

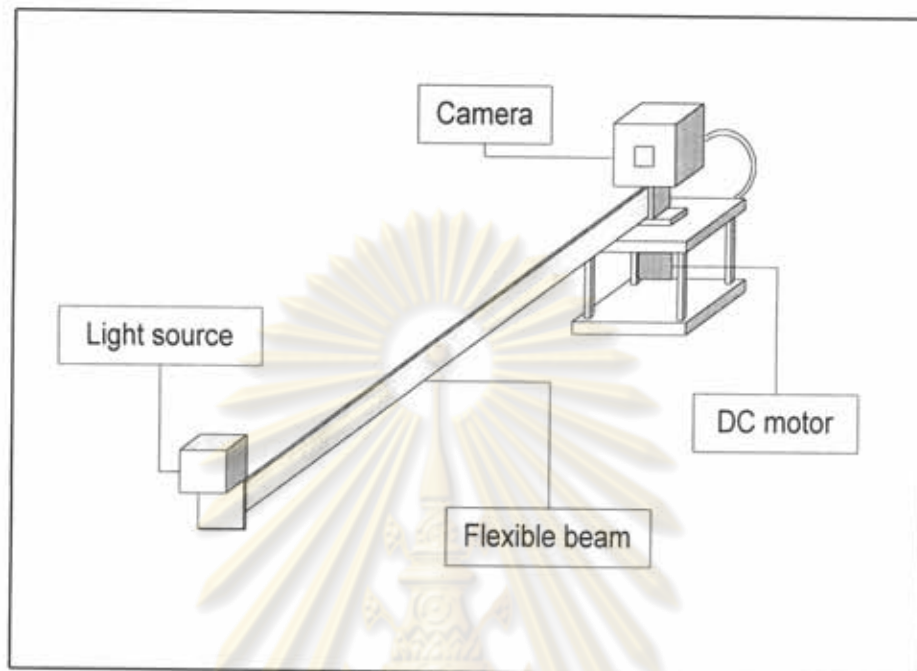
บทที่ 3

ระบบแขนกลข้อต่อเดียวแบบอ่อนตัว

ในบทที่ 1 ได้กล่าวถึงระบบแขนกลข้อต่อเดียวแบบอ่อนตัวมาบ้างแล้ว ซึ่งต่อไปนี้จะใช้คำว่าระบบแขนกลแบบอ่อนตัวแทนระบบแขนกลข้อต่อเดียวแบบอ่อนตัว เนื้อหาในบทนี้จะเป็นรายละเอียดของส่วนประกอบและลักษณะการทำงานของระบบแขนกลแบบอ่อนตัว จากนั้นจะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ การควบคุมตำแหน่งของระบบและในตอนท้ายเป็นการจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์ ตลอดจนศึกษาถึงผลการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อพฤติกรรมของระบบแขนกลแบบอ่อนตัว

ระบบแขนกลข้อต่อเดียวแบบอ่อนตัว

ระบบแขนกลแบบอ่อนตัวที่ศึกษาในงานวิจัยนี้มีส่วนประกอบที่สำคัญต่างๆ ดังนี้ ส่วนแรกคือมอเตอร์กระแสตรง (DC motor) ส่วนนี้จัดได้ว่าเป็นส่วนที่สำคัญมากส่วนหนึ่งเพราะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการขับเคลื่อนแขนกลให้หมุนไปยังตำแหน่งที่ต้องการ โดยลักษณะการหมุนของมอเตอร์กระแสตรงนี้เป็นการหมุนในแนวราบ สำหรับส่วนที่สองคือแขนกลซึ่งมีลักษณะข้อต่อเดียวแบบมีความอ่อนตัว (Flexible arm) โดยที่ปลายของแขนกลด้านหนึ่งยึดติดอยู่กับมอเตอร์กระแสตรง เมื่อมอเตอร์รับสัญญาณตำแหน่งที่ป้อนเข้ามา มอเตอร์จะหมุนและส่งแรงบิดไปยังตัวแขนกลทำให้แขนกลที่ยึดติดกับมอเตอร์นั้นมีการหมุนตามไปด้วย และส่วนที่สามคือตัวตรวจรู้ (Sensor) เป็นส่วนที่ใช้ในการวัดตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรงและตำแหน่งปลายของแขนกลแบบอ่อนตัว สำหรับชุดทดลองของระบบแขนกลแบบอ่อนตัวนั้นมีเครื่องมือที่คอยวัดสัญญาณที่ตำแหน่งปลายของแขนกล โดยมีกล้อง (Camera) ทำหน้าที่เป็นตัวตรวจรู้ กล้องนี้ติดตั้งอยู่บริเวณด้านบนของแกนของมอเตอร์กระแสตรงและที่บริเวณปลายอีกด้านหนึ่งของแขนกลมีหลอดไฟซึ่งเป็นตัวให้กำเนิดแสง (Light source) กล้องนี้มีหน้าที่คอยรับสัญญาณแสงที่ส่งมาจากปลายอีกด้านของแขนกลแบบอ่อนตัวโดยมีการวัดระดับของความเข้มของแสงที่ส่งออกมา สัญญาณที่ส่งมานี้เป็นสัญญาณตำแหน่งที่ปลายแขนกลแบบอ่อนตัว ระบบแขนกลข้อต่อเดียวแบบอ่อนตัวนี้ได้แสดงในรูปที่ 3.1



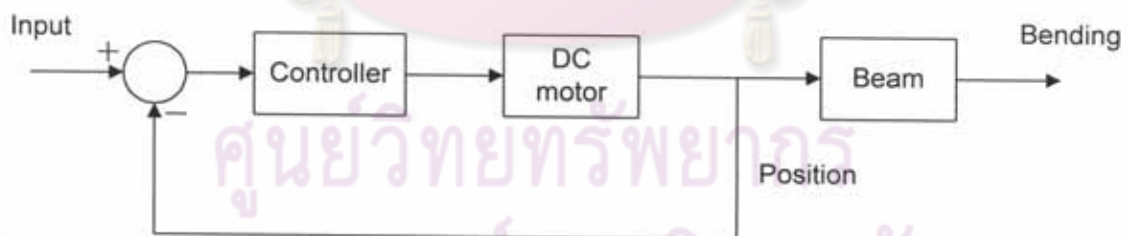
รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของแขนกลข้อต่อเดียวแบบอ่อนตัว

ลักษณะการทำงานของระบบแขนกลข้อต่อเดียวแบบอ่อนตัวเริ่มจากเมื่อป้อนสัญญาณเข้าให้กับมอเตอร์กระแสตรงแล้วมอเตอร์จึงหมุนไปในแนวองศาที่ต้องการ ในขณะที่มอเตอร์เริ่มหมุนนั้นแขนกลที่ขีตติดอยู่กับมอเตอร์ได้รับแรงบิดทำให้เกิดการเคลื่อนที่โดยหมุนตามมอเตอร์ไปด้วย ในขณะที่มอเตอร์มีการหมุนตัวตรวจรู้ (Sensor) ทำหน้าที่คอยวัดตำแหน่งของมอเตอร์แล้วป้อนกลับไปเปรียบเทียบกับสัญญาณเข้าได้เป็นค่าสัญญาณคลาดเคลื่อน ในขณะที่มอเตอร์หมุนไปแต่ยังไม่ถึงตำแหน่งที่ต้องการ จึงได้ค่าสัญญาณคลาดเคลื่อนซึ่งสัญญาณคลาดเคลื่อนนี้ถูกส่งให้กับตัวควบคุมแล้วตัวควบคุมจึงส่งสัญญาณควบคุมให้กับระบบต่อไป เมื่อมอเตอร์หมุนเข้าใกล้ตำแหน่งที่ต้องการค่าสัญญาณคลาดเคลื่อนที่ได้มีค่าน้อย ตัวควบคุมแล้วตัวควบคุมจึงส่งสัญญาณควบคุมค่าน้อยออกไปควบคุมระบบ และเมื่อมอเตอร์หมุนมายังองศาที่ต้องการแล้วค่าสัญญาณคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์ จึงไม่มีสัญญาณควบคุมส่งออกไปมอเตอร์จึงหยุดหมุน แต่เนื่องจากยังคงมีแรงเฉื่อยที่สะสมอยู่ที่ตัวแขนกลและด้วยลักษณะทางกายภาพของตัวแขนกลที่มีความอ่อนตัวจึงทำให้เกิดการสั่นที่ปลายแขนกลรอบๆตำแหน่งที่ต้องการดังแสดงในรูปที่ 3.2 ในงานวิจัยนี้ได้เสนอแนวทางการแก้ปัญหาเพื่อลดการแกว่งที่เกิดขึ้นปลายแขนกลแบบอ่อนตัวนี้ ซึ่งก่อนที่จะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมต่อไปนั้นเป็นการจำลองระบบแขนกลข้อต่อเดียวแบบอ่อนตัวและศึกษาพฤติกรรมของระบบต่อไป



รูปที่ 3.2 ภาพด้านบนการเคลื่อนที่ของแขนกลที่มีความอ่อนตัว

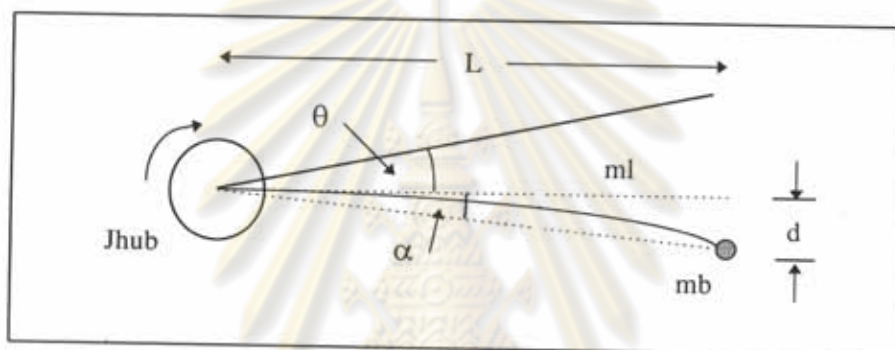
ในการออกแบบตัวควบคุม โดยทั่วไปจะต้องสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นแทนระบบทางกายภาพแล้วจึงใช้แบบจำลองนั้นๆ ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม สำหรับระบบแขนกลแบบอ่อนตัวก็เช่นกัน แบบจำลองของระบบสามารถแสดงได้ด้วยแผนภาพกรอบ (Block diagram) ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนภาพกรอบของระบบแขนกลข้อต่อเดียวแบบอ่อนตัว

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแขนกลข้อต่อเดียวแบบอ่อนตัว

ระบบแขนกลแบบอ่อนตัวในรูปที่ 3.1 เมื่อมองภาพด้านบนของระบบเมื่อมีการแกว่งที่ปลายของแขนกลจะเป็นดังรูปที่ 3.4 ในรูปนี้จะมีแกนของมอเตอร์กระแสตรง (Hub) แขนกลแบบอ่อนตัวซึ่งกำหนดให้มีความยาว L เมตร และมวลของแขนกลเป็น m_l กิโลกรัม ที่ปลายของแขนกลแบบอ่อนตัวมีหลอดไฟซึ่งมีมวล m_b กิโลกรัม ส่องมายังตัวตรวจรู้ที่แกนมอเตอร์กระแสตรง และให้ระยะการแกว่งของแขนกลที่เบนออกจากตำแหน่งอ้างอิงเป็น D เมตร



รูปที่ 3.4 แบบจำลองของระบบแขนกลข้อต่อเดียวแบบอ่อนตัว

ซึ่งได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยพิจารณามุมของการแกว่งที่ตำแหน่งปลายเทียบกับตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรงตามรูปที่ 3.4 ได้ตั้งสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบนี้คือ

$$\ddot{\alpha} = -\omega_c^2 \alpha \quad (3.1)$$

โดยที่ α คือ มุมที่แขนกลเบนออกจากแนวอ้างอิง

ω_c คือ ความถี่ธรรมชาติของแขนกลแบบอ่อนตัว

K_{STIFF} คือ ค่าคงความแข็งตึงของแขนกลแบบอ่อนตัว

ความเฉื่อยของแขนกล $J_L = \frac{1}{3} m_l L^2 \quad (3.2)$

ความเฉื่อยที่ตำแหน่งปลาย $J_b = m_b L^2 \quad (3.3)$

จะได้
$$\omega_c = \sqrt{\frac{K_{STIFF}}{J_L + J_b}} \quad (3.4)$$

ดังนั้น
$$K_{STIFF} = (\omega_c)^2 (J_L + J_b) \quad (3.5)$$

จากข้อกำหนดดังกล่าวจะได้สมการสถานะ (State equation) ระบบดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (3.6)$$

โดยที่

$$x = \begin{bmatrix} \theta & \alpha & \dot{\theta} & \dot{\alpha} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$u = Vm \quad (3.8)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{K_{STIFF}}{J_{hub}} & -\frac{Km^2 Kg^2}{J_{hub}} & 0 \\ 0 & -\frac{K_{STIFF}(J_{load} + J_{hub})}{J_{hub}J_{load}} & \frac{RJ_{hub}}{Km^2 Kg^2} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{KmKg}{RJ_{hub}} \\ -\frac{KmKg}{RJ_{hub}} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{L} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$D = 0 \quad (3.12)$$

เมื่อพิจารณากรณี d น้อยกว่า L มากๆ ($d \ll L$)

$$d = \alpha L \Rightarrow \alpha = \frac{d}{L} \quad (3.13)$$

จากที่ (3.9) และ(3.10) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \tilde{A}z + \tilde{B}u \\ y &= \tilde{C}z + \tilde{D}u \end{aligned} \quad (3.14)$$

โดยที่

$$z = [\theta \quad d \quad \dot{\theta} \quad \dot{d}]^T \quad (3.15)$$

$$u = Vm \quad (3.16)$$

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{K_{STIFF}}{J_{hub}} & -\frac{K_{STIFF} h}{L K m^2 K g^2} & 0 \\ 0 & \frac{K_{STIFF} (J_{load} + J_{hub})}{J_{hub} J_{load}} & \frac{h}{L K m^2 K g^2} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\tilde{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K m K g}{L} \\ \frac{h}{L K m K g} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$\tilde{C} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{L} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$\tilde{D} = 0 \quad (3.20)$$

ในการจำลองระบบดังกล่าวนี้จะใช้พารามิเตอร์ต่างๆดังนี้

ความเฉื่อยที่แกนหมุน (J_{hub}) = 0.002 Kgm²

ความยาวของแขนกล (L) = 0.45 m

ความสูงของแขนกล (h) = 0.02 m

ความหนาของแขนกล (w) = 0.0008 m

มวลของแขนกล (ml) = 0.06 Kg

มวลที่บริเวณปลายของแขนกลแบบอ่อนตัว(mb) = 0.05 Kg

ความเฉื่อยของแขนกล(J_L) = 0.0042 Kgm²

อัตราขยายของตัวตรวจรู้ตำแหน่ง (K_s) = 0.39 V/cm

จะได้สมการสถานะของระบบแขนกลข้อต่อเดียวแบบอ่อนตัวคือ

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{d} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1919 & -57 & 0 \\ 0 & -932 & 24 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ d \\ \dot{\theta} \\ \dot{d} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 106 \\ -44 \end{bmatrix} V_m \quad (3.21)$$

เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งของมอดเตอร์กระแสตรงจะได้

$$y_1 = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (3.22)$$

และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งปลายของแขนกลได้

$$y_2 = [1 \ 2.5 \ 0 \ 0] \quad (3.23)$$

จากสมการสถานะข้างต้นจัดเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแขนกลข้อต่อเดียวแบบอ่อนตัวซึ่งเมื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วจึงมีการออกแบบตัวควบคุมและหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการควบคุมระบบแขนกลแบบอ่อนตัว และนำมาใช้ในการจำลองระบบต่อไป

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมระบบแขนกลแบบอ่อนตัวนี้ได้แยกออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่งของมอดเตอร์กระแสตรง และในส่วนที่สองคือการควบคุมการแกว่งที่ปลายของแขนกลแบบอ่อนตัว สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตัวควบคุมเพื่อลดแกว่งของแขนกลแบบอ่อนตัวโดยใช้ตัวควบคุมแบบตรรกศาสตร์ฟัซซี่ ซึ่งรายละเอียดในการออกแบบตัวควบคุมต่าง ๆ อยู่ในส่วนของบทที่ 4 สำหรับการควบคุมตำแหน่งของมอดเตอร์กระแสตรงได้เลือกใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์ซึ่งจะได้กล่าวถึงในส่วนต่อไป

การควบคุมตำแหน่งของแขนกลข้อต่อเดียวแบบอ่อนตัว

จากระบบแขนกลข้อต่อเดียวแบบอ่อนตัวที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นมอเตอร์กระแสตรงเป็นส่วนที่ใช้ในการขับเคลื่อน และจุดประสงค์หลักการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงคือการควบคุมให้มอเตอร์หมุนไปยังตำแหน่งหรือองศาที่ต้องการได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ข้างต้นของมอเตอร์กระแสตรงมีลักษณะเป็นเชิงเส้น ในงานวิจัยนี้ได้เลือกตัวควบคุมแบบตัวชดเชยแบบล้าหน้ามาใช้ในการควบคุมตำแหน่งของแขนกลข้อต่อเดียวแบบอ่อนตัว ซึ่งแสดงในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ (3.16)

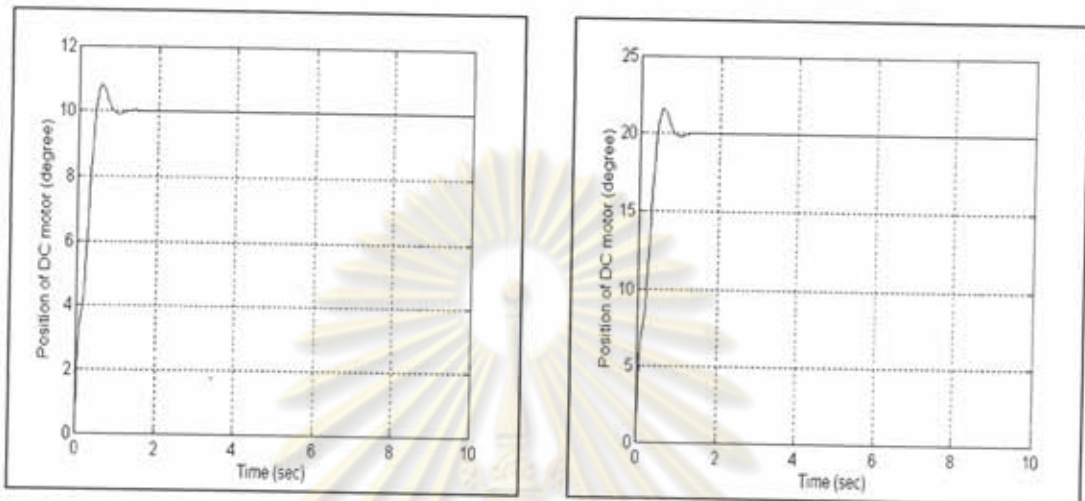
$$G_c = \frac{1.4(s+1.9)}{(s+2)} \quad (3.24)$$

การจำลองระบบแขนกลข้อต่อเดียวแบบอ่อนตัว (Computer Simulation)

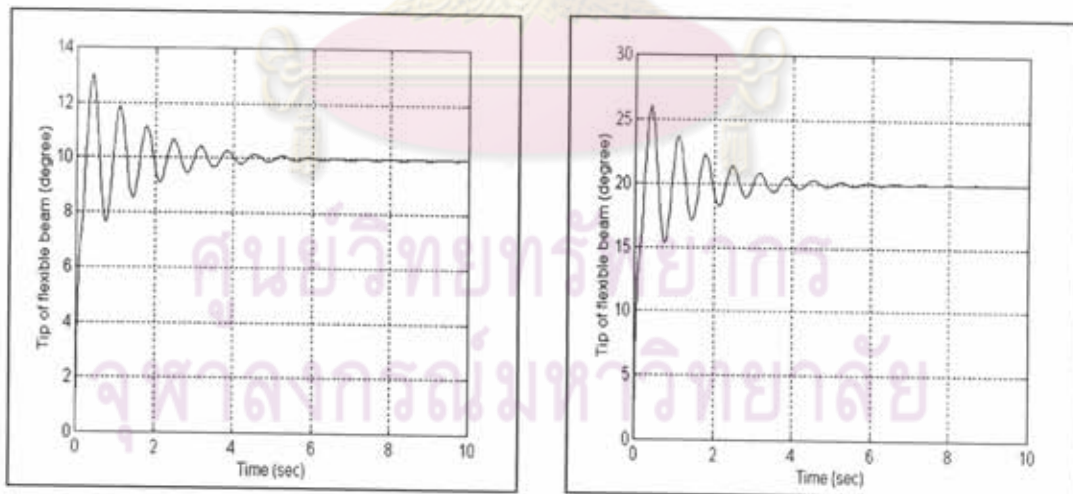
ในงานวิจัยนี้ได้จำลองระบบแขนกลข้อต่อเดียวแบบอ่อนตัวในคอมพิวเตอร์ ทั้งนี้เพื่อเป็นการศึกษาพฤติกรรมรวมทั้งผลตอบสนองที่สภาวะต่างๆ ของระบบเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมต่อไป ซึ่งในการจำลองระบบนี้มีการใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นและเพื่อให้ระบบที่ได้จำลองนี้มีสภาวะการทำงานใกล้เคียงกับระบบที่เป็นอุปกรณ์จริงมากที่สุดจึงกำหนดขอบเขตในการหมุนในลักษณะเดียวกันคือ รัศมีของการหมุนไม่เกินค่าบวกและค่าลบ 45 องศา จากตำแหน่งอ้างอิง นั่นคือสามารถหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกาภายในรัศมี 45 องศา นั่นเอง

สำหรับสัญญาณเข้าที่ป้อนให้กับระบบดังกล่าวได้แบ่งออกได้ 2 แบบคือสัญญาณแบบขั้น (Step) และสัญญาณแบบพัลส์ (Pulse) ซึ่งในการจำลองนี้ได้กำหนดสัญญาณเข้าที่ป้อนให้กับระบบไม่เกินค่าที่ได้กำหนดไว้ โดยที่สัญญาณแบบขั้นที่ป้อนให้กับระบบได้กำหนดที่ค่าต่างๆคือ 10, 20, 30 และ 40 องศา ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ถึง 3.8 และสำหรับสัญญาณพัลส์ได้กำหนดที่ค่าต่างๆคือ ± 10 , ± 20 , ± 30 และ ± 40 องศา ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ถึง 3.12 รูปที่ได้แสดงต่อไปนี้เป็นรูปแสดงผลตอบสนองของระบบแขนกลข้อต่อเดียวแบบอ่อนตัว โดยพิจารณาเป็น 2 ส่วนคือผลตอบสนองของตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรงและผลตอบสนองที่ตำแหน่งปลายของแขนกลแบบอ่อนตัว

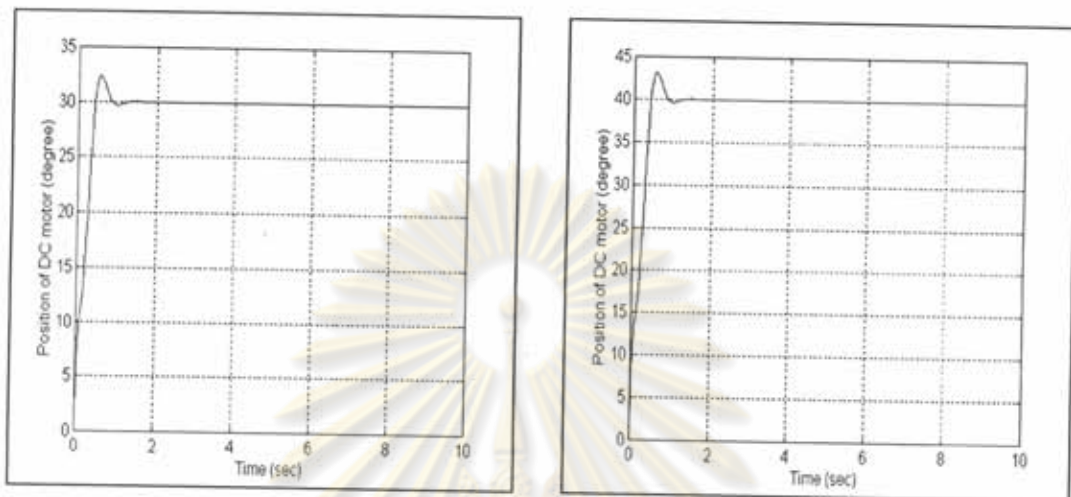
เมื่อสัญญาณเข้าเป็นแบบขั้น (Step)



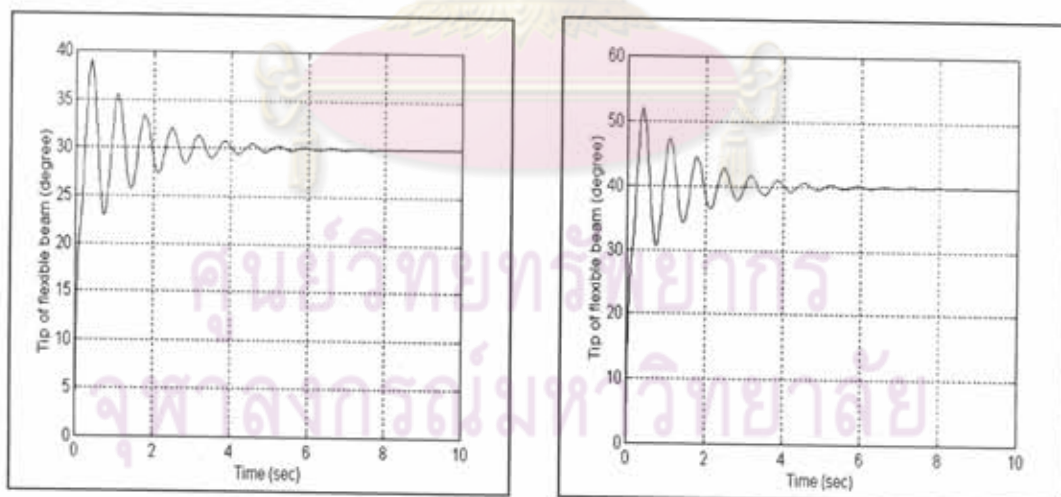
รูปที่ 3.5 ตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรงเมื่อสัญญาณเข้าเป็นแบบขั้นที่ 10 และ 20 องศา



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งปลายของแกนกลแบบอ่อนตัวเมื่อสัญญาณเข้าเป็นแบบขั้นที่ 10 และ 20 องศา



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรงเมื่อสัญญาณเข้าเป็นแบบขั้นที่ 30 และ 40 องศา



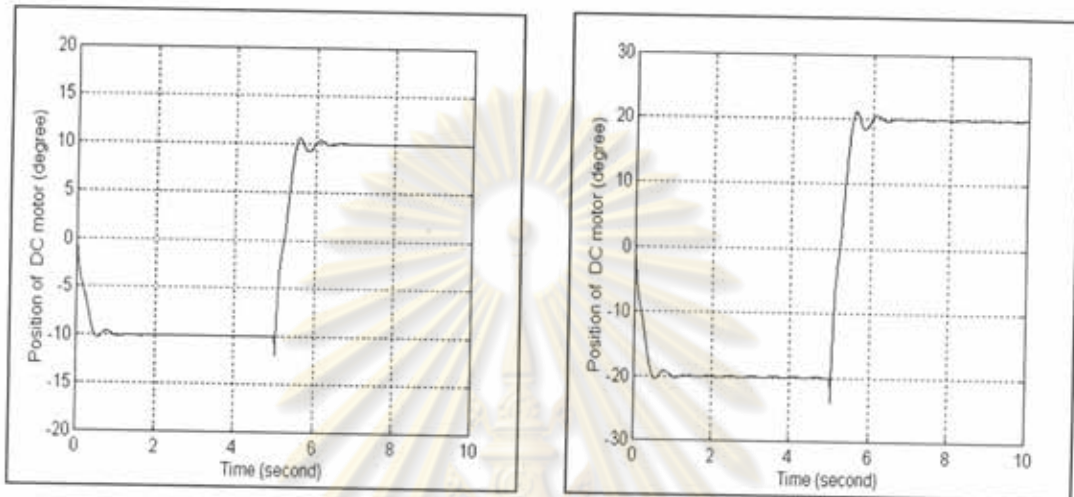
รูปที่ 3.8 ตำแหน่งปลายของแกนกลแบบอ่อนตัวเมื่อสัญญาณเข้าเป็นแบบขั้นที่ 30 และ 40 องศา

จากรูปที่ 3.5-3.8 ซึ่งแสดงผลการจำลองระบบเมื่อป้อนสัญญาณเข้าเป็นสัญญาณแบบขั้น (Step) ขนาด 10, 20, 30 และ 40 องศาตามลำดับ เมื่อพิจารณารูปที่ 3.5 แสดงตำแหน่งของมอเตอร์ กระแสตรงเมื่อป้อนสัญญาณเข้าเป็น 10 และ 20 องศาพบว่าสามารถควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ ได้ตามที่ต้องการและเมื่อพิจารณาในรูปที่ 3.6 ซึ่งแสดงตำแหน่งปลายของแขนกลเมื่อสัญญาณเข้า เป็น 10 และ 20 องศา พบว่าเกิดการแกว่งและขนาดของการแกว่งมีขนาดเพิ่มขึ้นตามขนาดของ สัญญาณเข้า จากรูปที่ 3.7 ซึ่งแสดงตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรงเมื่อป้อนสัญญาณเข้าเป็น 30 และ 40 องศา พบว่าสามารถควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรงได้และในรูปที่ 3.8 แสดง ตำแหน่งปลายของแขนกลพบว่าขนาดการแกว่งที่ปลายแขนกลมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อสัญญาณเข้ามี ขนาดเพิ่มขึ้น

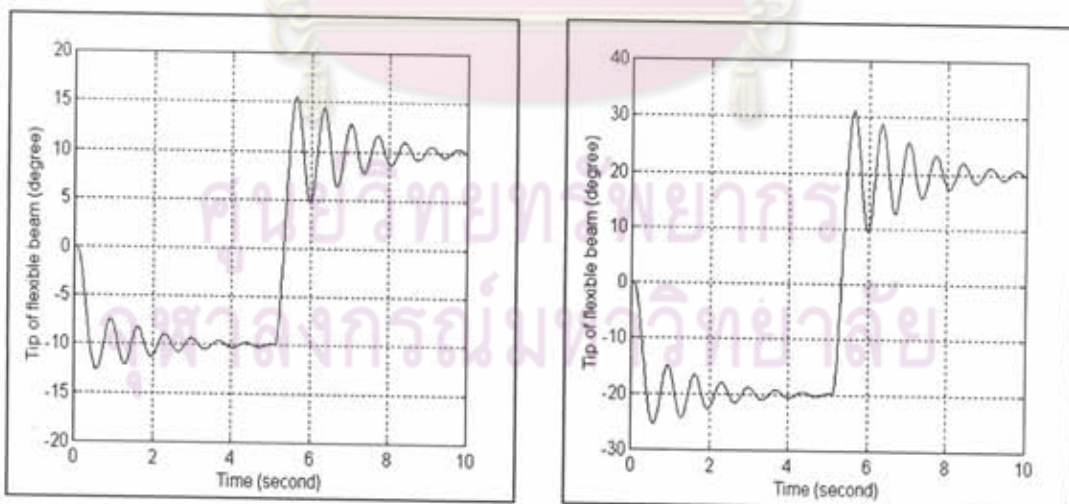
แต่เมื่อพิจารณาช่วงเวลาเข้าที่ (Settling time) ของการแกว่งที่ตำแหน่งปลายของแขนกล แบบอ่อนตัว พบว่าเมื่อขนาดของสัญญาณเข้ามีค่าเพิ่มมากขึ้นจาก 10 ถึง 40 องศา นั้นช่วงเวลาเข้าที่ ของผลตอบสนองมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ในการจำลองระบบแขนกลแบบอ่อนตัวเมื่อป้อน สัญญาณเข้าที่มีขนาดแตกต่างกันพบว่าเมื่อขนาดของสัญญาณเข้าเพิ่มขึ้นมีผลให้ขนาดของการแกว่ง ที่เกิดขึ้นที่ปลายของแขนกลแบบอ่อนตัวนั้นมีขนาดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นั่นคือขนาดของการแกว่งที่ ตำแหน่งปลายของแขนกลจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของสัญญาณเข้าที่ป้อนให้กับระบบ แต่ขนาดของ สัญญาณเข้าไม่มีผลต่อช่วงเวลาเข้าที่ของการแกว่งของแขนกลแบบอ่อนตัว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

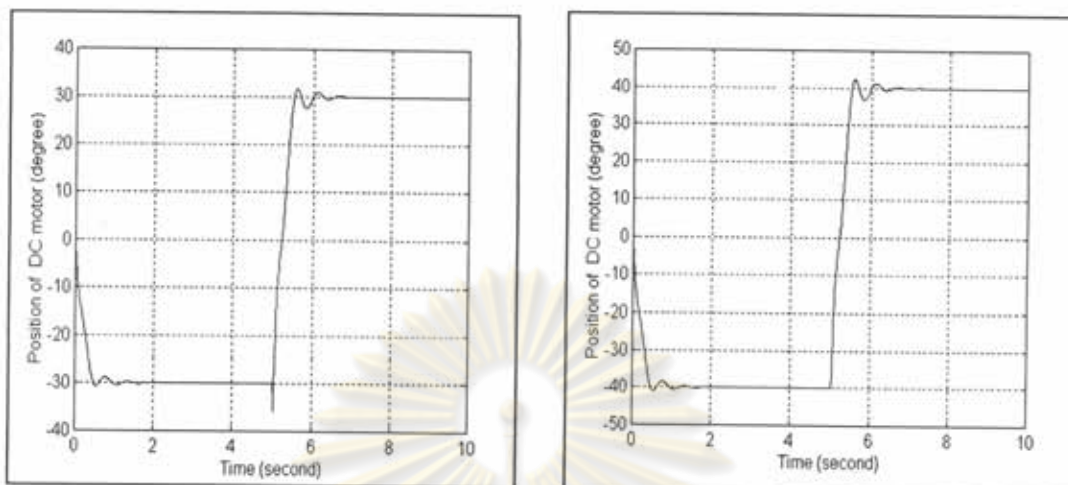
เมื่อป้อนสัญญาณเข้าเป็นแบบพัลส์ (Pulse)



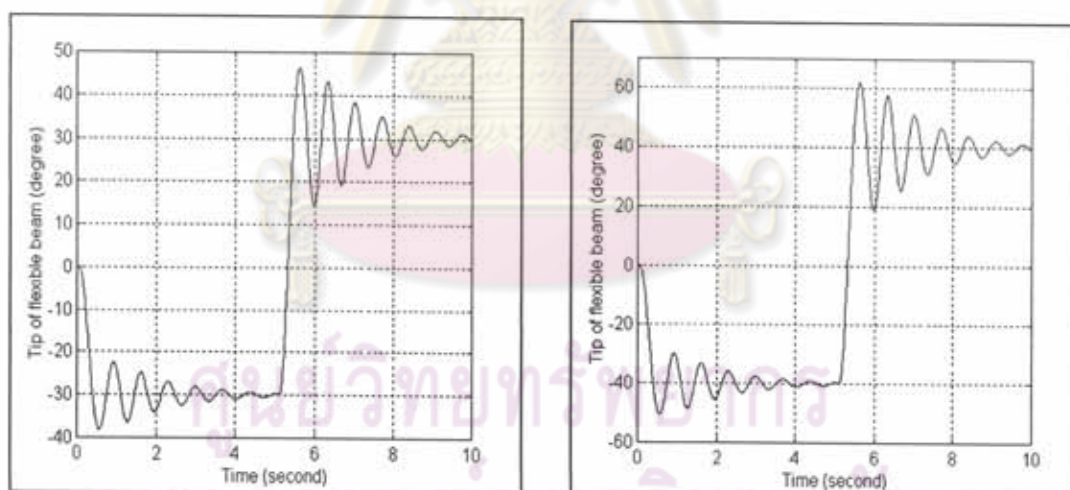
รูปที่ 3.9 ตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรงเมื่อสัญญาณเข้าเป็นค่า ± 10 และ ± 20 องศา



รูปที่ 3.10 ตำแหน่งปลายของแขนกลแบบอ่อนตัวเมื่อสัญญาณเข้าเป็นค่า ± 10 และ ± 20 องศา



รูปที่ 3.11 ตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรงเมื่อสัญญาณเข้าเป็นค่า ± 30 และ ± 40 องศา



รูปที่ 3.12 ตำแหน่งปลายของแขนกลแบบอ่อนตัวเมื่อสัญญาณเข้าเป็นค่า ± 30 และ ± 40 องศา

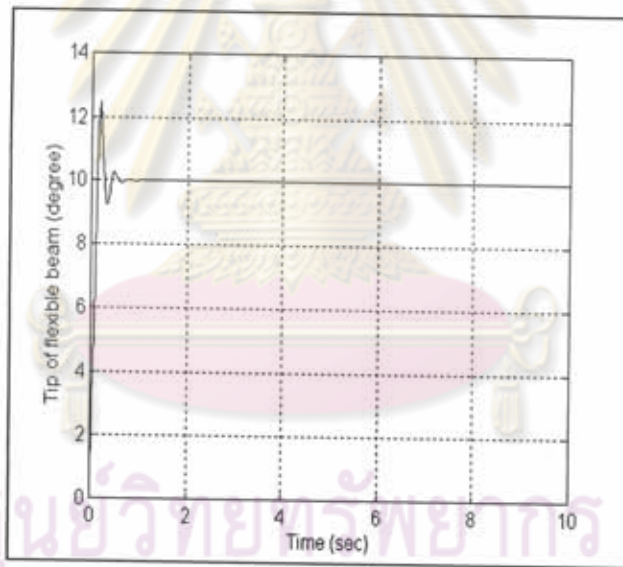
จากรูปที่ 3.9 ถึง 3.12 ซึ่งแสดงผลการจำลองระบบเมื่อป้อนสัญญาณเข้าเป็นสัญญาณแบบพัลส์(Pulse)ที่ ± 10 , ± 20 , ± 30 และ ± 40 องศาตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.9 ซึ่งเป็นผลตอบสนองของตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรงเมื่อป้อนสัญญาณเข้าเป็น ± 10 และ ± 20 องศา พบว่าสามารถควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรงได้และเมื่อพิจารณาในรูปที่ 3.10 ซึ่งแสดงตำแหน่งปลายของแขนกลแบบอ่อนตัวเมื่อป้อนสัญญาณเข้าเป็น ± 10 และ ± 20 องศา พบว่ามีการแกว่งรอบตำแหน่งที่ต้องการและยังพบอีกว่าขนาดของการแกว่งมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อสัญญาณเข้าเพิ่มจาก ± 10 องศาเป็น ± 20 องศา จากรูปที่ 3.11 ซึ่งเป็นผลตอบสนองของตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรงเมื่อป้อนสัญญาณเข้าเป็น ± 30 และ ± 40 องศา พบว่าสามารถควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรงได้ตามที่ต้องการ สำหรับรูปที่ 3.12 ซึ่งแสดงตำแหน่งปลายของแขนกลแบบอ่อนตัวเมื่อป้อนสัญญาณเข้าเป็น ± 30 และ ± 40 องศา พบว่าขนาดของการแกว่งที่ปลายของแขนกลยังมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เมื่อพิจารณาในส่วนช่วงเวลาเข้าที่ พบว่าเมื่อขนาดของสัญญาณเข้าแตกต่างกันแต่พบว่าช่วงเวลาเข้าที่ มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นขนาดของการแกว่งที่เกิดขึ้นที่ปลายของแขนกลข้อต่อเดียวแบบอ่อนตัวนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของสัญญาณเข้าที่ป้อนให้กับระบบ

เพื่อศึกษาว่าพารามิเตอร์อื่นๆนอกเหนือจากขนาดของสัญญาณเข้าที่มีผลต่อขนาดของการแกว่งที่ปลายของแขนกลแล้วยังมีพารามิเตอร์อื่นอีกหรือไม่ จากการทดลองข้างต้นมีการกำหนดขนาดความยาวของแขนกลแบบอ่อนตัวไว้ที่ 40 เซนติเมตร และในการทดลองนี้ได้มีการเปลี่ยนขนาดความยาวของแขนกล โดยมีการเปลี่ยนขนาดความยาวเป็น 20, 30 และ 40 องศา ดังแสดงผลการทดลองในส่วนต่อไป

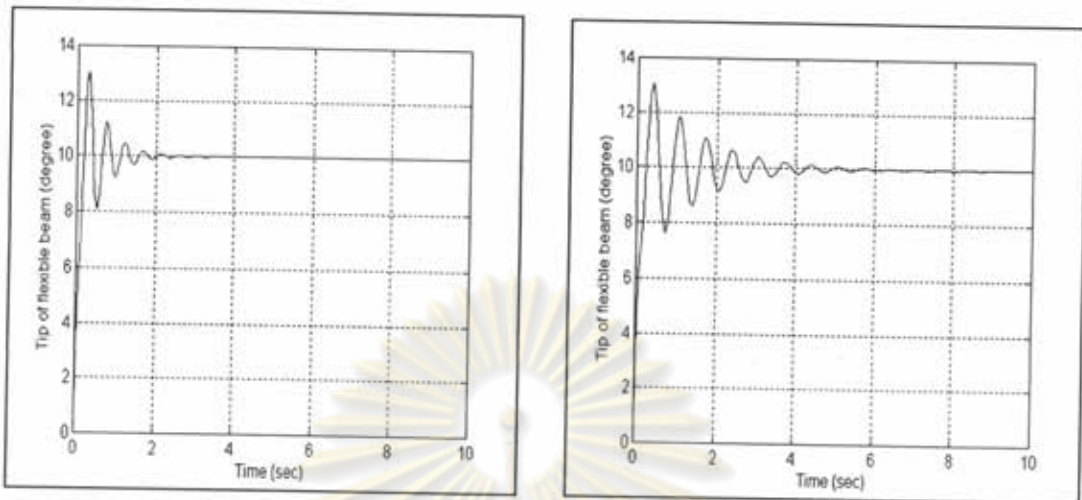
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อเปลี่ยนความยาวของแขนกลแบบอ่อนตัว

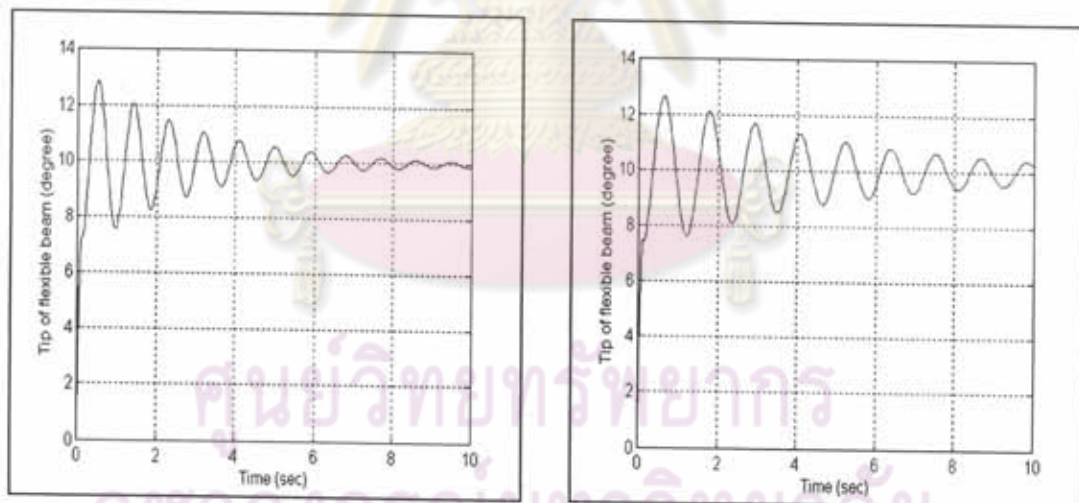
จากการทดลองที่ผ่านมาเป็นการศึกษาถึงผลตอบสนองที่ได้เมื่อเปลี่ยนขนาดของสัญญาณเข้าที่ป้อนให้กับระบบ โดยทดสอบกับระบบมีการกำหนดขนาดความยาวของแขนกลไว้ที่ 40 เซนติเมตร ในส่วนต่อไปนี้เป็นการศึกษาเพื่อศึกษาเกี่ยวกับความยาวของแขนกลแบบอ่อนตัวมีผลตอบสนองต่อการแกว่งที่ปลายของแขนกลแบบอ่อนตัวมากน้อยเพียงไร โดยได้ทดลองเปลี่ยนความยาวของแขนกลเป็นค่าที่แตกต่างกันคือ 20, 30, 40, 50 และ 60 เซนติเมตรตามลำดับ โดยกำหนดขนาดของสัญญาณเข้าที่ป้อนให้กับระบบเป็นสัญญาณแบบขั้นที่ 10 องศา ซึ่งได้ผลการทดลองแสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.13 ผลตอบสนองที่ปลายของแขนกลเมื่อแขนกลมีความยาว 20 เซนติเมตร



รูปที่ 3.14 ผลตอบสนองที่ปลายของแกนกลเมื่อแกนกลมีความยาว 30 และ 40 เซนติเมตร



รูปที่ 3.15 ผลตอบสนองที่ปลายของแกนกลเมื่อแกนกลมีความยาว 50 และ 60 เซนติเมตร

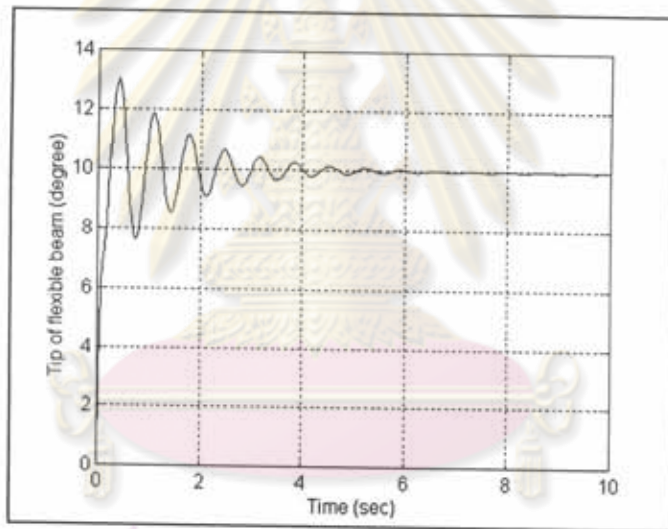
จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.13 ถึง 3.15 ซึ่งแสดงผลตอบสนองที่ตำแหน่งปลายของแกนกลข้อต่อเดี่ยวแบบอ่อนตัวโดยมีการเปลี่ยนค่าความยาวของแกนกล จากรูปที่ 3.13 เมื่อกำหนดค่าความยาวของแกนกลเป็น 20 เซนติเมตร พบว่าผลตอบสนองที่ได้มีการแกว่งรอบๆค่ากำหนดแล้วจึงลู่เข้าสู่ค่ากำหนดและพบว่าเวลาเข้าที่ประมาณ 1 วินาที เมื่อพิจารณาในรูปที่ 3.13 เมื่อกำหนดค่าความยาวของแกนกลเป็น 30 และ 40 เซนติเมตร พบว่าขนาดของการแกว่งที่เกิดขึ้นที่ปลายของแกนกลมีขนาดไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อพิจารณาในส่วนช่วงเวลาเข้าที่นั้นมียค่าเพิ่มขึ้นเป็น 3 วินาที และ 8 วินาทีตามลำดับ และจากรูปที่ 3.14 และ 3.15 เมื่อกำหนดค่าความยาวของแกนกลเป็น 50 และ 60 เซนติเมตร พบว่าขนาดของการแกว่งที่ปลายแกนกลนั้นไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ช่วงเวลาเข้าที่นั้นยังมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ

ดังนั้นจากผลการทดลองการเปลี่ยนขนาดความยาวของแกนกลข้อต่อเดี่ยวแบบอ่อนตัวพบว่าเมื่อเพิ่มขนาดความยาวของแกนกลขึ้นมีผลให้ช่วงเวลาในการลู่เข้าสู่ค่ากำหนดยิ่งมากขึ้นตามไปด้วย นอกเหนือจากขนาดของสัญญาณเข้าที่ป้อนให้กับระบบและขนาดความยาวของแกนกลแบบอ่อนตัวซึ่งมีผลต่อการแกว่งที่ปลายของแกนกลแบบอ่อนตัวแล้ว จากการทดลองที่ผ่านมาไม่มีการติดตั้งมวลที่ปลายของแกนกลแบบอ่อนตัวดังนั้นเพื่อศึกษาว่าการเพิ่มมวลที่ปลายของแกนกลนั้นมีผลต่อระบบอย่างไรเมื่อพิจารณาทั้งในส่วนขนาดของการแกว่งหรือช่วงเวลาในการลู่เข้าสู่ค่ากำหนดซึ่งได้กล่าวรายละเอียดในส่วนต่อไป

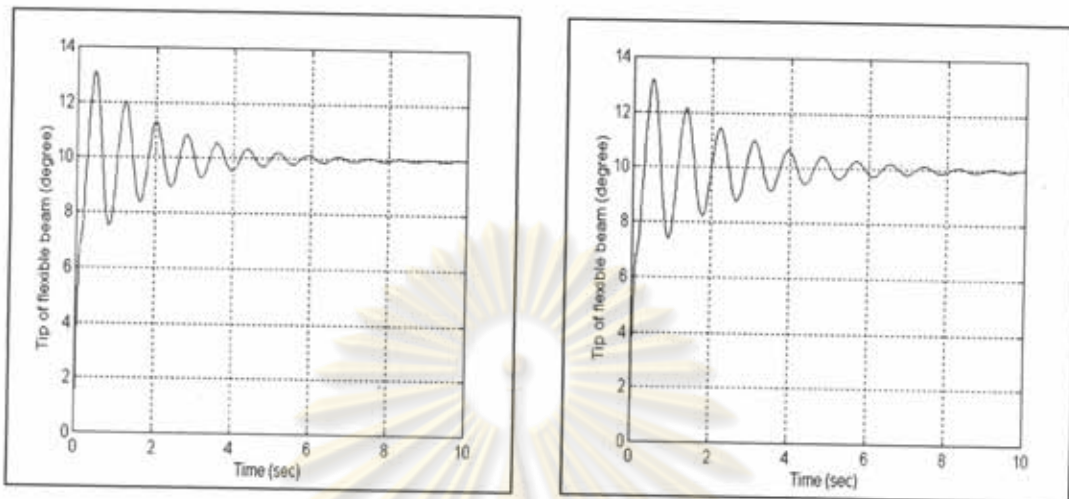
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อเพิ่มมวลที่ปลายของแขนกลข้อต่อเดียวแบบอ่อนตัว

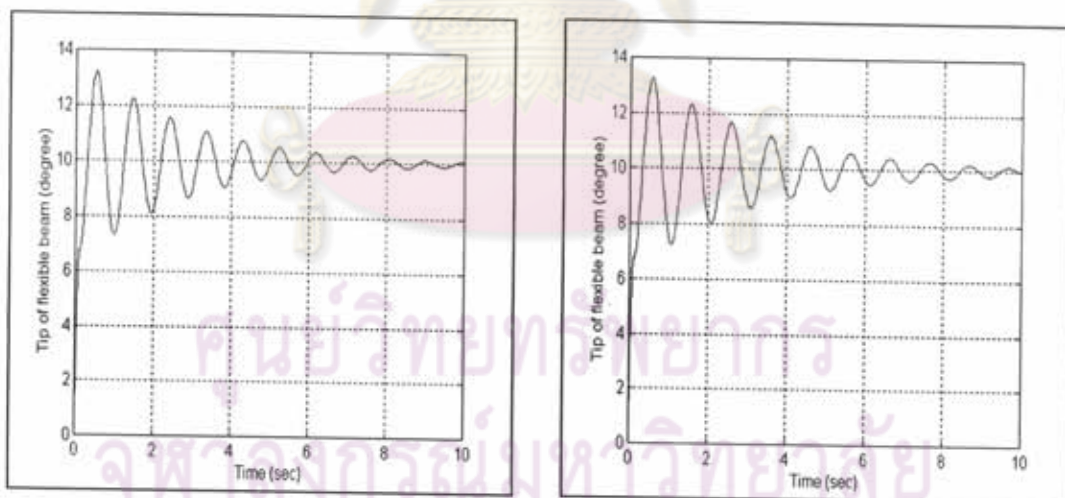
จากผลการทดลองที่ผ่านมาข้างต้นนั้นที่ตำแหน่งปลายของแขนกลไม่มีการติดตั้งมวลไว้ ซึ่งในส่วนนี้เป็นการศึกษาถึงเมื่อมีการเพิ่มมวลเข้าไปที่ตำแหน่งปลายของแขนกลนั้นมีผลต่อระบบอย่างไรทั้งในส่วนของขนาดของการแกว่งและช่วงเวลาเข้าที่สู่ค่าที่กำหนดคนั้น ในการทดลองนี้มีการเพิ่มมวลเข้าที่ปลายแขนกลแบบอ่อนตัว โดยมีการกำหนดรูปแบบของสัญญาณเข้าเป็นสัญญาณแบบขั้นที่ 10 องศาซึ่งได้แสดงผลตอบสนองที่ตำแหน่งปลายของแขนกลดังแสดงต่อไปนี้



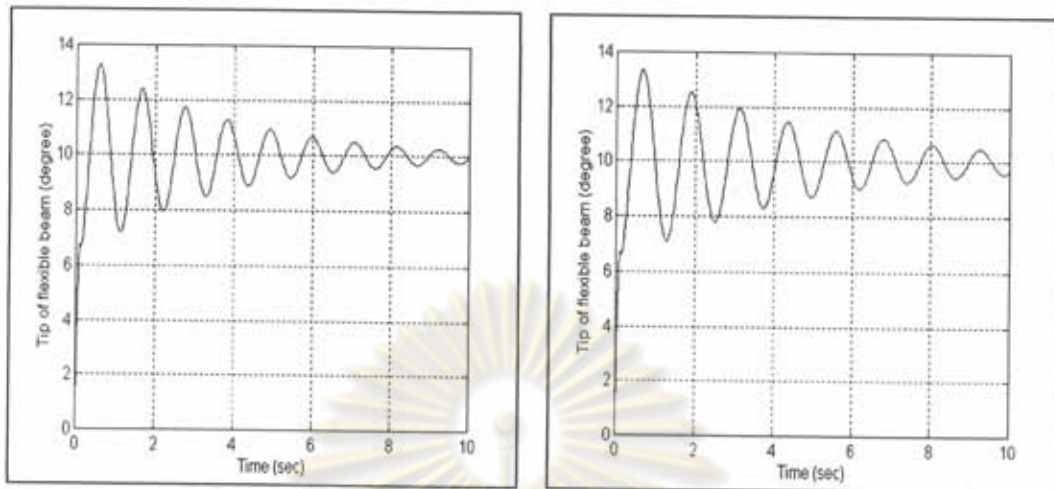
ศูนย์วิทยทรัพยากร
รูปที่ 3.16 เมื่อยังไม่มีการเพิ่มมวลที่ปลายของแขนกลแบบอ่อนตัว
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.17 เมื่อมีการเพิ่มมวลที่ปลายของแกนกลแบบอ่อนตัวที่มีขนาด 0.02 และ 0.04 กิโลกรัม



รูปที่ 3.18 เมื่อมีการเพิ่มมวลที่ปลายของแกนกลแบบอ่อนตัวที่มีขนาด 0.06 และ 0.08 กิโลกรัม



รูปที่ 3.19 เมื่อมีการเพิ่มมวลที่ปลายของแกนกลแบบอ่อนตัวที่มีขนาด 0.1 และ 0.15 กิโลกรัม

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.16 ถึง 3.19 ซึ่งแสดงผลตอบสนองที่ตำแหน่งปลายของแกนกลข้อต่อเดือวแบบอ่อนตัว จากรูปที่ 3.16 ซึ่งเป็นผลตอบสนองเมื่อยังไม่มีมวลที่ตำแหน่งปลายของแกนกล และ 3.17 เป็นผลตอบสนองเมื่อเพิ่มมวลที่มีขนาด 0.02 และ 0.04 กิโลกรัมเข้าที่ตำแหน่งปลายของแกนกลพบว่า ขนาดของการแกว่งที่เกิดขึ้นมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากคือช่วงในการแกว่ง มีการค่าเพิ่มน้อยมาก แต่พบว่าช่วงเวลาเข้าที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อพิจารณารูปที่ 3.18 ถึง 3.19 พบว่าขนาดของการแกว่งที่เกิดขึ้นมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากคือแต่ช่วงเวลาในการเข้าสู่ช่วงเวลาเข้าที่ซึ่งมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อขนาดของมวลที่นำมาติดที่ปลายของแกนกลมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นจากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเพิ่มขนาดของมวลที่ตำแหน่งปลายของแกนกลแบบอ่อนตัวนั้นมีผลต่อขนาดของการแกว่งน้อยมาก แต่ทำให้ช่วงเวลาเข้าที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

จากการจำลองเพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมต่างๆของระบบพบว่าขนาดของสัญญาณเข้าที่ป้อนให้กับระบบนั้นมีผลโดยตรงต่อขนาดของการแกว่งที่เกิดขึ้นที่ปลายของแกนกลแบบอ่อนตัว แต่ไม่มีผลต่อช่วงเวลาในการเข้าสู่ค่ากำหนดแต่อย่างใด สำหรับการเปลี่ยนความยาวของแกนกลโดยการเพิ่มขนาดของความยาวของแกนกล และเมื่อมีการเพิ่มขนาดของมวลเข้าที่ปลายของแกนกลพบว่า มีผลให้ช่วงเวลาในการเข้าสู่ค่ากำหนดนั้นเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ไม่มีผลต่อขนาดของการแกว่งที่ปลายของแกนกลแต่อย่างใด

ในงานวิจัยนี้ได้เสนอแนวทางในการลดการแกว่งที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งปลายของแกนกลโดยพิจารณาแบบแกนกลแบบอ่อนตัวโดยมีการกำหนดความยาวของแกนกลคงที่เป็น 40 เซนติเมตร และไม่มีการติดตั้งมวลที่ปลายของแกนกลแบบอ่อนตัว ซึ่งในการพิจารณาเช่นนี้เพื่อให้ระบบดังกล่าวมีการทำงานในลักษณะเดียวกับระบบแกนกลข้อต่อเดียวแบบอ่อนตัวที่เป็นชุดทดลองจริง ซึ่งในการออกแบบตัวควบคุมระบบดังกล่าวนี้จะได้กล่าวถึงในบทต่อไป



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย