

## การปรับตำแหน่งอ้างอิงร่วมกับตัวควบคุมแบบคิวนเพื่อลดการสั่นสะเทือนของแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น

### Reference Position Shaping with QFT Based Controller to Reduce Residual

#### Vibration of Flexible Joint Robot

ภูวดล โพธิ์แดง<sup>1\*</sup>,<sup>2</sup>, วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย<sup>1</sup> และ บัณฑิต อินทรีย์มีศักดิ์<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสั่นสะเทือน (CRV Lab) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

<sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี หนองแขม กรุงเทพฯ 10160

\*ติดต่อ: p.poedaeng@gmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 08 9684 5640, เบอร์โทรสาร 0 2579 4576

#### บทคัดย่อ

เทคนิคอินพุตเชปปีง (Input shaping) เป็นเทคนิคที่ทำงานนอกการควบคุม ซึ่งสร้างมาจากอนุกรมแรงดลใส่เข้ากับสัญญาณอ้างอิง ผลที่ได้คือการสั่นสะเทือนที่เหลือจากการเคลื่อนที่ลดลง แต่เทคนิคนี้ไม่สามารถลดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากสิ่งรบกวนที่สัญญาณขาเข้า (Plant input disturbance), สิ่งรบกวนที่สัญญาณขาออกของระบบ (Plant output disturbance) และความไม่แน่นอนของระบบ (Plant uncertainty) ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำทฤษฎีการควบคุมป้อนกลับเชิงปริมาณ (Quantitative feedback theory, QFT) มาเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเทคนิคอินพุตเชปปีงในด้านการลดสิ่งรบกวนของระบบ และความไม่แน่นอนของระบบ เนื่องจากทฤษฎีนี้ออกแบบตัวควบคุมจากเซตความไม่แน่นอนของระบบ เรียกว่า plant template นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดคุณสมบัติของระบบเพิ่มเติม เช่น คุณสมบัติด้านการลดสิ่งรบกวนที่สัญญาณขาเข้า, การลดสิ่งรบกวนที่สัญญาณขาออกของระบบ และ คุณสมบัติของการเคลื่อนที่ตามที่ต้องการ (Tracking specification) การกำหนดคุณสมบัติจะกระทำในโดเมนความถี่ ต่อมานำค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio) ที่หาได้จากระบบป้อนกลับมาออกแบบตัวเทคนิคอินพุตเชปปีง ระบบพลศาสตร์ที่ใช้ทดลองคือแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น ผลการทดลองพบว่าระบบควบคุมที่ใช้มีประสิทธิภาพมาก สามารถลดการสั่นสะเทือนลง 40% เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอดี

**คำหลัก:** การลดการสั่นสะเทือน, อินพุตเชปปีง, ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ, แขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น

#### Abstract

Input shaping is a feedforward control that designed impulse sequence to convolution with reference input. It can reduce residual vibration of the system But input shaping cannot reduces the vibrations from plant input disturbance, plant output disturbances and plant model uncertainty. In this paper, a control system consisting of input shaper and a feedback controller based on quantitative feedback theory (QFT) is proposed. QFT controller can be reduction vibration form input disturbance, output disturbance and plant model uncertainty. The controller is designed on a set of uncertain model called plant template. Specifications such as input disturbance rejection, output disturbance rejection and tracking can be formulated in frequency domain. The control system is applied to a flexible joint robot. The input shaper is then designed using the closed-loop natural frequency and damping ratio. Experimental results indicate that the control system is very effective in residual vibration reduction. Vibration is reduced about 40% when compared with PID controller

**Keywords:** Vibration reduction, Input shaping, Flexible joint robot, Quantitative feedback theory

## 1. บทนำ

งานวิจัยด้านการลดการสั่นสะเทือนในแขนกล เป็นหัวข้องานวิจัยที่น่าสนใจมาก เนื่องจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับแขนกล ส่งผลกระทบต่อโดยตรงกับประสิทธิภาพในการทำงาน ทั้งในส่วนของความแม่นยำ, ความรวดเร็วในการเคลื่อนที่ และความเสี่ยงหายจากอุบัติเหตุในระหว่างการทำงาน เป็นต้น แนวทางการแก้ปัญหาด้วยการสั่นสะเทือนโดยใช้เทคนิคการออกแบบตัวควบคุมสามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ การควบคุมแบบ Active control และ แบบ Passive control

การควบคุมแบบ Active control เป็นการนำเทคนิคการควบคุมมาออกแบบ ทั้งในส่วนของโดเมนความถี่ (Frequency domain) [1] และในโดเมนเวลา (Time domain) [2] หรือ อาจจะมีการควบคุมแบบ Adaptive control [3, 4] มาประยุกต์ใช้กับแขนกลเพื่อให้แขนกลสามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่ข้อจำกัดของ Active control คือ อาจจะต้องทำการดัดแปลงหรือทำการติดตั้งตัวเซ็นเซอร์ (Sensor) เพิ่มเข้ามาในระบบ ซึ่งอาจจะต้องทำการออกแบบตัวควบคุมของระบบพลศาสตร์ใหม่ทั้งหมด

การควบคุมแบบ Passive control เป็นการทำงานแบบ Feed forward หลักการคือ สร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ เพื่อให้การทำงานของระบบไม่ตรงกับค่าความถี่ธรรมชาติ จนเกิดการสั่นพ้อง (Resonance) ข้อดีของการควบคุมลักษณะนี้ คือ ไม่ต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มหรือทำการดัดแปลงระบบแต่อย่างใด สามารถลดค่าใช้จ่ายในการออกแบบตัวควบคุม และไม่ต้องทำการออกแบบตัวควบคุมของระบบใหม่

เริ่มแรก Passive control ใช้การปรับลักษณะของความเร่ง หรือเป็นที่รู้จักกันในชื่อ Command shaping [5, 6] แต่มีข้อจำกัดคือ การเคลื่อนที่ต้องมีลักษณะคงเดิมด้วยเหตุนี้ Singer และ Seering [7] ได้พัฒนาเทคนิคจากเดิมที่ปรับลักษณะจากความเร่ง เป็นการปรับลักษณะที่ตำแหน่งการเคลื่อนที่ จนมาเป็นเทคนิคอินพุตเซปป์

แต่ข้อเสียของเทคนิคอินพุตเซปป์คือ ไม่สามารถลดการสั่นสะเทือนจากสิ่งรบกวนที่สัญญาณขาเข้าของระบบ (Plant input disturbance), สิ่งรบกวนที่สัญญาณขาออกของระบบ (Plant output disturbance) และความไม่แน่นอนของตัวแปรในระบบพลศาสตร์ (Plant parametric uncertainty) จากปัจจัยดังกล่าว ผู้วิจัยได้นำ Quantitative feedback theory (QFT) มาทำงานร่วมกับเทคนิคอินพุตเซปป์เพื่อชดเชยข้อเสียในส่วนนี้

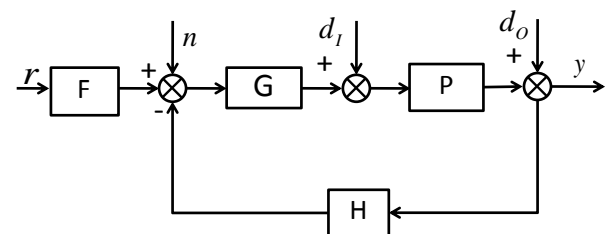
เนื่องจากตัวควบคุม QFT ใช้เซตความไม่แน่นอนของตัวแปรในระบบพลศาสตร์ (Plant parametric uncertainty) มาออกแบบตัวควบคุม ทั้งยังเพิ่มประสิทธิภาพของตัวควบคุมโดยการนำขอบเขต (Bounds) มาใช้ โดยตัวขอบเขตที่สำคัญของ QFT ที่ชดเชยข้อเสียของเทคนิคอินพุตเซปป์คือ ขอบเขตด้านการลดสิ่งรบกวนที่สัญญาณขาเข้าของระบบ (Plant input disturbance rejection) และ ขอบเขตด้านการลดสิ่งรบกวนที่สัญญาณขาออกของระบบ (Plant output disturbance rejection) เป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบได้เป็นอย่างดี

เนื้อหาในงานวิจัยส่วนที่ 2 เป็นความรู้พื้นฐานของเทคนิค QFT และเทคนิคอินพุตเซปป์ ส่วนที่ 3 แสดงการสร้างแบบจำลองของระบบพลศาสตร์, การออกแบบตัวควบคุมด้วยเทคนิค QFT และ การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ด้วยเทคนิคอินพุตเซปป์ ส่วนที่ 4 เป็นการจัดเตรียมอุปกรณ์ และผลการทดลอง ส่วนสุดท้ายเป็นสรุป และวิจารณ์ผลการทดลอง

## 2. ทฤษฎีพื้นฐาน

### 2.1 พื้นฐานของเทคนิค QFT

ระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยทั่วไปสามารถพิจารณาได้ตามรูปที่ 1 เมื่อ  $F$  คือ Filter,  $G$  คือตัวควบคุม,  $P$  คือระบบ,  $H$  คือตัวเซ็นเซอร์,  $r$  คือสัญญาณอ้างอิง,  $d_i$  คือสิ่งรบกวนที่สัญญาณขาเข้าของระบบ,  $d_o$  คือสิ่งรบกวนที่สัญญาณขาออกของระบบ,  $n$  คือสัญญาณรบกวนของเซ็นเซอร์ และ  $y$  คือสัญญาณขาออกของระบบ



รูปที่ 1 ภาพบล็อกไดอะแกรมของระบบป้อนกลับ

ขอบเขตที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม คือ ปริมาณระหว่างสองตำแหน่ง สามารถเขียนความสัมพันธ์อยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน [8] ขอบเขตทั้งหมดของเทคนิค QFT มีดังนี้

1. Plant output disturbance rejection

$$\left| \frac{y}{d_o} \right| = \left| \frac{1}{1+PGH} \right| < \delta_{do}$$

2. Plant input disturbance rejection

$$\left| \frac{y}{d_i} \right| = \left| \frac{P}{1+PGH} \right| < \delta_{di}$$

3. Model matching

$$\left| \frac{y}{r} - F_m \right| = \left| \frac{PGF}{1+PGH} - F_m \right| < \delta_m$$

4. Tracking

$$\alpha \leq \left| \frac{PGF}{1+PGH} \right| \leq \beta$$

5. Noise rejection

$$\left| \frac{y}{n} \right| = \left| \frac{PG}{1+PGH} \right| < \delta_n$$

6. Control effort

$$\left| \frac{u}{n} \right| = \left| \frac{G}{1+PGH} \right| < \delta_c$$

ขอบเขตแบบที่ 1 และ 2 เป็นขอบเขตที่ใช้ลดผลกระทบของสิ่งรบกวนที่สัญญาณขาออก และ ขาเข้าของระบบ เมื่อทำการกำหนดขอบเขตนี้แล้วผลกระทบของสิ่งรบกวนทั้งภายใน และภายนอกจะมีค่าน้อยกว่าค่าคงที่  $\delta_{di}$  และ  $\delta_{do}$  ที่กำหนด

ขอบเขตแบบที่ 3 และ 4 เป็นการปรับปรุงการทำงานของระบบในช่วงความถี่ต่ำ โดยนำฟังก์ชันถ่ายโอนมาเป็นขอบเขตทำให้ระบบทำงานตามคุณลักษณะที่ออกแบบไว้ ส่วนขอบเขตแบบที่ 5 และ 6 เป็นขอบเขตที่ช่วยลดสัญญาณรบกวนของเซ็นเซอร์ และลดการใช้พลังงานในการควบคุมระบบ

การออกแบบตัวควบคุมจะนำ Plant template ที่สร้างจาก เซตความไม่แน่นอนของตัวแปรในระบบมา ออกแบบร่วมกับขอบเขตของเทคนิค QFT ให้มีความสอดคล้องกัน การออกแบบตัวควบคุมจะนำฟังก์ชันถ่ายโอนพื้นฐานมาออกแบบ เช่น Gain, Real pole, Real zero, Lead, Lag, Complex pole และ Complex zero เป็นต้น การออกแบบทั้งหมดจะทำในโปรแกรม QFT control design toolbox [9] ซึ่งเป็น Toolbox เสริมของโปรแกรม Matlab

## 2.2. พื้นฐานของเทคนิคอินพุตเซปป์

เทคนิคอินพุตเซปป์เป็นเทคนิคที่ใหม่ การคำนวณเริ่มจากทฤษฎีระบบเชิงเส้น (Linear system theory) โดยคำนวณจากผลตอบสนองของการสั่นสะเทือนแบบ

อิสระ (Free vibration system) และนำผลตอบสนองที่ได้ เป็นตัวกำหนดขนาดของอนุกรมแรงดล (Impulse) และนำอนุกรมแรงดลไปคอนโวลูชัน (Convolutions) กับสัญญาณอ้างอิงเดิมของระบบ ผลตอบสนองของแรงดลต่อระบบเชิงเส้นสามารถแสดงได้ดัง (1)

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

เมื่อ  $A$  คือ แอมพลิจูด (Amplitude) ของแรงดล,  $\omega$  คือ ความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency)  $\Delta t$  คือ ผลต่างของเวลาที่ใส่แรงดลเข้าไปในระบบ และ  $\zeta$  คือ อัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio),  $y(t)$  คือ ตำแหน่งที่สนใจ จาก (1) สามารถใช้หลักการของตรีโกณมิติจัดรูปได้ตาม (2)

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

จาก (2) สามารถระบุค่าตัวแปรได้ดังนี้

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

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

$$\phi_1 = \omega\sqrt{(1-\zeta^2)}t_1, B_1 = \frac{A_1\omega}{\sqrt{(1-\zeta^2)}} e^{-\zeta\omega(t_1-t_0)}$$

$$\phi_2 = \omega\sqrt{(1-\zeta^2)}t_2, B_2 = \frac{A_2\omega}{\sqrt{(1-\zeta^2)}} e^{-\zeta\omega(t_2-t_0)}$$

เมื่อพิจารณาเฉพาะตัว  $A_{amp}$  จาก (2) พบว่าการที่จะทำให้ระบบไม่มีการสั่นสะเทือน ต้องกำหนดให้  $A_{amp}$  มีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อพิจารณาเฉพาะ  $A_{amp}$  สามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปอนุกรมในกรณีที่มีแรงดล  $N$  แรงได้ตาม (3) เมื่อ  $A_j$  คือขนาดของแรงดล,  $t_N$  คือเวลาของแรงดลสุดท้าย,  $t_j$  คือเวลาของแรงดลแต่ละแรง

$$\sum_{j=1}^N A_j e^{-\zeta\omega(t_N-t_j)} \cos\left(\left(\omega\sqrt{(1-\zeta^2)}\right)t_j\right) = 0 \quad (3)$$

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

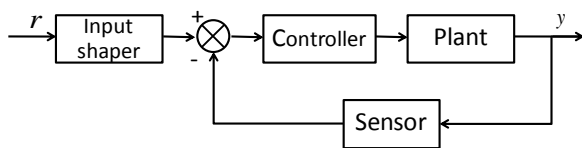
$$\sum_{i=1}^N A_i t_i e^{-\zeta\omega(t_N-t_i)} \cos\left(\left(\omega\sqrt{(1-\zeta^2)}\right)t_j\right) = 0 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N A_i t_i e^{-\zeta\omega(t_N-t_i)} \sin\left(\left(\omega\sqrt{(1-\zeta^2)}\right)t_j\right) = 0$$

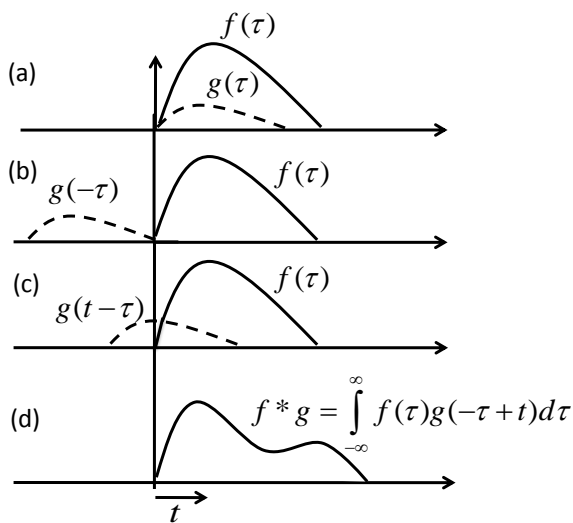
การเพิ่มประสิทธิภาพของเทคนิคอินพุตเซปป์ในด้านทนทานต่อความไม่แน่นอนของค่าความถี่ธรรมชาติ และอัตราส่วนความหน่วงทำได้โดยหาอนุพันธ์ของ (3)

เทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วง จะได้ (4)

การประยุกต์เทคนิคอินพุตเซปิ้งกับระบบควบคุมแบบป้อนกลับ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2 จากที่กล่าวมาเบื้องต้น เทคนิคอินพุตเซปิ้งเป็นเทคนิคแบบ Feed forward ซึ่งทำงานนอก-loop การควบคุม ดังนั้นเทคนิคนี้จึงสามารถใช้งานกับตัวควบคุมได้ทุกแบบ การรวมสัญญาณใช้หลักการคอนโวลูชัน ซึ่งทำงานในโดเมนเวลา



รูปที่ 2 แสดงการทำงานของเทคนิคอินพุตเซปิ้งกับระบบควบคุมแบบป้อนกลับ



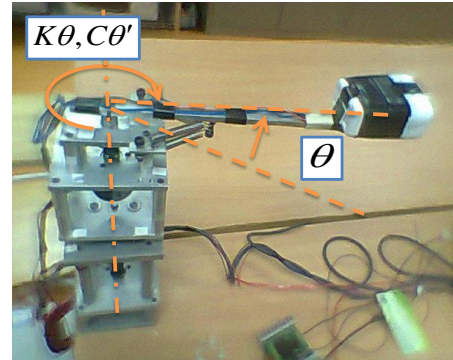
รูปที่ 3 แสดงการคอนโวลูชันของสองสัญญาณ

การคอนโวลูชัน ระหว่างสัญญาณอ้างอิง กับอนุกรมแรงดล สามารถแสดงได้ในรูปที่ 3 จากรูปเป็นขั้นตอนการคอนโวลูชันของสัญญาณ  $f(\tau)$  และ  $g(\tau)$  ผลของการคอนโวลูชันจะได้  $f * g = \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau)g(-\tau+t)d\tau$  ซึ่งการคอนโวลูชันคือการอินทิเกรตสัญญาณทั้งสอง โดยความสัมพันธ์ระหว่าง  $g(t-\tau) = g(-\tau+t)$  พบว่าส่วนของ  $g(\tau)$  จะขยับตามแนวแกน  $t$  โดยที่ 3(a) แสดงสัญญาณ  $f(\tau)$  และ  $g(\tau)$  รูปที่ 3(b) แสดงการสะท้อนของ  $g(\tau)$  โดยที่มีขนาดเท่ากันแต่ทิศทางตรงข้ามกัน 3(c) แสดงการขยับ  $g(\tau)$  ตามแนวแกนด้วยเวลา  $t$  และ

สุดท้าย 3(d) แสดงผลการคอนโวลูชัน ได้พื้นที่ใต้กราฟระหว่าง  $f(\tau)$  และ  $g(-\tau+t)$

### 3. การจำลองการทำงานของแขนกลแบบข้อต่อยึดหยุ่น

#### 3.1 การหาสมการการเคลื่อนที่และการหาเอกลักษณ์ของระบบ (System identification)



รูปที่ 4 แสดงภาพไดอะแกรมของแขนกลแบบข้อต่อยึดหยุ่น

เมื่อพิจารณาไดอะแกรมในรูปที่ 4 ของแขนกลแบบข้อต่อยึดหยุ่น ซึ่งมีลักษณะเป็น Pendulum ที่แกว่งในแนวระดับ ใช้กฎข้อที่สองของนิวตันจะได้

$$T - C\theta' - K\theta = J\theta'' \quad (5)$$

เมื่อ  $T$  คือค่าทอร์ก,  $K$  คือค่าคงที่ของสปริง,  $J$  คือค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของแขนกลแบบข้อต่อยึดหยุ่น,  $\theta$  คือมุมของแขนกล, ' คืออนุพันธ์เทียบกับเวลา

$$k_d V = IR_m + k_b \theta' \quad (6)$$

$$T = k_m I \quad (7)$$

ค่าทอร์กที่มอเตอร์สร้างขึ้น สามารถกำหนดได้เป็น (6) และ (7) เมื่อ  $V$  คือค่าแรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์,  $I$  คือค่ากระแสไฟ,  $R_m$  คือค่าความต้านทานในขดลวด,  $k_b$  คือค่ากระแสไหลย้อนกลับ (Back emf),  $k_d$  คือ Motor drive constant และ  $k_m$  คือ Motor torque constant ทำการรวม (6) และ (7) จะได้

$$T = \frac{k_d k_m V}{R_m} - \frac{k_b k_m}{R_m} \theta' \quad (8)$$

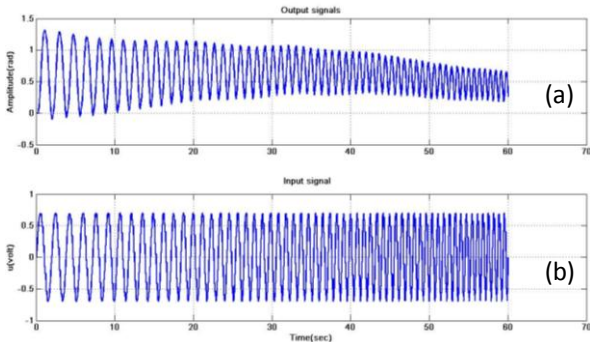
จากนั้น นำ (8) ไปแทนใน (5) และ ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้า  $V$  และมุมของแขนกล  $\theta$  ได้เป็น

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{k_d k_m}{(JR_m)s^2 + (CR_m + k_b k_m)s + KR_m} \quad (9)$$

จาก (9) เขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายโดยแทนค่า,  
 $a = (CR_m + k_p k_m) / (JR_m)$ ,  $b = KR_m / (JR_m)$  และ  
 $c = k_d k_m / (JR_m)$  สามารถเขียนได้เป็น

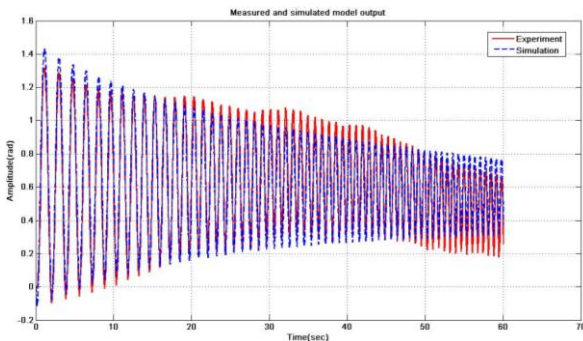
$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{c}{s^2 + as + b} \quad (10)$$

ทำการหาเอกลักษณ์ของระบบ โดยป้อนสัญญาณ  
 ไซน์แบบระบบเปิด ที่แอมป์ริจูดเท่ากับ  $0.7 \text{ rad}$  และ  
 ความถี่ระหว่าง  $0.1 - 1.0 \text{ Hz}$  ในระยะเวลา  $60$  วินาที  
 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5 เมื่อ 5 (a) คือค่าสัญญาณเอา  
 พุด (Output) ของระบบมีหน่วยเป็น  $\text{rad}$  และ 5 (b)  
 คือสัญญาณอินพุต (Input) ของระบบมีหน่วยเป็น  $\text{volt}$



รูปที่ 5 แสดงสัญญาณขาเข้าและสัญญาณขาออกใน  
 ขั้นตอนการหาเอกลักษณ์ของระบบ

เมื่อได้สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาพุตของระบบ  
 แล้ว นำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ในโปรแกรม Matlab เพื่อ  
 ประมาณค่าตัวแปรโมเดล (10) งานวิจัยนี้ทำการ  
 ทดลองทั้งหมด 32 ครั้ง และผลที่ได้พบว่า ค่าความ  
 แม่นยำของโมเดลที่ได้ อยู่ระหว่าง  $70.52 - 88.00\%$  รูป  
 ที่ 6 เป็นการจำลองการทำงานของโมเดลที่ได้จากการหา  
 เอกลักษณ์ของระบบกับสัญญาณเอาพุตจริง โดยทำการ  
 ป้อนสัญญาณอินพุตเป็นตัวเดียวกัน



รูปที่ 6 แสดง Model validate

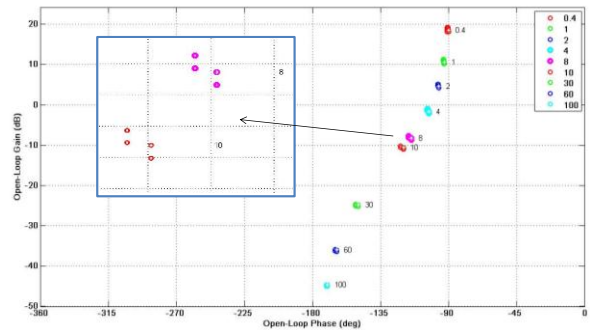
ช่วงของตัวแปรที่ได้จากการหาเอกลักษณ์ของระบบ  
 สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} a &= [16.2 \quad 17.39] \\ b &= [0.0437 \quad 0.1529] \\ c &= [56.5226 \quad 59.2418] \end{aligned} \quad (11)$$

### 3.2 การออกแบบตัวควบคุมด้วยเทคนิค QFT

การออกแบบตัวควบคุมด้วยเทคนิค QFT สามารถ  
 แบ่งเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1. นำเซตความไม่แน่นอนของตัวแปรจาก (10,  
 11) มากำหนดจุดบน Nichols chart จะได้ Plant  
 template ของระบบตามรูปที่ 7 จากรูปตารางด้าน  
 ขวามือ คือค่าความถี่ที่ใช้สร้างขอบเขต และออกแบบตัว  
 ควบคุม มีหน่วยเป็น  $\text{rad/sec}$  ต่อมาทำการเลือก  
 Nominal plant จาก Plant template ของระบบเพื่อ  
 เป็นจุดอ้างอิงในการออกแบบตัวควบคุม



รูปที่ 7 แสดง Plant template ของระบบ

ขั้นที่ 2. การสร้างขอบเขต งานวิจัยนี้ใช้ขอบเขต 3  
 แบบคือ แบบที่ 1 การลดสิ่งรบกวนที่สัญญาณขาออกของ  
 ระบบ, แบบที่ 2 การลดสิ่งรบกวนที่สัญญาณขาเข้าของ  
 ระบบ และ แบบที่ 4 การเคลื่อนที่ตามสัญญาณ ขอบเขต  
 แบบที่ 1 เรากำหนดค่า  $\delta_{do}$  เท่ากับ  $4 \text{ dB}$  และขอบเขต  
 แบบที่ 2 เรากำหนดค่า  $\delta_{di}$  เท่ากับ  $-5 \text{ dB}$  ส่วนขอบเขต  
 แบบที่ 4 กำหนดเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนโดยที่ Steady  
 state error อยู่ที่  $\pm 5\%$  ค่า Settling time อยู่ระหว่าง  
 $1.02 - 1.62$  วินาที ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนตาม 2 ฟังก์ชัน (12)

$$\begin{aligned} UB &= \frac{4.773s + 26.25}{s^2 + 7s + 25} \\ LB &= \frac{96.19}{s^3 + 14s^2 + 65.25s + 101.3} \end{aligned} \quad (12)$$

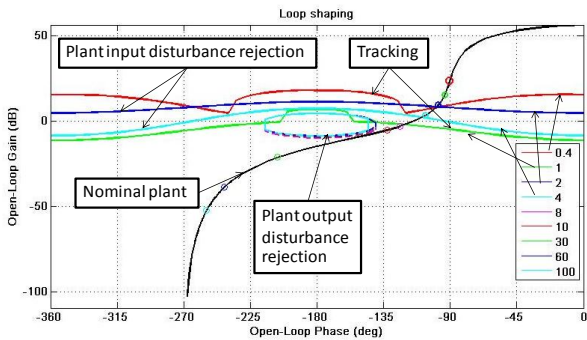
จาก (12) UB คือ Upper bound และ LB คือ Lower  
 bound ลักษณะการทำงานของขอบเขตแบบเคลื่อนที่  
 ตามสัญญาณ คือทำให้ระบบทั้งหมดเคลื่อนที่อยู่ระหว่าง  
 UB และ LB

ขั้นที่ 3. การออกแบบตัวควบคุมโดยการจัดรูปแบบของ Nominal plant ให้สอดคล้องกับขอบเขตที่ได้กำหนดไว้ในขั้นตอนที่ 2 กระบวนการนี้เรียกว่า Loop shaping สามารถแสดงได้ในรูป 8 ซึ่งแสดงขอบเขตชนิดต่างๆที่กำหนดไว้เบื้องต้น หลักการออกแบบคือ ขอบเขตแบบที่ 2 และขอบเขตแบบที่ 4 Nominal plant ที่ความถี่เดียวกันต้องอยู่เหนือกว่าเส้นความถี่เดียวกัน ส่วนขอบเขตแบบที่ 1 ต้องออกแบบ Nominal plant ไม่ให้เข้าไปในส่วนของขอบเขตแบบที่ 1 จากการออกแบบได้ตัวควบคุมดังนี้

$$G = \frac{2.267s + 22.82}{s^2 + 15.08s + 100} \quad (13)$$

เมื่อได้ตัวควบคุมแล้ว นำตัวควบคุมที่ได้ไปออกแบบ Pre-filter ซึ่งเป็นการออกแบบที่ทำงานนอกการควบคุม เพื่อเป็นการยืนยันว่า ระบบเคลื่อนที่ภายใต้ขอบเขตที่กำหนด จากการออกแบบได้ตัวฟิวส์เตอร์ดังนี้

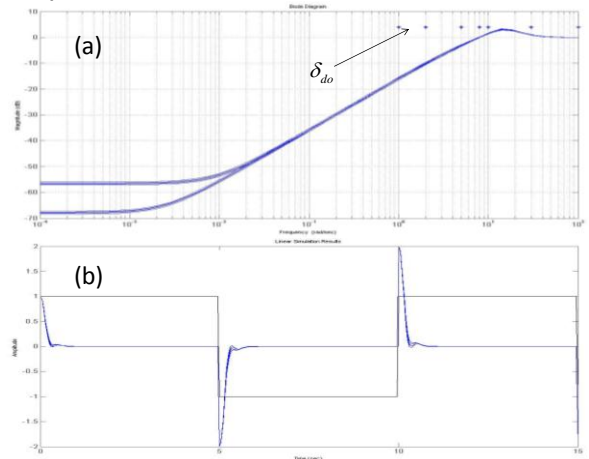
$$F = \frac{5.027s + 4.447}{s + 4.403} \quad (14)$$



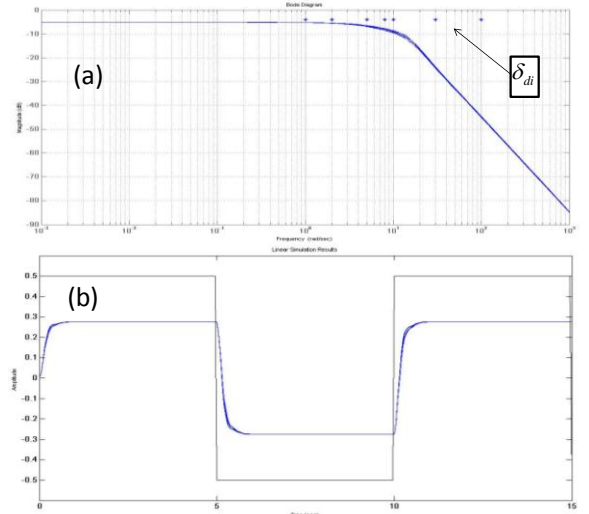
รูปที่ 8 แสดงการออกแบบตัวควบคุมโดยวิธี Loop shaping บน Nichols chart

ขั้นตอนสุดท้าย เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมด้วยการจำลองการทำงาน ซึ่งจะทำทั้งในส่วนของโดเมนเวลา และโดเมนความถี่ การทดสอบประสิทธิภาพระบบของขอบเขตแบบที่ 1, 2 และ 4 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9, 10 และ 11 จากรูปที่ 9 (a), 10 (a) และ 11 (a) เป็นการจำลองในโดเมนความถี่เพื่อทดสอบว่าระบบทั้งหมดอยู่ภายใต้ขอบเขตที่กำหนด และรูปที่ 9 (b) และ 10 (b) เป็นการทดสอบประสิทธิภาพในโดเมนเวลา เมื่อกำหนดสิ่งรบกวนของระบบเป็น Square wave ที่มีแอมพลิจูดเท่า 1 และ 0.5 rad ตามลำดับ รูป 11 (b) เมื่อระบบเคลื่อนที่ตามสัญญาณ Square wave พบว่าระบบทั้งหมดเคลื่อนที่อยู่ระหว่าง UB และ LB

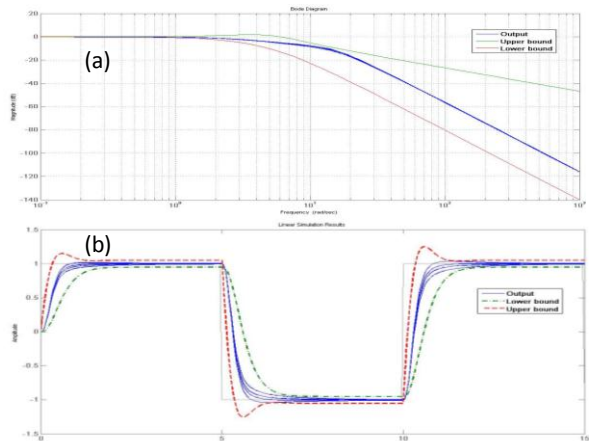
### 3.3 การออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ด้วยเทคนิค อินพุตเซปปีง



รูปที่ 9 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบต่อขอบเขตแบบที่ 1



รูปที่ 10 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบต่อขอบเขตแบบที่ 2



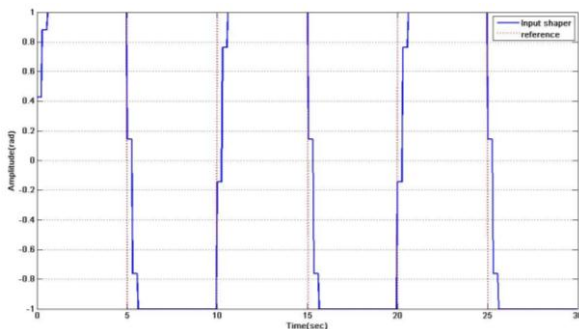
รูปที่ 11 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบต่อขอบเขตแบบที่ 4

งานวิจัยนี้ใช้อินพุตเชปป์แบบ 3 แรงดล หรือ Zero vibration derivative เนื่องจากอินพุตเชปป์ชนิดนี้ทำงานได้ดีในช่วงค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วงที่มีความคลาดเคลื่อนได้  $\pm 20\%$  การคำนวณหาแรงดลสามารถหาได้จาก (3) และ (4) โดยกำหนด  $A_1$  เท่ากับ 1 และ  $t_0$  เท่ากับ 0 เพื่อคำนวณหา  $A_2, A_3, t_2$  และ  $t_3$  แต่การนำไปใช้งานต้องทำการเพิ่ม Constrain แบบ  $\sum_{i=1}^N A_i = 1$  เมื่อ  $N$  คือจำนวนของแรงดลในระบบ  $A_i$  คือแรงดลลูกที่  $i$  เพื่อให้เส้นทางการเคลื่อนที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{1}{K^2 + 2K + 1} & t_1 &= 0 \\ A_2 &= \frac{2K}{K^2 + 2K + 1} & t_2 &= \Delta t \\ A_3 &= \frac{K^2}{K^2 + 2K + 1} & t_3 &= 2\Delta t \end{aligned} \quad (15)$$

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

จากการทดลองตัวควบคุมแบบ QFT พบว่าค่าอัตราส่วนความหน่วงของระบบมีค่า 0.4037 และค่าความถี่ธรรมชาติของแกนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นมีค่า 10.3 rad/sec [10] นำเทคนิคอินพุตเชปป์กับสัญญาณแบบ Square wave มาทำงานร่วมกัน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 12



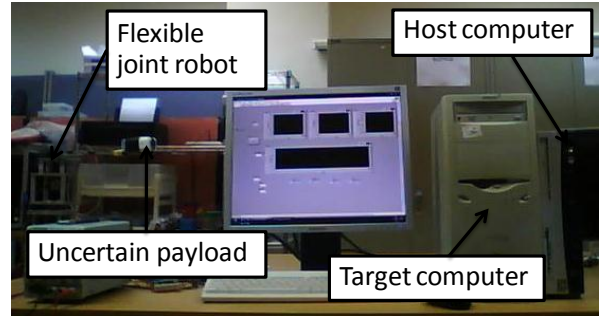
รูปที่ 12 แสดงการทำงานของเทคนิคอินพุตเชปป์กับสัญญาณแบบ Square wave

#### 4. การจัดเตรียมอุปกรณ์และผลการทดลอง

##### 4.1 การจัดเตรียมอุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย Host computer, Target computer และ ชุดทดลองแกนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 13 ตัว Host computer ประกอบด้วยโปรแกรมที่จำเป็นในการสั่งการ

และวิเคราะห์ผลเช่น ระบบปฏิบัติการ โปรแกรม Labview และโปรแกรม Matlab เป็นต้น ส่วนตัว Target computer เป็นตัวประมวลผล, รับส่งสัญญาณระหว่างเซ็นเซอร์ และ Actuator ของชุดทดลอง

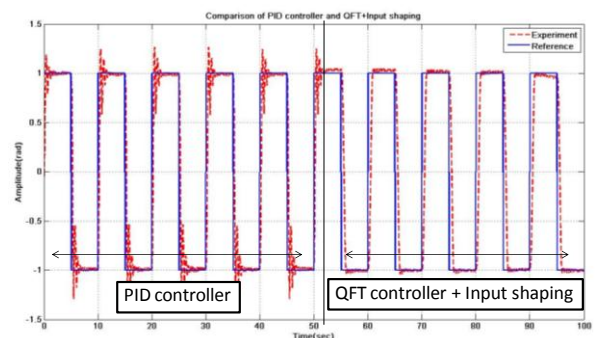


รูปที่ 13 การจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง

##### 4.2 ผลการทดลอง

การทดลองแบ่งเป็นสองช่วง คือ ช่วงแรกใช้ตัวควบคุมแบบ PID เมื่อระบบทำงานไปประมาณ 50 วินาทีทำการสลับตัวควบคุมเป็นแบบ QFT พร้อมกับเปิดการทำงานของเทคนิคอินพุตเชปป์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 14 จากรูปพบว่าเมื่อเปิดการทำงานของตัวควบคุมแบบ PID แกนกลเกิดการสั่นสะเทือนอย่างชัดเจน เนื่องจากเป้าหมายของการออกแบบตัวควบคุมแบบ PID คือปรับค่าผลตอบสนองของระบบ ให้ใกล้เคียงกับผลตอบสนองของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ QFT

เมื่อสลับตัวควบคุมแบบ QFT ที่ทำงานร่วมกับเทคนิคอินพุตเชปป์การสั่นสะเทือนลดลงประมาณ 30% และตำแหน่งปลายของแกนกลอยู่ในช่วง Steady state error ที่  $\pm 5\%$

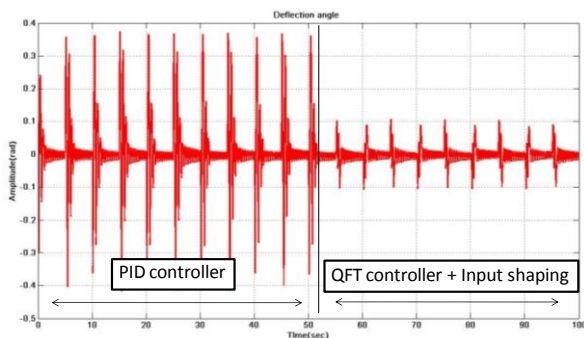


รูปที่ 14 ผลการทดลองระหว่าง PID controller กับ QFT controller + input shaping

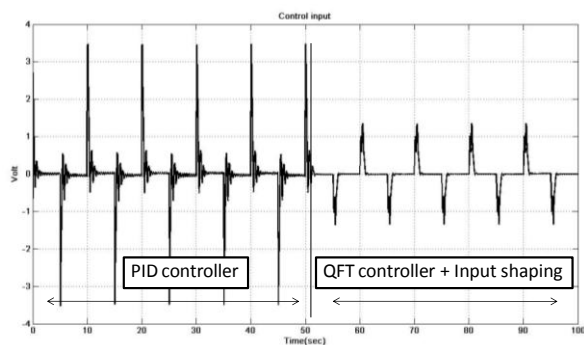
เมื่อพิจารณาในส่วน Deflection angle ที่ปลายแกนกลจากรูปที่ 15 พบว่าการสั่นสะเทือนที่ปลายแกน

กลลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบ PID แต่จากการทดลองในส่วนนี้พบว่าที่ปลายแขนกลยังมีการสั่นสะเทือนอยู่เล็กน้อย เนื่องจาก ที่ปลายแขนกลได้ติดตั้ง Uncertain payload และ สปริงที่ใช้ในแขนกลมีค่าคงที่ต่ำ ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนได้ง่ายมาก

รูปที่ 16 คือ Control input ที่ป้อนให้กับแขนกล จากรูปพบว่าค่าโวลต์ที่ใช้มีค่าน้อยกว่า เมื่อเทียบกับการควบคุมแบบ PID เนื่องจากเส้นทางการเคลื่อนที่ที่สร้างขึ้นจากเทคนิคอินพุตเซปิ้งมีการกระตุ้นของแรงดลเป็นช่วง จึงลดค่าโวลต์ในช่วงการเปลี่ยนตำแหน่ง และประโยชน์อีกอย่างที่ได้คือ สามารถยืดอายุการทำงานของตัว Actuator ได้ เนื่องจากค่าโวลต์ที่ป้อนเข้าระบบไม่สูงจนเกินไป



รูปที่ 15 แสดง Deflection angle ที่ปลายแขนกล



รูปที่ 16 แสดงค่า Control input ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ

### 5. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าตัวควบคุม QFT ที่ทำงานร่วมกับเทคนิคอินพุตเซปิ้ง สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในด้านการลดการสั่นสะเทือน และความแม่นยำ

เทคนิคอินพุตเซปิ้งคำนวณมาจากระบบเชิงเส้น จึงไม่มีการกล่าวถึงลักษณะที่ไม่เชิงเส้น และ ประสิทธิภาพ

ของเทคนิคอินพุตเซปิ้งขึ้นอยู่กับความถูกต้องของค่าความถี่ธรรมชาติ และ อัตราส่วนความหน่วงของระบบ

### 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนสถานที่ทำงานวิจัย และ บริษัท Terasoft ที่สนับสนุนโปรแกรม QFT toolbox

### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Dalong, Wang. and Max, Meng. (1999). Frequency Analysis of a Flexible Robot Manipulator. *Processding of Electrical and computer engineering 1999*, shaw conference center, Edmonton, Alberta, Cannada
- [2] Dong, H.K., and Won, H.O. (2006). Robust control design for flexible joint manipulator: Theory and experimental verification, *International journal of control , Automation and System*, vol. 4, August 2006, pp. 495 – 505.
- [3] Hunmo.Kirrt and Joey K.Parker. (1993). Artificial Neural Network For Identification And Tracking Control Of A Flexible Joint Single-Link Robot. *Proceedings SSST '93., Twenty-Fifth Southeastern Symposium on*
- [4] S. S. Ge, T. H. Lee, and C. J. Harris. (2003) Adaptive Neural Network Control for Robotic Manipulators. *London, U. K, World Scientific*. VOL. 19, NO. 3 ed, pp.523 – 524
- [5] P. H. Meckl and W. P. Seering. April (1988), Controlling velocity-limited systems to reduce residual vibration. *Processding of Electrical and computer engineering on Robotics and Automation 1988*: 1428-1433
- [6] Withit Chatlatanagulchai, Victor M. Beazel, and Peter H. Meckl. (2006). Command Shaping Applied to a Flexible Robot with Configuration-Dependent Resonance. *American Control Conference 2006 June 14-16.*: 1766-1771
- [7] 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.





[8] Yaniv, O.,(1999). Quantitative Feedback Design of Linear and Nonlinear Control Systems. Kluwer Academy Publishers, United State of America.

[9] Borghessani, c., Chait, Y., and Yaniv, o., (2003). The Frequency Domain Control Design Toolbox User's Guide, Terasoft Inc

[10] W. Chatlatanagulchai and K. Saeheng, Real-time reference position shaping to reduce vibration in slewing of a very-flexible-joint robot, *Journal of Research in Engineering and Technology*, Vol. 6, No. 1, January 2009, pp. 51-66