

## การปรับลักษณะตำแหน่งอ้างอิง เพื่อลดการสั่นสะเทือนในการเคลื่อนที่ของแขนกล ยืดหยุ่น

### Real-Time Reference Position Shaping to Reduce Vibration in Screwing of a Very-Flexible-Joint Robot

กนกรัตน์ แซ่เฮ้ง<sup>1\*</sup> และ วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสั่นสะเทือน (CRVLAB) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ อ. จตุจักร จ. กรุงเทพฯ 10900  
\*ผู้ติดต่อ: E-mail foccus\_ly@hotmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 08-5094-8859

#### บทคัดย่อ

แขนกลชนิดแบบข้อต่อยืดหยุ่นถูกนำมาใช้งานมากขึ้น เพราะสามารถลดความเสียหายจากการชน แต่ข้อเสียของแขนกลชนิดนี้คือความแม่นยำในการทำงานลดลงเนื่องจากการสั่นสะเทือน การออกแบบอนุกรมแรงดลและช่วงเวลาในการใส่แรงดล เมื่อนำไปใช้งานร่วมกับสัญญาณควบคุมสามารถลดการสั่นสะเทือนที่เหลือจากการเคลื่อนที่ และทำให้การเคลื่อนที่ของแขนกลมีความนุ่มนวลมากขึ้น การใส่แรงดลเป็นช่วงเวลาสามารถประยุกต์ใช้กับงานแบบ Real time ซึ่งเหมาะสมกับกับงานที่มีมนุษย์สั่งการโดยตรง (Human operate) เช่น เครื่องก่อสร้าง (Construction crane) เป็นต้น งานวิจัยนี้ทำการประยุกต์เทคนิคนี้ กับแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น ซึ่งมีมนุษย์คอยควบคุมการทำงาน ผลที่ได้จากการทดลองคือ สามารถลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นได้ดีมาก

**คำหลัก:** ลดการสั่นสะเทือน, แขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นได้, เทคนิคอินพุตเซปปีง

#### Abstract

A flexible joint robot is used more. It can reduce the damage from the collision. But certainly, this type of robot that is accurate down because of vibrations. The convolution between the reference position and a properly designed impulse sequence produces an input that cancels residual vibration resulting. And the movement of the robot is more gentle. The convolution can be done in real time; the technique is then suitable for human-operated machine, such as construction cranes etc. we apply this technique to a laboratory-scale human-operated very-flexible-joint robot with great vibration-attenuated result.

**Keywords:** Vibration Reduction, Flexible Joint, Input Shaping, Shaped

#### 1. บทนำ

ในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมมีการนำแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น (Flexible joint robot) เนื่องจากแขนกลชนิดนี้สามารถลดความเสียหายเนื่องจากอุบัติเหตุจาก

การชนได้ดี แต่ข้อเสียของแขนกลชนิดชนิดนี้คือ การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงาน ซึ่งทำให้ความแม่นยำและประสิทธิภาพลดลง ที่ผ่านมานักวิจัยทำการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น โดย

ออกแบบตัวควบคุมทั้งแบบ Active control และ Passive control ความแตกต่างระหว่าง Active control และ Passive control คือ Active control เป็นการออกแบบตัวควบคุมโดยทั่วไป อาจทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้เพิ่มเข้าไปในระบบ หรือทำการดัดแปลงระบบเพื่อให้ระบบทำงานได้ตามที่ต้องการ แต่ Passive control คือการใช้สมการทางคณิตศาสตร์สร้างสัญญาณการควบคุมเพื่อลดการสั่นสะเทือน ดังนั้นจึงไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้เพิ่ม หรือทำการแก้ไขระบบ

งานวิจัยในส่วนที่เป็นการควบคุมแบบ Active control มาใช้กับแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นพบเห็นได้บ่อย เช่น การออกแบบตัวควบคุม และนำ Neural network มาลด Uncertainty ที่เกิดขึ้นของระบบ [1] ซึ่ง Uncertainty ที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากความไม่เชิงเส้นของระบบ นอกจากนี้ได้มีการปรับปรุง Algorithm ของตัว Adaptive neural network [2] เพื่อให้สามารถควบคุมแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นได้โดยตรงทั้งการควบคุมแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinearity) และการควบคุมแบบ Multivariable นอกจาก Neural network แล้วมีงานวิจัยนำ Fuzzy logic มาออกแบบร่วมกับตัวควบคุมแบบ PI [3] เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน และมีการพัฒนาต่อเนื่องโดยใช้ PID กับ Fuzzy logic [4] ควบคุมแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น นอกจากการใช้ Black box กับแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นแล้ว มีการออกแบบการควบคุมแบบไม่เชิงเส้นโดยใช้เทคนิค Back stepping [5] ซึ่งเทคนิคนี้มีประสิทธิภาพอยู่ในระดับที่น่าพอใจ กับระบบที่มีความไม่เชิงเส้น และความยืดหยุ่นสูง

งานวิจัยในส่วน Passive control พบเห็นได้ไม่บ่อยเมื่อเทียบกับการควบคุมแบบ Active control เนื่องจากการควบคุมแบบนี้เป็นเทคนิคที่ใหม่ หลักการทำงานคือใช้สมการทางคณิตศาสตร์สร้างสัญญาณควบคุมเพื่อหลีกเลี่ยง Resonance เริ่มแรกการควบคุมแบบนี้เป็นการ Shape ความแรงของระบบซึ่งเป็นที่รู้จักในชื่อ Command shaping [6] หลักการคือสร้าง Cost function เพื่อไปลดพลังงานกระตุ้น ณ

ความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) และได้มีนักวิจัยนำเทคนิคนี้ไปประยุกต์กับแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นสองข้อต่อ (Two-links flexible joint robot) [7] ในงานวิจัยได้เปรียบเทียบชนิดของ Cost function แต่ข้อเสียของ Command shaping คือเมื่อมีการเปลี่ยนเส้นทางการเคลื่อนที่ ต้องทำการสัญญาณควบคุมใหม่ทั้งหมด ต่อมา Singer และ Seering [8] คิดค้นเทคนิค Input shaping ซึ่งเทคนิคนี้เป็นแบบ Positions shaping เหมาะกับการทำงานแบบ Real time เนื่องจากถึงแม้เปลี่ยนเส้นทางการเคลื่อน ก็ไม่ต้องออกแบบตัวควบคุมใหม่ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เทคนิค Input shaping มาประยุกต์ใช้งานกับแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น ซึ่งมีการทำงานแบบ Human operate

ในส่วนที่ 2 ของงานวิจัยเป็นการกล่าวถึงพื้นฐานของเทคนิค Input shaping และการประยุกต์ใช้เทคนิคนี้ในการควบคุม ในส่วนที่ 3 เป็นการแสดงการประยุกต์ใช้เทคนิค Input shaping ในแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น การหาความถี่ธรรมชาติ และการหาค่าแดมป์ (Damp) ในส่วนที่ 4 แสดงการจัดเตรียมอุปกรณ์ และผลการทดลอง และสุดท้ายส่วนที่ 5 เป็นส่วนของสรุปผลการทดลอง

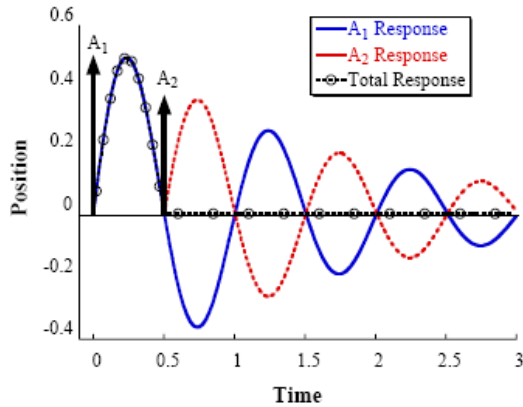
## 2. พื้นฐานเทคนิค Input shaping

การคำนวณด้วยเทคนิค Input shaping ค่อนข้างจะเป็นเทคนิคที่ใหม่ การคำนวณเริ่มจากทฤษฎีระบบเชิงเส้น (Linear system theory) โดยที่ผลเอาพุด (Output) ของการสั่นแบบอิสระ (Free vibration system) ซึ่งผลของค่าเอาพุด (Output) ที่ได้ เป็นตัวกำหนดขนาดของอนุกรม Impulse ซึ่งจะนำผลที่ได้ไป Convolutions กับสัญญาณอ้างอิง ผลของเอาพุดที่ได้แสดงใน (1) [9]

$$y(t) = \left[ A \frac{\omega_0}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_0(t-t_0)} \right] \sin(\omega_0 \sqrt{1-\zeta^2} (t-t_0)) \quad (1)$$

เมื่อ  $A$  คือ แอมพลิจูด (Amplitude) ของ Impulse ,  $\omega_0$  คือ ความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency)  $t$  คือ เวลา  $t_0$  คือเวลาที่ใส่ Impulse เข้าไปในระบบ และ  $\zeta$  คือ Damping ratio ของระบบ ส่วนของ

Impulse โดยมากจะเป็นทอร์ก (Torque) หรือ การควบคุมความเร็ว (Velocity command) เพื่อไปควบคุม Actuator ของระบบพลศาสตร์  $y(t)$  คือตำแหน่งที่สนใจในระบบ



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างอนุกรม Impulse และผลตอบสนองของ Output แสดงในลักษณะการเคลื่อนที่

จากรูปที่ 1 ภาพแสดงให้เห็นว่ามี impulse จำนวน 2 แรง เข้าไปในระบบ แสดงได้คือ  $A_1$  และ  $A_2$  ผลที่ได้คือเกิดการหักล้างระหว่างของการสั่นสะเทือนแบบอิสระ กับ Impulse ที่ป้อนเข้าไปในระบบ ซึ่งผลที่ได้จากกราฟแสดงได้ในเส้นจุดไขว้ปลา ซึ่งหลังจากใส่ Impulse เข้าไปในระบบ เมื่อสิ้นสุด Impulse ในแรงที่ 2 แล้วการสั่นสะเทือนทั้งหมดจะถูกหักล้างทั้งหมด ดังนั้นเบื้องต้นกำหนดให้ Impulse มีทั้งหมด 2 แรง จาก (1) ใช้หลักการของตรีโกณมิติ (Trigonometric relations) [9] ได้ตาม (2)

$$\left. \begin{aligned} & B_1 \sin(\alpha t + \phi_1) + B_2 \sin(\alpha t + \phi_2) \\ & = A_{amp} \sin(\alpha t + \psi) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

เมื่อ

$$A_{amp} = \sqrt{(B_1 \cos \phi_1 + B_2 \cos \phi_2)^2 + (B_1 \sin \phi_1 + B_2 \sin \phi_2)^2}$$

$$\psi = \tan^{-1} \left( \frac{B_1 \cos \phi_1 + B_2 \cos \phi_2}{B_1 \sin \phi_1 + B_2 \sin \phi_2} \right)$$

จาก (2) ในส่วนของแอมพลิจูด (Amplitude) สามารถเขียนใหม่ได้ (3)

$$Apm = \sqrt{\left( \sum_{j=1}^N B_j \cos \phi_j \right)^2 + \left( \sum_{j=1}^N B_j \sin \phi_j \right)^2} \quad (3)$$

$$\phi_j = \omega \sqrt{(1-\zeta^2)} t_j, B_j = \frac{A_j \omega}{\sqrt{(1-\zeta^2)}} e^{-\zeta \omega (t_n - t_j)}$$

$B_j$  คือ Coefficients ของไซน์ใน (1),  $N$  คือ จำนวน Impulse  $t_j$  คือ เวลาที่ทำการใส่ Impulse เข้าไปในระบบ และ  $\omega$  คือค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency)  $\zeta$  คือ Damping ratio ในการที่จะทำให้การสั่นสะเทือนของระบบมีค่าเป็นศูนย์ค่า  $Amp$  จาก (3) ต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ ในเวลาที่สิ้นสุดการใส่อินพุตเข้าไปในระบบ แทนเวลานั้นด้วย  $t_N$  และ (3) เป็นจริงได้ก็ต่อเมื่อทั้งสองเทอมใน (3) ต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ทั้งสองเทอม สามารถเขียนอยู่ในรูป (4) และ (5) ดังนี้

$$\sum_{j=1}^N A_j e^{-\zeta \omega (t_N - t_j)} \cos \left( \left( \omega \sqrt{(1-\zeta^2)} \right) t_j \right) = 0 \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^N A_j e^{-\zeta \omega (t_N - t_j)} \sin \left( \left( \omega \sqrt{(1-\zeta^2)} \right) t_j \right) = 0 \quad (5)$$

กรณี  $N=2$  (จำนวน Impulse ที่กำหนดในการคำนวณ) แทนค่า  $A_1=1, t_1=0, \sum_{i=1}^N A_i=1$  (ผลรวมของจำนวนแอมพลิจูด (Amplitude) ทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 1 แทนค่าเริ่มต้นใน (6) และ (7)

$$e^{-\zeta \omega_n t_2} + A_2 \cos(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t_2) = 0 \quad (6)$$

$$A_2 \sin(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t_2) = 0 \quad (7)$$

ได้ (8) และ (9)

$$e^{-\zeta \omega_n t_2} + A_2 \cos(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t_2) = 0 \quad (8)$$

$$A_2 \sin(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t_2) = 0 \quad (9)$$

จะได้  $t_2 = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}$  จากนั้นแทน  $t_2$  ในสมการที่

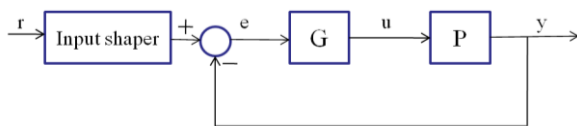
$$(8) \text{ จะได้ } A_2 = e^{-\frac{\zeta \pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$$

$$\text{แทนค่าตัวแปร } K = e^{-\frac{\zeta \pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \text{ และ } \Delta t = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}$$

$$\left( \begin{array}{cc} A_1 = \frac{1}{K+1} & A_2 = \frac{K}{K+1} \\ t_1 = 0 & t_2 = \Delta t \end{array} \right)$$

**2.1 การประยุกต์ใช้เทคนิค Input shaping กับ Closed loop system**

เทคนิค Input shaping เป็นเทคนิคแบบ Feed forward ที่ทำการประยุกต์ใช้งานนอก Loop ของ การควบคุมสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2 เมื่อ  $r$  คือ สัญญาณควบคุม (Command),  $e$  คือ ค่าความผิดพลาดของระบบ (Error) ,  $u$  คือ สัญญาณตัวควบคุม,  $y$  คือสัญญาณขาออกของระบบ (Output) ,  $G$  คือตัวควบคุม (controller) ,  $P$  คือระบบ (System) หรือ Plant จากภาพแสดงให้เห็นว่าสัญญาณควบคุมถูกรวมกับอนุกรม Impulse เป็น Shaped command ก่อนที่สัญญาณนี้ถูกส่งเข้าไปใน Loop ของการควบคุมแบบป้อนกลับ

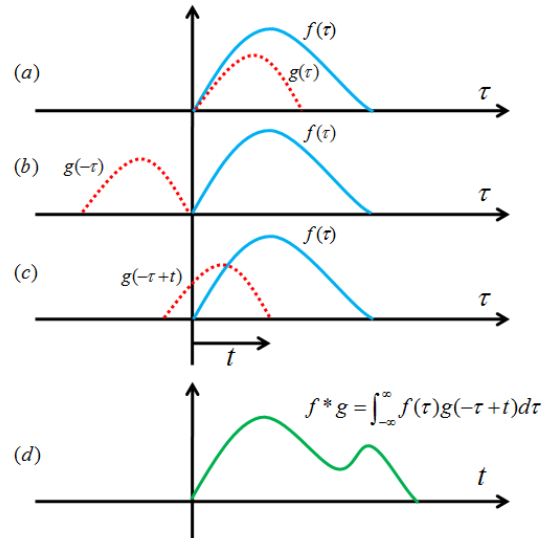


รูปที่ 2 แสดงวงจรการควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed loop system)

ในช่วงการดำเนินงานในฐานะที่เป็นโดเมนเวลา (Time domain) การคอนโวลูชัน (Convolution) ของ สัญญาณทั้งสอง  $f(t)$  และ  $g(t)$  จะได้

$$f * g = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) g(t-\tau) d\tau$$

สัญลักษณ์ \* แสดงคอนโวลูชันของสัญญาณทั้งสอง เป็นการอินทิเกรตสัญญาณทั้งสอง โดย  $g(t-\tau) = g(-\tau+t)$  เราจะเห็นว่า ส่วนของภาพสะท้อนของ  $g(\tau)$  จากการขยับตามแนวแกนของเวลาไป  $t$ , ผลจากการคอนโวลูชันแสดงได้ดังรูปที่ 3 โดยรูปที่ 3 (a) แสดงตัวอย่าง  $f(t)$  และ  $g(t)$  รูปที่ 3 (b) แสดงส่วนของภาพสะท้อนของ  $g(\tau)$  รูปที่ 3 (c) แสดงการขยับ  $g(\tau)$  ตามแนวแกนของเวลาไป  $t$ , และสุดท้าย รูปที่ 3 (d) แสดงถึงผลรวมของ  $f * g$  จะได้  $f(t)$  พื้นที่ใต้กราฟ และ  $g(-\tau+t)$



รูปที่ 3 แสดงการ Convolution ระหว่างสัญญาณ 2 สัญญาณ

## 2.2 เพิ่ม Robustness uncertainties ใน ค่า Natural frequency และ ค่า Damping ratio

เทคนิค Input shaping นี้ประกอบด้วยค่า Impulse 3 ได้มีการหา Derivative จาก (4) และ (5) เทียบกับความถี่ของระบบ ( $\omega$ ) เราจะได้ (10) และ (11)

$$\sum_{i=1}^N A_i t_i e^{-\zeta \omega_n (t_n - t_i)} \cos(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t_i) = 0 \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^N A_i t_i e^{-\zeta \omega_n (t_n - t_i)} \sin(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t_i) = 0 \quad (11)$$

ซึ่งค่า Constraint ตาม (10) และ (11) สามารถเพิ่ม Robustness ให้กับระบบซึ่งเป็นผลมาจาก Sensitivity ของระบบ

เมื่อแทนค่า  $A_1 = 1$ ,  $t_1 = 0$  เราจะได้ค่า  $t_2, A_2, t_3$  และ  $A_3$  จากสมการที่ (4) ถึง (11)

$$\text{แทนค่าตัวแปล } K = e^{-\frac{\zeta \pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \text{ และ } \Delta t = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}$$

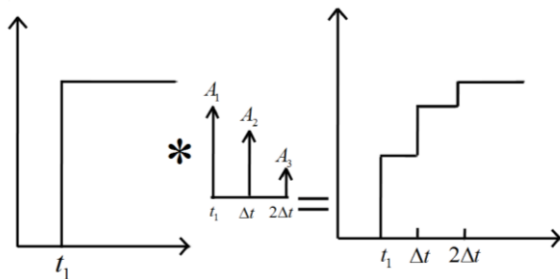
จาก  $\sum_{i=1}^N A_i = 1$  จะได้

$$\left\{ \begin{array}{l} A_1 = \frac{1}{K^2 + 2K + 1} \quad A_2 = \frac{2K}{K^2 + 2K + 1} \quad A_3 = \frac{K^2}{K^2 + 2K + 1} \\ t_1 = 0 \quad t_2 = \Delta t \quad t_3 = 2\Delta t \end{array} \right\} \quad (12)$$

เมื่อเพิ่ม Constrains เข้าไปในระบบทำให้จำนวน Impulse ที่ได้มี 3 แรงสามารถแสดงได้ดัง ภาพที่ 4

จากภาพ รูปที่ 4 (a) สัญญาณอ้างอิงของระบบ รูปที่ 4 (b) แสดงการคอนโวลูชันของ 3 Impulse ณ เวลาต่างๆ รูปที่ 4 (c) แสดงผลจากการคอนโวลูชันของสัญญาณอ้างอิงรูป และ อนุกรม Impulse

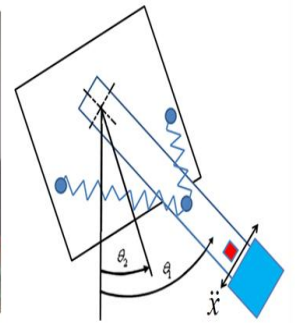
นอกจากนี้เราสามารถเพิ่ม Robustness ให้กับระบบได้ โดยการเพิ่ม Constrain แบบ Double derivative ผลที่ได้จะประกอบด้วยค่า Impulse 4 ซึ่ง Input shaping ในลักษณะนี้เหมาะกับระบบที่มี Sensitivity สูงมาก ข้อเสียคือเวลาหน่วง (Delay) ก็มากขึ้นตาม ดังการการเลือกใช้ Constrain ควรเลือกให้เหมาะสมกับระบบที่ใช้งาน



รูปที่ 4 แสดงผลจากการ Convoluting ของสัญญาณอ้างอิงรูป และ อนุกรม Impulse

### 3 การประยุกต์ใช้เทคนิค Input shaping ในแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น การหาค่าแดมป์ (Damp) และ ค่าความถี่ธรรมชาติ

แขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้ ระบบป้อนเข้าสัญญาณ ไตอะแกรม (Diagram) ความสัมพันธ์ระหว่างมุมโดย Link ( $\theta_1$ ) จะถูกควบคุมความแรงดันไฟฟ้ามอเตอร์จ่ายพลังงานผ่าน Hub ทำการติดตั้งสปริง (Springs) 2 อันไว้ที่ Link และ Hub ( $\theta_2$ ) ถูกควบคุมความแรงดันไฟฟ้ามอเตอร์จ่ายพลังงาน โดยจะเคลื่อนที่เป็นระยะ  $\ddot{x}$  ที่ความเร็ว และ ความเร่งเชิงเส้น จากการจ่ายแรงดันผ่าน พาวเวอร์แอมพลิฟายเออร์ (Power amplifier) การเคลื่อนที่ของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นแสดงได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงโครงสร้างของแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นได้

จากภาพที่ 5 สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างมุมของตัว Link ( $\theta_1$ ) และ มุมของ Hub ( $\theta_2$ ) ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) โดยใช้ตัวควบคุมพีไอดี (PD controller) และทำการป้อนสัญญาณไซน์ (sine waves)

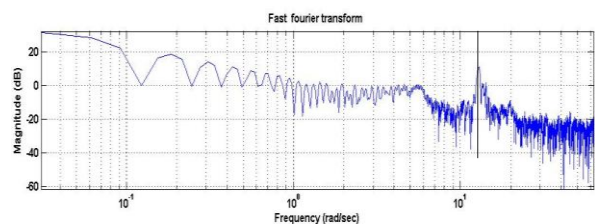
$$P = \frac{\Theta_1(s)}{\Theta_2(s)} = \frac{K(s+A)}{(s^2 + Bs + D)}$$

จากการเอกลักษณ์ของระบบ (System identification) จำนวน 32 ครั้ง ได้ค่าตัวแปรอยู่ในช่วงดังต่อไปนี้

$$K = \begin{bmatrix} 5.634 & 6.25 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 24.75 & 26.72 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 3.25 & 4.143 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 154.78 & 162.31 \end{bmatrix}$$

จากช่วงความถี่ของตัวที่ได้เมื่อทำการเลือกค่ากลางจะได้ Damping ratio ( $\zeta = 0.14$ ) สำหรับ ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency)  $\omega_n$  ของระบบ หาได้จาก ตัวตรวจจับความเร่ง (Accelerometer) เมื่อทำการแปลง Fast Fourier transform แสดงได้ดังรูปที่ 6 จากภาพพบว่าที่ความถี่ 10.3 rad/s ระบบมีค่าพลังงานสูงที่สุด ดังนั้นค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้คือ 10.3 rad/s

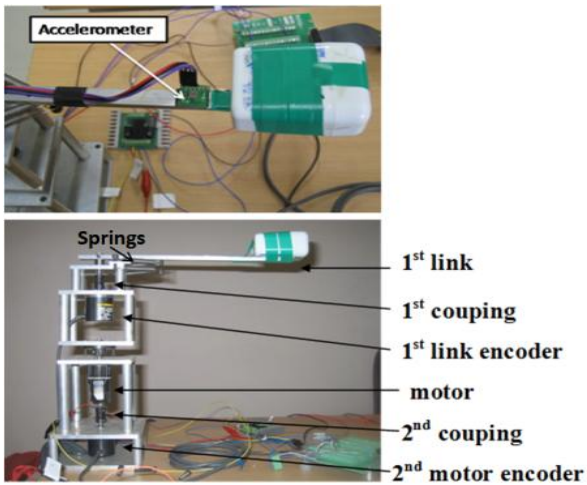


รูปที่ 6 แสดงผลการแปลง Fast Fourier transform จากค่าที่ ตัวตรวจจับความเร่ง

#### 4. แสดงการจัดเตรียมอุปกรณ์ (Experimental setup) และผลการทดลอง

##### 4.1 การจัดเตรียมอุปกรณ์ (Experimental setup)

ทำการติดตั้งตัวตรวจจับความเร็ว และ Payload ไว้ที่ปลายกล ซึ่งตัว Payload เหนียวบรรจุภายในเพื่อเพื่อ Uncertainty ให้ระบบ มุม Hub ( $\theta_2$ ) วัดจาก Encoder ตัวที่ 2 และ มุมของ Link ( $\theta_1$ ) วัดจาก Encoder ตัวที่ 1 ทำการติดสปริง Spring 2 อัน โดยจะแนบติดกับตัว Hub เพื่อทำให้เกิดการยืดหยุ่นของตัวแขนกล สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7

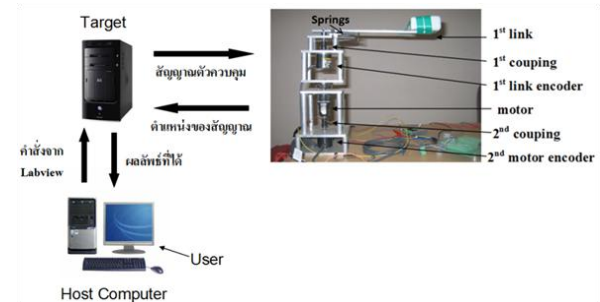


รูปที่ 7 แสดงการจัดเตรียมอุปกรณ์ของแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นที่ใช้ในการทดลอง

ทำการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆตาม Block diagram ในรูปที่ 8 ซึ่งประกอบด้วย Host computer, Target computer และ ชุดทดลองแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น ในส่วนของ Host computer เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการสื่อสารกับผู้ใช้ เช่นโปรแกรม Microsoft windows XP, Labview8.2 และMATLAB เป็นต้น ตัว Target computer มีหน้าที่ประมวลผล รับส่งสัญญาณจากตัวตรวจรู้ (Sensor) และส่งสัญญาณควบคุมไปยังอุปกรณ์ซึ่งการควบคุมที่ Host computer ผ่านทางสาย LAN ไปยัง Target computer

การควบคุมแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นในการทดลองนี้ใช้ตัวควบคุมแบบ PD Control อย่างง่ายในการควบคุมโดยค่า เกน (Gain),  $K_p = 0.05$  และ Derivative,  $K_d = 0.002$  ซึ่งค่าความถี่ธรรมชาติและค่า Damping ratio ใช้ ค่า( $\omega_n = 10.3 \text{ rad} / \text{s}$ ) และ

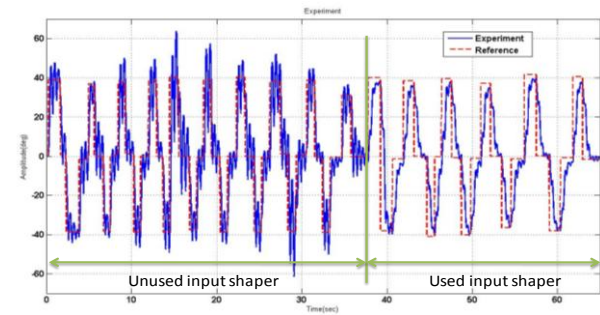
ค่า( $\zeta = 0.14$ ) ซึ่งการเปิดและปิดใช้งานเทคนิค Input shaper จะทำการกดปุ่มด้วยโปรแกรมที่เขียนไว้ การเคลื่อนที่ของแขนกลทั้งหมดถูกสั่งการจากมนุษย์โดยตรง (Humanoperate)



รูปที่ 8 แสดงโครงสร้างระบบทั้งหมดที่ใช้ทำการทดลอง

##### 4.2 ผลการทดลอง

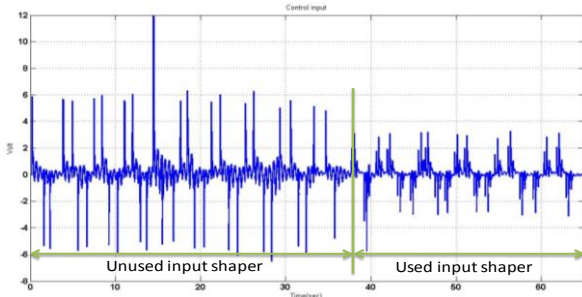
เนื่องจากการทดลองทั้งหมดเป็นการทำงานแบบ Human operate เวลาที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดคือ 65 วินาที ช่วงแรกของการทดลอง ทำการปิดการทำงานของเทคนิค Input shaping เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 38 วินาที จึงเปิดการทำงานของเทคนิค Input shaping ผลการทดลองที่ได้ สามารถแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 9 แสดงผลการทดลองระหว่างการเปิดและปิดการทำงานของเทคนิค Input shaping

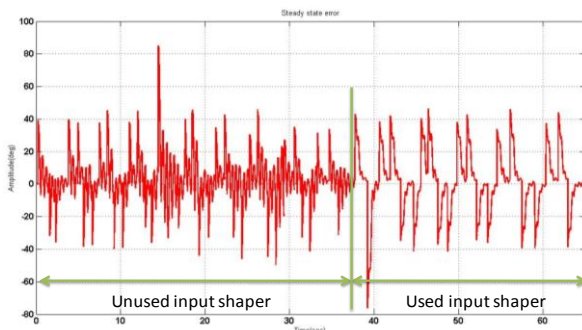
ผลจากการทดลองในรูปที่ 9 เส้นปะสีแดงแสดงการเคลื่อนที่ของสัญญาณอ้างอิง เส้นสีน้ำเงินทึบแสดงผลการทดลอง จากภาพพบว่าเมื่อเปิดทำงานเทคนิค Input shaping สามารถลดการสั่นสะเทือนอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงปิดการทำงาน แต่เมื่อเปิดทำงานเทคนิค Input shaping ก่อนที่ระบบจะเข้า Steady state error จะเกิดเวลาหน่วง (delay) ขึ้นทำให้ค่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (Root

mean square; RMS) ของ Steady state error ไม่แตกต่างกันมาก



รูปที่ 10 แสดง Control input ระหว่างการเปิดและปิดการทำงานเทคนิค Input shaping

จากรูปที่ 10 แสดงกราฟ Control input ที่ป้อนเข้าสู่ระบบจะเห็นว่าแรงดันที่จ่ายเข้าไปยังมอเตอร์ในส่วนของการเปิดการทำงานของเทคนิค Input shaping มีการใช้พลังงานค่อนข้างน้อยกว่าในช่วงที่ปิดการทำงานมากเนื่องจาก ระบบระบบเกิดการสั่นสะเทือนที่น้อยลง ดังนั้นพลังงานที่ป้อนเข้าสู่ระบบเพื่อให้ระบบเข้าสู่สถานะ Steady state error จึงน้อยกว่าช่วงที่ปิดการทำงาน



รูปที่ 11 แสดงค่าความผิดพลาดของระบบเมื่อเข้าสู่สถานะ Steady state error ระหว่างการเปิดและปิดการทำงานเทคนิค Input shaping

จากรูปที่ 11 ค่าความผิดพลาดของระบบเมื่อเข้าสู่สถานะ Steady state error กราฟในส่วนของการเปิดการทำงานเทคนิค Input shaping ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองที่เกิดเนื่องจากการสั่นสะเทือนมีค่าน้อยกว่าช่วงที่ปิดการทำงานเทคนิค Input shaping ไม่มากนัก เนื่องจากตัวเทคนิค Input shaping มีเวลาหน่วง (delay) จากตัวเทคนิคเอง ดังนั้น ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจึงไม่ต่างกันมาก แต่สิ่งที่ต่างกันมากคือ การสั่นสะเทือนที่ลดลงอย่างน่าพอใจ

## 5 สรุปผลการทดลอง

ผลจากการใช้เทคนิค Input shaping สามารถลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากผลของการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบข้อต่อยึดหยุ่นได้เป็นอย่างดี จากการใช้ทฤษฎีคอนโวลูชันในการอ้างอิงถึงตำแหน่งแรงกระตุ้นจำนวน 3 Impulses ช่วยทำให้ระบบลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับระบบได้ดี

เทคนิคนี้ยังอาศัยหลักการของผลรวมเชิงเส้นจึงไม่มีการกล่าวถึงลักษณะที่ไม่เชิงเส้นเลย เนื่องจากความแม่นยำและถูกต้องของค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) และ ค่า damping ratio ของระบบมีผลต่อประสิทธิภาพของเทคนิคนี้

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RD IPT) แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ และ ห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสั่นสะเทือน (CRV Lab) ที่เอื้อเพื่อสถานที่ในการทำการวิจัยนี้

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Hunmo.Kirrt and Joey K.Parker. 1993. Artificial Neural Network For Identification And Tracking Control Of A Flexible Joint Single-Link Robot.. IEEE : 233-237.
- [2] S. S. Ge, T. H. Lee, and C. J. Harris. 2003 Adaptive Neural Network Control for Robotic Manipulators. VOL. 19, NO. 3 ed. London, U. K, World Scientific. 523 - 524
- [3] Weiming Tang and Guanrang Chen. 1994. A Robust Fuzzy PI Controller for a Flexible-Joint Robot Arm with Uncertainties. IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY : (vol.3,no-) 1554 - 1559
- [4] Heidar A. Malki, Dave Misir, Denny Feigenspan, and Guanrong Chen. 1997. Fuzzy PID Control of a Flexible-Joint Robot Arm with Uncertainties from Time-Varying Loads. IEEE

TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS  
TECHNOLOGY (VOL. 5, NO. 3): 371-378

[5] Jong H. Oht and Jin S. Leet. 1997. Control of Flexible Joint Robot System by Backstepping Design Approach. IEEE International Conference on Robotics and Automation April 1997: 3435-3440.

[6] P. H. Meckl and W. P. Seering. April 1988, Controlling velocity-limited systems to reduce residual vibration. IEEE Int'l Conf.on Robotics and Automation : 1428-1433

[7] Withit Chatlatanagulchai, Victor M. Beazel, and Peter H. Meckl. 2006. Command Shaping Applied to a Flexible Robot with Configuration-Dependent Resonance. American Control Conference June 14-16, 2006: 1766-1771.

[8] Singer, N.and Seering, W. 1990. Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control Much 1990 (Vol 112, No. 1): 76482.

[9] Bolz, RayE.,and Tuve, George L.,CRC Handbook of Tables for Applied Engineering Science,CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, 1973, p1071. 2nd

[10]Gieck, Kurt, Engineering Formular, McGraw-Hill, New York, 1983 p.E4 vol 2, No. 6, November-December 1979. pp 491-498