

การควบคุมการเคลื่อนที่ ของแขนหุ่นยนต์แบบข้อต่อยืดหยุ่นได้ โดยใช้เทคนิคคอมมานด์เชปปีง

Command Shaping Applied to Point-to-Point Motion of a One-Link Flexible-Joint Robot

ธีรพงษ์ ตระกูลโชคอำนวย¹
วิฑิต ฉัตรรัตนกุลชัย²

บทคัดย่อ

ความยืดหยุ่นของข้อต่อช่วยลดการเสียหายจากการชน จริง ๆ แล้วข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ทุกชนิดมีความยืดหยุ่นอยู่บ้าง จากคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ ผลในอดีตรบว่าหากไม่นำความยืดหยุ่นของข้อต่อเข้ามาพิจารณาในการออกแบบ อาจทำให้เกิดความเสียหายจากการสั่นพ้อง (Resonance) และประสิทธิภาพในการควบคุมลดลง อย่างไรก็ตามการควบคุมหุ่นยนต์แบบข้อต่อยืดหยุ่นได้ยังเป็นปัญหาเปิดทางการวิจัย เนื่องจากแบบจำลองมีความซับซ้อนและการที่ระบบเป็นแบบ Under-actuated ความยืดหยุ่นของข้อต่อทำให้แขนหุ่นยนต์ไม่สามารถเคลื่อนที่

ได้เร็วเนื่องจากการสั่นสะท้อนที่ End Point จากการที่ Reference Signals ได้แก่ ความเร่ง ความเร็ว และการขจัดที่มี Power Spectrum สูง ในทุกย่านความถี่ไปกระตุ้นความถี่ธรรมชาติของระบบ ในงานวิจัยนี้เราได้ใช้ฟังก์ชันพื้นฐานเรมไซนูซอย (ramp sinusoid) ในการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของ Reference Signals เพื่อลดค่าพลังงานกระตุ้นในช่วงที่เกิดความถี่ธรรมชาติเพื่อลดการสั่นพ้อง ผลจาก Simulation และจากการทดลองจริงเห็นได้ชัดว่าการสั่นสะท้อนของแขนหุ่นยนต์จากการใช้ Command Shaping ลดลงทำให้แขนกลเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น

¹ นิสิตปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

² อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

คำสำคัญ : แขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นได้
เทคนิคคอมมานด์เซปิ้ง

Abstract

Joint flexibility is used to reduce damage from accidental collision. Actually, robot joints gain flexibility from the basic properties of their materials. Past research specified that ignorance of the joint flexibility during the design phase may damage joints due to resonance, and the control design has less efficiency. However, the control design of the flexible-joint robot is an open research problem because the mathematical model of the robot is complicated, and the flexible-joint robot is under-actuated. The robot cannot move too fast because of the residual vibration at the end point due to the joint flexibility. The traditional reference acceleration signal is a square wave, which has high power spectrum energy over a broad frequency range. When this reference acceleration is integrated to become reference velocity and position, it also has high-power spectrum energy over a broad frequency range. These high power spectrum signals, when used as reference signals, will excite the robots' natural frequency causing resonance. In this research, we use a ramped sinusoidal basis function to reconstruct the reference

signals to reduce power energy at the natural frequency, and therefore reduce resonance. Simulation and experimental results show that the residual vibration of the flexible-joint robot using shaped reference signals is lower, and the flexible-joint robot achieves faster movement.

Keywords: flexible joint robot manipulator, command shaping

1. คำนำ

ความยืดหยุ่นของแขนกลถือได้ว่าเป็นส่วนประกอบหนึ่งในหุ่นยนต์ที่มีความสำคัญในการทำงานต่าง ๆ ของระบบ โดยส่วนใหญ่แล้วข้อต่อของแขนกลทุกชนิดจะมีความยืดหยุ่นซึ่งเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของแขนกล ซึ่งความยืดหยุ่นของแขนกลนั้นจะช่วยลดความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการชนและอุบัติเหตุที่เกิดขึ้น เพราะแขนกลนั้นจะมีการเคลื่อนที่ค่อนข้างเร็วอยู่ตลอดเวลา เหตุผลที่สำคัญประการหนึ่งในการออกแบบแขนกลคือความยืดหยุ่น หากไม่นำความยืดหยุ่นมาพิจารณาในการออกแบบข้อต่อของแขนกลแล้วในการนำไปใช้งานจริงนั้นอาจเกิดความเสียหายจากการสั่นพ้อง (Resonance) และส่งผลให้ประสิทธิภาพในการควบคุมแขนกลลดลง

การสั่นสะเทือนทางกลนั้นจะเกิดจากการเคลื่อนที่แบบสั่นไปมาของระบบที่ประกอบด้วยมวลและสภาพยืดหยุ่น (Elasticity) ในช่วงเวลาที่กำหนดในช่วงเวลาหนึ่งเรียกว่าการสั่นสะเทือน (Vibration) [1] ในโครงสร้างของระบบทางพลศาสตร์นั้นจะมีการสั่นพ้อง (Resonance) ที่

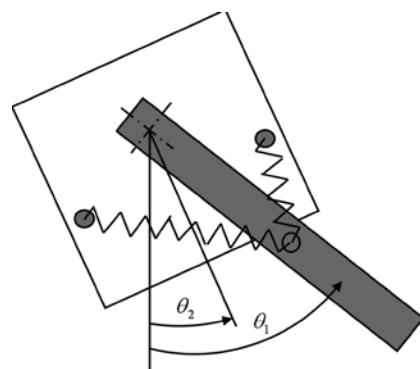
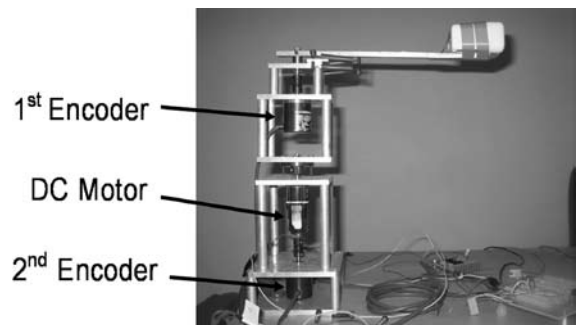
สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อระบบของเราถูกกระตุ้นจาก Input ที่ให้กับระบบมีเทคนิคต่าง ๆ ในการควบคุม การลั่นสะเทือนของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่น ซึ่งประกอบด้วย การควบคุมการลั่นสะเทือนโดยใช้ พื้นฐานรูปแบบทางพลศาสตร์ [2] คอมมามันด์ เซปป์ [6], [7], [8] อะแดปทีฟ (adaptive) และการควบคุมความทนทาน [9], [4] การลดการลั่นสะเทือนโดยใช้ Peizeolectric Actuators [3] การควบคุมแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้นั้นยังเป็น ปัญหาเปิดทางงานวิจัยเพราะว่าส่วนใหญ่แล้วแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลจะเป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ต้องทำการหาซึ่งจะสามารถช่วยอธิบายพฤติกรรมของระบบแขนกล แต่ปัญหาที่สำคัญคือระบบสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั้นมีความยากต่อการทำให้ระบบมีความแม่นยำ และจากการที่ระบบของแขนกลเป็นแบบ Under-actuated ความยืดหยุ่นของข้อต่อทำให้แขนกลไม่สามารถเคลื่อนที่ได้เร็วเนื่องจากเมื่อเกิดการเคลื่อนที่จะมีการลั่นสะเทือนที่จุดปลายของแขนกล (End Point) จากสัญญาณอ้างอิงของระบบคือ Reference Signals ซึ่งได้แก่ ความเร่ง ความเร็ว และการจัดซึ่งค่า Reference Signals ทั้งสามนี้จะมี Power Spectrum สูงในทุกย่านความถี่โดยจะไปกระตุ้นความถี่ธรรมชาติของระบบทำให้แขนกลนั้นเกิดการลั่นสะเทือน

ในงานวิจัยนี้เราให้ใช้เทคนิคคอมมามันด์ เซปป์ในการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของ Reference Signals เพื่อลดค่าพลังงานกระตุ้นในช่วงที่เกิดความถี่ธรรมชาติเพื่อลดการลั่นพ้องและใช้ฟังก์ชันพื้นฐานของแรมไซนูซอยเข้ามาใช้ในการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของ

Reference Signals ผลจาก Simulation และจากการทดลองจริงแสดงให้เห็นว่าการลั่นสะเทือนของแขนกลจากการใช้เทคนิคคอมมามันด์เซปป์ลดลงและทำให้แขนกลเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น

วิธีการ

แขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้จะมีการเคลื่อนที่ในแนวระนาบ เมื่อแขนกลเกิดการเคลื่อนที่ มุมของ Link แขนกลที่หมุนไปจะถูกวัดโดย Encoder ตัวที่ 1 ที่ทำการติดตั้งอยู่บริเวณส่วนบนของแขนกลและมุมของ Hub แขนกลที่หมุนไปจะถูกวัดโดย Encoder ตัวที่ 2 ที่ติดตั้งอยู่บริเวณด้านล่างของฐานดังแสดงในภาพที่ 1 เป็น



ภาพที่ 1 โครงสร้างแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่น ได้ที่ใช้ในการทดลอง

โครงสร้างของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งตั้งอยู่ที่ห้อง Control of Robot and Vibration Laboratory (CRV Lab) ตึก RDIP T ชั้น 5

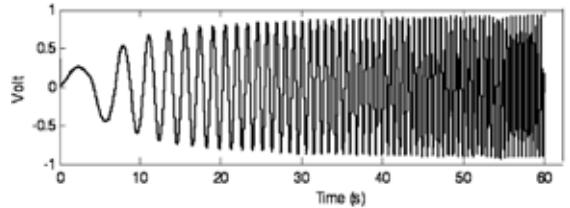
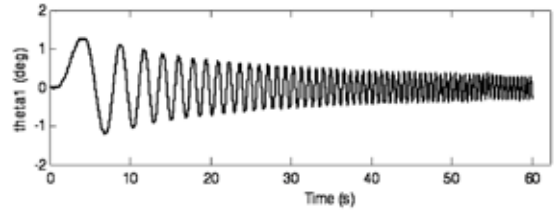
การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้โดยใช้วิธีงานพลังงานของลากรานจ์ (Lagrange) ซึ่งสมการการเคลื่อนที่ของแขนกลคือ

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_1 &= -\frac{k_{stiff}}{J_{link}}\theta_1 - \frac{c}{J_{link}}\dot{\theta}_1 + \frac{k_{stiff}}{J_{link}}\theta_2 \\ &\quad + \frac{c}{J_{link}}\dot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_2 &= \frac{k_{stiff}}{J_{hub}}\theta_1 + \frac{c}{J_{hub}}\dot{\theta}_1 - \frac{k_{stiff}}{J_{hub}}\theta_2 - \\ &\quad \left(\frac{c}{J_{hub}} + \frac{k_m^2 k_g^2}{R_m J_{hub}} \right) \dot{\theta}_2 + \frac{k_m k_g}{R_m J_{hub}} V \end{aligned} \quad (1)$$

1. การหาสมการการเคลื่อนที่ของแขนกล (system identification)

ทำการเก็บค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้โดยใช้โปรแกรม Matlab สำหรับการเก็บค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแขนกลในการทำ System ID ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของแขนกลนั้นประกอบด้วย แรงดันไฟฟ้าที่ให้กับมอเตอร์ในการขับ มุมการเคลื่อนที่ของ Link และมุมการเคลื่อนที่ของ Hub เพื่อนำมาสร้างสมการการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้

การทดลองเก็บค่าพารามิเตอร์ของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้นั้น เราได้ให้แรงดันไฟฟ้ากับมอเตอร์เป็นสัญญาณ Sine Wave ซึ่งมีส่วนของการเปลี่ยนความถี่ที่ใช้ทำการทดลองตั้ง



ภาพที่ 2 รูปบนแสดงมุมการเคลื่อนที่ของแขนกล รูปล่างแสดงผลของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์

แต่ 0.01 ถึง 1 Hz ค่าแอมพลิจูดที่ใช้คือ 1.5 เวลาที่ใช้ 60 วินาที ผลจากการทำ System ID แสดงในภาพที่ 2

จากกฎของนิวตัน (Newton) จะได้

$$J\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + k\theta = T \quad (2)$$

ค่าทอร์กของมอเตอร์ที่สร้างขึ้นคือ

$$V = IR_m + k_b k_g \dot{\theta}_2 \quad (3)$$

และ

$$T = k_g k_m I \quad (4)$$

จากสมการ (3) และ (4) จะได้

$$T = \frac{k_g k_m V}{R_m} - \frac{k_b k_m k_g^2}{R_m} \dot{\theta}_2 \quad (5)$$

สมการ Transfer Function ของการเคลื่อนที่แขนกลโดยที่ Input ของระบบคือ V และ Output ของระบบคือ θ เพราะฉะนั้นจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการคือ

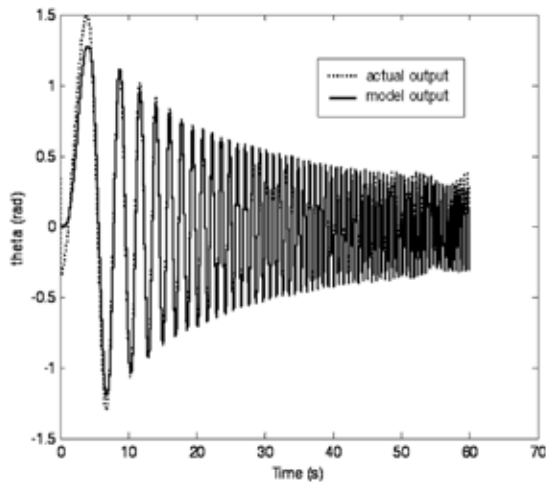
$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{k}{(Tw s)^2 + (2 Zeta Tw)s + 1} \quad (6)$$

หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากสมการที่ (6) จะได้

$$k = [12.0333], Tw = [0.33261], Zeta = [5.0546]$$

เพราะฉะนั้นจะได้ สมการ Transfer Function คือ

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{12.03}{0.1106S^2 + 3.3620S + 1} \quad (7)$$



ภาพที่ 3 แสดงผลการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบมีข้อต่อยึดหยุนจากแบบจำลองแขนกลกับแขนกลจริง

ผลจากการจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบมีข้อต่อยึดหยุนได้ดังแสดงในภาพที่ 3 เส้นทึบคือผลการจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกล เส้นปะคือผลการเคลื่อนที่จริงของแขนกลจากการจำลองการเคลื่อนที่นั้นมีความถูกต้อง 80.79% ซึ่งนับว่าเป็นค่าที่มีความถูกต้องในเกณฑ์ที่ดีแต่ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างซึ่งเป็นผลมาจากแบบจำลองสมการการเคลื่อนที่ของแขนกลกับแขนกลจริงนั้นยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่ ดังนั้นเราต้องมีตัวควบคุมซึ่งทำหน้าที่ลดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น

2. การออกแบบระบบควบคุม

2.1 การควบคุมแบบ Inverse Dynamics

เราได้ทำการเลือกการควบคุมแขนกลแบบมีข้อต่อยึดหยุนโดยใช้การควบคุมแบบ Inverse Dynamics ซึ่งก็เป็นการควบคุมแบบป้อนกลับอย่างหนึ่งและเรามีการทำ Inverse Model ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากสมการของลากรางจ์ คือ

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial K}{\partial \theta_i} + \frac{\partial P}{\partial \theta_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_i} = Q_i, \quad i = 1, 2.$$

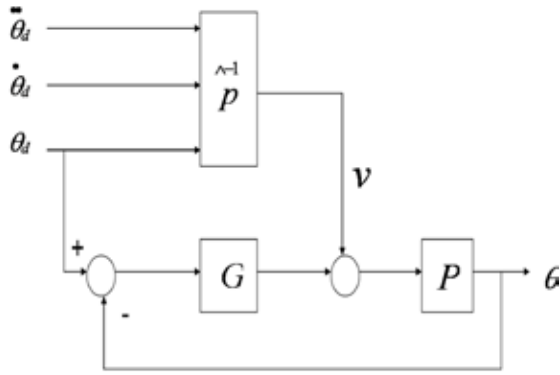
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากสมการ

$$J_l \ddot{\theta}_1 + k(\theta_1 - \theta_2) + c_2(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) = 0$$

$$J_h \ddot{\theta}_2 - k(\theta_1 - \theta_2) + c_1 \dot{\theta}_2 - c_2(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) = T$$

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้น Input คือ

ทอร์ก (τ) Output ของระบบคือ มุม ($\ddot{\theta}, \dot{\theta}, \theta$) เมื่อทำการ Inverse แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เราหามานั้น Input ของระบบคือ มุม ($\ddot{\theta}, \dot{\theta}, \theta$) Output ของระบบคือ ทอร์ก (τ)



ภาพที่ 4 แสดงการควบคุมแบบ Inverse Dynamics

จากภาพที่ 4 เป็นบล็อกไดอะแกรม (Block Diagram) แสดงการควบคุมแบบ Inverse Dynamics เมื่อพิจารณาบล็อกไดอะแกรมนี้ความต้องการที่เราจะทำการควบคุมระบบคือต้องการให้ θ ตาม θ_d เมื่อเรามาพิจารณา ค่าของ \hat{P}^{-1} คือ Inverse Model กับ P คือ ระบบหรือ Plant

ถ้าเราสมมุติให้ค่าของ \hat{P}^{-1} เท่ากับ P ค่าทั้งสองในระบบตัดกันโดยมีค่าเป็นศูนย์สมมุติเมื่อเราป้อนสัญญาณเข้าเป็นสัญญาณ Sine Wave สัญญาณขาออกก็จะเป็นสัญญาณเดิมคือ Sine Wave นั้นหมายถึงระบบของเราที่ทำการควบคุมมีความถูกต้องและเป็นสิ่งที่เราต้องการแต่ไม่ว่าจะเป็นในทางปฏิบัติหรือทางทฤษฎีค่าทั้งสองคือ \hat{P}^{-1} กับ P ไม่สามารถที่จะเท่ากันได้เพราะ

ประการแรกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เราหามานั้นมีความคลาดเคลื่อน ประการที่สองระบบของเราที่ทำการควบคุมมีความไม่แน่นอน (Uncertainty)

ดังนั้นเราจึงต้องมีค่า G คือตัวควบคุม (Controller) จะทำหน้าที่ลดค่าความผิดพลาด e (Error) คือ สัญญาณค่าความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้ เราสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการได้ คือ $e = \theta_d - \theta$ โดยที่ตัวควบคุมจะทำหน้าที่ในการลดค่าความผิดพลาด e (Error) ให้มีค่าน้อย ๆ หรือเท่ากับศูนย์ เพื่อที่จะทำให้ระบบของเรามีการตอบสนองตามคำสั่งที่เราต้องการ

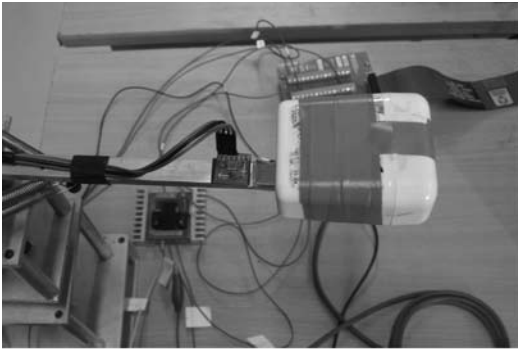
3. การหาความถี่ธรรมชาติของระบบ

วิธีการหาความถี่ธรรมชาติของแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นได้ ซึ่งทำการทดลองโดยใช้ อุปกรณ์ Accelerometer เป็นเครื่องมือในการหาความถี่ธรรมชาติของแขนกลเพื่อที่จะได้นำผลของความถี่ธรรมชาติไปทำการลดการสั่นสะเทือนของแขนกลโดยการ Shaped Input ของ Reference Signals โดยเป็นการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของ Reference Signals เพื่อให้ผลของความถี่ที่เกิดขึ้นนั้นหลบความถี่ธรรมชาติของแขนกลในการลดการสั่นสะเทือน

3.1 วิธีหาความถี่ธรรมชาติของแขนกลจากการทดลองโดยใช้ Accelerometer

ขั้นตอนที่ 1

ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งเชิงมุม (Accelerometer) ดังแสดงในภาพที่ 5



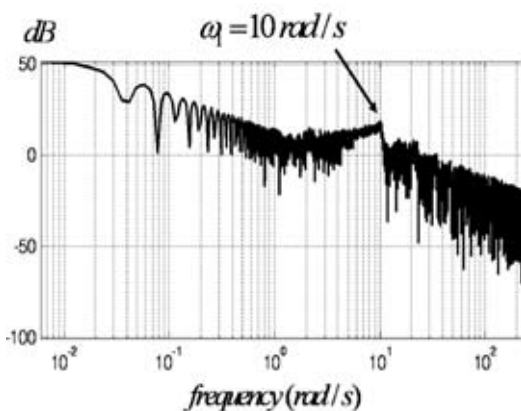
ภาพที่ 5 แสดงการติดตั้ง Accelerometer กับ แขนกล

ขั้นตอนที่ 2

ให้สัญญาณ Sine Wave กับมอเตอร์ โดยสร้างช่วงความถี่ 0.15-3 Hz แอมพลิจูดที่ 1.5 ค่าที่ Accelerometer เก็บค่าได้จะเป็นค่าความเร่งในแนวตั้งฉากกับ Link ของแขนกลและเป็นสัญญาณแบบต่อเนื่อง (Analog signal)

ขั้นตอนที่ 3

นำค่าที่เก็บได้จาก Accelerometer ในรูปของ Text file ไปหาความถี่ธรรมชาติของแขนกลจากโปรแกรม Matlab โดยใช้วิธี Fast Fourier Transform (FFT)



ภาพที่ 6 แสดงผลการหาค่าความถี่ธรรมชาติจาก FFT

ภาพที่ 6 แสดงผลของความถี่ธรรมชาติของแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นได้ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10 rad/s เนื่องจากระบบของเรามีสององศาอิสระ ค่าความถี่ธรรมชาติของแขนกลจะต้องมีสองความถี่ธรรมชาติ แต่จากการทำการทดลองหลายครั้งโหมดความถี่ธรรมชาติที่ได้มีค่าเดียวเนื่องจากความถี่ธรรมชาติที่ได้นั้นเป็นค่าความถี่ธรรมชาติของสปริงและอีกค่าเป็นความถี่ธรรมชาติของมอเตอร์ซึ่งจะมีค่าความถี่ธรรมชาติมากกว่าความถี่ธรรมชาติของสปริงซึ่งสาเหตุที่เราไม่สามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติของมอเตอร์ออกมาได้นั้นเนื่องมาจากสัญญาณ Sine Wave ที่ให้กับมอเตอร์ที่มีช่วงความถี่ 0.15-3 Hz นั้นมีช่วงความถี่น้อยไปไม่สามารถไปกระตุ้นความถี่ธรรมชาติของมอเตอร์ งานวิจัยนี้จึงใช้ความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดลองที่มีค่าเท่ากับ 10 rad/s ในการทำการทดลองในขั้นตอนต่อไป

4. เทคนิคคอมมานด์เชปปีง (command shaping)

เทคนิคคอมมานด์เชปปีง [4] เป็นการนำพื้นฐานของฟังก์ชันแรมไซนูซอยที่นำมาประยุกต์ใช้ รวมถึงแสดงความสัมพันธ์ของสมการ Cost Function ที่จะอธิบายถึงแอมพลิจูดของการสั่นและความถี่ธรรมชาติของแขนกล

พื้นฐานของฟังก์ชันแรมไซนูซอยจากสมการคือ

$$f(t) = \sum_{l=1}^L \frac{\beta_l}{\alpha_l^2} \Phi_l^*(t) \quad (8)$$

และ

$$\Phi_i^*(t) = \alpha_i \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{t}{T_f} \right) + \sin \left(\alpha_i \frac{t}{T_f} \right) - \frac{\alpha_i}{2} \cos \left(\alpha_i \frac{t}{T_f} \right) \quad (9)$$

แทนค่าสมการ (9) ใน (8) จะได้

$$f(t) = \sum_{l=1}^L \frac{\beta_l}{\alpha_l^2} \alpha_l \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{t}{T_f} \right) + \sin \left(\alpha_l \frac{t}{T_f} \right) - \frac{\alpha_l}{2} \cos \left(\alpha_l \frac{t}{T_f} \right) \quad (10)$$

เป็นพื้นฐานฟังก์ชันแรมไซนูซอยด์ β_l เป็นสัมประสิทธิ์ของพื้นฐานฟังก์ชันและ α_l เป็นจำนวนลักษณะที่มีความสัมพันธ์กับพื้นฐานฟังก์ชันโดยค่า β_l สามารถหาได้จากสมการที่ (10) และสมการ Cost Function ที่มีความสัมพันธ์ระหว่าง Time-Optimality และ Vibration-Reduction คือ

$$J = \frac{1}{T_f} \left\{ \int_0^{T_f/2} [1-f(t)]^2 dt + \int_{T_f/2}^{T_f} [-1-f(t)]^2 dt \right\} + \rho \sum_{i=1}^{11} (\omega_i T_s)^2 |F^*(\omega_i T_f)|^2 \quad (11)$$

จากสมการที่ (11) เราต้องการ Minimize (J) ซึ่งผลต่างของ Square คือ

$$\left\{ \int_0^{T_f/2} [1-f(t)]^2 dt + \int_{T_f/2}^{T_f} [-1-f(t)]^2 dt \right\}$$

เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Bang-Bang command profile กับ Command shaped profile โดยต้องการให้ผลต่างของ Square คือค่า Command shaped profile มีค่าน้อย หรือเท่ากับศูนย์เพื่อที่จะให้ค่าเข้าใกล้ Bang-Bang เพราะว่า Bang-Bang จะมีการเคลื่อนที่เร็ว ส่วนค่าความถี่ธรรมชาติของแขนกลสามารถอธิบายจาก Input Frequency Spectrum คือ

$$\rho \sum_{i=1}^{11} (\omega_i T_s)^2 |F^*(\omega_i T_f)|^2$$

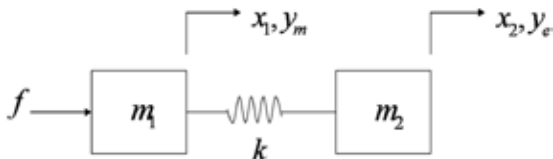
โดยพจน์สมการ Cost Function นี้จะบอกถึงความถี่ธรรมชาติของระบบ ω_i คือค่าความถี่ธรรมชาติของแขนกลที่มีความถี่ตั้งแต่ $i=1$ ถึง $i=11$ ความถี่ โดยจะมีช่วงของความถี่ $\pm 10\%$ เพราะฉะนั้นขอบเขตความถี่ในระบบคือ $0.9\omega_n < \omega_i < 1.1\omega_n$

จากนั้นทำการ Minimize คือ $\partial J / \partial \beta_r = 0$ จากสมการที่ (11) คือ Objective Function (J) เพื่อหาค่า β_l และเวลา T_f โดยการหาอนุพันธ์ย่อยของสมการที่ (11) เทียบกับ β_r เปลี่ยนตัวแปร l เป็น r แล้วจับเท่ากับศูนย์

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Input Spectrum และ Residual Acceleration Amplitude

จากพื้นฐานของระบบ Two-mass undamped system ดังแสดงในภาพที่ 7 ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง Input function spectrum และแอมพลิจูดของการสั่นซึ่งความสัมพันธ์ทั้งสองนี้จะสามารถอธิบายถึงสมการที่

(11) ได้เป็นอย่างดี จากสมการที่ (12) โดยจะบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างโดเมนสองโดเมนคือแอมพลิจูดของการสั่นซึ่งจะอยู่บนโดเมนเวลา (Time Domain) และ Input function spectrum คือ ความถี่ธรรมชาติของระบบจะอยู่บนโดเมนความถี่ (Frequency Domain)



ภาพที่ 7 แสดง Two-Mass System Model

จากความสัมพันธ์ของระบบเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$\frac{y_e^*}{f^*} = \frac{\left(\frac{\omega_A}{\omega_N}\right)^2}{s^2 \left[s^2 + \left(\frac{\omega_A}{\omega_N}\right)^2 \right]}$$

กำหนดให้

y_e เป็นตำแหน่งการสิ้นสุดการเคลื่อนที่ (endpoint position)

y_m เป็นตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์ (motor position)

f เป็นแรง (force)

ระบบ Two-Mass System Model ให้ m_1 และ m_2 คือมวลของระบบ k คือค่าของสปริง และ f คือแรงที่มากระทำกับระบบทำให้ระบบเกิด

การสั่นสะเทือน ค่าความถี่ธรรมชาติของระบบที่เกิดขึ้นจะมีค่าเดียวโดยสามารถแสดงความสัมพันธ์นี้ได้ดังสมการ

$$A^* = \frac{A}{F_{\max} / (m_1 + m_2)} = \omega_n T_f |F^*(\omega_n T_f)| \quad (12)$$

และ

$$|F^*(\omega_n T_f)| = |F(\omega_n)| / F_{\max} T_f$$

โดยที่

A คือ แอมพลิจูดความเร่งของการสั่นสะเทือน

F_{\max} คือ แรงสูงสุด (peck force amplitude)

$F(\omega_n)$ คือ ฟูเรีย ทรานส์ฟอร์ม (Fourier transform) ของ input function

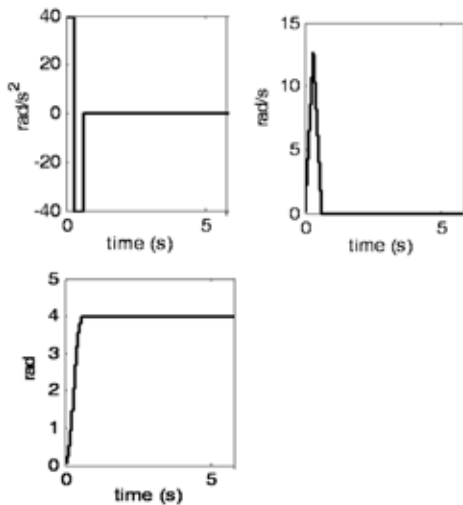
4.2 เทคนิคคอมมานด์เซปป์ิงในการลด

การสั่นสะเทือนของแกนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่น

เป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคคอมมานด์เซปป์ิงมาใช้ในการลดการสั่นสะเทือนของแกนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้ โดยได้อธิบายถึง Reference Trajectories (Square Wave) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ทำการออกแบบขึ้นมาเพื่อให้แกนกลได้เคลื่อนที่ตามตำแหน่งที่เราต้องการ หลังจากนั้นทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบและทำการ Shaped Input เพื่อให้ความถี่ของ Reference Trajectories (Square Wave) ที่ออกแบบไว้นั้น หลบความถี่ธรรมชาติของแกนกลเพื่อลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น หลังจากการ Shaped Input โครงสร้างที่ได้ปรับเปลี่ยนก็จะเป็น Reference Trajectories (Ramped Sine)

4.2.1 Reference Trajectories (Square Wave)

Reference Trajectories (Square Wave) เป็นโครงสร้างพื้นฐานของ Bang-Bang command profile ที่ยังไม่ได้ทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างเพื่อลดค่าพลังงานซึ่งโครงสร้างของ Reference Trajectories (Square Wave) นั้นจะมี Power Spectrum สูงในทุกย่านความถี่มีผลไปกระตุ้นความถี่ธรรมชาติของระบบทำให้เกิดการสั่นสะเทือน จากภาพที่ 8 รูปบนซ้ายคือความเร่ง เมื่อเราทำการอินทิเกรตจะได้ รูปบนขวาคือ ความเร็ว และทำการอินทิเกรตอีกครั้งจะได้ รูปล่างคือตำแหน่ง

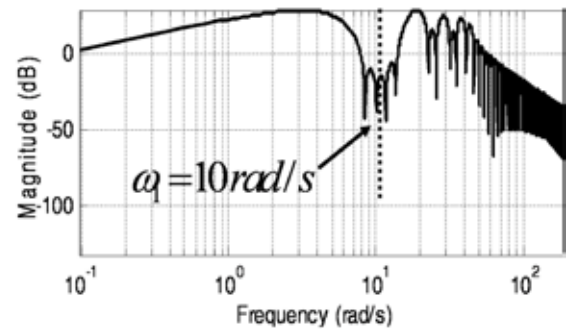


ภาพที่ 8 แสดง Reference Trajectories (Square Wave)

จาก Reference Trajectories (Square Wave) เราจะทำการออกแบบโครงสร้างเพื่อให้

แขนกลเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งโดยกำหนดมุมการเคลื่อนที่ของแขนกลคือ 4 เรเดียน ค่าทอร์กที่ใช้คือ 40 N/m^2 ในพื้นฐานโครงสร้างของ Reference Trajectories (Square Wave) เราต้องการที่จะลดค่า Power Spectrum ให้น้อยลงเพื่อให้แขนกลไม่มีการสั่นสะเทือนในระหว่างการเคลื่อนที่ซึ่งแขนกลจะสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น

ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่จะใช้ในการออกแบบคือ $L, \rho, \omega_n, F_{max}$ เพื่อที่จะ Minimize สมการที่ (11)

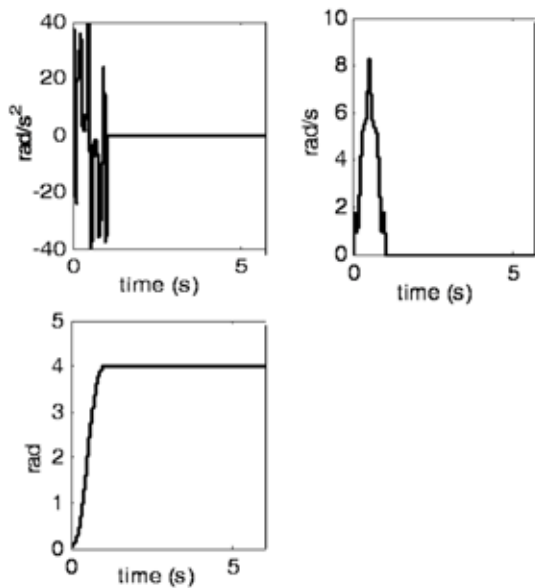


ภาพที่ 9 แสดงการ Shaped Input

จากภาพที่ 9 แสดง Frequency Spectrum จากการ Shaped Input ของโครงสร้าง Reference Trajectories (Square Wave) ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้คือ $L=10, \rho=10, \omega_n=10 \text{ rad/s}, F_{max}=40$ ซึ่งผลของการ Shaped Input เพื่อทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างแล้วจะทำให้ Power Spectrum และค่าความถี่ต่าง ๆ ที่อยู่บริเวณโดยรอบความถี่ธรรมชาติลดลงโครงสร้างที่ทำการปรับเปลี่ยนแล้วจะเรียกว่า Reference Trajectories (Ramped Sine)

4.2.2 Reference Trajectories (Ramped Sine)

Reference Trajectories (Ramped Sine) เป็นโครงสร้างที่ถูกออกแบบขึ้นในการเคลื่อนที่ของแขนกลและได้ทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างเพื่อลดค่า Power Spectrum ที่เพิ่มสูงขึ้น หลังจากนั้นผลจากการ shaped input ของโครงสร้าง Reference Trajectories (Square Wave) จะทำให้แขนกลไม่เกิดการลั่นที่จุดปลาย (End Point) และมีการเคลื่อนที่เร็วขึ้น



ภาพที่ 10 แสดง reference trajectories (ramped sine)

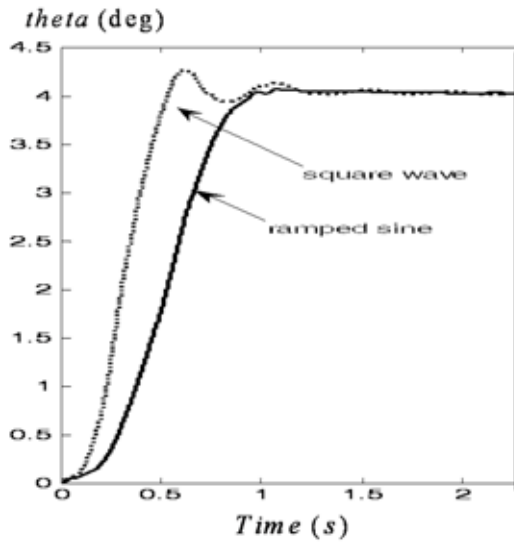
ภาพที่ 10 แสดง Reference Trajectories (Ramped Sine) เป็นโครงสร้างการเคลื่อนที่ของแขนกลและทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างแล้ว รูปบนซ้ายคือความเร่งเมื่อเราทำการอินทิเกรตจะได้รูปบนขวาคือความเร็ว และทำ

การอินทิเกรตอีกครั้งจะได้รูปล่างคือตำแหน่ง ในการออกแบบโครงสร้าง Reference Trajectories (Ramped Sine) นั้นได้ใช้โปรแกรม Matlab ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และจะนำผลที่ได้จากการออกแบบและผลของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ นำไปใช้ทดลองการควบคุมแขนกล

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการทดลองของแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นได้จากการใช้เทคนิคคอมมานด์เซปปีง โดยการนำ Reference Trajectories (Ramped Sine) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ถูกออกแบบขึ้นในการเคลื่อนที่ของแขนกลและได้ทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างเพื่อลดค่า Power Spectrum ที่เพิ่มสูงขึ้นมาใช้ในการทดลองควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล จากภาพที่ 11 12 และ 13 เป็นการเปรียบเทียบการใช้เทคนิคคอมมานด์เซปปีงกับไม่ใช้เทคนิคคอมมานด์เซปปีง คือโครงสร้างของ Reference Trajectories (Square Wave) กับโครงสร้าง Reference Trajectories (Ramped Sine)

จากภาพที่ 11 แสดงผลการทดลองการเคลื่อนที่ของแขนกลโดยเราต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง มุมที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของแขนกลคือ 4 เรเดียน เป็นตำแหน่งที่แขนกลเคลื่อนที่ไปและจะหยุดนิ่ง โดยเส้นปะและเส้นทึบเป็น Desired Trajectory คือ Square Wave และ Ramped Sine ตามลำดับ Square Wave เป็น Reference Signals ที่ยังไม่ได้ทำการ Shaped Input หรือว่ายังไม่ใช้เทคนิคคอมมานด์เซปปีงส่วน Ramped Sine เป็น Reference Signals ที่ได้ทำการ Shaped Input

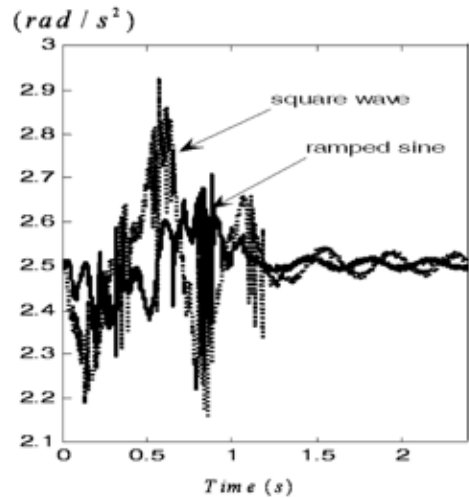


ภาพที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของ แขนกลจากการใช้เทคนิคคอมมานด์เซปป์

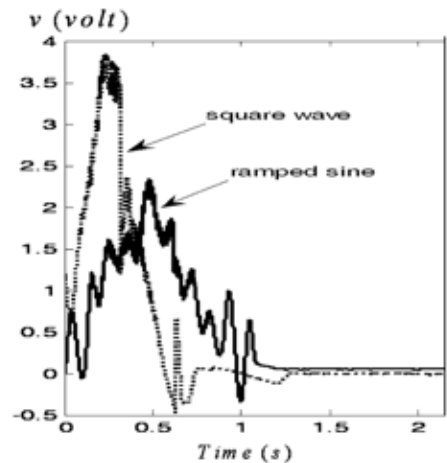
ซึ่งก็คือการใช้เทคนิคคอมมานด์เซปป์ ผลจากการทดลองเส้นทึบ (Ramped Sine) เป็นการใช้เทคนิคคอมมานด์เซปป์สามารถที่จะเข้าสู่ Setting Time ที่ $\pm 3\%$ ได้เร็วกว่าเส้นปะ (Square Wave) ที่ 0.85 วินาทีและ 1.12 วินาที ตามลำดับ และผลจากการนำเทคนิคคอมมานด์เซปป์มาใช้กับแขนกลนั้น สามารถที่จะลดค่า Overshoot ที่เกิดขึ้นได้

จากภาพที่ 12 แสดงผลของแอมพลิจูด ความเร่งของการสั่นสะเทือนจะเห็นว่าค่า Amplitude และ Overshoot นั้นจะมีค่าที่ลดต่ำลงเมื่อเราได้นำเทคนิคคอมมานด์เซปป์มาใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล ในการออกแบบการเคลื่อนที่ของแขนกลนั้น ได้ใช้โปรแกรม Matlab ในการสร้าง Reference Trajectories ซึ่งสามารถทำให้แขนกลนั้นมีการเคลื่อนที่ในลักษณะต่าง ๆ ตามความต้องการของผู้ควบคุมเช่นในการทดลอง

สามารถออกแบบการเคลื่อนที่แขนกลให้เคลื่อนที่แบบกลับไปมาอย่างต่อเนื่องได้



ภาพที่ 12 แสดงผลของความเร่งทั้งสองกรณี



ภาพที่ 13 แสดงผลของ Input Voltages ทั้งสองกรณี

ภาพที่ 13 แสดง Input Voltages ของ Square Wave และ Ramped Sine คือเส้นปะ และเส้นทึบตามลำดับ เทคนิคคอมมานด์เซปป์สามารถที่จะลดค่าพลังงานกระตุ้นจาก Square

Wave ที่มี Power Spectrum สูงในทุกย่านความถี่ที่จะมีผลไปกระตุ้นความถี่ธรรมชาติของแขนกลทำให้เกิดการสั่นสะเทือนและผลของ Ramped Sine นั้น จะเห็นว่า การนำเทคนิคคอมมานด์เซปป์มาใช้ช่วยลดพลังงานกระตุ้นให้น้อยลงทำให้แขนกลนั้นลดการสั่นพ้อง (Resonance) และจากการใช้เทคนิคคอมมานด์เซปป์นั้น ทำให้แขนกลสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นและไม่มีการสั่นสะเทือนที่จุดปลายแขนกล (End Point)

ในการทดลองถ้ามีการใช้ Notch-filter แทนเทคนิคคอมมานด์เซปป์ซึ่งวิธี Notch-filter เป็นการสร้าง Filtered time function ขึ้นมา และทำการตัดช่วงของความถี่ออกจากฟูเรียสเปกตัม (Fourier Spectrum) ของ Square Wave ซึ่งจะได้ Time Function ขึ้นมาใหม่เป็น Filtered Spectrum จากการใช่วิธี Inverse Fourier Transform ผลจากการใช้ Notch-filter สามารถที่จะลดการสั่นสะเทือนได้แต่ผลตอบสนองต่อเวลาจะนานกว่าเพราะไม่มี Input Energy ในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนของระบบถึงแม้วิธี Notch-filter จะช่วยลดการสั่นสะเทือนให้น้อยลง แต่ผลที่ได้ก็ดีไม่เท่ากับการใช้เทคนิคคอมมานด์เซปป์

วิจารณ์ผลการทดลอง

1. จากภาพที่ 3 แสดงผลการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นของแบบจำลองแขนกลกับแขนกลจริง ผลจากการจำลองการเคลื่อนที่นั้นมีความถูกต้อง 80.79% แต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง ซึ่งเป็นผลมาจากแบบจำลองสมการการเคลื่อนที่ของ แขนกลกับแขนกลจริงนั้นยังมีความคลาดเคลื่อน

2. ค่าความถี่ธรรมชาติที่หาได้จากการทดลองนั้น จากภาพที่ 6 แสดงผลการหาค่าความถี่ธรรมชาติจาก Fast Fourier Transform (FFT) เนื่องจากระบบที่ใช้ทดลองมี DOF = 2 ความถี่ธรรมชาติของระบบมีสองค่า แต่จากการทำการทดลองหลายครั้งโหมดความถี่ธรรมชาติที่ทำการทดลองได้มีสองค่าจริงตามทฤษฎี แต่เนื่องจากโหมดของความถี่ธรรมชาติที่เกิดขึ้นจากมอเตอร์นั้นมีค่าที่สูงจึงไม่สามารถที่จะให้ความถี่ไปกระตุ้นแขนกลให้เจอความถี่ธรรมชาติได้ ดังนั้นจึงใช้ความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดลองที่มีค่าเท่ากับ 10 rad/s

สรุปและข้อเสนอแนะ

ผลการทดลองจากการใช้เทคนิคคอมมานด์เซปป์สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้เป็นอย่างดี รวมถึงสามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกล ทำให้มีความรู้ความเข้าใจถึงพฤติกรรมของแขนกลและสมการการเคลื่อนที่ของแขนกล (System ID) ที่มีความถูกต้องและมีความแม่นยำในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ในส่วนของผลการทดลองนั้นได้ทำการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้จากการใช้เทคนิคคอมมานด์เซปป์และนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบระหว่างการใช้ Unshaped Command กับ Shaped Command ซึ่งผลของเทคนิคคอมมานด์เซปป์จากการใช้พื้นฐานของฟังก์ชันแร็มไซนูซอย (ramp sinusoid) เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือนในระหว่างที่เคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งของแขนกลอีกทั้งยังสามารถลดค่า

Overshoot ให้น้อยลงทำให้แขนกลสามารถเข้าสู่ Settling Time ได้เร็วขึ้น ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ระบบเข้าสู่ Stable

เทคนิคคอมมานด์เชปปีงทำให้แขนกลมีการเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นจากการ Shaped Input ทำให้ Power Spectrum ของ Reference Signals คือ ความเร่ง ความเร็ว และการขจัดที่มีค่าพลังงานสูงในทุกย่านความถี่ที่มีผลไปกระตุ้นความถี่ธรรมชาติของระบบลดลงและช่วยลดความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการสั่นพ้อง (Resonance) ได้

ข้อเสนอแนะ

1. จากระบบของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้ เราควรทำให้ระบบเป็น Non-Minimum-Phase ก่อน เพราะเมื่อผลจากการทำ Inverse Model แล้วระบบจะไม่เกิด Unstable

2. ค่าความถี่ธรรมชาติของแขนกลที่เกิดจากมอเตอร์นั้นมีค่าความถี่ที่สูงกว่าช่วงความถี่ที่ไปกระตุ้นแขนกล ดังนั้นจึงควรใช้ช่วงความถี่ที่จะไปกระตุ้นความถี่ธรรมชาติของแขนกลให้สูงขึ้น

3. การนำคอมมานด์เชปปีงไปใช้สำหรับ Unstable System นั้นควรทำให้ระบบนั้น stable ก่อน โดยการทำให้ระบบนั้น Close-Loop system ใหม่แล้วทำการ Shaped Input ของระบบทั้ง Loop

เอกสารอ้างอิง

[1] มนตรี พิรุณเกษตร. 2548. การสั่นสะเทือนเชิงกล. สำนักพิมพ์ที่อป, กรุงเทพฯ.

[2] Bayo, E. and H. Moulin. 1989. An Efficient Computation of the Inverse Dynamics of Manipulators in the Time Domain. IEEE International Conference on Robotics and Automation 2: 710-775.

[3] Ge, S.S., T.H. Lee and Z.P. Wang. 2001. Model-free Regulation of Multi-link Smart Materials Robots. IEEE International Conference on Robotics and Automation 4: 3871-3876.

[4] Khorrami, F., S. Jain and A. Tzes. 1995. Experimental Results on Adaptive Nonlinear Control and Input Preshaping for Multi-link Flexible Manipulators. Automatica 31: 83-97.

[5] Meckl, P.H. 1984. Minimizing residual vibration of a linear system using appropriately shaped forcing functions. S.M. thesis, Massachusetts Institute of Technology.

[6] Meckl, P.H. and W.P. Seering. 1987. Reducing Residual Vibration in Systems with Time-Varying Resonances. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Raleigh 1690-1695.

