	0.123	0.457	0.146	0.454	0.144	0.566	0.181	0.655	0.209
40	0.336	0.107	0.389	0.124	0.459	0.146	0.460	0.146	0.570	0.182	0.659	0.210
43	0.339	0.108	0.397	0.126	0.467	0.147	0.463	0.147	0.574	0.183	0.668	0.212
45	0.340	0.108	0.399	0.127	0.468	0.149	0.469	0.149	0.579	0.184	0.678	0.214
50	0.346	0.110	0.408	0.130	0.474	0.151	0.478	0.152	0.588	0.187	0.694	0.221
55	0.352	0.112	0.415	0.132	0.480	0.153	0.485	0.154	0.596	0.190	0.704	0.224
60	0.355	0.113	0.421	0.134	0.484	0.154	0.490	0.156	0.603	0.192	0.713	0.227
65	0.358	0.114	0.425	0.135	0.488	0.155	0.496	0.158	0.607	0.193	0.721	0.229
70	0.360	0.115	0.429	0.136	0.493	0.157	0.502	0.160	0.610	0.194	0.728	0.231
75	0.361	0.115	0.433	0.138	0.496	0.158	0.508	0.161	0.613	0.195	0.735	0.233
80	0.363	0.116	0.436	0.139	0.499	0.159	0.510	0.162	0.615	0.196	0.739	0.235
90	0.366	0.117	0.442	0.141	0.503	0.160	0.516	0.164	0.619	0.197	0.747	0.237
100	0.368	0.117	0.446	0.142	0.506	0.161	0.521	0.166	0.622	0.198	0.755	0.240
150	0.375	0.119	0.458	0.146	0.518	0.165	0.531	0.169	0.635	0.202	0.778	0.247
200	0.378	0.120	0.463	0.147	0.524	0.167	0.538	0.171	0.640	0.204	0.787	0.250
300	0.382	0.122	0.471	0.150	0.534	0.170	0.550	0.175	0.650	0.207	0.801	0.255
แร็ค	0.390	0.124	0.484	0.154	0.550	0.175	0.568	0.180	0.660	0.210	0.823	0.262

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค่าความเค้นสถิตยใช้งานสำหรับใช้กับสมการของลูอิส

วัสดุ	σ		HB
	ksi	N/mm ²	
เหล็กหล่อสีเทา			
ASTM 25	8	55	174
ASTM 35	12	82	212
ASTM 50	15	103	223
เหล็กกล้าหล่อ (คาร์บอนต่ำ)			
0.2% C ไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน	20	138	180
0.2% C WQT	25	172	250
เหล็กกล้าคาร์บอนตีอัด (forged)			
SAE 1020 case hardened และ WQT	18	124	156
SAE 1030 ไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน	20	138	180
SAE 1035 ไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน	23	159	190
SAE 1040 ไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน	25	172	202
SAE 1045 ไม่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน	30	207	215
SAE 1045 ชุบแข็งโดย WQT	32	220	205
SAE 1050 ชุบแข็งโดย OQT	35	241	223
เหล็กกล้าผสม			
SAE 2320 case hardened และ WQT	50	345	225
SAE 2345 ชุบแข็งโดย OQT	50	345	475
SAE 3115 case hardened และ OQT	37	255	212
SAE 3145 ชุบแข็งโดย OQT	53	365	475
SAE 3245 ชุบแข็งโดย OQT	65	448	475
SAE 4340 ชุบแข็งโดย OQT	65	448	475
SAE 4640 ชุบแข็งโดย OQT	55	379	475

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-1 คุณสมบัติทางกลของเหล็กหล่อบางชนิด
(Mechanical Properties of Some Cast Ferrous Materials)

Identification Number or Specification	Modulus of Elast. in Tension, psi	Tensile Strength, ksi	Yield Strength, ksi	Elongation in 2 in., %	Hardness BHN	Endurance Limit, ksi	Modulus of Elast. in Compression, ksi	Compressive Strength, ksi	Shear Strength, ksi	Impact Strength, (Charpy), ft-lb
Cast Alloy Steels ^a										
Class 65,000	30 X 10 ⁶	68 ^c	38	32	137	32	—	—	—	60
Class 80,000	30 X 10 ⁶	86 ^c	54	24	170	39	—	—	—	48
Class 105,000	30 X 10 ⁶	110 ^c	91	21	217	53	—	—	—	58
Class 150,000	30 X 10 ⁶	158 ^d	142	13	311	74	—	—	—	30
Class 200,000	30 X 10 ⁶	205 ^d	170	8	401	88	—	—	—	14
Cast Carbon Steels										
Class 60,000 ^c	30 X 10 ⁶	63	35	30	131	30	—	—	—	12
Class 70,000 ^c	30 X 10 ⁶	75	42	27	143	35	—	—	—	30
Class 85,000 ^c	30 X 10 ⁶	90	55	20	179	39	—	—	—	26
Class 100,000 ^d	30 X 10 ⁶	105	75	19	212	45	—	—	—	40
Alloy Cast Irons										
Ni-Hard Type 2 ^e	25 X 10 ⁶	60	—	—	575	—	—	—	—	38
Duriron ^b	23 X 10 ⁶	16	—	—	520	—	—	—	—	3
Ni-Resist Type 1 ^f	16 X 10 ⁶	27	—	—	150	—	—	—	—	60
Cast Stainless Steels										
CB-30 ^g	29 X 10 ⁶	95	60	15	195	—	—	—	—	70
CF-8M ^h	28 X 10 ⁶	80	42	50	163	—	—	—	—	75
CF-20 ⁱ	28 X 10 ⁶	77	36	50	163	—	—	—	—	75
CN-7M ^j	24 X 10 ⁶	69	32	48	130	—	—	—	—	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-2 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาและเหล็กกล้าผสม
(ขึ้นทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25 มม)
(Mechanical Properties of Plain Carbon and Alloy Steels)

AISI Type	Condition	Tensile Strength, ksi	Yield Strength, ksi	Elongat. in 2 in., %	Reduction in Area, %	Hardness, BHN	Machinability (Based on 1112 = 100)
1010	HR	64	42	28	67	107	45
	CD	78	68	16	63	129	55
	CDA	64	48	28	65	131	55
1020	HR	65	43	36	59	143	50
	CD	78	66	20	55	156	65
	A	57	52	37	66	111	90
1030	N	64	50	36	68	131	75
	HR & turned	72	44	31	63	140	—
	CD	84	76	16	57	177	65
1040	A	67	50	31	58	126	—
	N	76	51	32	61	149	—
	HR	91	58	27	50	201	63
1045	CD	100	88	17	42	207	65
	A	75	51	30	57	149	—
	N	85	50	28	55	170	60
1050	HR	98	59	24	45	212	56
	CD	103	90	14	40	217	60
	A	90	55	27	54	174	60
1095	N	99	61	25	49	207	—
	HR	105	67	15	—	—	—
	CD	114	104	9	—	—	54
1118	A	92	43	24	40	187	—
	N	109	62	20	39	217	—
	HR	142	83	18	38	295	—
2330	A	95	38	13	21	192	—
	N	147	73	10	14	293	—
	HR	75	50	35	55	140	—
3140	CD	85	75	25	55	170	80
	A	65	41	35	67	131	80
	N	69	46	34	66	143	80
4130	CD	105	90	20	50	212	50
	A	86	61	28	58	179	50
	N	100	68	26	56	207	—
3140	CD	107	92	17	50	212	55
	A	100	61	25	51	197	55
	N	129	87	20	58	262	—
4130	HRA	86	56	29	57	183	65
	CDA	98	87	21	52	201	70
	N	97	63	26	60	197	50

SOURCE: ASME Handbook Material Properties, McGraw-Hill Book Co., 1954; Reverson Data Book, Joseph T. Reverson and Sons, Inc., 1965.

NOTE: HR = hot rolled, HRA = hot rolled annealed, CD = cold drawn, CDA = cold drawn annealed, HRN = hot rolled normalized, A = annealed, N = normalized.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-2 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาและเหล็กกล้าผสม
(ชนิดทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25 mm)
(Mechanical Properties of Plain Carbon and Alloy Steels)

AISI Type	Condition	Tensile Strength, ksi	Yield Strength, ksi	Elongat. in 2 in., %	Reduction in Area, %	Hardness, BHN	Machinability (Based on 1112 = 100)
4140	HRA	90	63	27	58	187	57
	CDA	102	90	18	50	223	66
	N	148	95	18	47	302	—
4340	HRA	101	69	21	45	207	45
	CDA	110	99	16	42	223	50
	N	185	126	11	41	363	—
4620	HR	85	63	28	64	183	58
	CD	101	85	22	60	207	64
	A	74	54	31	60	149	55
	N	83	53	29	67	174	—
4640	CDA	117	95	15	43	235	55
	A	98	63	24	51	179	55
	N	123	87	19	51	248	—
5120	CD	92	77	20	55	187	65
	CDA	87	70	23	60	179	65
5140	CDA	105	88	18	52	212	60
52100	HRA	100	81	25	57	192	45
	HRN	185	139	13	20	363	—
6150	CDA	111	95	14	44	223	45
	N	136	89	22	61	269	—
8620	HR	89	65	25	63	192	60
	CD	102	85	22	58	212	63
	A	78	56	31	62	149	—
	N	92	52	26	60	183	—
8640	CD	140	120	11	38	277	—
	CDA	107	90	14	45	217	60
8740	HRA	95	64	25	55	190	56
	CDA	107	96	17	48	223	66
	N	135	88	16	48	269	—
9255	HRA	113	71	22	41	229	45
	N	135	84	20	43	269	—
E9310	HR	115	75	22	58	241	45
	A	119	64	17	42	241	—
	N	132	83	19	58	269	—
9440	HR	123	80	18	47	241	—
	HRA	93	59	26	53	183	—
	N	110	72	25	58	223	—

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-3 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าที่ชุบแข็งได้
(Mechanical Properties of Carburizing and Hardening Grade Steels^a)

AISI Type	Tensile Strength, ksi	Yield Point, ksi	Elongation in 2 in., %	Reduction of Area, %	Impact Strength (Izod), ft-lb	Hardness		Machining	AISI Type	Tensile Strength, ksi	Yield Point, ksi	Elongation in 2 in., %	Reduction of Area, %	Impact Strength (Izod), ft-lb	Hardness		Machining
						Case (Brinell)	Case (Rockwell)								Core (Brinell)	Case (Rockwell)	
Plain Carbon, Carburized Steels																	
C1015	73	46	32	71	91	149 ^b	C62 (.048 ^c)	Poor	4130 ^f	234-98	197-89	12-28	44-71	32-108	461-202 ^d	—	—
C1020	75	48	31	71	93	156 ^b	C62 (.046 ^c)	Poor	8630 ^f	250-115	230-93	10-26	47-70	33-114	495-217 ^d	—	—
C1022	83	47	27	66	81	163 ^b	C62 (.046 ^c)	Good	1340	282-100	235-76	9-25	24-61	9-97	578-235 ^d	—	—
C1117	97	59	23	53	33	192 ^b	C65 (.045 ^c)	Ver. g.d. to excel.	3140	280-112	250-92	11-23	49-69	9-97	555-223 ^d	—	—
C1118	113	77	17	45	16	229 ^b	C61 (.065 ^c)	Ver. g.d. to excel.	4140 ^f	290-117	251-100	11-23	42-65	11-108	578-235 ^d	—	—
Plain Carbon, Hardened Steels																	
C1030	122-75	93-58	18-33	48-71	8-100	495-179 ^d		Fair to good	4150	308-128	248-117	10-20	34-60	10-77	578-262 ^d	—	—
C1040	113-89	86-62	19-33	48-68	36-72	262-183 ^d		Fair to good	5150	312-116	250-102	9-22	31-62	7-78	601-241 ^d	—	—
C1050	143-96	108-61	10-30	42-63	16-53	321-192 ^d		Fair to good	6150 ^k	315-118	270-108	7-22	17-61	14-87	601-241 ^d	—	—
C1060	160-103	112-68	12-28	40-60	14-23	321-212 ^d		Must be Ann'l'd.	9255 ⁿ	305-130	288-102	2-22	4-49	3-25	601-262 ^d	—	—
C1080	190-117	142-70	12-24	35-51	10-22	388-223 ^d		Must be Ann'l'd.	5160 ^p	322-115	260-106	4-24	9-60	2-63	627-229 ^d	—	—
C1095	188-190	120-74	10-26	30-53	5-6	401-229 ^d		Must be Ann'l'd.	4063 ^m	345-114	257-103	4-24	8-60	3-67	557-229 ^d	—	—
C1137	158-87	138-60	6-28	22-70	10-90	352-174 ^d		Good to very good									
C1141	237-94	188-68*	7-28	58-63	9-81	461-192 ^d		Good to very good									
C1144	128-97	91-68	17-24	35-59	7-62	277-201 ^d		Good to very good									

ตาราง ข-10 คุณสมบัติทางกลของทองแดงผสมล่อบางชนิด
(Mechanical Properties of Some Cast Copper Base Alloys)

Brill's Grade and Composition, %	Modulus of Elast. in Tension, psi	Tensile Strength, Kil	Yield Strength, (0.5% ext.), kil	Elongation in 2 in., %	Reduction of Area, %	Brinell Hardness (500 kg)	Impact Strength (rod), ft-lb	Compressive Strength			Fatigue Strength, 10 ⁶ cycle, kil	Machinability (Based on free cutting brass = 100)	Typical Uses
								0,001-in. ext., kil	0,010-in. ext., kil	0,100-in. ext., kil			
Tin bronze, 1B	13 X 10 ⁶	40	18	25	20	60	14	12	—	—	40	Bearings, bushings, piston rings, pump bodies, valves, impellers, steam fittings, gears.	
Leaded tin bronze, 2C	11 X 10 ⁶	36	18	20	15	65	7	12	—	—	50	Boils, nuts, gears, valves, pump pistons, pressure pipe fittings, expansion joints.	
High leaded tin bronze, 3C	11 X 10 ⁶	28	15	25	20	55	8	13	—	—	70	Machine tool bearings, general bearing uses.	
Leaded red brass, 4A	12 X 10 ⁶	33	15	22	17	62	11	14	17	37	84	Low pressure valve bodies, pipe fittings, plumbing parts.	
High strength yellow brass, 5C	14 X 10 ⁶	112	65	12	10	310	14	71	97	—	8	Spur gears, bridge parts, screw down nuts, bearings.	
Aluminum bronze, 9A	16 X 10 ⁶	70	25	22	20	110*	35	27	—	65	20	Machine parts, pump impellers and castings, gears, rolling mill bearings, washers, chemical plant equipment, marine propellers, pump casings, fittings, chains and hooks.	
Aluminum bronze, 9D	18 X 10 ⁶	90	40	7	10	175*	9	—	—	—	20		
Leaded nickel brass and bronze, 11A	19 X 10 ⁶	40	17	15	11	76	11	24	31	57	71	Marine fittings, furniture and building trim, various hardware parts.	
Silicon brass and bronze, 13B	15 X 10 ⁶	60	25	17	20	134*	32	27	43	84	50	Bearings, gears, rocker arms, impellers, valve stems, propellers.	

Source: Data was compiled from the 1972 *Harnett's Directory*, Reinhold Publishing Co., New York, and the
ASME *Handbook of Engineering Materials*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1934.
* Room and Brass (aged) hardness

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายโดยประมาณ

วัสดุ	สัมประสิทธิ์ความเสียหาย			
	สถิติ f		เลื่อน f_0	
	แห้ง	เปียก	แห้ง	เปียก
เหล็กกล้ากับ เหล็กกล้า	0.15-0.20	0.10	0.10-0.15	0.05
เหล็กกล้ากับ เหล็กหล่อ				
ทองเหลืองหรือบรอนซ์	0.18-0.25	0.10	0.15-0.20	0.05
เหล็กหล่อกับ เหล็กหล่อ				
หรือบรอนซ์	0.22-0.26	0.16	0.15-0.20	0.10
โลหะกับไม้	0.50-0.60	0.10	0.20-0.50	0.08
ไม้กับไม้	0.50-0.70	0.20	0.20-0.40	0.005-0.15
สายพานหนังกับ เหล็กหล่อ	0.50-0.60	0.30	0.30-0.50	0.20
หรือ เหล็กหล่อ เหนียว				
ปะเก็นกับโลหะ	0.60	0.25	0.25	0.12
แผ่นผ้า เบรคและคลัตช์				
ที่ทำจาก โปหีนกับ เหล็ก				
กล้า เหล็กหล่อ เหนียว				
หรือ เหล็กหล่อ	-	-	0.30-0.50	0.15-0.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง

มิติมูลฐานของเกลียวสี่เหลี่ยมคางหมู
ตามมาตรฐาน ISO 2904-1977 (E)

ขนาดเป็น mm

ขนาดระบุ			ระยะ พิตช์ p	$d_2 = D_2$	D_4	d_3	D_1
ช่อง 1	ช่อง 2	ช่อง 3					
	30		3	28.000	30.500	26.500	27.000
			* 6	27.000	31.000	23.000	24.000
			10	25.000	31.000	19.000	20.000
32			3	30.500	32.500	28.500	29.000
			* 6	29.000	33.000	25.000	26.000
			10	27.000	33.000	21.000	22.000
34	34		3	32.500	34.500	30.500	31.000
			* 6	31.000	35.000	27.000	28.000
			10	29.000	35.000	23.000	24.000
36			3	34.500	36.500	32.500	33.000
			* 6	33.000	37.000	29.000	30.000
			10	31.000	37.000	25.000	26.000
38	38		3	36.500	38.500	34.500	35.000
			* 7	34.500	39.000	30.000	31.000
			10	33.000	39.000	27.000	28.000
40			3	38.500	40.500	36.500	37.000
			* 7	36.500	41.000	32.000	33.000
			10	35.000	41.000	29.000	30.000
42	42		3	40.500	42.500	38.500	39.000
			* 7	38.500	43.000	34.000	35.000
			10	37.000	43.000	31.000	32.000
44			3	42.500	44.500	40.500	41.000
			* 7	40.500	45.000	36.000	37.000
			12	38.000	45.000	31.000	32.000
46	46		3	44.500	46.500	42.500	43.000
			* 8	42.000	47.000	37.000	38.000
			12	40.000	47.000	33.000	34.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง

มีติมูลฐานของเกลียวสี่เหลี่ยมคางหมู

ตามมาตรฐาน ISO 2904-1977 (E)

ขนาดเป็น mm

ช่อง 1	ขนาดระบุ		ระยะ พิคซ์ p	$d_2 = D_2$	D_4	d_3	D_1
	ช่อง 2	ช่อง 3					
48			3	46.500	48.500	44.500	45.000
			* 8	44.000	49.000	39.000	40.000
			12	42.000	49.000	35.000	36.000
	50		3	48.500	50.500	46.500	47.000
			* 8	46.000	51.000	41.000	42.000
			12	44.000	51.000	37.000	38.000
52			3	50.500	52.500	48.500	49.000
			* 8	48.000	53.000	43.000	44.000
			12	46.000	53.000	39.000	40.000
	55		3	53.500	55.500	51.500	52.000
			* 9	50.500	55.000	45.000	46.000
			14	48.000	57.000	39.000	41.000
60			3	58.500	60.500	56.500	57.000
			* 9	55.500	61.000	50.000	51.000
			14	53.000	62.000	44.000	46.000
	65		4	63.000	65.500	60.500	61.000
			*10	60.000	66.000	54.000	55.000
			16	57.000	67.000	47.000	49.000
70			4	68.000	70.500	65.500	66.000
			*10	65.000	71.000	59.000	60.000
			16	62.000	72.000	52.000	54.000
	75		4	73.000	75.500	70.500	71.000
			*10	70.000	76.000	64.000	65.000
			16	67.000	77.000	57.000	59.000
80			4	78.000	80.500	75.500	76.000
			*10	75.000	81.000	69.000	70.000
			16	72.000	82.000	62.000	64.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง

มีติมูลฐานของเกลียวสี่เหลี่ยมคางหมู
ตามมาตรฐาน ISO 2904-1977 (E)

ขนาดเป็น mm

ขนาดระบุ			ระยะ พิตช์ P	d ₂ = D ₂	D ₄	d ₃	D ₁
ช่อง 1	ช่อง 2	ช่อง 3					
	85		4	83.000	85.500	80.500	81.000
			*12	79.000	86.000	72.000	73.000
			18	76.000	87.000	65.000	67.000
90			4	88.000	90.500	85.500	86.000
			*12	84.000	91.000	77.000	78.000
			18	81.000	92.000	70.000	72.000
	95		4	93.000	95.500	90.500	91.000
			*12	89.000	96.000	82.000	83.000
			18	86.000	97.000	75.000	77.000
100			4	98.000	100.500	95.500	96.000
			*12	94.000	101.000	87.000	88.000
			20	90.000	102.000	78.000	80.000
	105		4	103.000	105.500	100.500	101.000
			*12	99.000	106.000	92.000	93.000
			20	95.000	107.000	83.000	85.000
	110		4	108.000	110.500	105.500	106.000
			*12	104.000	111.000	97.000	98.000
			20	100.000	112.000	88.000	90.000
	115		6	112.000	116.000	108.000	109.000
			*14	108.000	117.000	99.000	101.000
			22	104.000	117.000	91.000	93.000
120			6	117.000	121.000	113.000	114.000
			*14	113.000	122.000	104.000	106.000
			22	109.000	122.000	96.000	98.000
	125		6	122.000	126.000	118.000	119.000
			*14	118.000	127.000	109.000	111.000
			22	114.000	127.000	101.000	103.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง มาตรฐานของเกลียวสี่เหลี่ยมคางหมู
ตามมาตรฐาน ISO 2904-1977 (E)

ขนาดเป็น mm

ช่อง 1	ขนาดระบุ		ระยะ พิทช์ p	$d_2 = D_2$	D_4	d_3	D_1
	ช่อง 2	ช่อง 3					
130			6	127.000	131.000	123.000	124.000
			*14	123.000	132.000	114.000	116.000
			22	119.000	132.000	106.000	108.000
		135	6	132.000	136.000	128.000	129.000
			*14	128.000	137.000	119.000	121.000
			24	123.000	137.000	109.000	111.000
140			6	137.000	141.000	133.000	134.000
			*14	133.000	142.000	124.000	126.000
			24	128.000	142.000	114.000	116.000
		145	6	142.000	146.000	138.000	139.000
			*14	138.000	147.000	129.000	131.000
			24	133.000	147.000	119.000	121.000
150			6	147.000	151.000	143.000	144.000
			*16	142.000	152.000	132.000	134.000
			24	138.000	152.000	124.000	126.000
		155	6	152.000	156.000	148.000	149.000
			*16	147.000	157.000	137.000	139.000
			24	143.000	157.000	129.000	131.000
160			6	157.000	161.000	153.000	154.000
			*16	152.000	162.000	142.000	144.000
			28	146.000	162.000	130.000	132.000
		165	6	162.000	166.000	158.000	159.000
			*16	157.000	167.000	147.000	149.000
			28	151.000	167.000	135.000	137.000
170			6	167.000	171.000	163.000	164.000
			*16	162.000	172.000	152.000	154.000
			28	156.000	172.000	140.000	142.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง

พินิจมูลฐานของเกลียวสี่เหลี่ยมคางหมู
ตามมาตรฐาน ISO 2904-1977 (E)

ขนาดเป็น มม.

ขนาดระบุ			ระยะ พิตช์ p	$d_2 = D_2$	D_4	d_3	D_1
ช่อง 1	ช่อง 2	ช่อง 3					
		175	8	171.000	176.000	166.000	167.000
			*15	167.000	177.000	157.000	159.000
			28	161.000	177.000	145.000	147.000
180			8	176.000	181.000	171.000	172.000
			*18	171.000	182.000	160.000	162.000
			28	166.000	182.000	150.000	152.000
		185	8	181.000	186.000	176.000	177.000
			*18	176.000	187.000	165.000	167.000
			32	169.000	187.000	151.000	153.000
	190		8	186.000	191.000	181.000	182.000
			*18	181.000	192.000	170.000	172.000
			32	174.000	192.000	156.000	158.000
		195	8	191.000	196.000	186.000	187.000
			*18	186.000	197.000	175.000	177.000
			32	179.000	197.000	161.000	163.000
200			8	196.000	201.000	191.000	192.000
			*18	191.000	202.000	180.000	182.000
			32	184.000	202.000	166.000	168.000
	210		8	206.000	211.000	201.000	202.000
			*20	200.000	212.000	188.000	190.000
			36	192.000	212.000	172.000	174.000
220			8	216.000	221.000	211.000	212.000
			*20	210.000	222.000	198.000	200.000
			36	202.000	222.000	182.000	184.000
	230		8	226.000	231.000	221.000	222.000
			*20	220.000	232.000	208.000	210.000
			36	212.000	232.000	192.000	194.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง

มิติมูลฐานของเกลียวสี่เหลี่ยมคางหมู

ตามมาตรฐาน ISO 2904-1977 (E)

ขนาดเป็น mm

ขนาดระบุ			ระยะ พิตช์ p	$d_2 = D_2$	D_4	d_3	D_1
ช่อง 1	ช่อง 2	ช่อง 3					
240			8	236.000	241.000	231.000	232.000
			*22	229.000	242.000	216.000	218.000
			36	222.000	242.000	202.000	204.000
250	250		12	244.000	251.000	237.000	238.000
			*22	239.000	252.000	226.000	228.000
			40	230.000	252.000	208.000	210.000
260			12	254.000	261.000	247.000	248.000
			*22	249.000	262.000	236.000	238.000
			40	240.000	262.000	218.000	220.000
270	270		12	264.000	271.000	257.000	258.000
			*24	258.000	272.000	244.000	246.000
			40	250.000	272.000	228.000	230.000
280			12	274.000	281.000	267.000	268.000
			*24	268.000	282.000	254.000	256.000
			40	260.000	282.000	238.000	240.000
290	290		12	284.000	291.000	277.000	278.000
			*24	278.000	292.000	264.000	266.000
			44	268.000	292.000	244.000	246.000
300			12	294.000	301.000	287.000	288.000
			*24	288.000	302.000	274.000	276.000
			44	278.000	302.000	254.000	256.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

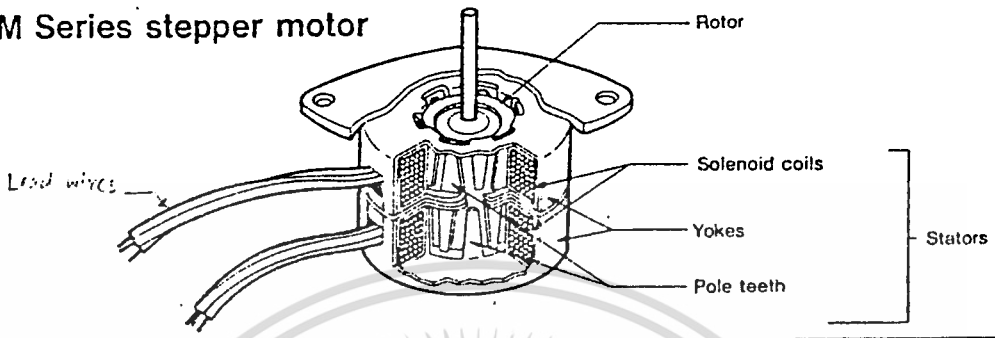
Structure and Operation

The stepper motor is designed to convert electric pulse signals into incremental mechanical motions. The SM series models are PM (permanent magnet) type stepper motors with a claw-pole yoke structure and a cylindrical permanent magnet rotor.

In this design, a rotating magnetic field is created by applying an alternating current to each solenoid coil of

two stators each having the same number of cup shaped yokes as the rotor magnet poles and positioned 90° apart from each other in electrical phase angle. The incremental motion of the motor is then derived by synchronizing the multi-pole permanent magnet rotor with the rotating field.

Structure of SM Series stepper motor

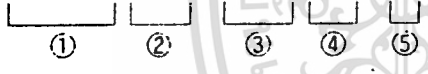


Code Names

The stepper motors manufactured by Fuji Electrochemical are each given a code name according to the following coding system:

- SMS — thin, lightweight series characterized by high torque performance in high speed range
- SMT — super thin series
- SMR — series for improving circuit design efficiency

SMS 40 - 48 01 - A



- ② Type number
- ③ Number of steps
- ④ Development number
- ⑤ Modification code

Series variation code, with the prefixed initials denoting specific series variations:
SM — standard series

Ferrite Magnets for Rotors

To produce rotors, the most important component of the SM Series stepper motors, Fuji Electrochemical uses ferrite magnets developed from original technologies.

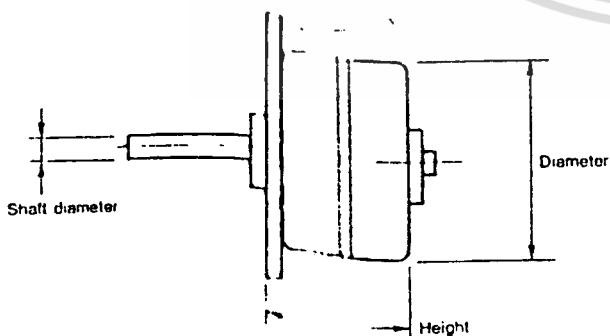
The following types of ferrite magnets are available to match a wide variety of stepper motor applications:

Rotor grade		E		H	S
Material		B13 (isotropic)	B26 (anisotropic plastic magnet)	B41 (anisotropic)	B36 (anisotropic)
Residual induction	Br (Gauss)	2000~2300	2400~2500	2400~2800	3800~4200
Coercive force	bHc (Oe)	1700~2000	1800~2000	2000~2400	2700~3300
	iHc (Oe)	3000~4000	1800~2200	2600~3300	2700~3300
Max. energy product	(BH)max. (MGOe)	0.9~1.2	1.4~1.5	1.4~1.8	3.6~4.2
Density	ρ (g/cm ³)	4.7~5.0	3.5~3.7	4.7~4.9	4.7~5.0
Characteristics		Low price	Light weight, low price	Medium output, low price	High output

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Specification Type	No. of steps (step angle)								Applicable rotor grade			Motor dimensions			Weight (g)
	20 (18°)	24 (15°)	36 (10°)	48 (7.5°)	60 (6°)	96 (3.75°)	100 (3.6°)	200 (1.8°)	E	H	S	Diameter	Height	Shaft diameter	
SM20	●								●	●	●	φ20	14.1	φ1.5	20
SMR20	●								●	●	●	φ20	14.1	φ1.5	20
SM30	●								●	●	●	φ20	18.3	φ1.5	28
SMR30	●								●	●	●	φ20	18.3	φ1.5	28
SMT25					●					●		φ25	4.8	φ1.5	10
SMS25		●								●	●	φ25	12.3	φ2	35
SM25	●	●								●	●	φ25	15.9	φ2	45
SMS35				●					●	●	●	φ35	14.7	φ2	80
SM35	●	●		●					●	●	●	φ35	21.4	φ2	100
SMR35	●	●		●					●	●	●	φ35	21.4	φ2	100
SMS40		●		●					●	●	●	φ42	14.4	φ3	110
SMB40				●		●	●					φ42	14.4	φ3	110
SM40	●	●	●	●					●	●	●	φ42	21.8	φ3	140
SMR40				●					●	●	●	φ42	21.8	φ3	140
SM55		●		●					●	●	●	φ55	24.5	φ6.345	280
SMR55				●					●	●	●	φ55	24.5	φ6.345	280
SMS58						●	●		●	●	●	φ58	23.1	φ6.345	350
SMR58				●					●	●	●	φ58	36.2	φ6.345	430
SM60		●		●					●	●	●	φ60	42.5	φ6.345	520
SMS65						●	●		●	●	●	φ65	13.5	φ4.76	180

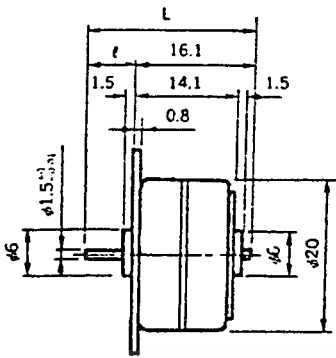


Note 1) Motor dimensions indicate the measurements as shown in the left diagram.

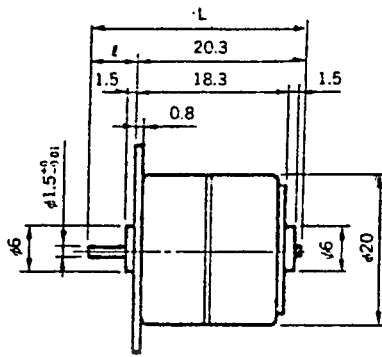
2) Rotor grade "V," which has a higher magnet material quality than the "S" grade, is also available to interested customers.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

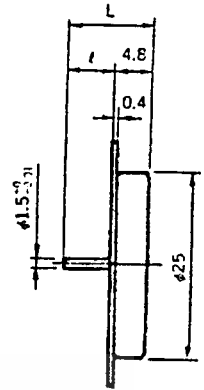
SM20/SMR20



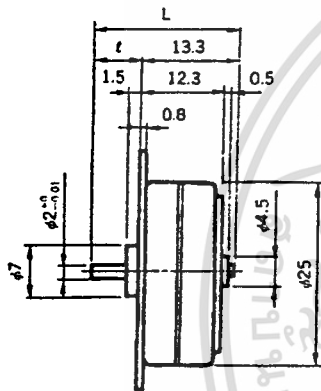
SM30/SMR30



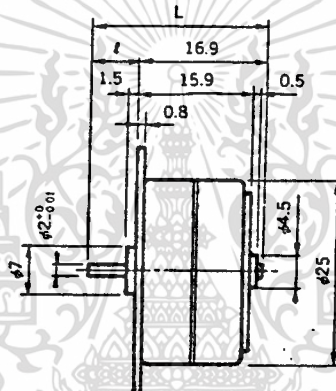
SMT25



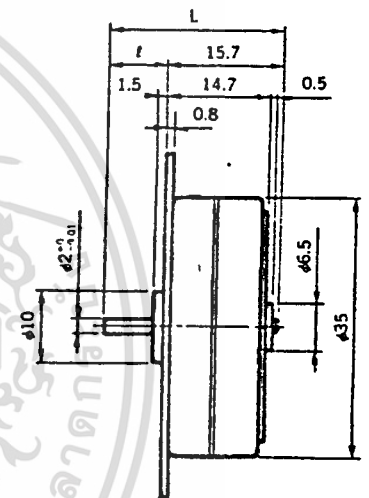
SMS25



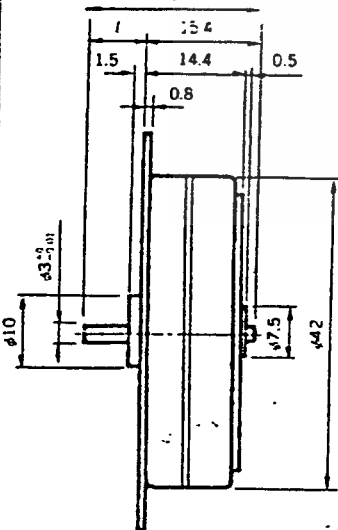
SM25



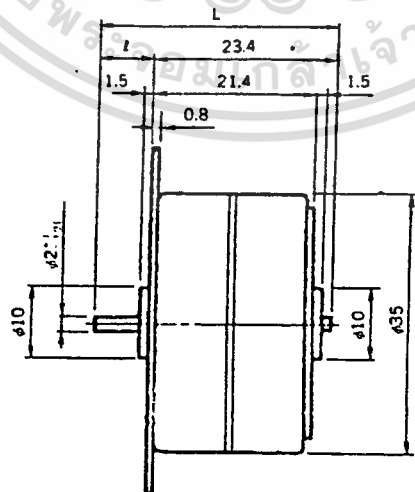
SMS35



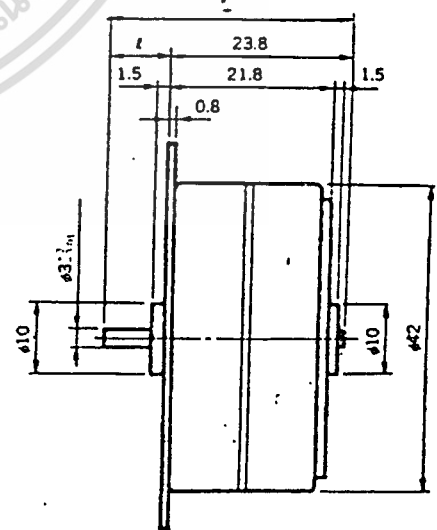
✓ SMS40 SMB40



SM35/SMR35



SM40/SMR40

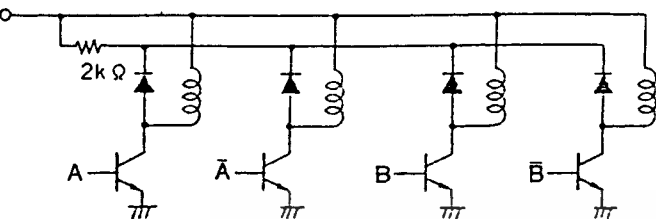


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Output Characteristics

It is impossible to give a general description of the characteristics of stepper motors, since these characteristics depend heavily on coil conditions, rotor grade, drive mode and other factors. Merely for reference,

therefore, the table below shows the pull-in and pull-out characteristics of major SM Series stepper motor models, and these data must be used only as a rough base for computing operational ranges.



The SMT25-60 adopts a bipolar 3.6V and two-phase excitation condition.

With few exceptions, the data were obtained under the following conditions:

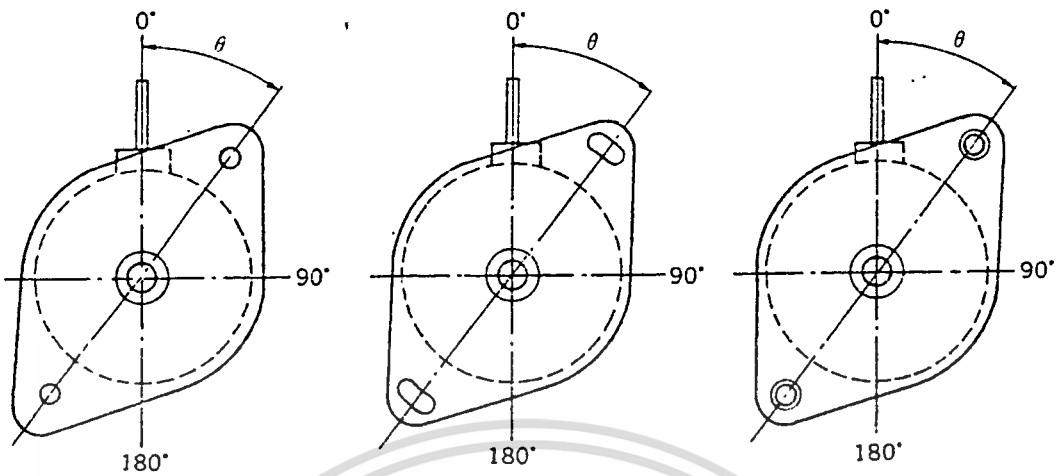
- Heat sink used to control the temperature rise of the coil
- Unipolar drive and two-phase excitation modes
- Ambient temperature was 25°C.

Other conditions are shown in the table, and as additional information, the drive frequency corresponding with the coil temperature increase of 60°C for each model is included.

Motor condition			Drive condition			Output characteristics		Frequency at which temperature rise reaches 60°C
Model	Rotor grade	Coil resistance	Drive voltage	Aluminum plate heat sink (mm)	Excitation duty	Holding torque	Dynamic torque	
10-20	H	110Ω	12.0V	30 [□] × 1	100%	37g·cm	Graph (A)	400 pps
10-20	H	80Ω	12.0V	30 [□] × 1	100%	56g·cm	(B)	400 pps
25-60	H	15Ω	3.6V	Not used	100%	30g·cm	(C)	0 pps
25-24	S	80Ω	12.0V	40 [□] × 1	100%	70g·cm	(D)	400 pps
25-20	S	55Ω	12.0V	40 [□] × 1	100%	90g·cm	(E)	400 pps
25-24	S	55Ω	12.0V	40 [□] × 1	100%	114g·cm	(F)	400 pps
35-48	S	30Ω	12.0V	50 [□] × 1	100%	240g·cm	(G)	400 pps
35-24	H	16Ω	12.0V	60 [□] × 1	50%	270g·cm	(H)	300 pps
35-48	S	16Ω	12.0V	60 [□] × 1	50%	240g·cm	(I)	300 pps
40-24	S	16Ω	12.0V	70 [□] × 1	50%	280g·cm	(J)	400 pps
40-48	S	16Ω	12.0V	70 [□] × 1	50%	450g·cm	(K)	400 pps
40-100	S	15Ω	12.0V	70 [□] × 1	50%	620g·cm	(L)	400 pps
40-24	H	12Ω	12.0V	70 [□] × 1	50%	470g·cm	(M)	200 pps
40-48	S	12Ω	12.0V	70 [□] × 1	50%	680g·cm	(N)	200 pps
45-48	S	12Ω	12.0V	120 [□] × 1	50%	1600g·cm	(O)	100 pps
58-100	S	19Ω	12.0V	Not used	100%	1780g·cm	(P)	150 pps
58-48	H	8.5Ω	12.0V	150 [□] × 1	50%	3300g·cm	(Q)	100 pps
60-48	H	6.2Ω	12.0V	150 [□] × 1	50%	3300g·cm	(R)	100 pps
65-200	S	33Ω	12.0V	Not used	100%	850g·cm	(S)	200 pps

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The angle is measured from the lead wire as seen from the output shaft side.



θ : 45° / 90° / 135°

Shaft Length

The standard shaft lengths presented in the table below are the length measured from the mounting surface of flange. Customers are recommended to make their

selection from these shaft lengths, but special lengths can be considered upon inquiry.

Shaft length (mm)	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	22	24	
M20 MR20			●	●	●	●	●																	
M30 MR30				●	●	●	●	●																
M25					●		●		●		●		●											
M35 MR35					●		●		●		●		●											
M40 MR40						●			●		●		●	●										
M55 MR55												●	●		●		●		●					
MR58													●		●		●		●		●	●		
M60																●		●			●	●	●	
MS65							●		●		●		●		●									
MS25			●		●		●		●		●													
MS35			●		●		●		●		●													
MS40 MB40			●					●				●		●		●								
MS58												●			●		●		●		●	●		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กติการมประกาศ

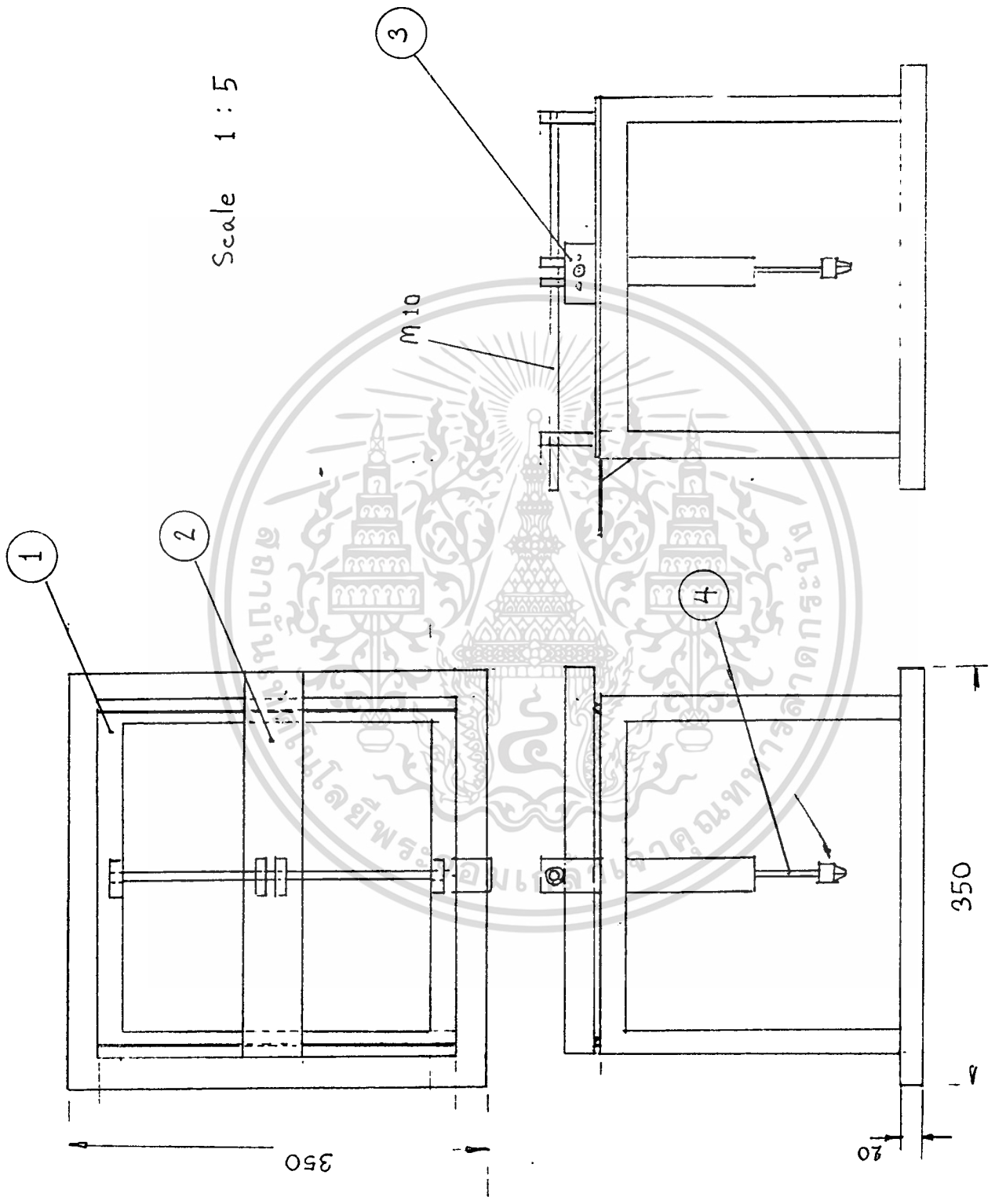
ปริทัศน์ฉบับนี้จะไม่สามารถสำเร็จลงได้ หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ
และคำแนะนำต่างๆ จาก อาจารย์ ประสิทธิ์ คำพันธ์ม และ เจ้าหน้าที่ภาควิชา
วิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน รวมทั้งเพื่อนนักศึกษาที่ช่วยเหลือในการค้นหาข้อมูลและ
ให้กำลังใจ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม 1 และ 2 ของ ดร.วริทธิ์ อังภากรณ์ และ ชานู ถนัดงาน
2. การทดลองระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3. เรื่องการควบคุมการทำงานของ Stepping Motor ด้วย ไมโครโปรเซสเซอร์ / วารสารคอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์ เวิลด์ ปีที่ 7 ฉบับที่ 80 ประจำเดือนกรกฎาคม 2525
4. เรื่องเครื่องควบคุม Stepping Motor / วารสารเซมิคอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ ฉบับที่ 92 เดือนพฤษภาคมถึงมิถุนายน 2532
5. Microprocessors for Measurement and Control / David M. Auslander and Paul Sagues
6. Mechanism, Linkage, And Mechanical controls / Nicholas P. Chironis / Mcgraw-Hill
7. Programming the Z-80 Third Edition / Rodney Zaks / Sybex

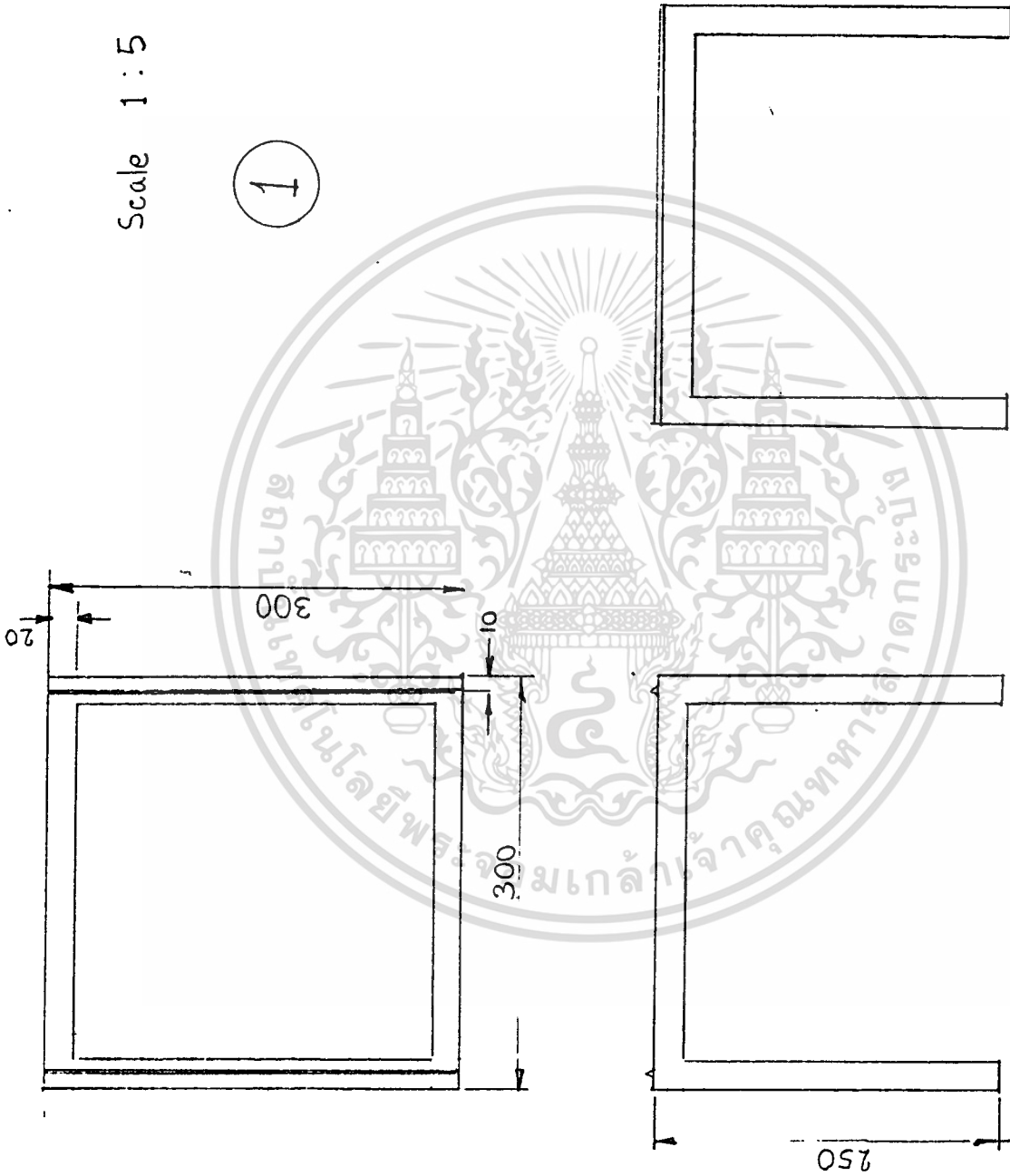


Scale 1 : 5

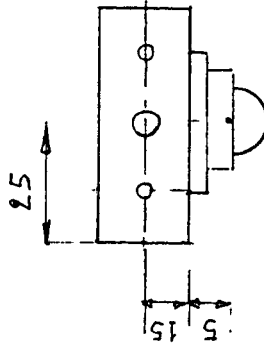
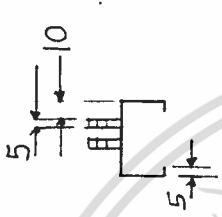
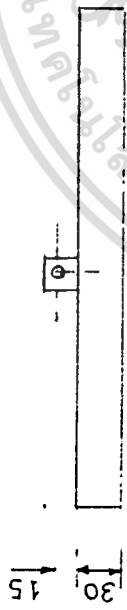
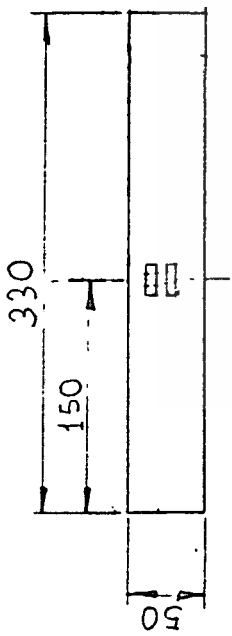
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Scale 1:5

1



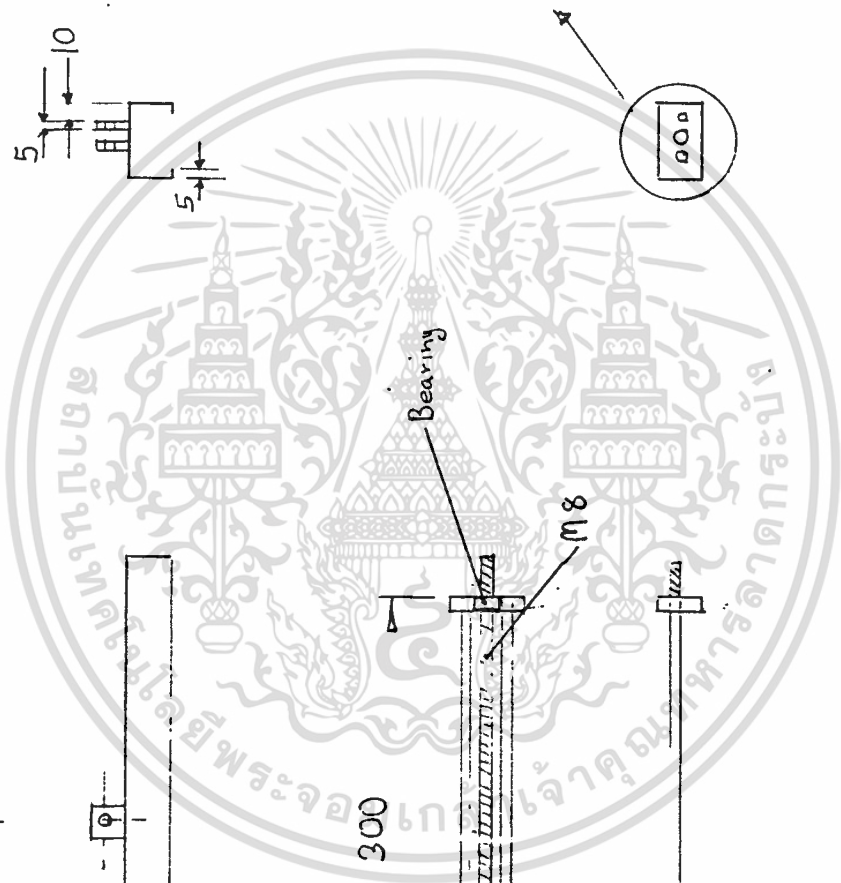
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



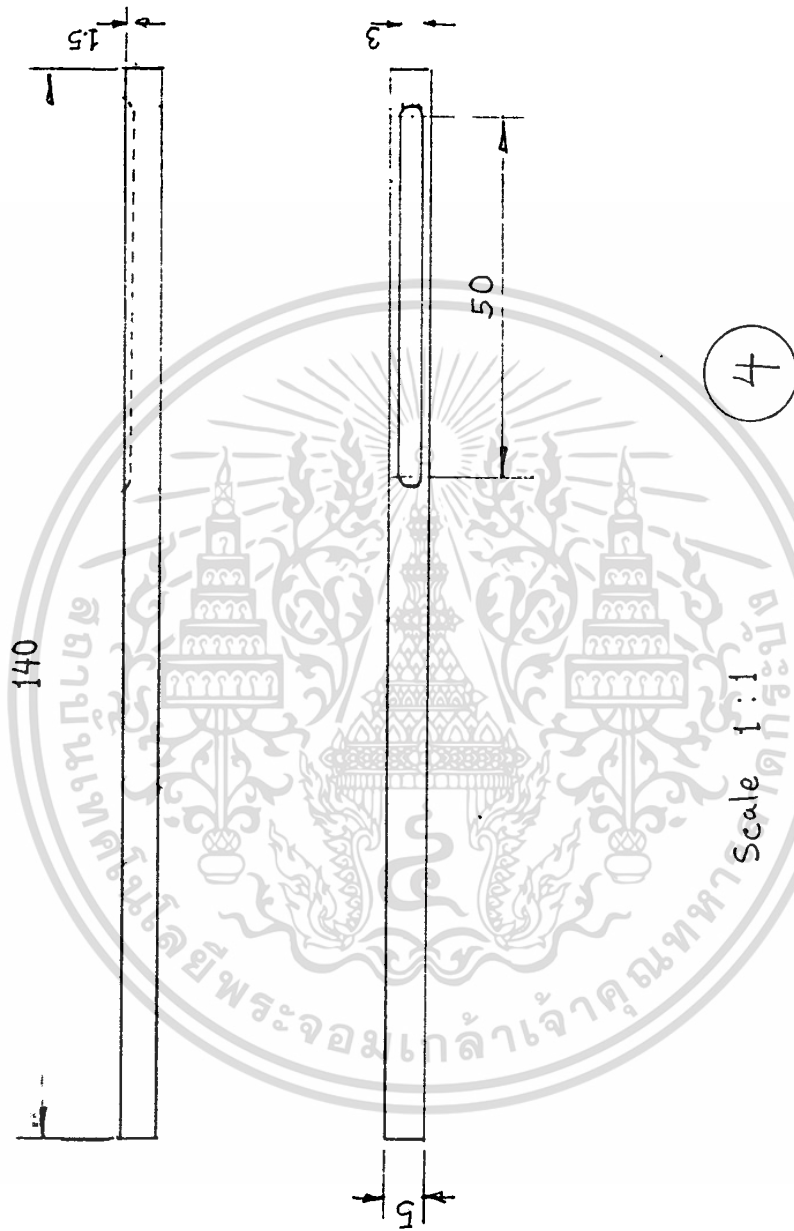
2

Scale 1:5

3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้