สำนักงานวิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การควบคุม

หลังจากผ่านขั้นตอนการแปลจนสามารถสร้างเป็นชุดคำสั่ง (Command object) และเรียกมาที่ฟังก์ชันการทำงานตามชุดคำสั่งที่ได้ โดยฟังก์ชันการทำงานที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ เช่น G01 จะต้องมีการสร้างแนวเส้นทางเดิน และควบคุมให้สามารถเคลื่อนที่ได้ตามแนวเส้นทางเดินนั้น ซึ่งในบทนี้จะเป็นการอธิบายพื้นฐานเกี่ยวกับตัวควบคุม (Controller) ที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ การสร้างเส้นแนวทางเดิน และขั้นตอนการสร้างเส้นทางเดินแบบเส้นตรง (Linear Interpolation)

ในการการควบคุมการเคลื่อนที่มีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการอ่านค่าตำแหน่งที่ต้องการจะเคลื่อนที่ไปถึง
2. อ่านค่าตำแหน่งปัจจุบัน
3. คำนวณหาค่าผิดพลาดทางตำแหน่งจากผลต่างของพิกัดที่ต้องการเคลื่อนที่ไปถึงกับพิกัดของตำแหน่งปัจจุบัน
4. คำนวณหาทอร์กที่จะใช้ขับมอเตอร์
5. ควบคุมมอเตอร์จากทอร์กที่คำนวณได้ โดยส่งค่าความต่างศักย์ซึ่งสัมพันธ์กับทอร์กที่คำนวณได้ ไปขับมอเตอร์

สำหรับการควบคุมความเร็ว จะอาศัยหลักการให้แขนกลเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการด้วยความเร็วที่กำหนด โดยจะแบ่งช่วงการเคลื่อนที่เป็นช่วงสั้นๆ ที่สัมพันธ์กับช่วงเวลาที่คงที่ เช่น ต้องการเคลื่อนที่เป็นระยะทาง 100 มิลลิเมตร ด้วยความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที ถ้าใช้ช่วงเวลา 4 มิลลิวินาทีในการการควบคุมการเคลื่อนที่ (คาบเวลาการสุ่ม (Sampling Time)) จะได้ว่าในช่วง 4 มิลลิวินาที แขนกลต้องเคลื่อนที่ได้เป็นระยะ 0.04 มิลลิเมตร จำนวน 2500 ช่วง

4.1 ตัวควบคุม (Controller)

หลักการทางตรรกศาสตร์ของการควบคุม คือการออกแบบเพื่อที่จะจัดการกับสัญญาณคลาดเคลื่อน (Error signal) เพื่อให้ได้สัญญาณควบคุม (Control signal) ที่ถูกต้อง ซึ่งจะกล่าวได้ว่าหน้าที่หลักของตัวควบคุม คือการควบคุมระบบให้ได้ค่าสัญญาณควบคุมที่ถูกต้องหรือใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้มากที่สุด

สำหรับตัวควบคุมพื้นฐานที่จะกล่าวถึงนั้น เช่น ตัวควบคุมแบบ พี แบบไอ แบบ ดี ซึ่งผลของการควบคุมแบบ พี แบบไอ และแบบ ดี จะมีข้อดีแตกต่างกัน คือการควบคุมแบบ พี จะทำให้การตอบสนองของระบบรวดเร็วขึ้น การควบคุมแบบ ไอ จะมีหน้าที่ลดความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัว (Steady state error) ให้น้อยลง ส่วนการควบคุมแบบ ดี จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้นเมื่อใช้ควบคู่กับการควบคุมแบบ พี. และการควบคุมแบบ ไอ.

แม้ว่าในกระบวนการการเคลื่อนที่จริง จะเป็นแบบต่อเนื่องของเวลา (Continuous in time) แต่กระบวนการต่างๆ ในคอมพิวเตอร์จะเป็นแบบไม่ต่อเนื่องของเวลา (Discrete in time) เนื่องจากการประมวลผลต้องอาศัยการสุ่มข้อมูล (Sampling) ตามค่าสัญญาณความถี่นาฬิกาของเครื่องคอมพิวเตอร์นั้นๆ จึงเป็นเหตุผลที่จะใช้ในการออกแบบโปรแกรมชุดควบคุมให้มีลักษณะเป็นแบบไม่ต่อเนื่องของเวลา (Discrete controller)
โดยตัวควบคุมแบบ พี.ไอ.ดี สามารถหาได้จากสมการ ดังนี้

4.1 1 การควบคุมแบบ พี (Propertional Control)

การควบคุมแบบ พี.ค่าการควบคุมจะเป็นสัดส่วนกับค่าความคลาดเคลื่อน เขียนอยู่ในรูปแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete form) ตามสมการ

$$u(k) = K_p e(k) \tag{4.1}$$

4.1.2 การควบคุมแบบ ไอ (Integral Control)

การควบคุมแบบ ไอ.ค่าการควบคุมจะเป็นสัดส่วนกับค่าผลรวมของความคลาดเคลื่อนเทียบกับเวลา ซึ่งก็คือพื้นที่ใต้กราฟความคลาดเคลื่อนของเทียบกับเวลา สามารถประมาณค่าได้โดยนับผลรวมพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าใต้เส้นโค้งที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนจุดหนึ่งๆ กับช่วงเวลาในการสุ่มค่า ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามสมการ

$$u(k) = K_I T \sum_{i=1}^{k} e(k) \tag{4.2}$$

4.1.3 การควบคุมแบบ ดี (Derivative Control)

การควบคุมแบบ ดี. ค่าการควบคุมจะเป็นสัดส่วนกับค่าดิฟเฟอเรนเชียลของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับเวลา สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบไม่ต่อเนื่องได้ ตามสมการ

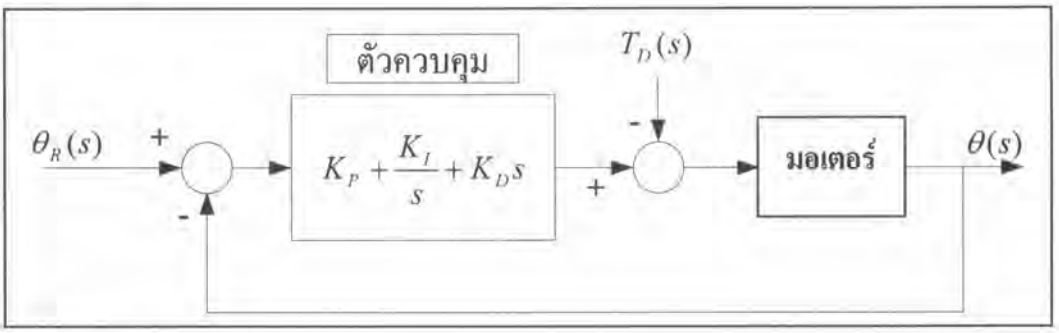
$$u(k) = K_D \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \tag{4.3}$$

4.1.4 การควบคุมแบบ พีไอดี (PID Control)

เป็นการผสมผสานการควบคุมทั้ง 3 แบบเข้าด้วยกัน สามารถเขียนสมการการควบคุมได้โดยนำสมการที่ (4.1), (4.2) และ (4.3) มารวมกัน

$$u(k) = K_P e(k) + K_I T \sum_{i=1}^{k} e(k) + K_D \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \tag{4.4}$$

ถ้าภาระของมอเตอร์เปลี่ยนแปลง เช่น เมื่อนำมอเตอร์ไปขับภาระภายนอกที่ต่ออยู่กับแกนมอเตอร์ ลักษณะเช่นนี้อาจถือได้ว่าภาระนั้นเป็นสัญญาณรบกวน (Disturbance torque) ได้ และเมื่อรวมเอาระบบควบคุมแบบพีไอดีเข้าด้วยกันแล้ว สามารถเขียนในรูปของสมการฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) และรูปแผนภาพบล็อก (Block Diagram) ของทั้งระบบมอเตอร์และระบบควบคุมได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี

ซึ่งในการควบคุมระบบที่มีสัญญาณรบกวนนั้น จะใช้การควบคุมแบบ " inverse dynamic control" ในการควบคุมการเคลื่อนที่

4.1.5 Inverse Dynamics Control

จากระบบสมการแบบจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกล

$$B(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + F\dot{q} + g(q) = \tau - J^{-T}h \tag{4.5}$$

เนื่องจากในสมการแบบจำลองการเคลื่อนที่ซึ่งเป็นชุดของสมการอนุพันธ์ลำดับสองไม่เชิงเส้นที่ coupling กันประกอบด้วยตัวแปรข้อต่อที่แสดงตำแหน่ง, ความเร็ว, ความเร่ง ตลอดจนแรงบิดที่ข้อต่อ และแรงภายนอกในรูปของแรงและโมเมนต์ที่เกิดเนื่องจากปลายแขนกลกระทำกับสิ่งแวดล้อม การควบคุมในระบบแบบนี้เราจะใช้ระบบควบคุมแบบ "inverse dynamics control" ในการควบคุมการเคลื่อนที่ โดยที่ตัวควบคุมแบบนี้จะทำให้ระบบที่ต้องการจะควบคุมดังสมการที่ (4.5) ซึ่งมีลักษณะเป็นแบบไม่เชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้นเพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนกลับหรือที่เรียกว่า feedback linearization โดยวิธีนี้จะทำให้เทอมตัวแปรแรงบิดที่ไม่เชิงเส้นต่างๆ เช่น Coriolis, เทอมแรงหนีศูนย์กลาง, ความเสียดทาน, ความโน้มถ่วง ไม่ปรากฏในสมการที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม ตัวควบคุมที่ใส่ลงไปจะเรียกว่า "dynamic model-based compensation" คือ

$$\tau = B(q)\nu + C(q,\dot{q})\dot{q} + F\dot{q} + g(q) \tag{4.6}$$

ในกรณีที่ไม่มีแรงและโมเมนต์ที่เกิดจากปลายแขนกลกระทำกับสิ่งแวดล้อม $h = 0$ และเมื่อแทนสมการที่ (4.6) ลงในสมการที่ (4.5) จะได้ว่า

$$\ddot{q} = \nu \tag{4.7}$$

ν แทนเทอม resolved acceleration ของตัวแปรข้อต่อ

สมการที่ (4.7) นี้เป็นสมการเชิงเส้นตรง ซึ่งเราจะใช้ในการออกแบบตัวควบคุม จากความสัมพันธ์ความเร็วระหว่างปลายแขนกล (v_e) ในพิกัด Task space และตัวแปรข้อต่อ ($\dot{q}$) ใน Joint space

$v_e = J(q)\dot{q}$ สำหรับแขนกลแบบอนุกรม ในขณะที่แขนกลแบบขนานจะได้ว่า

$$v_e = J^{-1}(q)\dot{q} \tag{4.8}$$

เมื่อนำสมการที่ (4.8) นำมาหาอนุพันธ์เทียบกับเวลาแล้วจัดรูปใหม่ จะได้

$$\ddot{q} = J(q)\left[\dot{v}_e - \dot{J}^{-1}(q,\dot{q})\dot{q}\right] \tag{4.9}$$

โดยที่ $\ddot{x}_e = \dot{v}_e = a$

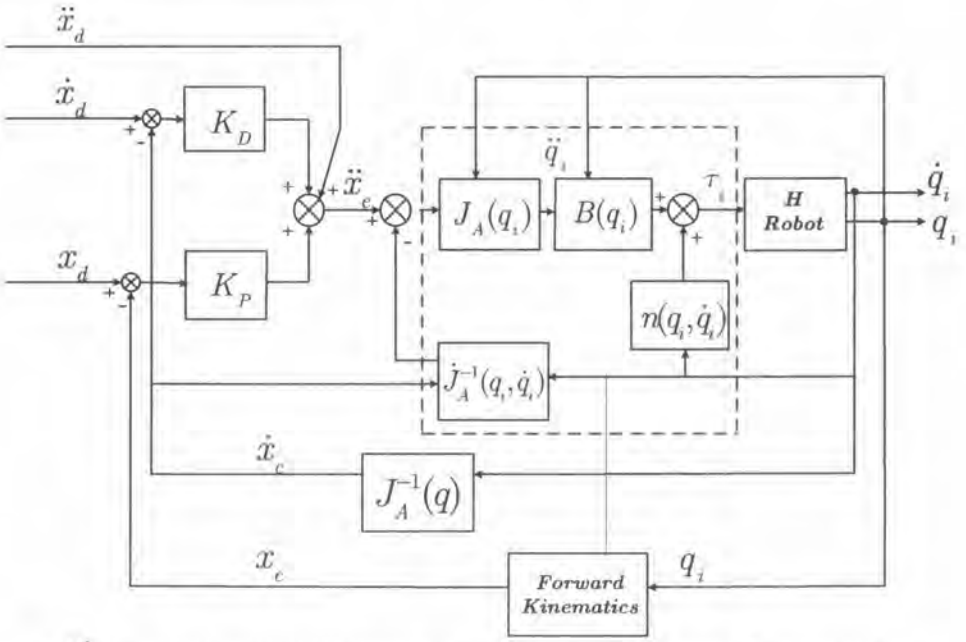
a แทนเทอม resolved acceleration ของตัวแปรที่ปลายแขนกล และใช้สำหรับสร้างคำสั่งชดเชยได้ดังนี้

$$a = \ddot{x}_d + K_D\left(\dot{x}_d - \dot{x}_e\right) + K_P\left(x_d - x_e\right) \tag{4.10}$$

เมื่อ x_d คือเวกเตอร์แทนตำแหน่งและทิศทางการเคลื่อนที่ที่กำหนด $\dot{x}_d$ แทนเวกเตอร์ความเร็วและความเร็วเชิงมุมของการเคลื่อนที่ $\ddot{x}_d$ แทนเวกเตอร์ความเร่งและความเร่งเชิงมุมของการเคลื่อนที่ตามลำดับในพิกัด Task space โดยที่เมตริกซ์ K_D, K_P เป็นเมตริกซ์เกน สมการที่ (4.10) สามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์แบบต่อเนื่องได้เท่ากับ

$$\left(\ddot{x}_d - \ddot{x}_e\right) + K_D\left(\dot{x}_d - \dot{x}_e\right) + K_P\left(x_d - x_e\right) = 0 \tag{4.11}$$

สมการที่ (4.11) เป็นพลศาสตร์ของความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งจริงกับตำแหน่งที่ต้องการ การเลือกค่าเกนที่เป็นบวกอย่างเหมาะสมจะทำให้ปลายแขนกลสามารถเคลื่อนที่ตามเส้นทาง, ความเร็วและความเร่งที่กำหนดไว้เป็นผลให้ระบบควบคุมนี้มีเสถียรภาพ



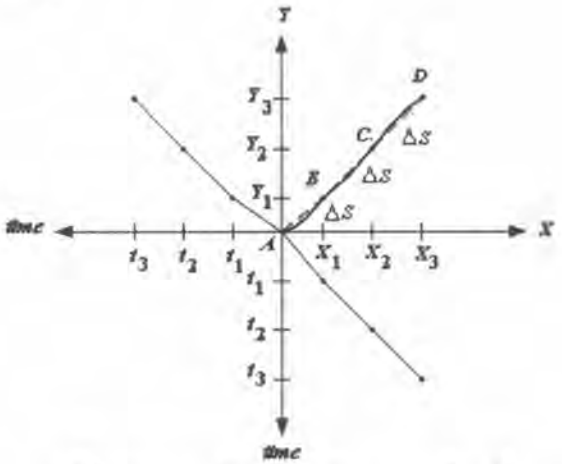
รูปที่ 4.2 แผนภาพการควบคุมแบบ Inverse Dynamics Control กับแขนกล 5 แกน

4.2 การควบคุมความเร็วตามแนวทางเดิน

ในการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรซีเอ็นซีนั้น นอกจากความถูกต้องของตำแหน่งตามแนวทางแล้ว สิ่งสำคัญอีกอย่างหนึ่งคือความเร็วตามแนวทางเดินจะต้องคงที่ด้วย เพื่อให้ได้งานที่มีคุณภาพ เทคนิคการควบคุมความเร็วให้คงที่มีหลายวิธี สำหรับในโครงการวิทยานิพนธ์นี้ การควบคุมตำแหน่งและความเร็วตามแนวทางเดินจะใช้วิธีดังนี้

$$Velocity = \frac{\Delta S}{\Delta t} \tag{4.12}$$

จากสมการที่ (4.12) ถ้ากำหนดให้ Δt มีค่าเท่ากับเวลาในการสุ่มค่า (Sampling period) ซึ่งมีค่าคงที และสามารถควบคุมให้ ΔS ซึ่งมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในแต่ละครั้งของการสุ่มให้มีค่าคงที่ เราจะได้ค่าความเร็วที่มีค่าคงที่ จากหลักการดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการควบคุมตำแหน่งและความเร็วได้ดังนี้



รูปที่ 4.3 การแบ่งจุดตามแนวการเคลื่อนที่

จากรูปที่ 4.3 เส้นทึบแสดงถึงแนวทางเดินที่ต้องการ เราจะแบ่งแนวทางเดินออกเป็นส่วนเล็กๆ มีขนาดเท่ากับ ΔS ซึ่งแสดงในรูปด้วยเส้นตรง AB BC CD (ดังแสดงเป็นเส้นประ) จากสมการที่ (4.12) ถ้ากำหนดให้ค่า Δt มีค่าเท่ากับเวลาในการสุ่มค่า T จะสามารถหาค่า ΔS ได้ดังสมการที่ (4.13)

$$\Delta S = VT \tag{4.13}$$

กำหนดให้

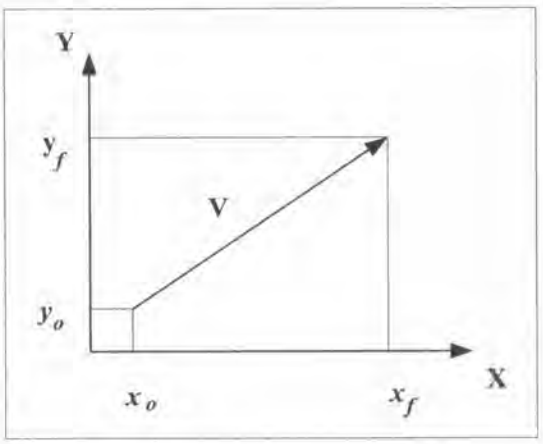
I24675192

V = ความเร็วตามแนวทางเดิน

T = เวลาในการสุ่มค่า

ΔS = ระยะทางในการเคลื่อนที่ในการสุ่มค่า 1 ครั้ง

จากสมการที่ (4.13) เราจะนำค่า ΔS ที่คำนวณได้ไปใช้ในการคำนวณหาจุดอ้างอิงตามแนวแกนเอ็กซ์และแกนวาย ที่เวลา T ใดๆ ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการเคลื่อนที่ของแกน Xและ Yด้วยความเร็ว V

เราสามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 4.3 กำหนดให้เส้นทางการเคลื่อนที่เริ่มจากจุด x_0, y_0 เคลื่อนไปด้วยความเร็ว V เป็นเส้นตรงไปยังจุด x_f, y_f สามารถหาจำนวนจุดในการเคลื่อนที่ได้ดังนี้

$$N = \frac{\left[(x_f - x_0)^2 + (y_f - y_0)^2\right]^{1/2}}{VT} \tag{4.14}$$

จะได้ระยะเคลื่อนที่แต่ละช่วงเวลาการสุ่ม ดังนี้

$$\Delta x = \frac{(x_f - x_0)}{N} \tag{4.15}$$

$$\Delta y = \frac{(y_f - y_0)}{N} \tag{4.16}$$

ชุดคำสั่งที่ใช้ในการเคลื่อนที่

$$x_n = x_{n-1} + \Delta x \tag{4.17}$$

$$y_n = y_{n-1} + \Delta y \tag{4.18}$$

แต่เนื่องจากหากใช้วิธีตามที่กล่าวมานั้น ช่วงเริ่มต้น และหยุดการเคลื่อนที่ของชุดขับเคลื่อนจะเกิดการกระชาก เพื่อจะลดปัญหานี้จึงใช้วิธีการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่โดยใช้ S-Curve โดยแบ่งเส้นทางการเคลื่อนที่ออกเป็น 3 ช่วง ช่วงแรกจาก t_0 ถึง t_1 เป็นช่วงความเร่งคงที่ (A) ทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้นจากค่าเริ่มต้นจนถึงค่าที่กำหนดและเคลื่อนที่ต่อไปในช่วงที่ 2 ซึ่งเป็นช่วงความเร็วคงที่ (V) จนถึงเวลา t_2 จึงเริ่มเคลื่อนที่ด้วยความหน่วงคงที่ $(-A)$ ความเร็วจะลดลงจนถึงเวลา t_3 ค่าความเร็วมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งได้ระยะทางที่กำหนด

จากรูปที่ 4.5 สามารถหาระยะทาง และเวลาในแต่ละช่วงได้ดังนี้

$$\Delta t_1 = t_1 - t_0 \tag{4.19}$$

$$\Delta s_1 = \frac{A\Delta t_1^2}{2} = x_1 - x_0 \tag{4.20}$$

$$\Delta t_3 = t_3 - t_2 = \Delta t_1 \tag{4.21}$$

$$\Delta s_3 = \frac{V^2}{2A} = x_f - x_2 \tag{4.22}$$

$$\Delta s_2 = x_2 - x_1 = x_f - \Delta s_1 - \Delta s_3 \tag{4.23}$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_1 = \frac{\Delta s_2}{V} \tag{4.24}$$

โดยทั่วไปจะให้ระยะทางส่วนแรก Δs_1 เท่ากับส่วนที่สาม Δs_3 เราสามารถหาระยะทางส่วนที่สองได้จากระยะทางทั้งหมดลบออกด้วยส่วนแรกและส่วนที่สาม

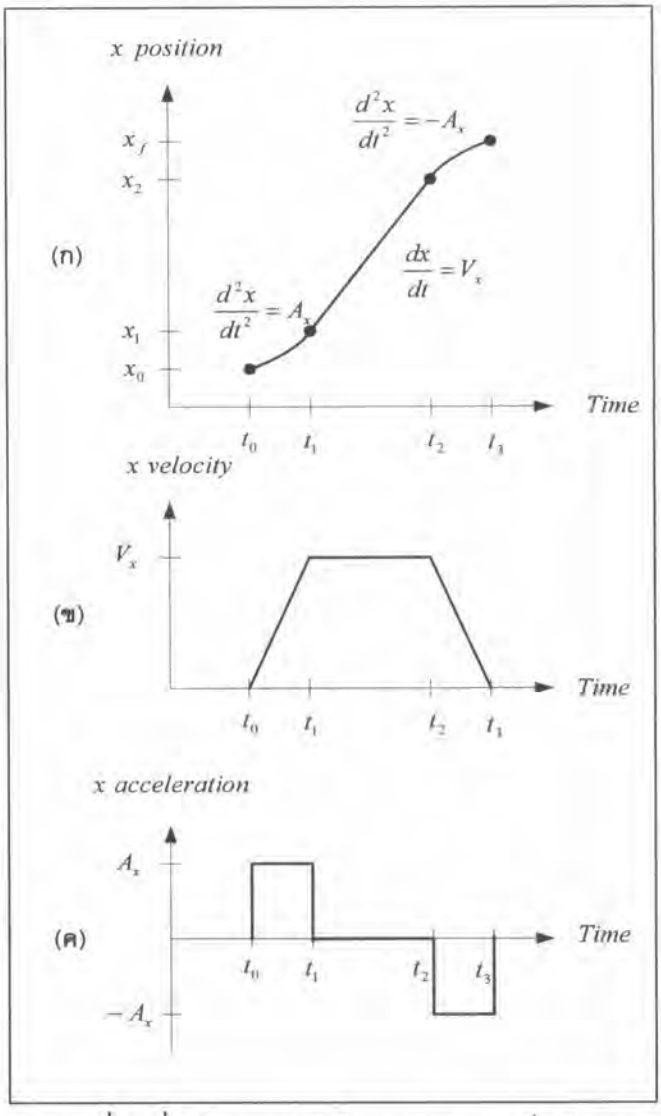
กำหนดให้ x_0 เป็นตำแหน่งเริ่มต้นการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ที่เวลา t_0

x_1 เป็นตำแหน่งเริ่มต้นการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ที่เวลา t_1

x_2 เป็นตำแหน่งเริ่มต้นการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ที่เวลา t_2

x_f เป็นตำแหน่งเริ่มต้นการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ที่เวลา t_3

ถ้าหากต้องการให้ช่วงเวลาในช่วงความเร็วคงที่ (Δt_2) มีมากกว่าช่วงเวลาในช่วงความเร่งคงที่ $(\Delta t_1$ หรือ $\Delta t_3)$ มากเท่าที่จะมากได้ ก็ควรจะกำหนดให้ค่าความเร่งมีค่าสูงเท่าที่เครื่องจักรจะทำได้ แต่ถ้าค่าความเร่งสูงก็จะมีผลทำให้เกิดการเคลื่อนที่เช่นกัน



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการเคลื่อนที่ (ก) ระยะทางกับเวลา (ข)ความเร็วกับเวลา (ค)ความเร่งกับเวลา

ในกรณีที่ช่วงเวลา Δt_2 มีค่าเป็นลบจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$|\Delta x| < \frac{V_x^2}{A_x} \tag{4.25}$$

แสดงว่าระยะทางเคลื่อนที่ไม่ยาวพอที่จะเคลื่อนที่ได้ถึงความเร็วสูงสุด กรณีเช่นนี้จะไม่มีช่วงความเร็วคงที่ ดังรูปที่ 4.6 สมการของเวลาและระยะทางจะเปลี่ยนเป็นดังนี้

$$\Delta x = x_f - x_0 \tag{4.26}$$

$$\Delta t_1 = \sqrt{\frac{\Delta x}{A}} \tag{4.27}$$

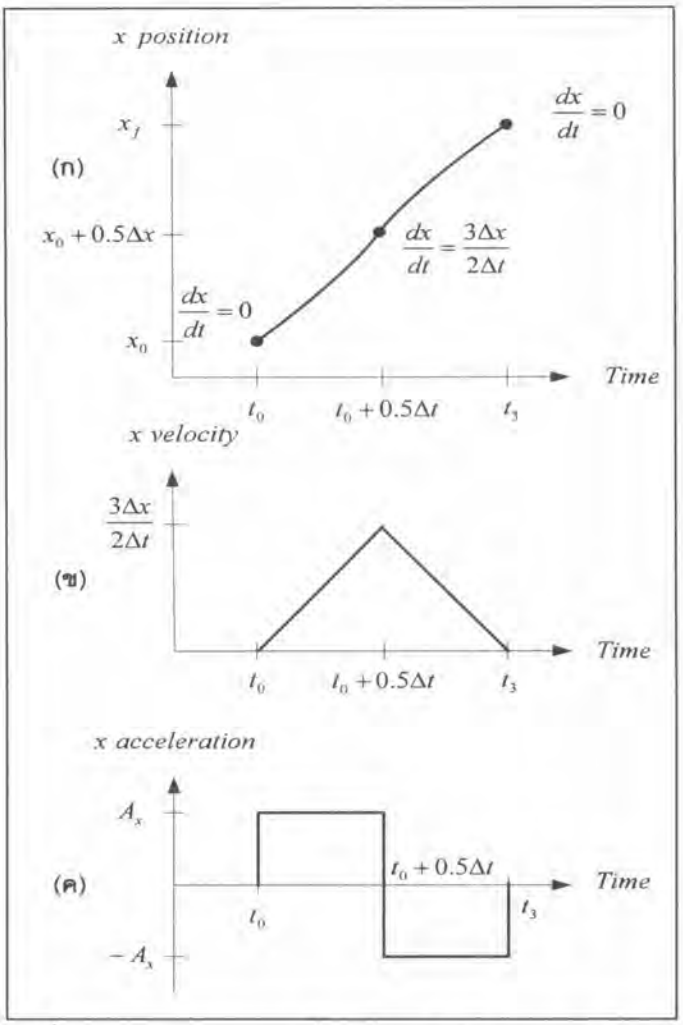
$$\Delta s_1 = \frac{A\Delta t_1^2}{2} \tag{4.28}$$

$$\Delta t_3 = \Delta t_1 \tag{4.29}$$

$$\Delta s_3 = \Delta s_1 \tag{4.30}$$

$$\Delta s_2 = 0 \tag{4.31}$$

$$\Delta t_2 = 0 \tag{4.32}$$



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการเคลื่อนที่แบบไม่มีช่วงความเร็วคงที่
(ก) ระยะทางกับเวลา (ข)ความเร็วกับเวลา (ค)ความเร่งกับเวลา

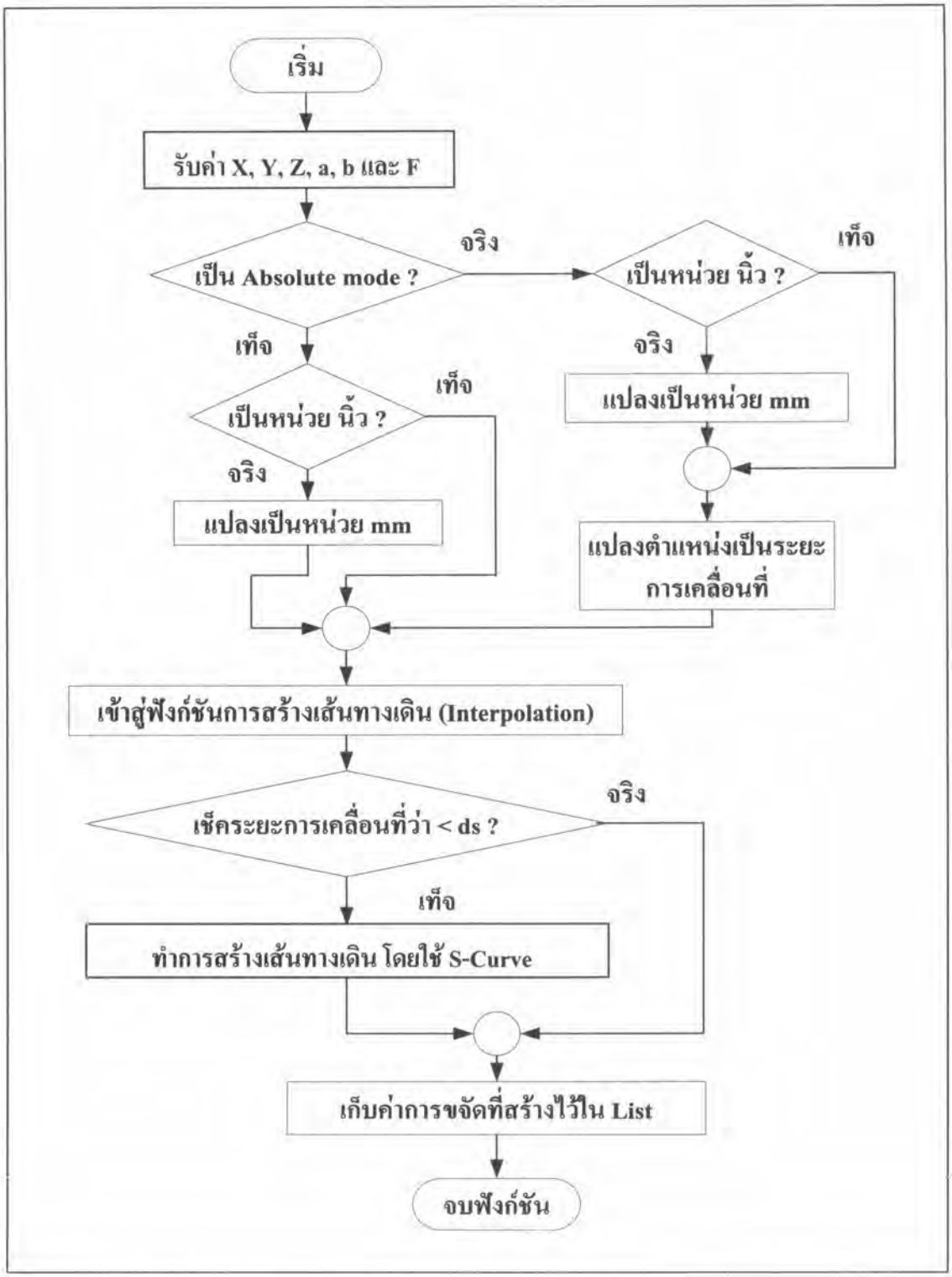
4.3 ขั้นตอนการเขียนโปรแกรมสร้างเส้นทางเดินแบบเส้นตรง

จากวิธีการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่โดยใช้ S-Curve ในบทที่ 2 ผู้วิจัยได้นำมาใช้ในการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ของโค้ด G01 โดยขั้นตอนในการควบคุมการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง จะอธิบายในรายละเอียดได้ดังนี้

4.3.1 การเคลื่อนที่เส้นตรง (Linear Interpolation)

เมื่อมีการเรียกชุดคำสั่งมาที่ฟังก์ชัน G01 ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง เริ่มต้นฟังก์ชันจะรับค่าโคออร์ดิเนตที่ต้องการเคลื่อนที่ไปของแกนเอ็กซ์ แกนวาย แกนแซด และค่าอัตราการป้อนเข้ามา หลังจากนั้นจะตรวจสอบว่ามีการใช้ระบบอ้างอิงการเคลื่อนที่แบบสัมบูรณ์ (Absolute) หรือแบบสัมพัทธ์ (Incremental) หากใช้ระบบอ้างอิงการเคลื่อนที่แบบสัมบูรณ์จะต้องนำตำแหน่งใหม่ที่ต้องการเคลื่อนที่ไปลบกับตำแหน่งเดิม จะได้เป็นระยะที่ต้องเคลื่อนที่ไปในแต่ละแนวแกน และไม่ว่าจะใช้ระบบอ้างอิงการเคลื่อนที่แบบสัมบูรณ์ หรือแบบสัมพัทธ์จะมีการตรวจสอบว่าเป็นใช้ระบบอ้างอิงหน่วยของระยะการเคลื่อนที่เป็น นิ้วหรือมิลลิเมตร หากเป็นหน่วยนิ้วจะทำการแปลงหน่วยให้อยู่ในหน่วยมิลลิเมตร ก่อนจะส่งมาทำการสร้างเส้นทางเดิน

เมื่อเข้าสู่ฟังก์ชันการสร้างเส้นทางเดิน จะมีการตรวจสอบก่อนว่าระยะที่ต้องเคลื่อนที่ไปในแต่ละแนวแกนมีค่าน้อยกว่าระยะการเคลื่อนที่ทีต้องเคลื่อนที่ในหนึ่งคาบการสุ่มหรือไม่ หากมีค่าน้อยกว่าก็ไม่จำเป็นต้องแบ่งระยะที่ต้องเคลื่อนที่ไปออกเป็นช่วงสั้นๆ อีก เพราะระยะนี้มีความละเอียดพอที่จะส่งไปควบคุมแขนกลได้แล้ว แต่ถ้าระยะที่ต้องเคลื่อนที่ไปในแต่ละแนวแกนมีค่ามากกว่า ก็จะทำการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่จากระยะนั้นโดยใช้ S-Curve แล้วเก็บค่าการขจัดย่อยๆ ในช่วงต่างของแกนเอ็กซ์วายแซดที่สร้างขึ้น ไว้ในลิสต์ (List) จนครบระยะทั้งหมดที่ต้องเคลื่อนที่ไป โดยขั้นตอนการสร้างทางเดินแบบเส้นตรงนี้ จะเป็นไปตามแผนภูมิโครงสร้างซึ่งอยู่ในหน้าถัดไป



รูปที่ 4.7 แผนภูมิโครงสร้างการสร้างเส้นทางเดินการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง