บทที่ 2

ทฤษฎีเบื้องต้นของแขนหุ่นยนต์

ระบบอุตสาหกรรมในปัจจุบัน มีการนำหุ่นยนต์มาใช้งานอย่างกว้างขวาง หุ่นยนต์อุตสาหกรรมจัดเป็นหุ่นยนต์ประเภทอเนกประสงค์ มีลักษณะการทำงานเลียนแบบอวัยวะของมนุษย์ ได้แก่ การทำงานของไหล่ แขน ข้อศอก และมือ มีคอมพิวเตอร์เป็นสมองควบคุมการทำงาน ให้เป็นไปตามขั้นตอนที่ได้วางแผนไว้ ทำให้หุ่นยนต์สามารถทำงานที่ซับซ้อนใกล้เคียงกับการทำงานของมนุษย์มากขึ้น การใช้หุ่นยนต์ในงานอุตสาหกรรม มีข้อได้เปรียบกว่าการทำงานของมนุษย์หลายอย่าง เป็นต้นว่า ในเรื่องของความแม่นยำ รวดเร็ว และสามารถทำงานซ้ำๆกันได้โดยไม่เกิดความล้า และให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ นอกจากนั้นหุ่นยนต์ยังสามารถทำงานในสภาวะแวดล้อม ที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ เช่น บริเวณที่มีความร้อนสูง หรือมีอากาศเป็นพิษ เป็นต้น

โครงสร้างของหุ่นยนต์

โครงสร้างของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมทั่วไป ดังรูปที่ 2.1 มีองค์ประกอบสำคัญ อย่างน้อย 3 ส่วนคือ

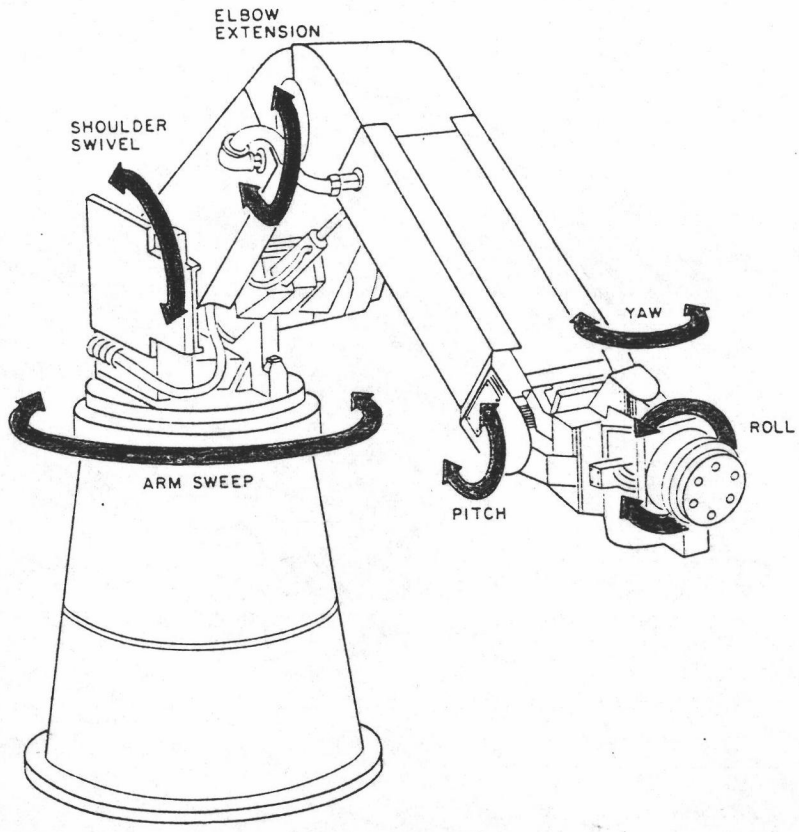
1. แขนหุ่นยนต์ ประกอบด้วยลิงค์ (link) ซึ่งเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (rigid body) หลายๆอันต่อเข้าด้วยกันแบบอนุกรม โดยมีข้อ (joint) ทำหน้าที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของลิงค์ ชนิดของข้อแบ่งตามลักษณะการเคลื่อนที่ได้เป็น 2 อย่าง ได้แก่ ข้อแบบหมุนหรือเคลื่อนที่เชิงมุม (rotary หรือ revolute joint) และข้อแบบเคลื่อนที่เชิงเส้น (linear หรือ prismatic joint) ที่ปลายแขนของหุ่นยนต์ มีอุปกรณ์สำหรับหยิบจับ หรือสำหรับการใช้งานอย่างอื่น (end-effector หรือ gripper)

2. อุปกรณ์ขับเคลื่อน (Actuator หรือ Driver) อุปกรณ์ที่ใช้ขับเคลื่อนแขนหุ่นยนต์แต่ละข้อมักเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า ได้แก่ มอเตอร์กระแสตรง หรือ มอเตอร์สเตป แต่ในงานที่หุ่นยนต์ต้องใช้กำลังมากๆ อาจใช้ระบบไฮโดรลิคเป็นระบบขับเคลื่อน

3. คอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมการทำงาน คอมพิวเตอร์ใช้ทำหน้าที่คำนวางแผนการเคลื่อนที่

และใช้เป็นระบบควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์

นอกจากนั้นอาจมีอุปกรณ์พิเศษอื่นๆอีก ได้แก่ ตัวรับข้อมูล เช่น ตัวรับแรงสัมผัส เป็นต้น



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมโดยทั่วไป

ประเภทของแขนหุ่นยนต์

การแบ่งประเภทหุ่นยนต์อุตสาหกรรม อาจแบ่งได้หลายวิธี ได้แก่ การแบ่งตามลักษณะการเคลื่อนที่ ชนิดของระบบขับเคลื่อน และระบบพิกัดอ้างอิง

1. การแบ่งตามลักษณะการเคลื่อนที่ การแบ่งประเภทแขนหุ่นยนต์ตามวิธีนี้ เป็นการแบ่งตามลักษณะการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ปลายแขนหุ่นยนต์ ซึ่งแบ่งออกเป็น แขนหุ่นยนต์ชนิดเคลื่อนที่แบบจุดสู่จุด (point-to-point motion) และชนิดเคลื่อนที่แบบเส้นทางต่อเนื่อง (continuous-path motion)

1.1 แขนหุ่นยนต์ชนิดเคลื่อนที่แบบจุดสู่จุด เป็นการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ปลายแขนหุ่นยนต์ จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในบริเวณทำงาน (work space) โดยไม่สนใจเส้นทางระหว่างจุด

การเคลื่อนที่แบบนี้ เป็นลักษณะการทำงานที่ไม่ต่อเนื่อง เช่น การเชื่อมไฟฟ้าแบบจุด (spot welding) การหยิบวัตถุจากตำแหน่งหนึ่งไปวางไว้ยังอีกตำแหน่งหนึ่ง และการประกอบชิ้นส่วนที่ไม่ซับซ้อน เป็นต้น

1.2 แขนหุ่นยนต์ชนิดเคลื่อนที่แบบเส้นทางต่อเนื่อง การเคลื่อนที่ลักษณะนี้ อุปกรณ์ปลายแขนหุ่นยนต์ต้องเคลื่อนที่ติดตามเส้นทางอ้างอิงซึ่งกำหนดไว้ล่วงหน้า อย่างใกล้ชิดที่สุด และในขณะเดียวกัน อุปกรณ์ปลายแขนหุ่นยนต์อาจทำงานไปด้วยอย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างการทำงานในลักษณะนี้ได้แก่ การพ่นสีรถยนต์ การเชื่อมไฟฟ้าแบบเป็นแนว (arc welding) และการประกอบชิ้นส่วนที่ซับซ้อน เป็นต้น

2. <u>การแบ่งตามชนิดของระบบขับเคลื่อน</u> ระบบขับเคลื่อนของหุ่นยนต์ที่ใช้กันโดยทั่วไป แบ่งเป็น 2 ระบบ ได้แก่ระบบไฟฟ้า และระบบไฮดรอลิค

2.1 แขนหุ่นยนต์ชนิดที่ขับเคลื่อนด้วยระบบไฟฟ้า มักใช้มอเตอร์กระแสตรง หรือ มอเตอร์สเตป เป็นระบบขับเคลื่อน

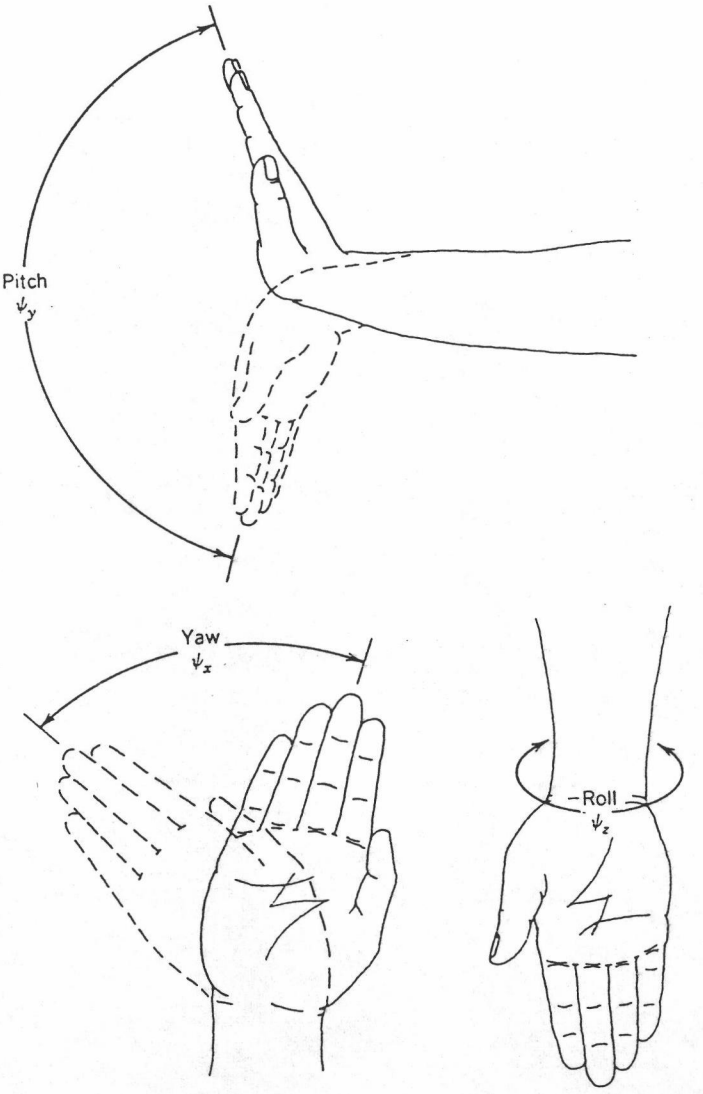
2.2 แขนหุ่นยนต์ชนิดที่ขับเคลื่อนด้วยระบบไฮดรอลิค มักใช้ในงานที่ต้องการกำลังสูง แต่มีข้อเสียที่สำคัญในเรื่องความสกปรก

3. <u>การแบ่งตามแกนพิกัดอ้างอิงในการเคลื่อนที่</u> แขนหุ่นยนต์โดยทั่วไปมักมี 6 ข้อ ประกอบด้วยลิงค์ 6 ลิงค์ โดยที่ 3 ลิงค์แรกทำหน้าที่กำหนดตำแหน่ง (position) และอีก 3 ลิงค์ที่เหลือทำหน้าที่กำหนดทิศทาง (orientation) ของอุปกรณ์ปลายแขนหุ่นยนต์ในบริเวณทำงาน พิกัดอ้างอิงของตำแหน่งเรียกว่า แกนหลัก (major axes) และพิกัดอ้างอิงของทิศทาง เรียกว่า แกนรอง (minor axes) ระบบพิกัดของแกนรอง อาจอ้างอิงในระบบ RPY (roll-pitch-yaw) ดังรูปที่ 2.2 สำหรับแกนหลักของแขนหุ่นยนต์สามารถอ้างอิงในระบบพิกัดได้หลายแบบ ขึ้นอยู่กับการประกอบกันของข้อทั้งสองชนิด ได้แก่ ข้อแบบเคลื่อนที่เชิงมุม และข้อแบบเคลื่อนที่เชิงเส้น

3.1 แขนหุ่นยนต์แกนพิกัดฉาก (Rectangular-Coordinate Manipulator) แขนหุ่นยนต์ชนิดนี้ ประกอบด้วยลิงค์ชนิดเคลื่อนที่เชิงเส้นทั้ง 3 ลิงค์ ดังรูปที่ 2.3 การอ้างอิงตำแหน่งของแขนในบริเวณทำงาน อ้างอิงในระบบพิกัดฉาก (catesian) การเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ชนิดนี้ ต้องการปริมาตรในบริเวณทำงานขนาดใหญ่

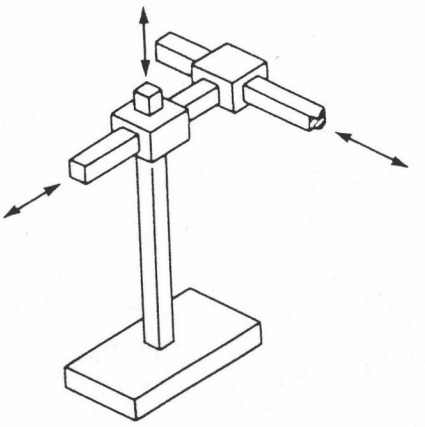
3.2 แขนหุ่นยนต์แกนพิกัดทรงกระบอก (Cylindrical-Coordinate Manipulator) แขนหุ่นยนต์ชนิดนี้ ประกอบด้วยลิงค์ชนิดเคลื่อนที่เชิงเส้น 2 ลิงค์ และลิงค์ชนิดเคลื่อนที่เชิงมุม 1 ลิงค์ ดังรูปที่ 2.4 การอ้างอิงตำแหน่งของแขนในบริเวณทำงาน อ้างอิงในระบบพิกัดทรงกระบอก การเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ชนิดนี้ ต้องการปริมาตรในบริเวณทำงานน้อย แต่การสัมผัสพื้นบริเวณฐานทำได้ยาก

3.3 แขนหุ่นยนต์แกนพิกัดทรงกลม (Spherical-Coordinate Manipulator) แขนหุ่นยนต์ชนิดนี้ ประกอบด้วยลิงค์ชนิดเคลื่อนที่เชิงเส้น 1 ลิงค์ และลิงค์ชนิดเคลื่อนที่เชิงมุม 2 ลิงค์ ดังรูปที่ 2.5 การอ้างอิงตำแหน่งของแขนในบริเวณทำงาน อ้างอิงในระบบพิกัดทรงกลม การเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ชนิดนี้ ต้องการปริมาตรในบริเวณทำงานมาก

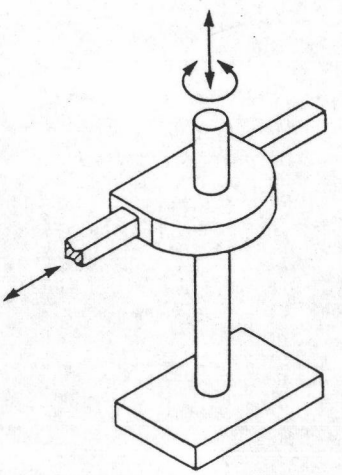


รูปที่ 2.2 ระบบพิกัด Roll-Pitch-Yaw

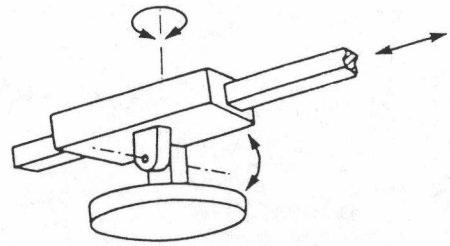
3.4 แขนหุ่นยนต์แกนหมุน (Articulated-Coordinate Manipulat) ประกอบด้วยลิงค์ชนิดเคลื่อนที่เชิงมุมทั้งหมด ดังรูปที่ 2.6 เป็นหุ่นยนต์ที่มีโครงสร้างค่อนข้างยืดหยุ่นในการใช้งานมาก แต่มีสมการการเคลื่อนที่ซับซ้อนกว่าแบบอื่นๆ ทำให้การควบคุมความแม่นยำของตำแหน่งในการเคลื่อนที่ทำได้ค่อนข้างยากกว่า



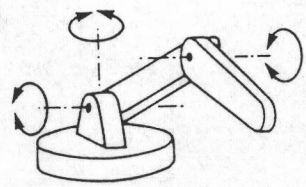
<u>รูปที่</u> 2.3 แขนหุ่นยนต์แกนพิกัดฉาก



<u>รูปที่</u> 2.4แขนหุ่นยนต์แกนพิกัดทรงกระบอก



รูปที่ 2.5 แขนหุ่นยนต์แกนพิกัดทรงกลม



รูปที่ 2.6 แขนหุ่นยนต์แกนหมุน

แบบจำลองพลวัตของแขนหุ่นยนต์

แบบจำลองพลวัตของแขนหุ่นยนต์ คือสมการคณิตศาสตร์ที่แสดงถึง ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหรือแรงบิดของแขนกับตัวแปรของการเคลื่อนที่ ได้แก่ ตำแหน่ง ความเร็ว และ ความเร่งของแขน ความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถแยกได้เป็น 2 ลักษณะ อย่างแรกเป็นการแสดงให้ทราบถึง ตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งที่แขนเคลื่อนที่ไป เนื่องจากผลของแรงที่มากระทำ ความสัมพันธ์เช่นนี้เรียกว่า พลวัตตรง (direct dynamics) สามารถนำไปใช้จำลองแบบการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ได้ อย่างที่สอง เป็นการแสดงให้ทราบถึง แรงที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนแขนให้เคลื่อนที่โดยมี ตำแหน่ง ความเร็ว และ ความเร่ง ตามที่กำหนด เรียกความสัมพันธ์เช่นนี้ว่า พลวัตย้อนกลับ (inverse dynamics)

วิธีหาสมการแบบจำลองแขนหุ่นยนต์ ทำได้หลายวิธี เช่น จากสมการ Lagrange-Euler สมการ Newton-Euler สมการ D'Alembert สมการ Recursive Lagrange-Euler เป็นต้น สมการแบบจำลองตามวิธีต่างๆดังกล่าว มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไปดังนี้

สมการ Lagrange-Euler เป็นสมการที่อยู่ในรูปปิด (closed-form equation) สามารถเขียนในรูปสมการสถานะ (state equations) ได้โดยตรง จึงเหมาะสำหรับนำไปใช้ออกแบบระบบควบคุมตามวิธีการต่างๆ แต่มีข้อเสียคือ การคำนวณสมการแบบจำลองชนิดนี้ใช้เวลาค่อนข้างมาก อาจทำให้มีข้อจำกัดในเรื่อง การควบคุมแบบเวลาจริง (real time control) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีจำนวนลิงค์มากขึ้น

สมการ Newton-Euler มีวิธีคำนวณโดยแยกแต่ละลิงค์ที่ประกอบกันเป็นแขนหุ่นยนต์ ออกเป็นวัตถุอิสระ (free body) ทำให้สามารถคำนวณแบบรีเคอร์สีพได้ จึงใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าสมการ Lagrange-Euler แต่มีข้อเสียคือ สมการไม่เป็นรูปปิด ทำให้ยากในการนำไปออกแบบระบบควบคุม

สมการ D'Alembert มีลักษณะอยู่ระหว่างสองวิธีแรก กล่าวคือเมื่อเปรียบเทียบในเรื่องลักษณะโครงสร้าง วิธีนี้มีโครงสร้างดีกว่าสมการ Newton-Euler แต่ยังไม่ดีเท่าสมการ Lagrange-Euler แต่เมื่อเปรียบเทียบเรื่องเวลาในการคำนวณ วิธีนี้ใช้เวลามากกว่าสมการ Newton-Euler แต่จะใช้เวลาคำนวณน้อยกว่าสมการ Lagrange-Euler

สมการ Recursive Lagrange-Euler มีการคำนวณเร็วกว่า สมการ Lagrange-Euler แบบรูปปิด แต่ยังคงใช้เวลามากกว่าสมการ Newton-Euler วิธีนี้มีข้อเสียคือ ทำให้ความเป็นโครงสร้างของสมการ Lagrange-Euler เสียไป

นอกจากแบบจำลองแขนหุ่นยนต์ตามวิธีการดังกล่าวแล้ว ยังมีงานวิจัยต่างๆอีกเป็นจำนวนมากที่เน้นไปทางด้าน เสนอวิธีการคำนวณแรงบิดจากโครงสร้างของแขนหุ่นยนต์ โดยใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด

สมการ Lagrange-Euler

แบบจำลองพลวัตของแขนหุ่นยนต์ในงานวิจัย จะพิจารณาจากสมการ Lagrange-Euler ทั้งในการจำลองเชิงเลขเพื่อทดสอบการทำงานของระบบ และในการออกแบบระบบควบคุม สมการ Lagrange-Euler เป็นสมการที่ได้มาจากฟังก์ชันพลังงานของ Lagrange ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่เป็นผลต่างระหว่างพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของระบบ ในกรณีนี้ถือว่าการเคลื่อนที่ของแต่ละลิงค์ เป็นการเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งแกร็ง แต่ละลิงค์มีมวลสม่ำเสมอ และต่อเข้าด้วยกันแบบอนุกรม สมการการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ ซึ่งอยู่ในรูปสมการอนุพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นอันดับสอง สามารถพิจารณาได้ดังนี้

กำหนดตัวแปรอิสระจำนวน N ตัว สำหรับแขนหุ่นยนต์ N ข้อ คือ $q1(t)$, $q2(t)$, ... , $q_N(t)$ ให้เป็นแกนพิกัดใดๆ (generalized coordinates) แทนตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของลิงค์ที่ 1 , 2 , ... , N ตามลำดับ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเวคเตอร์คือ $[\, q1 , q2 , \dots , q_N \,]^T$ ซึ่งมีมิติ N

สมการ Lagrange-Euler ในรูปของฟังก์ชันพลังงานของ Lagrange คือ

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \qquad i = 1, 2, \dots, N \qquad \text{_____(2.1)}$$

เมื่อ

$$L(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}}) = K(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}}) - P(\mathbf{q}) \qquad \text{_____(2.2)}$$

คือ ฟังก์ชันของ Lagrange

$$K(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}}) = \frac{1}{2}\dot{\mathbf{q}}^T D(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \qquad \text{_____(2.3)}$$

คือ พลังงานจลน์ของระบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งและความเร็วของแขน

$$P(\mathbf{q}) = -\sum_{i=1}^{N} m_i \mathbf{g}^T T_0^i \overline{p}_i \qquad \text{_____(2.4)}$$

คือ พลังงานศักย์ของระบบ เป็นปริมาณงานที่ต้องการ เพื่อเปลี่ยนตำแหน่งศูนย์กลางมวลของลิงค์ ไปจากระนาบอ้างอิง (horizontal plane) ในสนามความโน้มถ่วงของโลก ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแขนเพียงอย่างเดียว

$$\dot{q}(t) = \frac{dq(t)}{dt} \qquad \text{_____(2.5)}$$

คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของข้อ

$D(q)$ คือ เมตริกซ์ความเฉื่อยของแขนหุ่นยนต์ (inertia matrix) ซึ่งมีมิติ NxN และมีคุณสมบัติเป็น เมตริกซ์สมมาตรบวก (symmetric, positive-definite matrix)

τ_i คือ แรงหรือแรงบิดของข้อที่ i

m_i คือ มวลของลิงค์ที่ i

$\bar{p}_i$ คือ เวคเตอร์ชี้ตำแหน่งศูนย์กลางความโน้มถ่วง (center of gravity) ของลิงค์ที่ i

$\bar{g}^T = [\, g_{0x} \;\; g_{0y} \;\; g_{0z} \;\; 0 \,]^T$ คือ ความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก ซึ่งมีองค์ประกอบในทิศทางตามระบบแกนอ้างอิงของฐาน

T_0^i คือ เมตริกซ์ทรานส์ฟอร์เมชัน ระหว่างพิกัดอ้างอิงของลิงค์ที่ i กับพิกัดฐาน ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$T_0^i = T_0^1 T_1^2 \cdots T_{i-1}^i \qquad \text{——(2.6)}$$

เมื่อ

T_{i-1}^i คือ เมตริกซ์สำหรับแปลงตำแหน่ง ซึ่งอ้างอิงในพิกัด i มาอ้างอิงในพิกัด i-1 มีค่าดังนี้

$$T_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad \text{——(2.7)}$$

พารามิเตอร์ต่างๆมีความหมายดังต่อไปนี้

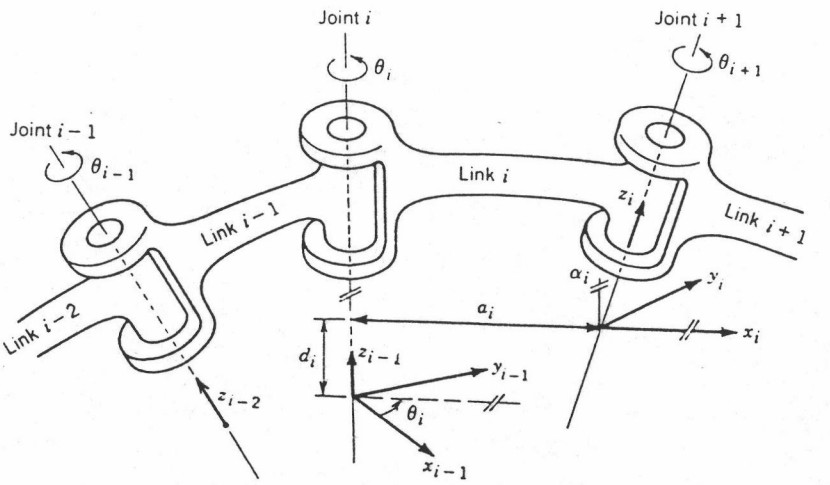
a_i คือ ความยาวของลิงค์ i เป็นระยะจากจุดกำเนิด (origin) ของพิกัด i ไปยังจุดตัดระหว่างแกนพิกัด z_{i-1} และแกนพิกัด x_i โดยวัดระยะไปตามแกน x_i หรือเป็นระยะตั้งฉากระหว่างแกนพิกัด z_i และ z_{i-1}

α_i คือ มุมบิด (twist angle) เป็นมุมของการหมุนรอบแกนพิกัด x_i โดยวัดจากแกนพิกัด z_{i-1} ไปยังแกนพิกัด z_i ซึ่งมีค่าเป็นบวกในทิศทวนเข็มนาฬิกา

θ_i คือ มุมของการหมุนรอบแกนพิกัด z_{i-1} โดยวัดจากแกนพิกัด x_{i-1} ไปยังแกนพิกัด x_i ซึ่งมีค่าเป็นบวกในทิศทวนเข็มนาฬิกา

d_i คือ ระยะจากจุดกำเนิดของพิกัด i-1 ไปยังจุดตัดระหว่างแกนพิกัด z_{i-1} กับแกนพิกัด x_i โดยวัดไปตามแกนพิกัด z_{i-1} แต่ถ้าหากแกนพิกัดทั้งสองไม่ตัดกัน d_i จะหมายถึงระยะตั้งฉากระหว่างแกนพิกัด x_i และแกนพิกัด x_{i-1}

การกำหนดระบบพิกัดดังกล่าว กำหนดตามวิธีของ Denavit-Hartenberg รายละเอียดดูได้จาก Fu et al. (1987) และ Koivo (1989)



รูปที่ 2.7 การกำหนดพารามิเตอร์ไคเนเมติคของแขนหุ่นยนต์

สมการ Lagrange-Euler ตามสมการ (2.1) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$D(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + H(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + G(\mathbf{q}) = \tau(t) \qquad \text{_____(2.8)}$$

เมื่อ

$H(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ คือ เวคเตอร์ของแรง Coliolis และ centrifugal ซึ่งมีมิติ N

$G(\mathbf{q})$ คือ เวคเตอร์แรงโน้มถ่วง (gravitational force vector) ซึ่งมีมิติ N

โดยที่

$$G(\mathbf{q}) = \frac{\partial P(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} \qquad \text{_____(2.9)}$$

และ

$H_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \dot{\mathbf{q}}^T h_i(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}$ คือ องค์ประกอบที่ i ของเวคเตอร์ $H(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ _____(2.10)

เมื่อ

$$h_i(\mathbf{q}) = \frac{1}{2}\left[\frac{\partial \mathbf{d}_i}{\partial \mathbf{q}} - \frac{\partial D(\mathbf{q})}{\partial q_i} + \left(\frac{\partial \mathbf{d}_i}{\partial \mathbf{q}}\right)^T\right] \qquad \text{——(2.11)}$$

d_i คือ คอลัมน์ที่ i ของเมตริกซ์ $D(\mathbf{q})$