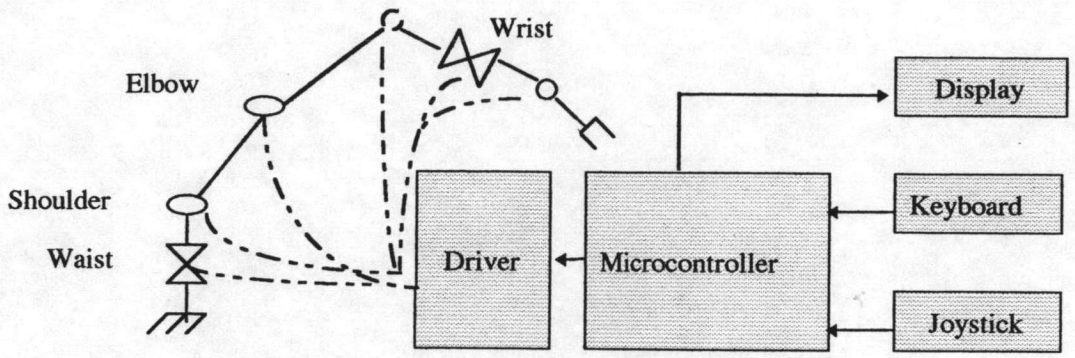
บทที่ 2

ระบบแขนกลสำหรับปฏิบัติงานด้านรังสี

ปัจจุบันเทคโนโลยีด้านแขนกล (Robotic arm)ได้เข้ามามีบทบาทในงานด้านอุตสาหกรรมการผลิตและชีวิตประจำวันอย่างกว้างขวาง ทั้งการช่วยงานในสิ่งที่แรงงานคนทำไม่ได้ และสามารถทำงานแบบซ้ำๆได้อย่างมีประสิทธิภาพ ต่างจากแรงงานคนที่ไม่สามารถควบคุมประสิทธิภาพการทำงานได้ต่อเนื่องระยะยาว เนื่องจากประสิทธิภาพจะด้อยลงเมื่อเหนื่อยล้าและขาดสมาธิ นอกจากนี้ในงานบางงานที่เสี่ยงต่ออันตรายจำเป็นต้องใช้หุ่นยนต์หรือแขนกลเข้าปฏิบัติงานแทน เช่น การตรวจแกสพิษ การปฏิบัติงานด้านรังสีสูง และการตรวจสอบวัตถุระเบิดที่อยู่ในภาวะพร้อมระเบิดได้ เป็นต้น

โครงสร้างของระบบแขนกลเบื้องต้นประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นกลไกเคลื่อนไหวของแขนรวมทั้งมือจับซึ่งบังคับด้วยมอเตอร์หรือระบบต้นกำลังอื่นๆ และอีกส่วนหนึ่งเป็นระบบควบคุมต้นกำลังให้บังคับกลไกของแขนให้เคลื่อนที่ในทิศทางและตำแหน่งที่ต้องการ ระบบควบคุมนี้ในปัจจุบันมักใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์หรือไมโครคอมพิวเตอร์ ทำงานด้วยโปรแกรมที่สามารถรับการควบคุมการเคลื่อนไหวของแขนกลจากภายนอก หรือทำงานแบบซ้ำๆกันโดยอัตโนมัติเฉพาะงานก็ได้ ขึ้นกับการออกแบบกระบวนการควบคุม ดังแผนภาพในรูปที่ 2.1 ระบบแขนกลสมรรถนะสูงบางชนิดมีการออกแบบโปรแกรมให้สามารถรับการเรียนรู้กระบวนการเคลื่อนไหวจากภายนอก และจดจำขั้นตอนเหล่านั้นไว้ (Learning mode) จากนั้นสามารถทำงานครั้งต่อๆไปด้วยขั้นตอนที่เรียนรู้และจดจำไว้ได้จนกว่าจะมีการจัดการให้ปรับเปลี่ยนใหม่

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 2.1 แผนภาพระบบแขนกลเบื้องต้น

2.1 ความจำเป็นในการใช้แขนกลควบคุมระยะไกลในงานด้านรังสี

เนื่องจากในการปฏิบัติงานด้านรังสี ผู้ปฏิบัติงานจำเป็นต้องคอยระมัดระวังป้องกันตัวเอง ไม่ให้รับรังสีเกินขีดจำกัดที่หน่วยงานควบคุมด้านสุขภาพของบุคลากรที่ปฏิบัติงานด้านรังสีกำหนดไว้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำงานบนพื้นฐานของการป้องกันรังสี ได้แก่ การใช้กำบังรังสีและการใช้แขนกลเข้าทำงานในพื้นที่ซึ่งมีปริมาณรังสีสูงด้วยการควบคุมระยะไกล เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานมีความปลอดภัยในการทำงานด้านรังสีสูง ลักษณะงานด้านรังสีสูงแบ่งเป็นงานด้านวิทยาศาสตร์นิวเคลียร์และงานด้านวิศวกรรมนิวเคลียร์ ดังนี้

2.1.1. งานด้านวิทยาศาสตร์นิวเคลียร์

ก. การผลิตไอโซโทปรังสี อุตสาหกรรมการผลิตไอโซโทปรังสีจำเป็นต้องใช้แขนกลในการควบคุมอุปกรณ์การเตรียมและแยกไอโซโทปรังสี เพื่อบรรจุในภาชนะหรือแคปซูล การเชื่อมปิดผนึกแคปซูล เป็นงานในพื้นที่มีรังสีสูงและอาจมีการเปรอะเปื้อนรังสีได้ง่าย

ข. การกำจัดกากกัมมันตภาพรังสี งานด้านการชำระล้างอุปกรณ์ที่มีการเปรอะเปื้อนรังสีที่มีความแรงสูง การบรรจุกากรังสีที่มีระดับรังสีสูงในภาชนะบรรจุ หรือการเข้าทำความสะอาดบริเวณเกิดอุบัติเหตุทางรังสี ล้วนแล้วแต่ต้องใช้แขนกลช่วยปฏิบัติงานเสมอ

ค. การวิจัยค้นคว้าด้านวิทยาศาสตร์นิวเคลียร์ งานด้านการวิจัยค้นคว้าจำเป็นต้องมีการติดตั้งต้นกำเนิดรังสีสูง การเปลี่ยนต้นกำเนิดรังสี การตรวจสอบผลของอันตรกิริยาหรือปฏิกิริยานิวเคลียร์บางชนิดที่ต้องใช้อุปกรณ์แขนกลควบคุมการทำงานระยะไกล

2.1.2. งานด้านวิศวกรรมนิวเคลียร์

ก. การผลิตแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ อุตสาหกรรมการผลิตเชื้อเพลิงนิวเคลียร์นั้นมีขั้นตอนการแยก การเตรียม และการบรรจุเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ซึ่งต้องใช้แขนกลทำงานร่วมกับผู้ปฏิบัติงาน ในบางส่วนที่มีการตัดแยกแท่งเชื้อเพลิงใช้แล้ว เพื่อแยกเชื้อเพลิงส่วนที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ จะต้องใช้แขนกลทำงาน 100 เปอร์เซนต์ ทั้งการแยกส่วนของเชื้อเพลิงที่ใช้แล้ว กากเชื้อเพลิง และเชื้อเพลิงที่นำเข้ากระบวนการนำมาใช้ใหม่ รวมทั้งการทำลายส่วนที่ใช้การไม่ได้เนื่องจากเป็นกากนิวเคลียร์

ข. การติดตั้งและการบำรุงรักษาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์สำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า จำเป็นต้องอาศัยแขนกลควบคุมระยะไกลในการเปลี่ยนแท่งเชื้อเพลิง การตรวจสอบบริเวณที่มีรังสีสูง การเคลื่อนย้าย Nozzle drums และการเคลื่อนย้ายซ่อมแซมจักรกลในส่วนของ Primary loop เป็นต้น

ค. การจัดการเครื่องปฏิกรณ์ที่หยุดใช้งาน ในเครื่องปฏิกรณ์ที่หมดอายุใช้งานหรือต้องการหยุดใช้งาน จำเป็นต้องมีการเก็บแยกอุปกรณ์ชิ้นส่วนที่มีรังสีออกเก็บในบริเวณที่จัดไว้ เพื่อให้พื้นที่เดิมมีความสะอาดและปราศจากรังสีสูง ก่อนมีการรื้อถอนหรือปรับปรุงให้ใช้งานได้ใหม่ งานเหล่านี้ต้องใช้แขนกลควบคุมการทำงาน

ง. การกู้อุบัติเหตุจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ การเกิดอุบัติเหตุในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์บริเวณแกนแท่งเชื้อเพลิง เป็นบริเวณที่มีกัมมันตภาพรังสีสูงมาก การค้นหา ทำความสะอาดและแยกประเภทกากนิวเคลียร์ จะต้องใช้ระบบแขนกลผสมผสานกับระบบยานยนต์เข้าไปในพื้นที่เพื่อจัดการเปิดทาง เคลื่อนย้ายและกำบังรังสีให้มีระดับต่ำลง

2.2 การจำแนกประเภทของแขนกล

ลักษณะการเคลื่อนที่และพิกัดการทำงานของแขนกลจะมีคำศัพท์เทคนิคเฉพาะที่ควรทราบดังนี้

Revolute	คือการเคลื่อนที่ของข้อต่อแขนกลเป็นวงกลมรอบจุดหมุน
Prismatic	คือการเคลื่อนที่ของข้อต่อที่มีทิศทางการทำงานเลื่อนเข้าออกในทิศทางเดียวกับแกน
Cartesian	คือลักษณะขอบเขตการเคลื่อนที่ของแขนกลเป็นรูปสี่เหลี่ยม
Cylindrical	คือลักษณะขอบเขตการเคลื่อนที่ของแขนกลเป็นรูปทรงกระบอก
Spherical	คือลักษณะขอบเขตการเคลื่อนที่ของแขนกลเป็นรูปทรงกลม

Scara	คือลักษณะขอบเขตการเคลื่อนที่ของแขนกลเป็นรูปทรงกระบอกคล้ายแบบ Cylindrical
Articulated	คือลักษณะขอบเขตการเคลื่อนที่ของแขนกลเป็นรูปครึ่งทรงกลม
Reach	คือระยะความยาวของรัศมีจากจุดศูนย์กลางที่เป็นแกนหลักของแขนกลไปยังส่วนปลายสุดของมือ
Stroke	คือระยะความยาวที่มือของแขนกลสามารถเอื้อมถึงได้
Pitch	คือมุมในการปรับข้อมือขึ้นลง
Roll	คือมุมในการหมุนข้อมือโดยรอบ
Yaw	คือมุมในการปรับข้อมือไปทางซ้ายหรือขวา
Gripper	คือมือจับที่อยู่ปลายสุดของแขนกล

โดยทั่วไปจะมีการจำแนกประเภทของแขนกลตามองค์ประกอบและโครงสร้างการทำงานของแขนกลต่างๆไว้ดังนี้ [1]

ก. จำแนกตามเทคนิคการขับเคลื่อน

ข. จำแนกตามการเคลื่อนที่ของข้อต่อ

ค. จำแนกตามกระบวนการเคลื่อนไหวของแขน

2.2.1 <u>เทคนิคการขับเคลื่อน</u>

การจัดประเภทแขนกลตามเทคนิคการขับเคลื่อนข้อต่อต่างๆที่นิยมใช้กันมีอยู่ 3 ระบบ คือ ระบบไฟฟ้า ระบบไฮดรอลิก (Hydralic) และระบบลม (Pneumatic) สำหรับการขับเคลื่อนด้วยระบบไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่นั้นต้นกำลังขับเคลื่อนจะใช้มอเตอร์เซอร์โวชนิดกระแสตรง (DC Servo motor) และมอเตอร์สเต็ปปิง (Stepping motor) ซึ่งมักจะใช้กับงานที่รับน้ำหนักไม่มากนัก ในกรณีที่แขนกลต้องทำงานที่รับน้ำหนักมากๆ เช่น งานเคลื่อนย้าย ประกอบชิ้นส่วนจักรกลที่มีน้ำหนักมาก จะใช้ระบบไฮดรอลิกเป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนแขนกล แต่เนื่องจากระบบไฮดรอลิกใช้น้ำมันในการขับดันอุปกรณ์กลจึงมีข้อเสียเรื่องความสะอาด ระบบที่ประหยัดสะอาดและทำงานรวดเร็วจะใช้ระบบลม ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วมักจะนำระบบขับเคลื่อนต่างๆมาทำงานผสมผสานกัน โดยพิจารณาจากข้อดีข้อเสียของแต่ละระบบ ดังตารางเปรียบเทียบที่ 2.1 [2]

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของระบบขับเคลื่อนแขนกลแบบต่างๆ

Advantages and Disadvantages of The three means of Actuation

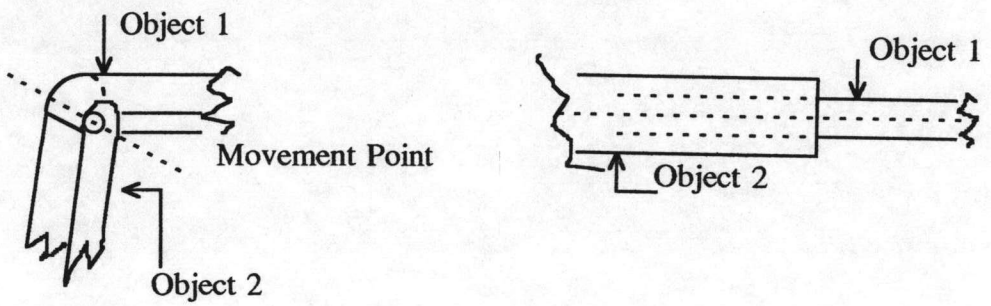
Actuator type	Advantages	Disadvantages
Electric	1 Lower initial cost than a fluid system 2 Much lower operating costs than a hydraulic system 3 Clean, no oil leaks to wipe up 4 Accurate servo-type positioning and velocity control can be achieved	1 Not such grate force capability as a hydraulic system 2 Very little holding strength when stopped, will allow a heavy load to sag; mechanical brakes are required
Hydraulic	1 Great force capability, can handle heavy loads 2 Great holding strength when stopped hydraulic cylinder will not allow a heavy load to sag 3 Accurate servo-type positioning and velocity control can be achieved 4 Intrinsically safe in flammable environments such as painting	1 High initial cost 2 High operating cost 3 Messy, tends to leak oil
Pneumatic	1 Lower initial cost than a hydraulic system 2 Lower operating costs than a hydraulic system 3 Clean, no oil leaks to wipe up 4 Quick response	1 Programming of accurate positioning and velocity control are impossible; mechanical stops are required 2 Weak force capability 3 Not so much holding strength when stopped as a hydraulic system, will allow a heavy load to sag somewhat

2.2.2 การเคลื่อนที่ของข้อต่อ

เนื่องจากมือของแขนกลจะอยู่ที่ส่วนปลายของแขน ดังนั้นการเคลื่อนที่เพื่อให้มือไปทำงาน จะต้องขับข้อต่อต่างๆเคลื่อนที่ไปด้วย ซึ่งลักษณะการเคลื่อนที่ของข้อต่อแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ [3]

1. การเคลื่อนที่แบบ Revolute สัญลักษณ์ที่ใช้คือ R เป็นการเคลื่อนที่ข้อต่อแบบวงกลมรอบแกนจุดหมุน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ก

2. การเคลื่อนที่แบบ Prismatic สัญลักษณ์ที่ใช้คือ P เป็นการเคลื่อนที่ของข้อต่อที่สไลด์ (slide)ไปในทิศทางเดียวกับแกน คล้ายกับลักษณะลูกสูบในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ข



ก. การเคลื่อนที่แบบ Revolute ข. การเคลื่อนที่แบบ Prismatic

รูปที่ 2.2 การเคลื่อนที่ของข้อต่อ

2.2.3 กระบวนการเคลื่อนไหวของแขน

หลักการในการจัดประเภทของแขนกลอีกประเภทหนึ่งคือ แบ่งตามวิธีควบคุมการเคลื่อนไหวของแขนกลซึ่งมี 2 ลักษณะด้วยกัน ลักษณะแรกเป็นการควบคุมการเคลื่อนไหวระหว่างจุดต่อจุด (Point to Point) หมายถึงควบคุมโดยการกำหนดจุดปลายมือ ต้นทางและปลายทาง ภายในขอบเขตการเคลื่อนที่ในการทำงาน ซึ่งแขนกลจะเคลื่อนมือไปตามจุดที่กำหนดเท่านั้น ส่วนลักษณะที่สองเป็นการควบคุมการเคลื่อนไหวแบบต่อเนื่อง (Continuous path) หมายถึงการควบคุมให้ปลายนิ้วมือเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่ได้กำหนดอย่างต่อเนื่อง การควบคุมลักษณะนี้จะทำให้แขนกลเคลื่อนไหวได้ซับซ้อนและละเอียดขึ้น

2.3 หลักการเคลื่อนไหวของแขนกล

2.3.1 ชนิดของแขนกลและการเคลื่อนที่ในแต่ละแกน

ลักษณะการเคลื่อนไหวของแขนกลจะเป็นไปตามขอบเขตการทำงานของมือจับที่ปลายแขนกล สามารถแบ่งเป็นชนิดของแขนกล และลักษณะการเคลื่อนที่ของข้อต่อได้ ดังตารางที่ 2.2 [4]

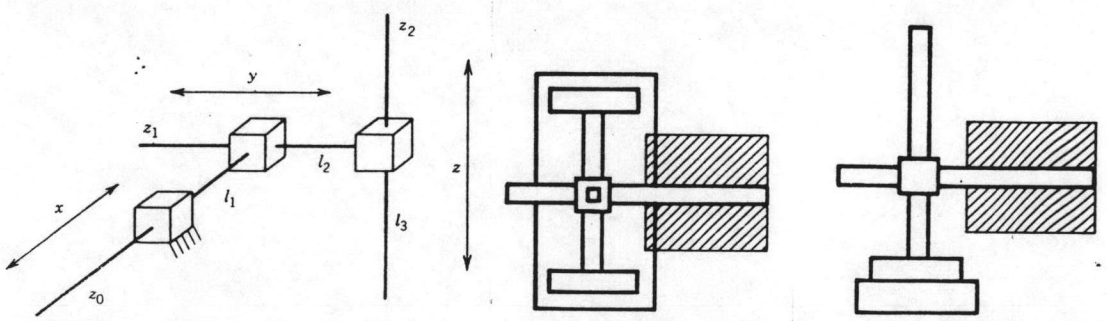
ตารางที่ 2.2 ชนิดของแขนกลและลักษณะการเคลื่อนที่ของข้อต่อ

ชนิดแขนกล	แกนที่ 1	แกนที่ 2	แกนที่ 3
Cartesian	P	P	P
Cylindrical	R	P	P
Spherical	R	R	P
Scara	R	R	P
Articulated	R	R	R

R = Revolution

P = Prismatic

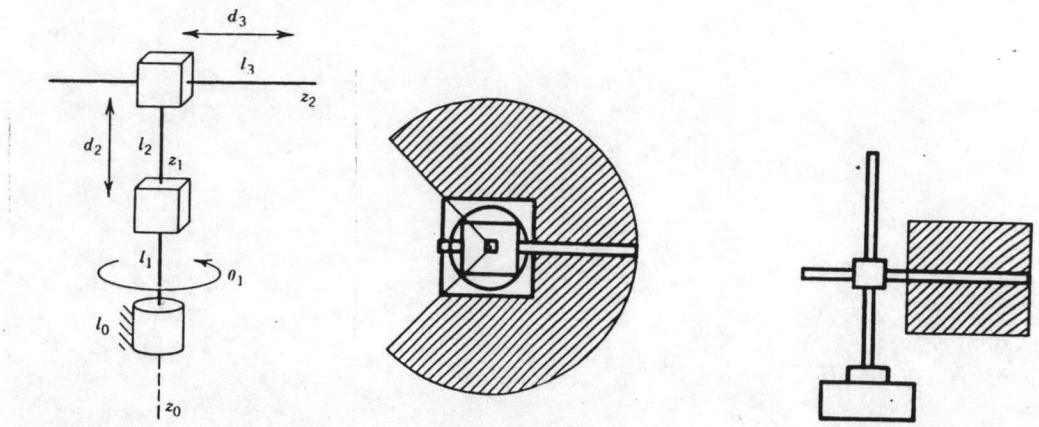
จากตารางที่ 2.2 แขนกลชนิด Cartesian มีลักษณะการเคลื่อนที่ของข้อต่อเป็นแบบ Prismatic ทั้ง 3 แกนโดยจะเคลื่อนที่สไลด์ไปบนแกนซึ่งมีลักษณะตั้งฉากซึ่งกันและกัน ดังรูปที่ 2.3 ดังนั้นขอบเขตการเคลื่อนที่ของปลายแขนในการทำงานของแขนกลชนิด Cartesian จะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม



ก. รูปแบบแขนกลชนิด Cartesian ข. ขอบเขตการทำงานของแขนกลชนิด Cartesian

รูปที่ 2.3 แขนกลชนิด Cartesian

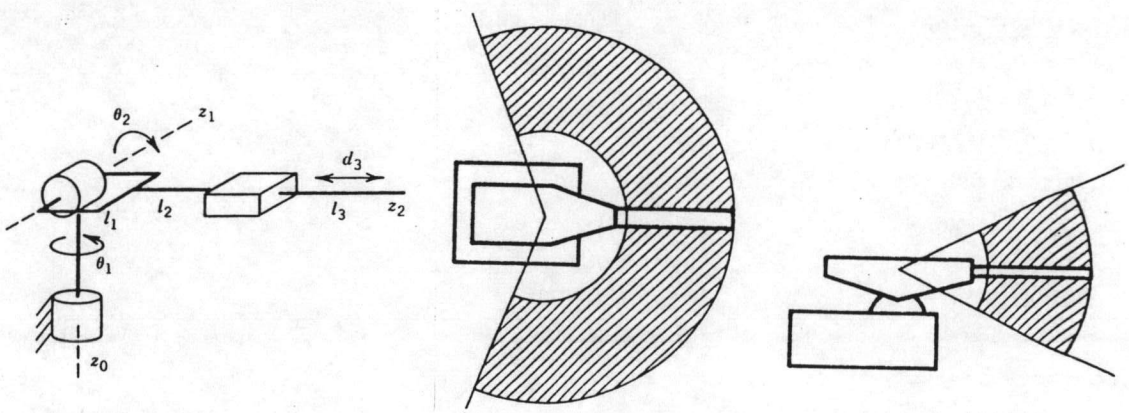
ถ้าเปลี่ยนแกนที่ 1 ของแขนกลชนิด Cartesian จากลักษณะการเคลื่อนที่แบบ P เป็นแบบ R จะได้แขนกลชนิดใหม่ คือแขนกลชนิด Cylindrical ดังแสดงในรูปที่ 2.4



ก. รูปแบบแขนกลชนิด Cylindrical ข. ขอบเขตการทำงานของแขนกลชนิด Cylindrical

รูปที่ 2.4 แขนกลชนิด Cylindrical

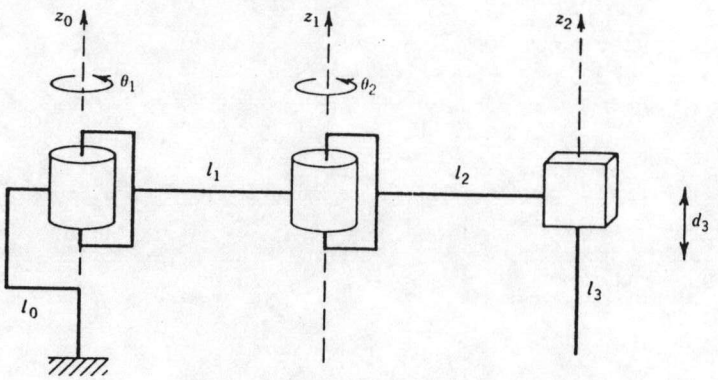
ลักษณะของขอบเขตในการเคลื่อนที่ของปลายแขนในการทำงานจึงเป็นรูปทรงกระบอกและโครงสร้างในทางปฏิบัติแสดงในรูป 2.8 ถ้าเปลี่ยนลักษณะการเคลื่อนที่ในแกนที่ 2 ของแขนกลชนิด Cylindrical จากแบบ P เป็นแบบ R จะได้แขนกลอีกลักษณะหนึ่ง ซึ่งมีขอบเขตการเคลื่อนที่ของปลายแขนในการทำงานเป็นแบบครึ่งทรงกลม แขนกลลักษณะนี้เรียกว่า แขนกลชนิด Spherical แสดงดังรูปที่ 2.5



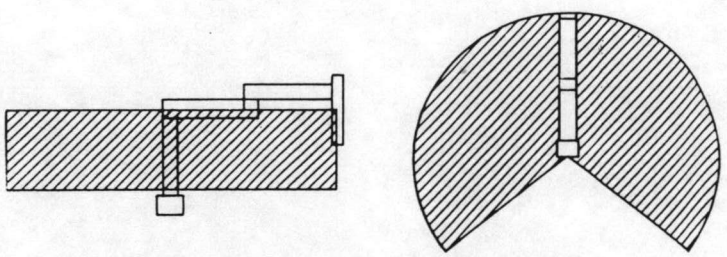
ก. รูปแบบแขนกลชนิด Spherical ข. ขอบเขตการทำงานของแขนกลชนิด Spherical

รูปที่ 2.5 แขนกลชนิด Spherical

มีแขนกลอีกลักษณะหนึ่งซึ่งมีลักษณะการเคลื่อนที่ของข้อต่อคล้ายกับแขนกลชนิด Spherical โดยมีแกนที่ 1 และ 2 เป็นการเคลื่อนที่แบบ R ส่วนแกนที่ 3 เป็นแบบ P ลักษณะการเคลื่อนที่ระหว่างแกนที่ 1กับแกนที่ 2 จะไม่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน เหมือนกับแขนกลชนิด Spherical แต่จะขนานกัน แขนกลลักษณะนี้เรียกว่า แขนกลชนิด Scara ดังแสดงในรูปที่ 2.6 แขนกลชนิด Scara นี้มีขอบเขตการเคลื่อนที่ของปลายแขนในการทำงานเป็นรูปทรงกระบอกคล้ายกับแขนกลชนิด Cylindrical



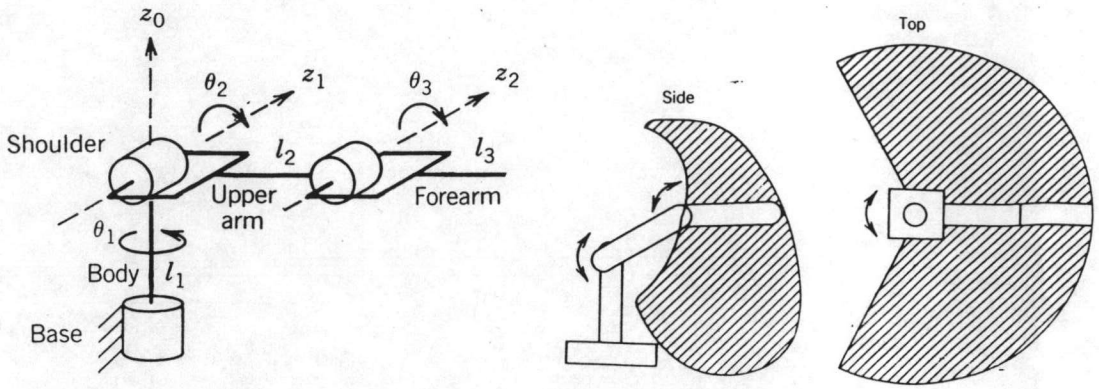
ก. รูปแบบแขนกลชนิด Scara



ข. ขอบเขตการทำงานของแขนกลชนิด Scara

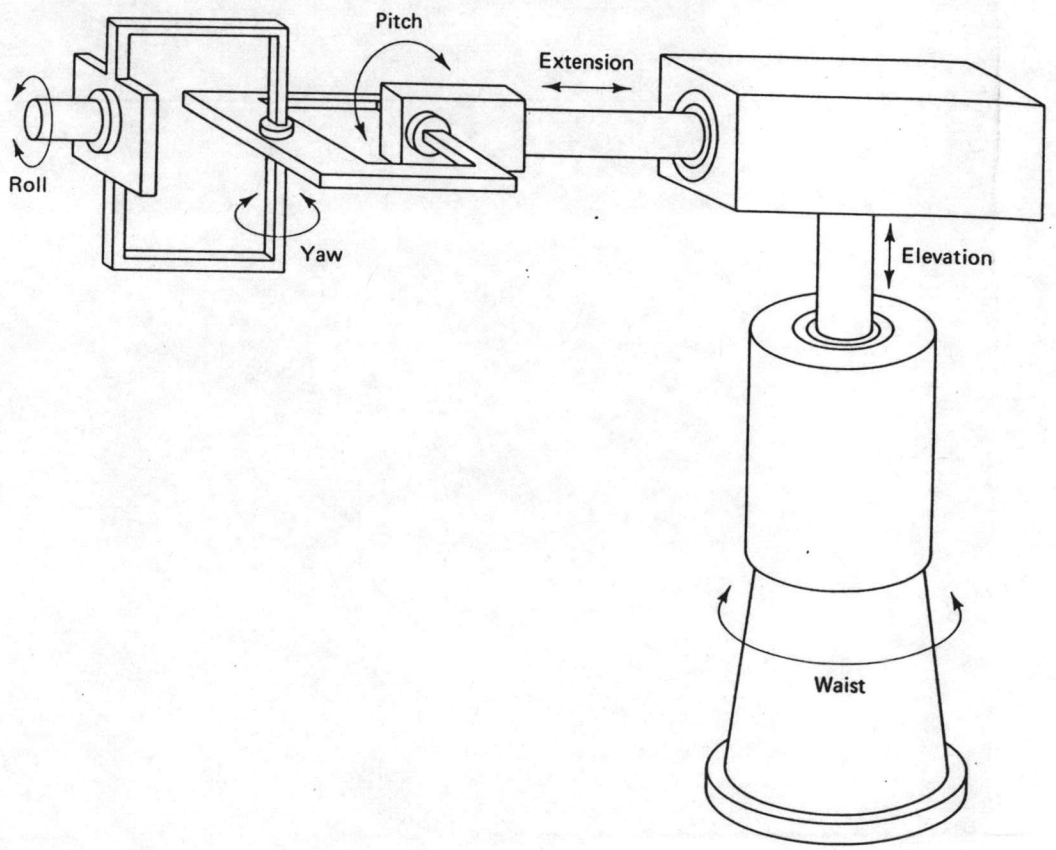
รูปที่ 2.6 แขนกลชนิด Scara

จากแขนกลชนิด Spherical ถ้าเปลี่ยนการเคลื่อนที่ของแกนที่ 3 จากการเคลื่อนที่แบบ P ให้มีลักษณะการเคลื่อนที่แบบ R ลักษณะของแขนกลชนิดนี้ เรียกว่าแขนกลชนิด Articulated ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งมีขอบเขตการเคลื่อนที่ของปลายแขนในการทำงานจะเป็นรูปทรงครึ่งทรงกลม และโครงสร้างในทางปฏิบัติแสดงในรูปที่ 2.9

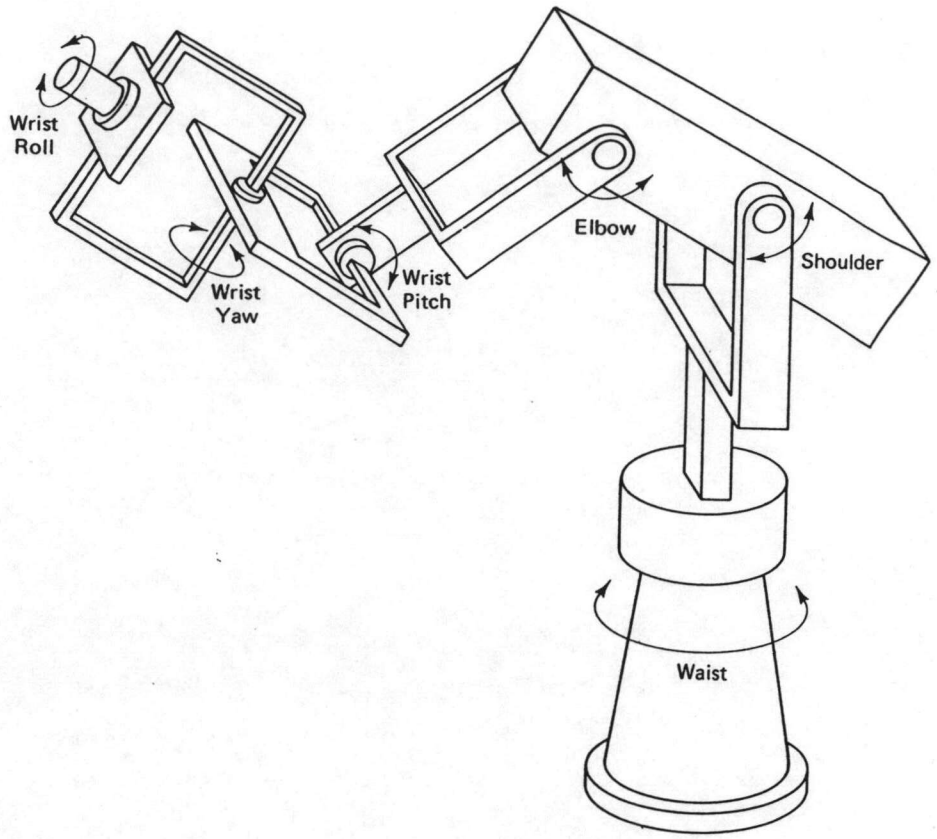


ก. รูปแบบแขนกลชนิด Articulated ข. ขอบเขตการทำงานของแขนกลชนิด Articulated

รูปที่ 2.7 แขนกลชนิด Articulated



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของแขนกลชนิด Cylindrical



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของแขนกลชนิด Articulated

2.3.2 <u>คุณลักษณะจำเพาะของแขนกล</u>

ในการเลือกแขนกลให้เหมาะสมกับงาน สิ่งที่ควรคำนึงถึงอีกประการหนึ่งคือคุณสมบัติจำเพาะพื้นฐานของแขนกลที่จะบ่งบอกถึงสมรรถนะการทำงานของแขนกล ดังแสดงในตารางที่ 2.3 [5]

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติจำเพาะพื้นฐานของแขนกลแต่ละชนิด

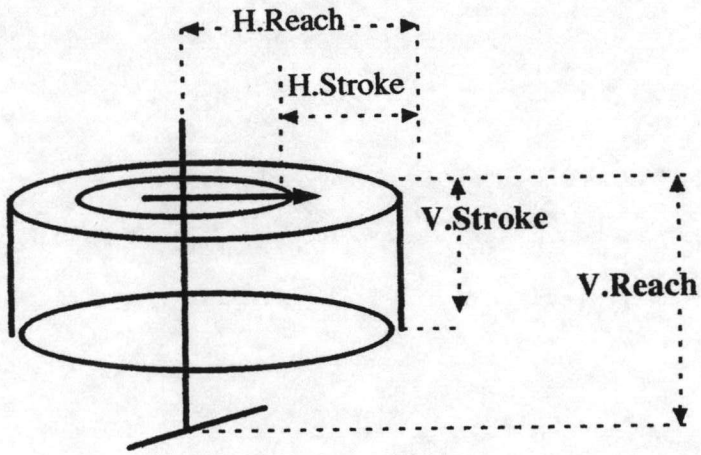
รายการ	หน่วย
จำนวนแกน	-
ความสามารถในการรับภาระ	กิโลกรัม (kg)
ความเร็วสูงสุด	มิลลิเมตรต่อวินาที (mm/s)
ระยะReach และ Stroke	มิลลิเมตร (mm)
มุมในการหมุนมือ	องศา (deg)
ความสามารถในการทำซ้ำ	มิลลิเมตร (mm)
ความแม่นยำและความเที่ยงตรง	มิลลิเมตร (mm)

จำนวนแกน คือจำนวนข้อต่อที่มีการเคลื่อนที่แบบ P หรือ R ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการปรับทิศทางเคลื่อนที่ของปลายแขน

ความสามารถในการรับภาระงาน คือน้ำหนักสูงสุดของวัตถุที่แขนกลสามารถเคลื่อนย้ายได้

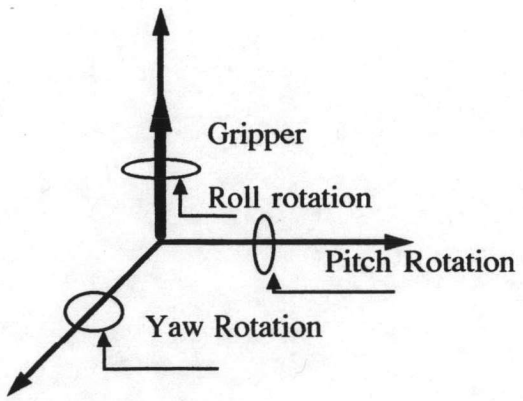
ความเร็วสูงสุด คือความเร็วในการหมุนข้อมือสูงสุดที่สามารถทำได้

ระยะ Reach และ Stroke เป็นส่วนที่ใช้บอกขอบเขตการเคลื่อนที่ในการทำงานของปลายแขน ประกอบด้วยระยะ Horizontal Reach และ Stroke พร้อมทั้งระยะ Vertical Reach และ Stroke ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงระยะ Reach และ Stroke

มุมในการหมุนมือเป็นส่วนที่ใช้วัดขอบเขตการหมุนของมือว่าสามารถหมุนได้สูงสุดเท่าไร สำหรับการหมุนของมือนั้นในลักษณะพื้นฐานจะประกอบด้วย 3 ส่วนคือ Yaw, Pitch และ Roll โดยการหมุนของมือกลจะพิจารณาในพื้นที่ 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ทิศทางการหมุนของข้อต่อในแบบ Yaw, Pitch และ Roll

ถ้าเปรียบเทียบความหมายของการเคลื่อนที่ของมือกลกับมือของมนุษย์จะเทียบได้ดังนี้ Yaw คือการปรับข้อมือไปทางซ้ายหรือทางขวา ส่วน Pitch คือการปรับข้อมือขึ้นหรือลง และ Roll คือการหมุนข้อมือโดยรอบ โดยเปลี่ยนจากหน้ามือไปสู่หลังมือ ซึ่งมุมในการหมุนทั้ง 3 ลักษณะมีหน่วยเป็นองศา

ความสามารถในการทำซ้ำ หมายถึงค่าผิดพลาดที่เกิดจากการทำงานซ้ำๆกันหลายครั้ง มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร ถ้าค่าผิดพลาดนี้มีค่าน้อยๆ แสดงว่าแขนกลชุดนี้มีความสามารถในการทำซ้ำสูง

ความเที่ยงตรงเป็นความละเอียดที่แขนกลสามารถเคลื่อนที่ได้เล็กที่สุด เช่น แขนกลชุดหนึ่งมีความเที่ยงตรงเท่ากับ 1 มิลลิเมตร หมายความว่าแขนกลชุดนี้สามารถเคลื่อนที่ได้ระยะสั้นที่สุดคือ 1 มิลลิเมตร ดังนั้นการเคลื่อนที่จะเป็นขั้นจาก 1, 2, 3, 4,... มิลลิเมตร ถ้าต้องการสั่งให้แขนกลชุดนี้เคลื่อนที่ไป 1.5 มิลลิเมตร แขนกลชุดนี้ไม่สามารถทำได้ เนื่องจากค่าที่เล็กที่สุดที่สามารถเคลื่อนที่ได้คือ 1 มิลลิเมตร ดังนั้นค่าต่อไปที่จะเคลื่อนได้คือ 2 มิลลิเมตรไม่สามารถเคลื่อนไป 1.5 มิลลิเมตรได้ เป็นต้น

ความแม่นยำเป็นการวัดความสามารถของแขนกลในการเคลื่อนมือไปตำแหน่งต่างๆที่ต้องการ โดยมีค่าผิดพลาดไปจากที่กำหนดมากน้อยเพียงใด เช่น กำหนดตำแหน่ง X, Y, Z ต้นทางที่จะหยิบวัตถุอยู่ในพื้นที่ 3 มิติ และตำแหน่ง X, Y, Z ปลายทางที่นำวัตถุไปวางเมื่อสั่งให้แขนกลทำงาน สังเกตตำแหน่งจริงที่แขนกลสามารถเคลื่อนที่ไปได้ทั้งตำแหน่งต้นทาง และปลายทางว่าผิดพลาดไปเท่าไร ถ้าแขนกลชุดใดมีค่าผิดพลาดในการเคลื่อนที่ลักษณะนี้น้อยมาก แสดงว่าแขนกลชุดนั้นมีความแม่นยำสูง

การที่มือของแขนกลจะเคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งใดๆได้ละเอียดและถูกต้องเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับข้อต่อต่างๆที่จะเคลื่อนไปในตำแหน่งและทิศทางที่เหมาะสมสอดคล้องกัน ซึ่งการควบคุมก็ต้องควบคุมตำแหน่งของข้อต่อต่างๆ ให้เหมาะสมกันซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยสมการคณิต

ศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ของข้อต่างๆและตำแหน่งปลายมือ สมการ Direct Kinematic สำหรับแขนกลชนิด Articulated แบบ 5 ดีกรีออฟฟรีดอม แสดงได้ดังนี้

$$X = C_1 (a_2 C_2 + a_3 C_2 + a_4 C_{234} - d_5 S_{234})$$

$$Y = S_1 (a_2 C_2 + a_3 C_{23} + a_4 C_{234} - d_5 S_{234})$$

$$Z = d_1 - a_2 S_2 - a_3 S_{23} - a_4 S_{234} - d_5 C_{234} \quad \text{.....(1)}$$

จากสมการข้างบนมีการใช้สัญลักษณ์เพื่อย่อความหมายให้ดูง่ายขึ้น

S_{ijk} คือ $\sin (i + j + k)$

C_k คือ $\cos_k$

C_{ijk} คือ $\cos (i + j + k)$; โดยค่า i, j, k คือมุมค่าใดๆ

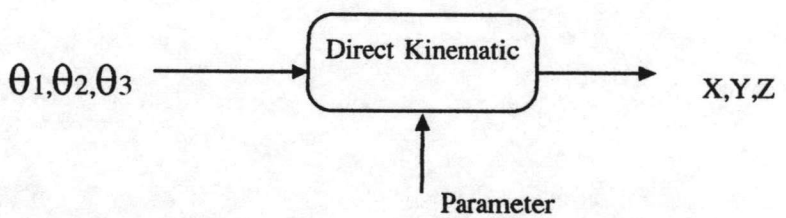
d_1 คือ ระยะห่างระหว่างฐานไปยังจุดหมุนที่ไหล่

a_2 คือ ระยะห่างจากจุดหมุนที่ไหล่ไปยังจุดหมุนที่ศอก

a_3 คือ ระยะห่างจากจุดหมุนข้อศอกไปยังจุดหมุนที่ข้อมือหมุนแบบ Pitch

a_4 คือ ระยะห่างจากจุดหมุนที่ข้อมือแบบ Pitch ไปยังข้อมือหมุนแบบ Roll

d_5 คือ ระยะห่างจากจุดหมุนที่ข้อมือหมุนแบบ Roll ไปยังจุดปลายมือ

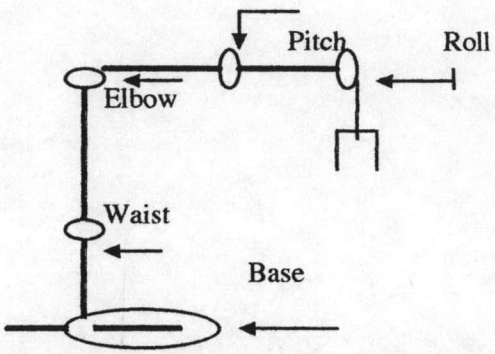


รูปที่ 2.12 แผนภาพของสมการ Direct Kinematic

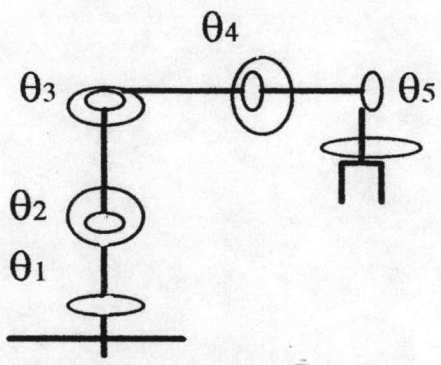
ดีกรีออฟฟรีดอม (Degree of Freedom) หรือ DOF หมายถึงจำนวนข้อต่อหรือจุดต่อที่เคลื่อนที่เป็นอิสระต่อกัน และก้าน (Link) หมายถึงสิ่งที่เชื่อมต่อระหว่างข้อต่อกับข้อต่อ ซึ่งข้อต่อนั้นจะเคลื่อนที่แบบ R หรือแบบ P ขึ้นอยู่กับชนิดของแขนกลแบบต่างๆ ตัวอย่างเช่น แขนกลชนิด Articulated ที่แสดงในรูปที่ 2.9 สามารถเขียนเป็นแผนภาพแขนกลที่มีการเคลื่อนที่แบบ 5 ดีกรีออฟฟรีดอม ดังรูปที่ 2.13

โดยทั่วไปแล้วการควบคุมแขนกล ให้เคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งที่ต้องการนั้น จะต้องมีตำแหน่งเริ่มต้นของแขน โดยใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงในการเคลื่อนที่ เรียกว่าตำแหน่ง Home ขึ้นอยู่กับชนิดของแขนกลและผู้ควบคุมว่าต้องการให้ตำแหน่งนี้อยู่ในลักษณะใด ในที่นี้จะอ้างอิง

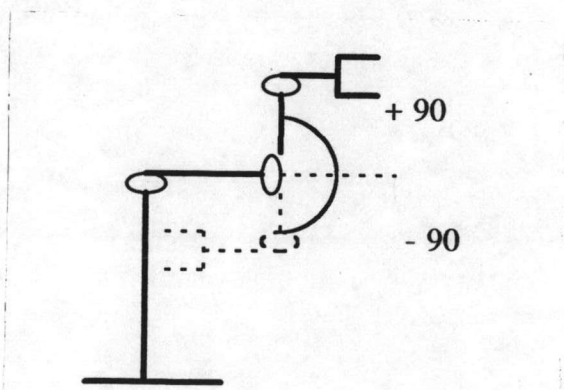
ตำแหน่ง Home ให้มีข้อต่อต่างๆอยู่ในลักษณะดังรูปที่ 2.13 เป็นหลัก รวมทั้งชนิดของแขนกลที่ใช้ในการอ้างอิงสมการหรือสูตรต่างๆ อ้างอิงเป็นชนิด Articulated แบบ 5 ดีกรีออฟฟรีดอม



รูปที่ 2.13 แผนภาพการทำงานของแขนกลในรูปแบบ 5 ดีกรีออฟฟรีดอม



รูปที่ 2.14 ตำแหน่ง Home ของแขนกล

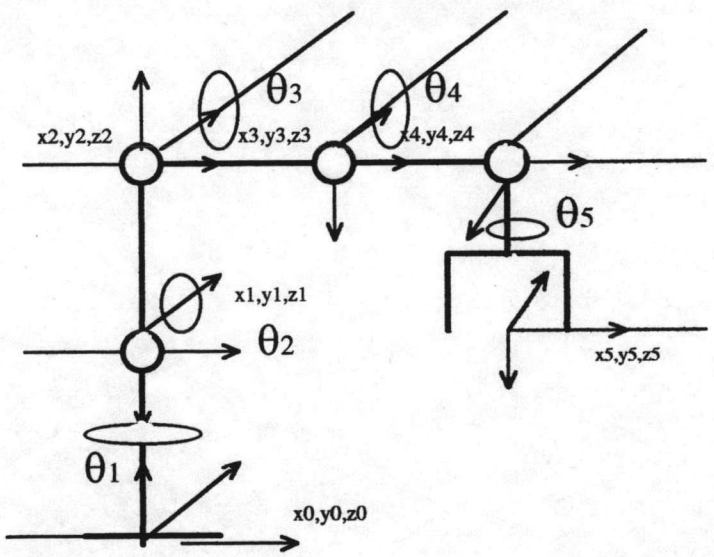


รูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างในการอ้างอิงมุม

2.3.3 การอ้างอิงมุมของแขนกล

ค่าของมุมของแต่ละข้อต่อที่ป้อนให้กับสมการ Direct Kinematic จะถูกอ้างอิงจากตำแหน่ง Home ดังนั้นในการป้อนค่ามุมของแต่ละข้อต่อจำเป็นต้องรู้ขนาดและทิศทางของมุมที่จะป้อนด้วย โดยปกติจะกำหนดให้ที่ตำแหน่ง Home ของทุกข้อต่อมีค่ามุมเป็น 0 องศา ตัวอย่างการอ้างอิงมุมแสดงในรูปที่ 2.14 เป็นลักษณะตำแหน่ง Home รูปแบบหนึ่ง ค่าของมุมของทุกข้อต่อในตำแหน่งนี้คือ θ_1, θ_2, θ_3, θ_4 และθ_5 กำหนดให้เป็น 0 องศา สมมุติว่าต้องการเคลื่อนเฉพาะ θ_4 ไป +90 องศา รูปแขนกลที่ได้จะเป็นดังรูปที่ 2.15

จากรูปที่ 2.15 ค่าของมุมอื่นๆยังคงเป็น 0 องศาอยู่มีเฉพาะมุม θ_4 เท่านั้นที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งถ้ามุมเคลื่อนที่ θ_4 เป็นค่าลบ มุมก็จะตรงข้ามกับทิศทางบวกโดยเริ่มนับจากตำแหน่งที่กำหนดให้เป็นตำแหน่งอ้างอิง ดังนั้นมุมที่ข้อต่ออื่นๆก็จะมีวิธีการอ้างอิงมุมในทำนองเดียวกัน



รูปที่ 2.16 เวกเตอร์ที่ตำแหน่งข้อต่อต่างๆของแขนกลชนิด Articulated แบบ 5 ดีกรีออฟฟรีดอม

ในรูปที่ 2.16 จะแสดงทิศทางของเวกเตอร์ในแต่ละข้อต่อ รวมทั้งแสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องซึ่งสามารถที่จะอธิบายแยกเป็นส่วน ๆ ดังนี้

θ_1 คือมุมในการกวาดแขนไปมารอบฐาน

θ_2 คือมุมในการหมุนไหล่ขึ้นลง

θ_3 คือมุมในการหมุนข้อศอก

θ_4 คือมุมในการหมุนข้อมือแบบหักขึ้นลง (Toll Pitch)

θ_5 คือมุมในการหมุนข้อมือในลักษณะหน้ามือไปหลังมือ (Toll Roll)

2.4 ต้นกำลังสำหรับขับเคลื่อนแขนกล

การที่แขนกลจะสามารถเคลื่อนไหวได้ตามการควบคุมได้นั้นต้องอาศัยพลังงานขับเคลื่อนจากแหล่งพลังงานต่างๆ ได้แก่ จากระบบไฮดรอลิก ระบบนิวเมติกส์ และระบบไฟฟ้า เป็นต้น

ระบบไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานต้นกำลังที่นิยมใช้เพราะค่าใช้จ่ายถูก ง่ายต่อการบำรุงรักษาที่สำคัญคือสามารถควบคุมตำแหน่งและความเร็วได้เที่ยงตรง มีมอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนให้แขนกลเคลื่อนไหวได้ตามการควบคุมผ่านวงจรอิเล็กทรอนิกส์หรือคอมพิวเตอร์

2.4.1 มอเตอร์สเต็ปปิง [6]

มอเตอร์สเต็ปปิง เป็นมอเตอร์ชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติดังนี้

ก. สามารถควบคุมตำแหน่งและความเร็วที่เที่ยงตรงได้โดยไม่ต้องการสัญญาณป้อนกลับ จึงใช้กับการควบคุมแบบระบบเปิดได้

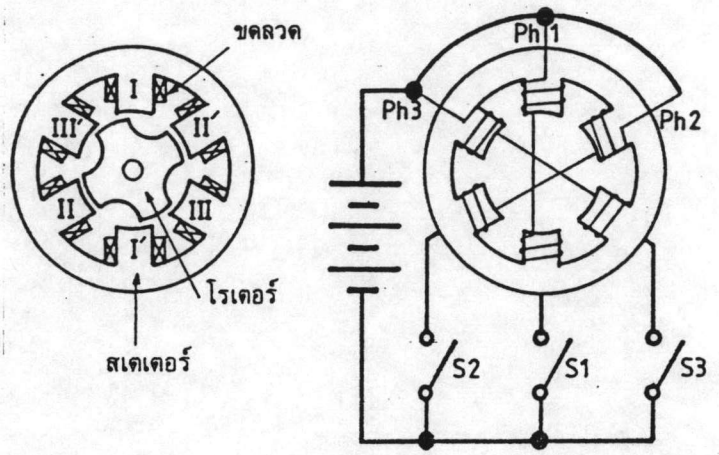
ข. เป็นอุปกรณ์ที่รับสัญญาณเชิงตัวเลขแล้วแปลงไปเป็นการเคลื่อนที่ทางกล ดังนั้นการติดต่อกับอุปกรณ์ระบบเชิงตัวเลขจึงเป็นไปได้ง่าย

ค. การออกแบบวงจรควบคุมมอเตอร์สเต็ปปิง สามารถทำได้ง่ายกว่าวงจรควบคุมมอเตอร์แบบเซอร์โว และยังสามารถออกแบบวงจรให้มอเตอร์สเต็ปปิงทำงานหรือหยุดได้แบบทันทีทันใด

2.4.1.1 ชนิดของมอเตอร์สเต็ปปิง

2.4.1.1.1 ชนิดวาริเอเบิลรีลักแตนซ์ (Variable Reluctance : VR) มอเตอร์ชนิดนี้เป็นพื้นฐานสำคัญในการทำงานของมอเตอร์สเต็ปปิง ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจการทำงานของมอเตอร์สเต็ปปิงชนิดอื่นให้ง่ายยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.17

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

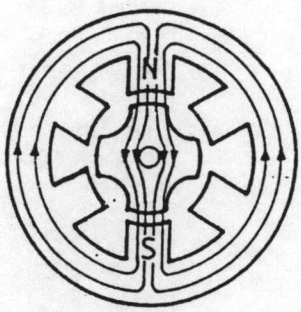


รูปที่ 2.17 ภาพตัดขวางและการพันขดลวดของ VR มอเตอร์สเต็ปปิงแบบ 3 เฟส

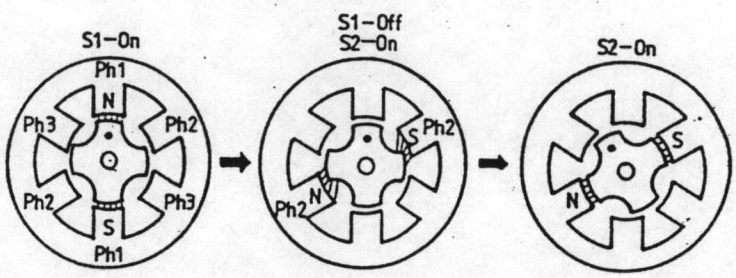
จากรูปที่ 2.17 เป็นภาพตัดขวางและพันขดลวดของ VR มอเตอร์แบบ 3 เฟสมีขั้วเหนือและใต้อยู่ตรงข้ามกัน 3 คู่ โดยจะพันขดลวดแบบอนุกรมกันในแต่ละชุด ถ้ามีการกระตุ้นเฟสเกิดขึ้นขั้ว I′, II′, III′ จะเป็นขั้วใต้ และขั้ว I , II , III จะเป็นขั้วเหนือ ทั้งโรเตอร์และสเตเตอร์จะทำจากเหล็กผสมซิลิคอนซึ่งเป็นวัสดุที่มีค่าความซึมซับเส้นแรงแม่เหล็ก (Permeability) สูง สามารถให้เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านได้มาก

การทำงานจะเริ่มจากการกระตุ้นที่เฟส 1 ก่อน (S1 “ON”) ซึ่งจะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นดังรูปที่ 2.18 (ก) ตัวโรเตอร์จะพยายามวางตำแหน่งตัวเองให้อยู่ในทิศทางที่ทำให้เกิดค่าความต้านทานแม่เหล็กน้อยที่สุด ในแนวขั้ว I - I′

ในขณะเริ่มต้นที่จะกระตุ้นที่เฟส II (S1 “OFF”, S2 “ON”) ดังรูปที่ 2.18 (ข) เส้นแรงแม่เหล็กจะไม่อยู่ในแนวทางเดินที่สะดวก จึงทำให้ค่าความต้านทานแม่เหล็กมีค่าสูง ตัวโรเตอร์ก็จะพยายามปรับตัวเองเพื่อให้ค่าความต้านทานแม่เหล็กน้อยที่สุด ด้วยการหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา เกิดแรงบิดที่ใช้หมุนภาระงานภายนอก แล้วจะไปหยุดที่ตำแหน่งความต้านทานแม่เหล็กน้อยที่สุด นั่นคือหมุนไป 1 สเต็ป



ก แสดงเส้นแรงแม่เหล็กขณะกระตุ้นเฟส 1

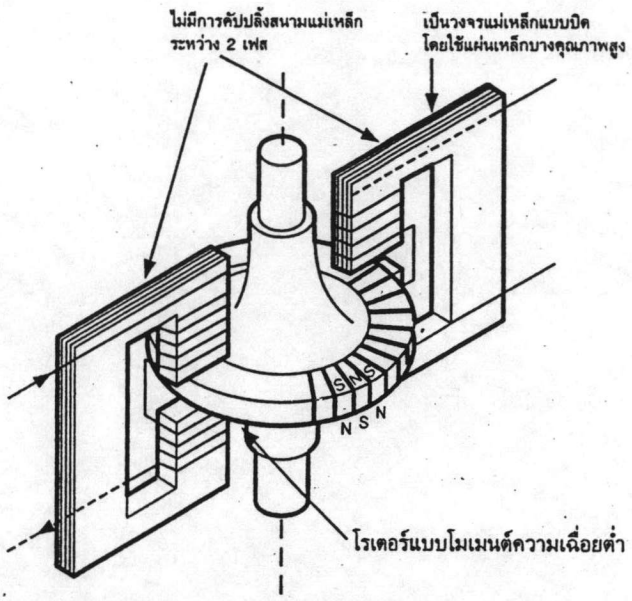


ข แสดงขั้นตอนการหมุนเมื่อมีการกระตุ้นเฟสจาก เฟส 1 ไปยัง เฟส 2

รูปที่ 2.18 แสดงการทำงานเมื่อมีการกระตุ้นเฟสของมอเตอร์สเต็ปปิง

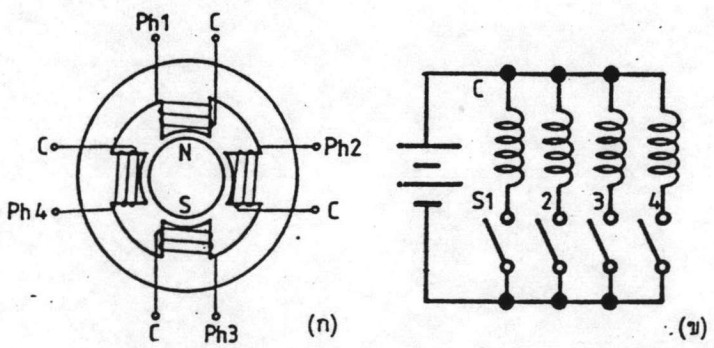
มอเตอร์สเต็ปปิงชนิดนี้มีข้อเสียในเรื่องของความถูกต้องของตำแหน่งและทำงานได้ไม่ดีเมื่อมีความเร็วรอบสูง

2.4.1.1.2 <u>ชนิดแม่เหล็กถาวร</u> (Permanent Magnet : PM) มีโครงสร้างของโรเตอร์แบบเรียบไม่มีซี่ขั้วแม่เหล็กและบนโรเตอร์จะเป็นแบบแม่เหล็กถาวร ดังแสดงในรูป 2.19



รูปที่ 2.19 โครงสร้างพื้นฐานภายในของมอเตอร์สเต็ปปิงชนิดแรเอิร์ธเพอร์มาเนนต์แมกเน็ต

การควบคุมทำได้โดยป้อนกระแสกระตุ้นที่ขดลวดบนสเตเตอร์ เช่นถ้าเป็นสเตเตอร์แบบ 4 เฟส จะมีขั้วแม่เหล็กอยู่ 4 ขั้วซึ่งมีคอยล์พันอยู่แยกจากกัน ขั้วแม่เหล็กถาวรบนโรเตอร์จะถูกแรงดึงดูดจากขั้วแม่เหล็กบนสเตเตอร์เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขดลวดและโรเตอร์จะอยู่คงที่ที่ขั้วแม่เหล็กบนสเตเตอร์นั้นถึงแม้ว่าจะไม่ป้อนกระแสไฟฟ้าอีกต่อไป ทำให้เกิดเป็นแรงยึดหน่วงขึ้น ดังแสดงในรูป 2.20

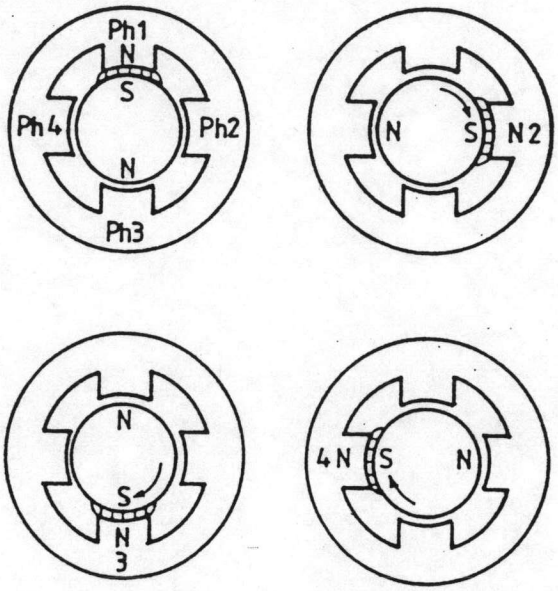


(ก) ภาพตัดขวางของ PM มอเตอร์สเต็ปปิงแบบ 4 เฟส

(ข) วงจรกระตุ้นเฟสพื้นฐาน สำหรับ PM มอเตอร์ 4 เฟส

รูปที่ 2.20 ขดลวดมอเตอร์สเต็ปปิงแบบ 4 เฟส

สำหรับการต่อวงจรกระตุ้นเฟสมอเตอร์อย่างง่ายแสดงไว้ในรูปที่ 2.20 (ข) จะเห็นว่าปลายขดลวด (C) ของทุกเฟสจะต่อร่วมกันถึงขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟ ดังนั้นเมื่อเกิดการกระตุ้นที่เฟสใดแล้วขั้วสเตเตอร์ที่เฟสนั้นก็จะกลายเป็นขั้วเหนือ



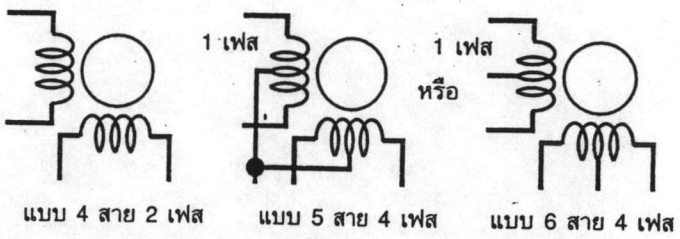
รูปที่ 2.21 ลำดับขั้นการหมุนในมอเตอร์ 4 เฟส

หลังจากมอเตอร์ถูกกระตุ้นที่เฟส 1-2-3-4 ตามลำดับ จะหมุนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ทุก 90 องศาต่อสเต็ป ถ้าต้องการจะให้มุมองศาต่อสเต็ปมีค่าลดลงหรือมีความละเอียดในตำแหน่งมากขึ้นจะต้องเพิ่มจำนวนเฟสของสเตเตอร์และจำนวนขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ให้มากขึ้น มอเตอร์สเต็ปปิงชนิดนี้มีข้อดีในเรื่องของความถูกต้องของตำแหน่ง และความเร็วรอบมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชนิดอื่น

2.4.1.1.3. <u>ชนิดไฮบริด</u> (Hybrid) โครงสร้างภายในเกิดจากการรวมเอาโครงสร้างของสเตเตอร์ชนิดวาริเอเบิลรีลักแตนซ์ และโครงสร้างของโรเตอร์ชนิดเพอร์มาเนนต์แมกเน็ตมาประกอบเข้าด้วยกัน จึงทำให้เป็นมอเตอร์ชนิดที่มีแรงยึดหน่วงสูง มีแรงบิดดึงและผลักสูงจึงมีความคงที่และทำงานได้ดี ถึงแม้ว่าจะมีสเต็ปต่อรอบในการหมุนสูง

2.4.1.2 <u>การพันขดลวดหรือคอยล์บนมอเตอร์สเต็ปปิง</u>

การพันขดลวดหรือคอยล์บนมอเตอร์สเต็ปปิงมีอยู่ 2 วิธีคือ แบบไบโพลาร์ (Bipolar) และแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar) ดังแสดงในรูปที่ 2.22



ก. ข. ค.

รูปที่ 2.22 แสดงการพันขดลวดบนสเตเตอร์ของมอเตอร์สเต็ปปิง ก. เป็นแบบไบโพลาร์ส่วน ข. และ ค. เป็นแบบยูนิโพลาร์ ซึ่งมีทั้งแบบ 5 สายและ 6 สาย 4 เฟส

มอเตอร์สเต็ปปิงแบบไบโพลาร์มีการพันขดลวด 1 ขดบนแต่ละขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ ขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนสเตเตอร์ถูกกำหนดโดยทิศทางของกระแสไฟฟ้า และสามารถทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กในทิศทางตรงข้ามได้โดยการกลับทิศการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งการกำหนดทิศการไหลและการกลับทิศทางของกระแสไฟฟ้าทำได้โดยการใช้วงจรสวิตช์กลับขั้วไฟฟ้า

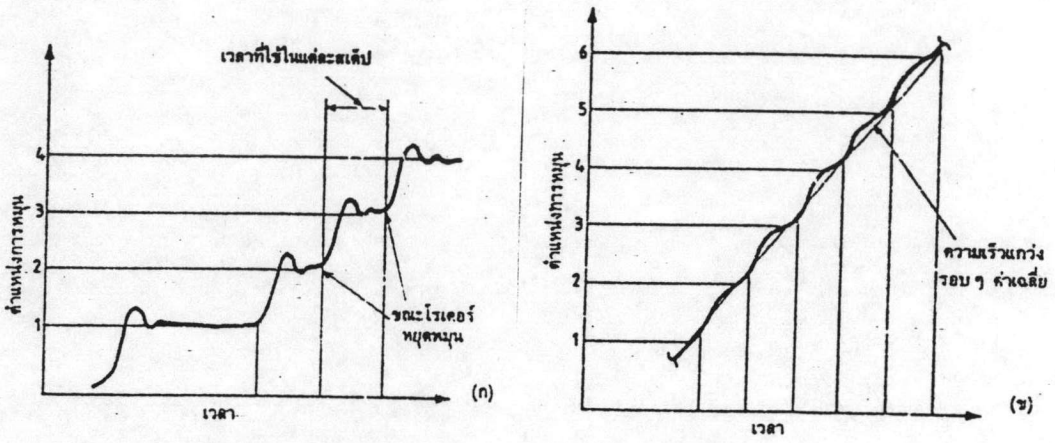
สำหรับยูนิโพลาร์จะมีการพันขดลวด 2 ขดบนแต่ละขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ ซึ่งแต่ละขดจะทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กในทิศทางตรงกันข้าม การกลับขั้วแม่เหล็กเปลี่ยนไปมาทำได้โดยการสวิตช์กระแสไฟฟ้าจากขดลวดขดหนึ่งไปยังอีกขดหนึ่งแทนเท่านั้น โดยปกติขดลวดทั้งสองจะมีการเชื่อมต่อกันหรือมีจุดร่วมเพื่อลดจำนวนของสายไฟที่ต่อจากมอเตอร์

2.4.1.3 <u>โหมดการทำงานของมอเตอร์สเต็ปปิง</u>

การทำงานของมอเตอร์สเต็ปปิงตามอัตราเร็วของสเต็ปแต่ละสเต็ปจะแบ่งออกได้เป็น 2 โหมดคือ หมุนเป็นสเต็ป (Discrete stepping mode) และหมุนแบบต่อเนื่อง (Slewing mode)

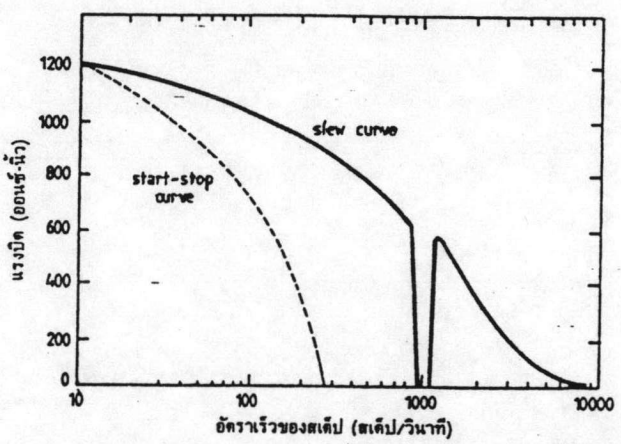
ก. การหมุนแบบสเต็ปและมีเวลาหยุดนิ่งก่อนที่จะเปลี่ยนเป็นสเต็ปถัดไป จะเรียกการทำงานในโหมดนี้ว่าการหมุนเป็นสเต็ป มีกราฟคุณลักษณะการหมุนดังในรูปที่ 2.23 (ก)

ข. ถ้าเพิ่มอัตราเร็วของในแต่ละสเต็ปให้เร็วขึ้น และเป็นไปอย่างต่อเนื่องไม่มีการหยุดนิ่งจะเรียกการทำงานนี้ว่า การหมุนแบบต่อเนื่อง มีกราฟคุณลักษณะการหมุน ดังในรูปที่ 2.23 (ข)



(ก) หมุนเป็นสเต็ป (ข) หมุนต่อเนื่อง

รูปที่ 2.23 กราฟแสดงสเต็ปของการหมุนในโหมดการทำงานแบบ



รูปที่ 2.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของสเต็ปกับแรงบิด ของการทำงานทั้ง 2 โหมดของมอเตอร์สเต็ปปิง

จากรูป 2.24 แสดงกราฟคุณลักษณะของมอเตอร์สเต็ปปิงเป็นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของสเต็ปกับแรงบิด สำหรับกราฟเส้นประเรียกว่า Start-stop curve หรือ Single-step load curve อยู่ในโหมดการหมุนเป็นสเต็ป แสดงถึงย่านของแรงบิดที่มอเตอร์สามารถเริ่มและหยุดหมุนได้ โดยปราศจากความผิดพลาดแม้ที่อัตราเร็วของสเต็ปต่างๆกัน และกราฟเส้นทึบเป็น Slew curve ซึ่งทำงานอยู่ในโหมดการหมุนแบบต่อเนื่อง เป็นกราฟที่แสดงถึงค่าแรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์สเต็ปปิงสามารถจะกระทำได้ที่อัตราเร็วของสเต็ปต่างๆกัน ถ้ามีการใช้งานมอเตอร์สเต็ปปิงเกินขอบเขตกราฟนี้ก็อาจทำให้เกิดความผิดพลาดได้ ในทางตรงกันข้ามถ้าใช้งานอยู่

ภายใต้กราฟนี้แม้จะควบคุมแบบระบบเปิดก็มั่นใจได้ว่าทั้งตำแหน่งและความเร็วมีความเที่ยงตรงแน่นอน โดยตำแหน่งของมอเตอร์สามารถคำนวณได้จากสมการ

มุมที่เปลี่ยนไป = มุมใน 1 สเต็ป × จำนวนพัลส์ที่ป้อนให้

สำหรับช่วงที่เส้นกราฟขาดหายไปของ Slew curve นั้นเป็นย่านเรโซแนนซ์ (Resonant region) ซึ่งเป็นจุดอ่อนสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการพิจารณาใช้งาน เพราะช่วงนี้เป็นช่วงที่ไม่เสถียรและควบคุมไม่ได้

2.4.1.4 <u>วิธีการกระตุ้นเฟส</u>

การที่จะทำให้มอเตอร์สเต็ปปิงหมุนได้อย่างต่อเนื่องเหมือนกับการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นจะต้องมีการจ่ายพัลส์เป็นลำดับอย่างต่อเนื่อง วิธีการที่จะกระตุ้นเฟสมีด้วยกันหลายวิธี ที่ใช้งานบ่อยมี 3 วิธี ได้แก่ แบบแรกคือ การกระตุ้นแบบเฟสเดี่ยว (Single-phase excitation) เป็นการกระตุ้นเฟสเพียงเฟสเดียวเท่านั้นที่จังหวะสัญญาณนาฬิกาหนึ่งๆ แบบที่สองคือ การกระตุ้นแบบเฟสคู่ (Two-phase excitation) จะมีการกระตุ้นเฟสสองเฟสพร้อมกันในจังหวะสัญญาณนาฬิกาหนึ่งๆ สำหรับแบบสุดท้ายเป็นการกระตุ้นแบบกึ่งสเต็ป (Half-step excitation) จะเป็นการรวมเอา 2 แบบแรกเข้าด้วยกัน โดยจะกระตุ้นเฟสแบบที่ 1 และแบบที่ 2 สลับกันไป การกระตุ้นเฟสของทั้ง 3 แบบแสดงในตารางในรูปที่ 2.25

จังหวะสัญญาณนาฬิกา	R	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
เฟส 1	■			■			■			■	
เฟส 2		■			■			■			■
เฟส 3			■			■			■		

(ก) แบบเฟสเดี่ยว (Single-phase)

จังหวะสัญญาณนาฬิกา	R	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
เฟส 1	■	■			■	■			■	■	
เฟส 2		■	■			■	■			■	■
เฟส 3			■	■			■	■			■

(ข) แบบเฟสคู่ (Two-phase)

จังหวะสัญญาณนาฬิกา	R	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
เฟส 1	▨	▨				▨	▨	▨			
เฟส 2		▨	▨	▨				▨	▨	▨	
เฟส 3				▨	▨	▨				▨	▨

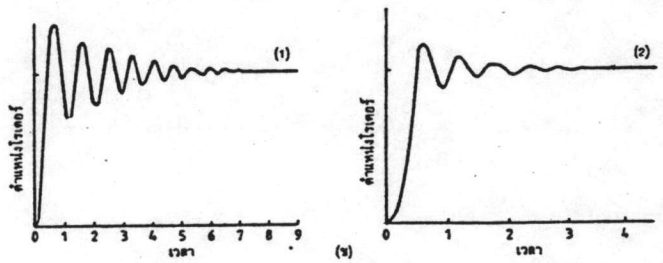
(ค) แบบกึ่งสเต็ป (Half-phase)

รูปที่ 2.25 ตารางแสดงการกระตุ้นเฟสของมอเตอร์สเต็ปปิง

ในการกระตุ้นเฟสแบบเฟสคู่ จะมีทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กไม่เป็นเส้นตรง เหมือนกับแบบกระตุ้นแบบเฟสเดี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 2.26 (ก) แต่ถึงกระนั้นค่ามุมที่เปลี่ยนไปใน 1 สเต็ปก็ยังคงมีค่าเท่าเดิมเหมือนกับแบบกระตุ้นแบบเฟสเดี่ยว สำหรับการกระตุ้นแบบกึ่งสเต็ป ค่ามุมที่เปลี่ยนไปใน 1 สเต็ปจะมีค่าลดลงครึ่งหนึ่ง การกระตุ้นแบบเฟสคู่จะเกิดแรงบิดได้มากกว่าการกระตุ้นแบบเฟสเดี่ยว ขณะเดียวกันยังสามารถเข้าตำแหน่งในแต่ละสเต็ปได้เร็วกว่าด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.26 (ข)

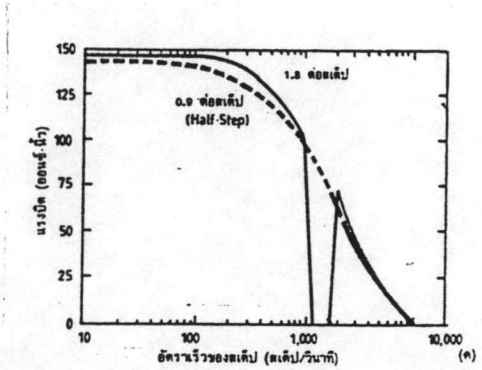
ข้อดีอย่างหนึ่งสำหรับการกระตุ้นเฟสแบบกึ่งสเต็ปคือ สามารถลดผลกระทบเนื่องจากย่านเรโซแนนซ์ได้ แต่ที่ความถี่ต่ำๆ จะมีค่าแรงบิดลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.26 (ค) และสำหรับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ขึ้นอยู่กับทิศทางของลำดับเฟสที่ถูกกระตุ้นด้วย

(ก) แสดงเส้นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กในการกระตุ้นแบบเฟสคู่



(ข) แสดงการเข้าตำแหน่งของโรเตอร์ที่สเต็ปหนึ่งๆของแบบ

(1) กระตุ้นแบบเฟสเดี่ยว (2) กระตุ้นแบบเฟสคู่

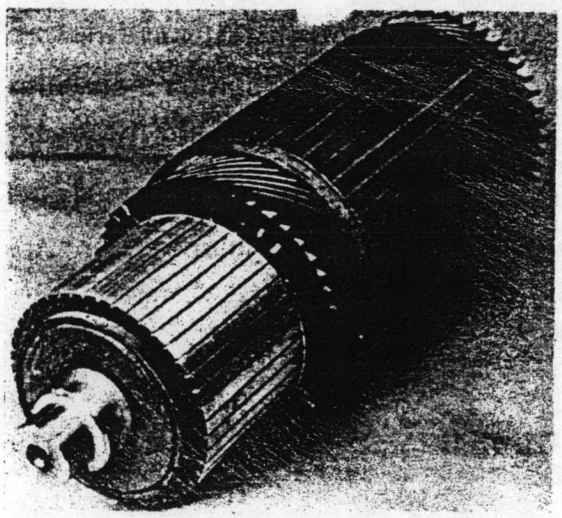


(ค) กราฟคุณลักษณะของการกระตุ้นเฟสแบบกึ่งสเต็ป (เส้นประ)และแบบเฟสคู่

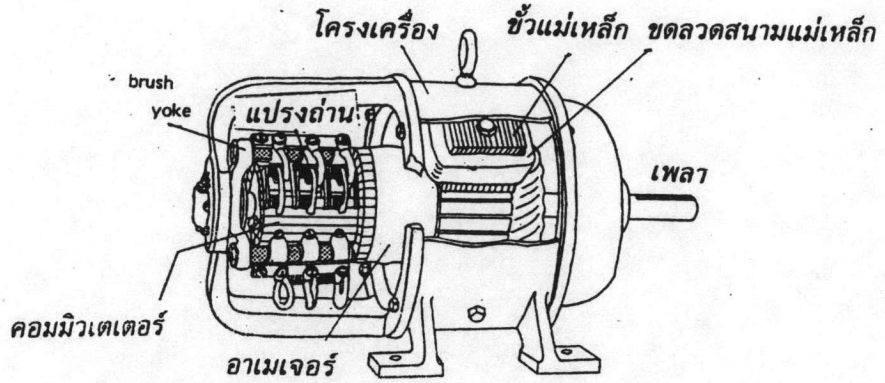
รูปที่ 2.26 แสดงคุณสมบัติของการกระตุ้นเฟสแบบกึ่งสเต็ป (เส้นประ)และแบบเฟสคู่

2.4.2 <u>มอเตอร์กระแสตรง</u> (DC motor)

โครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรงประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วนคือ อาร์เมเจอร์ ขั้วแม่เหล็ก คอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่าน ดังในรูปที่ 2.27 (ข)



(ก) ทุ่นอาร์เมเจอร์



(ข) ภาพตัดขวางของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

รูปที่ 2.27 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

2.4.2.1 <u>ชนิดของมอเตอร์กระแสตรง</u> (Characteristics of D.C. motors)

มอเตอร์กระแสตรงเป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลสามารถแบ่งได้เป็น [8]

ก. มอเตอร์ยูนิเวอร์แซล (universal motor)

ข. มอเตอร์ขนาน (shunt motor)

ค. มอเตอร์อนุกรม (series motor)

ง. มอเตอร์ผสม (compound motor)

2.4.2.1.1 <u>มอเตอร์ยูนิเวอร์แซล</u>

มอเตอร์ชนิดนี้มีความเร็วสูงและแรงบิดสูง ในมอเตอร์ที่ไม่มีตุ้มน้ำหนักถ่วง (governor) บางตัวจะปรับความเร็วได้โดยใช้ความต้านทานปรับค่าได้ หรือใช้ขดลวดสนามที่มีแท็ปหรือใช้เกียร์ทดรอบเพื่อให้ได้ความเร็วที่ต่ำลงเหมาะสมกับการใช้งาน มีใช้ในเครื่องมือขนาดเล็กทั่วไป เช่น เครื่องดูดฝุ่น จักรเย็บผ้า เครื่องผสมอาหาร เครื่องเป่าผม อุปกรณ์ที่ต้องการความสามารถในการใช้งานได้ทั้งระบบไฟกระแสสลับและไฟกระแสตรง

2.4.2.1.2 <u>มอเตอร์ขนานกระแสตรง</u>

มอเตอร์ชนิดนี้มีความเร็วค่อนข้างคงที่ แรงบิดออกตัวน้อย แต่จะเพิ่มขึ้นตามกระแสและโหลดที่เพิ่มขึ้น สามารถปรับความเร็วได้โดยต่อความต้านทานที่ปรับค่าได้ขนานกับขดลวดสนาม โดยความเร็วของมอเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าของความต้านทานของขดลวดสนามที่เพิ่มขึ้น

การใช้งานของมอเตอร์ขนานกระแสตรงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการความเร็วคงที่ มีใช้งานในเครื่องมือต่าง ๆ เช่น เครื่องเป่าลมแรง พัดลม และอื่น ๆ

2.4.2.1.3 มอเตอร์อนุกรมกระแสตรง

คุณสมบัติของมอเตอร์อนุกรมกระแสตรงคือ จะมีความเร็วขณะไม่มีโหลดสูงมากจนทำให้เกิดความเสียหายได้ ดังนั้นจะต้องให้มีโหลดอยู่ตลอดเวลา แรงบิดออกตัวต่ำและสูงขึ้นตามกระแสหรือโหลดที่มากขึ้น โดยแรงบิดจะเพิ่มขึ้นมากเมื่อกระแสหรือโหลดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

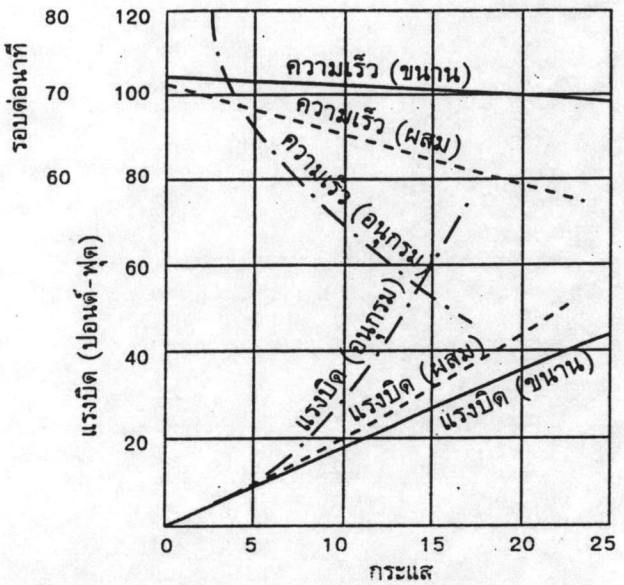
การใช้งานของมอเตอร์อนุกรมกระแสตรง จะใช้ในงานที่โหลดไม่คงที่และการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ไม่ค่อยมีผลกับการทำงานเนื่องจากความเร็วของมอเตอร์ไม่คงที่ อุปกรณ์ขับเคลื่อนที่ต่อเชื่อมจะต้องเป็นเกียร์หรืออุปกรณ์อื่นที่ไม่ลื่นไม่หลุดขาดง่าย ไม่ใช้กับระบบสายพาน เนื่องจากถ้าสายพานหลุดหรือขาดความเร็วจะสูงจนเกิดความเสียหายได้ ปกติจะใช้กับอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ต้องมีผู้ควบคุมอยู่ใกล้ชิดตลอดเวลา เช่น เครนและรอกยกของ เป็นต้น เมื่อยกของหนักมากความเร็วจะช้า เมื่อยกของเบาความเร็วจะมากขึ้น

2.4.2.1.4 มอเตอร์ผสมกระแสตรง

คุณสมบัติของมอเตอร์ผสมกระแสตรง จะได้คุณสมบัติที่ผสมกันอยู่ระหว่างมอเตอร์ขนานกระแสตรงและมอเตอร์อนุกรมกระแสตรง ความเร็วขณะไม่มีโหลดจะไม่สูงมากจนเกิดความเสียหาย แต่ความเร็วจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อมีโหลดหรือมีกระแสมากขึ้น แต่ไม่ลดลงมากเหมือนมอเตอร์อนุกรมกระแสตรง แรงบิดจะอยู่ระหว่างของมอเตอร์ขนานและมอเตอร์อนุกรม

2.4.2.2 คุณลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

การเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดต่างๆจะพิจารณาจากเส้นกราฟคุณลักษณะของมอเตอร์ซึ่งจะบ่งบอกความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า แรงบิดตัวและความเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 เส้นกราฟแสดงคุณสมบัติต่างๆของมอเตอร์ขนาน อนุกรม และผสมกระแสตรง

การพิจารณาเกี่ยวกับคุณลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จะต้องคำนึงถึงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์มอเตอร์ 2 สมการคือ [9]

$$T \propto \varnothing I_a \text{ และ } N \propto E_b / \varnothing \qquad \text{.....(2)}$$

T = แรงบิดรอบแกน เป็นนิวตันเมตร

$\varnothing$ = จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กต่อหนึ่งขั้ว เป็นเวเบอร์

La = กระแสอาร์เมเจอร์ เป็นแอมแปร์

N = ความเร็วรอบของมอเตอร์ เป็นรอบต่อนาที

E_b = แรงเคลื่อนไฟฟ้าต่อต้าน เป็นโวลต์

เส้นกราฟคุณลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะพิจารณากันใน 3 รูปแบบคือ

1. <u>แรงบิดและกระแสอาเมเจอร์</u> คือ เส้นกราฟคุณลักษณะของแรงบิดกับกระแสอาเมเจอร์ (T/I_a characteristic) หรืออาจจะเรียกว่า "คุณลักษณะทางไฟฟ้า" (Electrical characteristic)

2. <u>ความเร็วและกระแสอาเมเจอร์</u> คือ เส้นกราฟคุณลักษณะของความเร็วกับกระแสอาเมเจอร์ (N/I_a characteristic)

3. <u>ความเร็วและแรงบิด</u> คือ เส้นกราฟคุณลักษณะของความเร็วกับแรงบิด (N/T characteristic) หรืออาจจะเรียกว่า "คุณลักษณะทางกล" (Mechanical characteristic)