

DRC-25

การปรับลักษณะสัญญาณอ้างอิงกับเทคนิคควบคุมป้อนกลับเชิงปริมาณเพื่อลดการ สั่นสะเทือนของแขนกลชนิดยืดหยุ่น

Input Shaping Technique With Quantitative Feedback Theory For Reduce Residual Vibration of a Flexible Link Robot

นิตินรงค์ พงษ์พานิช^{1,2,*} ดำรงค์ศักดิ์ กิจเดชะ² และ วิทิต ฉัตรรัตน์กุลชัย²

¹ฝ่ายเครื่องจักรกลการเกษตรแห่งชาติ สำนักงานวิทยาเขตกำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาเขตกำแพงแสน 1 ม. 6 ต.กำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73104

²ห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสั่นสะเทือน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

*ติดต่อ rdinrp@ku.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 089-2556024

บทคัดย่อ

การสั่นสะเทือนของการควบคุมแขนกลชนิดยืดหยุ่นไปตำแหน่งเป้าหมาย เกิดจากความถี่ของสัญญาณอ้างอิงกระตุ้นกับความถี่ธรรมชาติหรือเกิดการสั่นพ้อง(resonance) ทำให้ระบบมีเวลาสู่สมดุล(Settling time) ช้า ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงนำเทคนิคอินพุตเซปป์ิงชนิด Zero Vibration Derivative (ZVD) มาปรับลักษณะสัญญาณอ้างอิงให้เหมาะสมกับความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วงของระบบ ควบคุมด้วยตัวควบคุมชนิด พีไอ(PI control) แต่เมื่อทำให้ ระบบมีความไม่แน่นอน(Plant uncertainties) และได้รับผลกระทบของสัญญาณรบกวน(Disturbance) ประสิทธิภาพในการควบคุมจึงลดลง เทคนิคการควบคุมป้อนกลับเชิงปริมาณ(Quantitative feedback control: QFT) จึงถูกใช้อย่างเหมาะสมกับตัวควบคุมในเชิงความถี่(Frequency domain) เพื่อกำหนดคุณสมบัติของตัวควบคุมให้มีความทนทานต่อระบบที่มีความไม่แน่นอนและลดผลกระทบของสิ่งรบกวน (Disturbance rejection) ให้เป็นไปตามที่ต้องการ จากผลการทดลอง การใช้เทคนิคอินพุตเซปป์ิงร่วมกับเทคนิคการควบคุมป้อนกลับเชิงปริมาณสามารถควบคุมระบบไปยังตำแหน่งเป้าหมายให้มีการสั่นสะเทือนที่น้อยและอยู่ในขอบเขตการควบคุมที่ได้กำหนดไว้

คำหลัก: การสั่นสะเทือนเชิงกล, อินพุตเซปป์ิงเทคนิค, การควบคุมป้อนกลับเชิงปริมาณ

Abstract

Control of flexible-link robot manipulator to a reference point can cause vibration. The frequency content in the reference signal can stimulate the system natural frequencies, the so-called resonance, resulting in longer settling time. The input shaping technique designs an impulse sequence to adjust the reference to avoid stimulating the system natural frequencies, suitable for the damping ratio of each mode. The zero vibration derivative (ZVD) input shapers have traditionally been applied together with a PI controller. However, plant uncertainties and external disturbances can reduce the control performance. In this paper, quantitative feedback controller, which is a design technique in the frequency domain, is used

DRC-25

to ensure the robustness to uncertainties and to reduce the effect from the external disturbance (disturbance rejection) to a desired level. From the experimental results, using the input shaping technique with the quantitative feedback controller can move the system to the desired target with reduced vibration and within the specified control limits.

Keyword: mechanical vibration, input shaping technique, quantitative feedback controller

1. บทนำ

การสั่นสะเทือนหลงเหลือ(residual vibration) เป็นปัญหาของการควบคุมระบบแขนกลชนิดยืดหยุ่น เมื่อเคลื่อนที่ถึงตำแหน่งเป้าหมาย ซึ่งทำให้ระบบมีเวลาสู่สมดุล (Settling time) ช้า โดยเกิดจากความถี่ โหมดของธรรมชาติของระบบถูกกระตุ้นด้วยความถี่ของสัญญาณเข้า เรียกว่า การสั่นพ้อง(resonance)

Singer และ Seering [1] ได้พัฒนาวิธีการลดสั่นสะเทือนเนื่องจากการสั่นพ้อง โดยใช้เทคนิคอินพุตเซปปีงเพื่อปรับเปลี่ยนลักษณะสัญญาณเข้าให้เหมาะสมกับความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วง ซึ่ง M.A. Ahmad et al. [2] ได้นำมาควบคุมเครนจำลองที่มีความยืดหยุ่นสูงเพื่อลดการแกว่งของมวลที่ปลาย มากกว่านั้น เทคนิคอินพุตเซปปีงยังสามารถใช้กับการควบคุมระบบหลายอินพุตและเอาต์พุต (MIMO) Vaughan et al. [3] เนื่องจากระบบชนิดยืดหยุ่นจะมีความถี่ธรรมชาติหลายโหมด Lucy. Y. Pao [4] ได้เสนอการออกแบบโดยอาศัยวิธีการ s-plane pole placement จะทำให้การสั่นสะเทือนลดลง

ปัจจัยของความไม่แน่นอนและสิ่งรบกวนของระบบ ทำให้การควบคุมมีประสิทธิภาพที่ลดลงการออกแบบตัวควบคุมที่มีความทนทานจึงช่วยลดปัญหาดังกล่าว เทคนิคควบคุมป้อนกลับเชิงปริมาณ (Quantitative Feedback Control: QFT) เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งออกแบบตัวควบคุมบน Nichols chart ในโดเมนเชิงความถี่ ถูกคิดค้นโดย I. Horowitz [5] หลังจากนั้น Yaniv, O [6] ได้พัฒนาสำหรับการใช้ในระบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น มีงานวิจัยของ ภูรุตล และวิทิต [7] ซึ่งใช้เทคนิค QFT ออกแบบตัวควบคุมของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์เพื่อลด

ผลกระทบของสัญญาณรบกวน และเมื่อปี 2551 ซาคริต และวิทิต [8] ได้ควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลชนิดสองข้อต่อด้วยเทคนิค QFT เช่นเดียวกัน

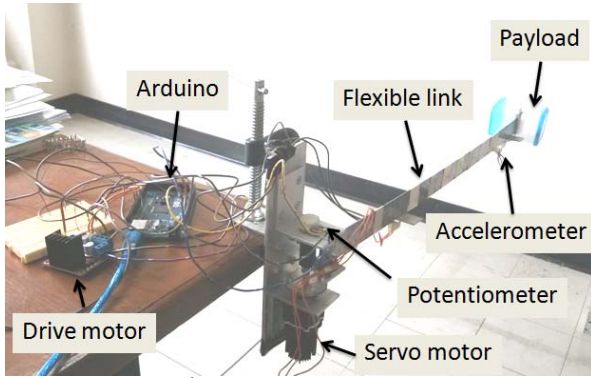
ต่อมา Chatlatanaguchai. W el. al [9] ได้นำเทคนิคอินพุตเซปปีงและเทคนิค QFT มาใช้งานร่วมกัน เพื่อลดการสั่นสะเทือนของการควบคุมแขนกล 2 ข้อต่อ ทำให้ระบบเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายและระดับการสั่นสะเทือนเป็นตามที่ต้องการ

สำหรับส่วนที่ 2 และ 3 ของงานวิจัยนี้ กล่าวถึงการติดตั้งอุปกรณ์และพลศาสตร์แขนกลชนิดยืดหยุ่น ส่วนที่ 4 เสนอ การหาค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วงของระบบ เพื่อใช้สำหรับ ส่วนที่ 5 แสดง เทคนิคการปรับเปลี่ยนลักษณะสัญญาณอ้างอิง (Input shaping technique) และส่วนที่ 6 จึงทำการออกแบบระบบควบคุมด้วยเทคนิคควบคุมป้อนกลับเชิงปริมาณ (QFT)

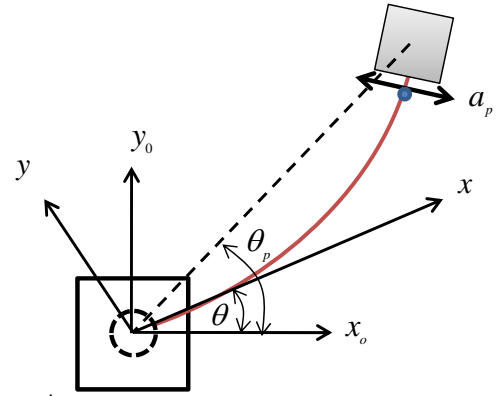
2. การติดตั้งอุปกรณ์

แขนกลชนิดยืดหยุ่น ดังรูปที่ 1 ใช้ไม้มอเตอร์เหล็กซึ่งมีความยืดหยุ่นสูงติดตั้งเข้ากับมอเตอร์กระแสตรงชนิดเซอร์โว (servo motor) เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่แบบเชิงมุม (θ) และใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้(variable resistance) ชนิด Potentiometer ต่อเข้ากับมอเตอร์สำหรับวัดตำแหน่งการหมุน โดยได้ถูกปรับเทียบจากสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (volt) มาเป็นองศาเชิงมุม(degree) สำหรับการวัดการสั่นสะเทือนใช้เซ็นเซอร์วัดความเร่ง (accelerometer) ของ Pololu รุ่น MMA7341L 3 ติดที่ปลายแขนกล และเพิ่มกล่องใส่น้ำหนัก (payload) ที่ปลายแขนกล เพื่อทดสอบความทนทานของระบบเมื่อมีการเพิ่มน้ำหนัก

DRC-25

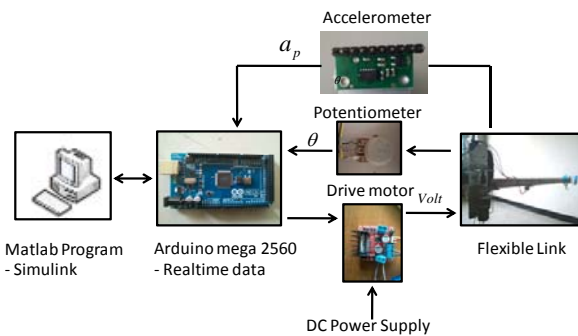


รูปที่ 1 แขนกลชนิดยืดหยุ่น



รูปที่ 3 พลศาสตร์ของแขนกลชนิดยืดหยุ่น

การควบคุมใช้โปรแกรม Matlab และ Simulink บอร์ดควบคุมของ Arduino Mega 2560 วรรจรับมอเตอร์ (drive motor) รุ่น L298N สำหรับสั่งการทำงานของมอเตอร์ และแหล่งจ่ายไฟ 12 โวลต์ โดยแสดงผลเป็นแบบเวลาจริง (real time) เพื่อสามารถดูผลตอบสนองและเปลี่ยนแปลงค่าอ้างอิงให้กับระบบควบคุม ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุม

3. พลศาสตร์ของแขนกลชนิดยืดหยุ่น

รูปที่ 3 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนกลชนิดยืดหยุ่น โดยที่ มุม θ คือ ตำแหน่งเป้าหมาย และ θ_p คือ มุมของปลายของแขนกลเมื่อเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมาย ซึ่งจะมีความคลาดเคลื่อนกับมุม θ สัญญาณความเร่ง (a_p) ถูกนำไปใช้เพื่อวัดค่าการสั่นสะเทือน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของความคลาดเคลื่อนระหว่างมุมที่เกิดขึ้น

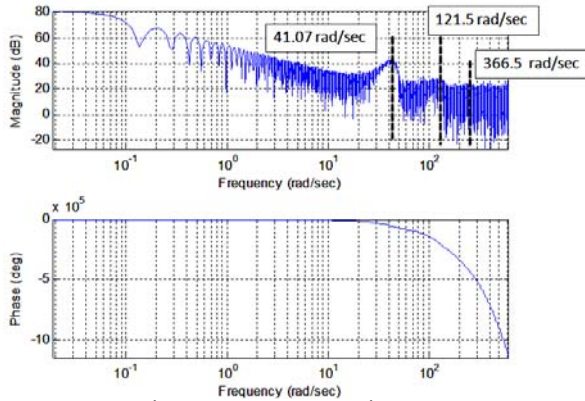
การสั่นสะเทือนสามารถจัดการได้โดย การปรับเปลี่ยนลักษณะของสัญญาณเข้าไม่ให้กระตุ้นกับโหมดของความถี่ธรรมชาติ โดยเทคนิคการปรับลักษณะของสัญญาณเข้า ได้แก่ เทคนิคอินพุตเชปปีง (input shaping technique) คือ เทคนิคที่ใช้ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) และค่าอัตราส่วนความหน่วง (damping ratio) ของระบบ มาหาค่าลำดับอิมพัลส์ (impulse) และตำแหน่งของเวลา (time location) เพื่อออกแบบสัญญาณเข้าให้มีความเหมาะสม

4. การหาค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วน

ความหน่วงของระบบ

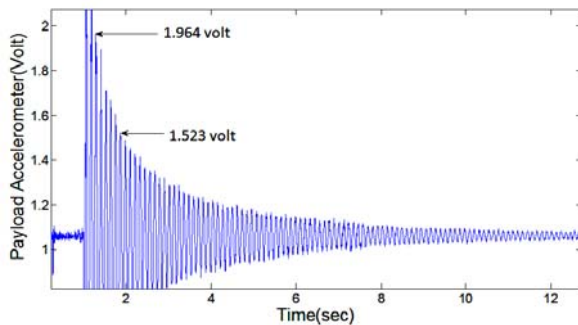
ระบบยืดหยุ่นจะมีความถี่ธรรมชาติเป็นอนันต์ ซึ่งงานวิจัยนี้ เลือกความถี่ธรรมชาติของโหมดในช่วงการทำงาน สามารถหาโดยการกระตุ้นระบบด้วยสัญญาณความถี่แบบคลื่นไซน์จาก 0.1 ถึง 8 เรเดียนต่อวินาที เป็นเวลา 45 วินาที มีเวลาซีกตัวอย่าง (sampling time) เท่ากับ 0.005 วินาที แล้วบันทึกข้อมูลของเซ็นเซอร์วัดความเร่ง นำมาเข้าวิธีการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (fast fourier transform : FFT) แสดงในรูปที่ 4 จะปรากฏโหมดของความถี่ธรรมชาติ ประกอบด้วย 3 โหมด คือ 41.07, 121.5 และ 366.5 เรเดียนต่อวินาที

DRC-25



รูปที่ 4 การหาค่าความถี่ธรรมชาติ

การหาค่าอัตราส่วนความหน่วง หาจากข้อมูล สั่นสะเทือนแบบอิสระ (free vibration) ของเซ็นเซอร์วัด ความเร่ง โดยใช้สมการ logarithmic decrements เพื่อ หาผลตอบสนองที่ลดลงในช่วง 5 คาบการสั่น โดยใช้ ค่าแอมพลิจูดต้านบวกของคลื่นที่ 1 และ 5 มา ซึ่งมีค่า เท่ากับ 1.964 และ 1.523 โวลต์ ตามลำดับ แสดงดัง รูปที่ 5



รูปที่ 5 การหาค่าอัตราส่วนความหน่วง

สมการที่ (1) คือ logarithmic decrements

$$\delta = \frac{1}{m} \ln \frac{x_n}{x_{n+m}} = \frac{1}{5} \ln \frac{1.964}{1.523} = 0.0508 \quad (1)$$

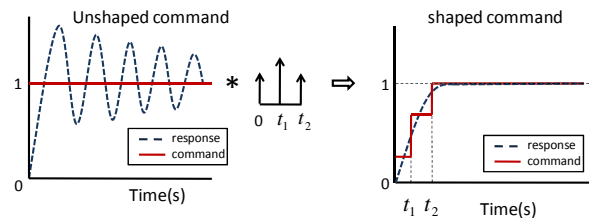
โดยที่ m แสดงถึง จำนวนของคลื่นที่คำนวณ
 x_n แสดงถึง ค่าแอมพลิจูดต้านบวกของคลื่น
 ลูกที่ 1
 x_{n+m} แสดงถึง ค่าแอมพลิจูดต้านบวกของ
 คลื่นลูกที่ 5

สามารถหาค่าอัตราส่วนความหน่วง (ζ) ได้จาก สมการที่ 2 โดยจะได้ค่าอัตราส่วนความหน่วงเท่ากับ 0.0081

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{\delta}\right)^2}} \quad (2)$$

5. เทคนิคการปรับเปลี่ยนลักษณะสัญญาณอ้างอิง (Input Shaping Technique)

เทคนิคการปรับเปลี่ยนลักษณะสัญญาณเข้าหรือ อินพุตเซปป์ (input shaping technique) เป็นเทคนิค การสร้างลำดับอิมพัลโดยอาศัยความถี่ธรรมชาติและ อัตราส่วนความหน่วงของระบบ สำหรับออกแบบ อินพุตเซปเปอร์ (input shaper) เพื่อค่าลำดับอิมพัลด์ (\bar{F}) และตำแหน่งของเวลา (t) ที่เหมาะสม ดังแสดง ในรูปที่ 6 ผลตอบสนองของระบบที่เกิดการ สั่นสะเทือนเมื่อนำมาคอนวอลูชัน (convolution) กับ อินพุตเซปเปอร์ ผลตอบสนองก็จะมีระดับการ สั่นสะเทือนลดลง



รูปที่ 6 กระบวนการของเทคนิคอิมพุตเซปป์

สำหรับระบบที่มีความถี่ธรรมชาติหลายโหมด (multi-mode) การออกแบบอินพุตเซปเปอร์จะแสดงได้ ดังสมการที่ (3)-(5) โดยเป็นแบบ Zero Vibration Derivative (ZVD) [3]

$$F(z) = F_1(z)F_2(z)F_3(z), \quad (3)$$

โดยที่

$$F_i(z) = \left(\bar{F}_1 + \bar{F}_2 z^{-\frac{t_2}{T_s}} + \bar{F}_3 z^{-\frac{t_3}{T_s}} \right) \quad (4)$$

DRC-25

$$\bar{F}_1 = 1 / (1 + 2K + K^2),$$

$$\bar{F}_2 = 2K / (1 + 2K + K^2),$$

$$\bar{F}_3 = K^2 / (1 + 2K + K^2),$$

เมื่อ

$$K = e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}, t_2 = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}, t_3 = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}, \quad (5)$$

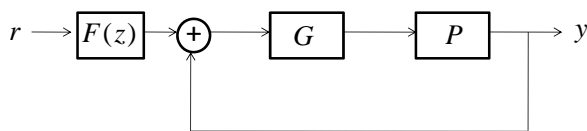
โดยที่ ζ หมายถึง อัตราส่วนความหน่วง

ω_n หมายถึง ความถี่ธรรมชาติ

t_s หมายถึง เวลาชักตัวอย่าง

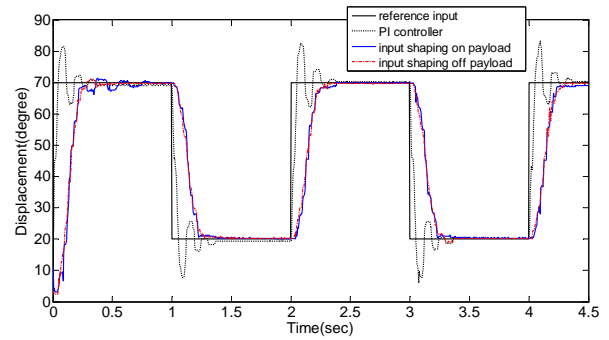
t_2, t_3 หมายถึง ตำแหน่งของเวลา

จากรูปที่ 7 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบป้อนกลับร่วมกับเทคนิคอินพุตเซปปีง โดยที่ $P, G, F(z), r, y$ คือ ระบบควบคุม (plant) ตัวควบคุม (controller) อินพุตเซปเปอร์ (input shaper) สัญญาณเข้า (input) และสัญญาณออก (output) ตามลำดับ



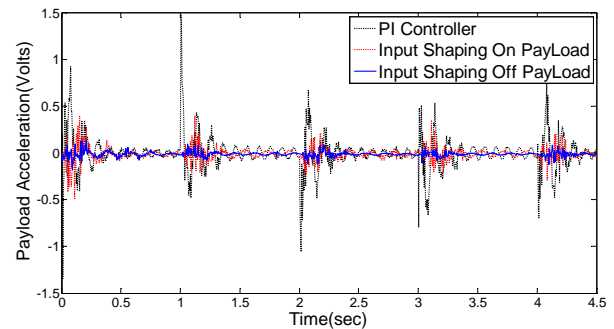
รูปที่ 7 บล็อกไดอะแกรมของอินพุตเซปปีง

รูปที่ 8 และ 9 เป็นสัญญาณออกและการสั่นสะเทือนของแขนกล ตามลำดับ ในกรณีการใช้เทคนิคอินพุตเซปปีงกับไม่ใช่ ซึ่งตัวควบคุมชนิด PI มีค่า K_p เท่ากับ 7 และ K_i เท่ากับ 0.4 โดยตำแหน่งเป้าหมายอยู่ระหว่าง มุม 20-70 องศา จะเห็นได้ว่าการใช้เทคนิคอินพุตเซปปีง ทำให้การสั่นสะเทือนลดลงกว่าในกรณีที่ไม่ใช่ แต่เมื่อเพิ่มมวลที่ปลายน้ำหนัก 126 กรัม การสั่นสะเทือนมีค่ามากขึ้นส่งผลต่อเวลาสู่สมดุล



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบผลตอบสนอง

ดังนั้นเพื่อให้ระบบมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงความไม่แน่นอนและสิ่งรบกวนของระบบ ตัวควบคุมชนิดทันทานจึงถูกออกแบบเพื่อแทนที่การใช้ตัวควบคุมชนิด PI สำหรับจัดการกับปัญหานั้น



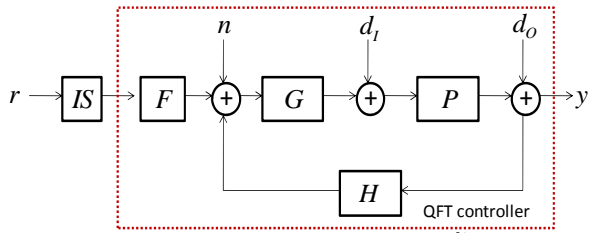
รูปที่ 9 การเปรียบเทียบการสั่นสะเทือน

6. เทคนิคควบคุมป้อนกลับเชิงปริมาณ

(Quantitative Feedback Control Technique)

เทคนิคควบคุมป้อนกลับเชิงปริมาณ (QFT) เป็นเทคนิคการออกแบบที่มีประสิทธิภาพสำหรับควบคุมความไม่แน่นอนและสัญญาณรบกวนของระบบ ดังรูปที่ 10 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมที่ใช้เทคนิคอินพุตเซปปีงร่วมกับเทคนิค QFT (กรอบสีแดง) โดยเทคนิค QFT จะทำการออกแบบ ตัวควบคุม (G) และ ตัวกรอง (F) อาศัยเซตความเป็นไปได้ของระบบ (P) กับสิ่งรบกวนของระบบขาเข้า (d_i) และขาออก (d_o) เมื่อค่า r, n และ y คือ สัญญาณเข้า สัญญาณรบกวน และสัญญาณออก ตามลำดับ

DRC-25



รูปที่ 10 บล็อกไดอะแกรมของอินพุตเซปป์ร่วมกับเทคนิค QFT

เทคนิค QFT จะทำการออกแบบตัวควบคุมและตัวกรอง ในโดเมนความถี่ โดยใช้หลักการสร้างขอบเขต (Bounds) ความเป็นไปได้ของระบบ ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน ดังสมการต่อไปนี้ [6]

- 1) Plant output disturbance rejection

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

- 2) Plant input disturbance rejection

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

- 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

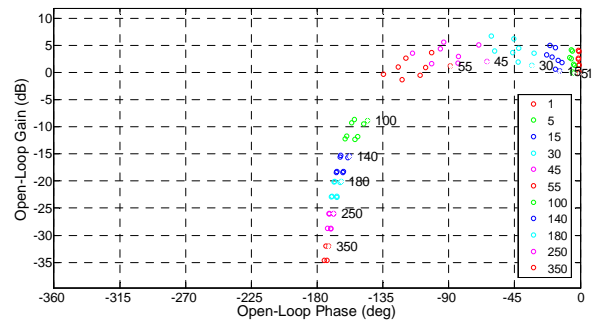
$$\left| \frac{y}{n} \right| = \left| \frac{PG}{1+PGH} \right| < \delta_n$$

- 6) Control effort

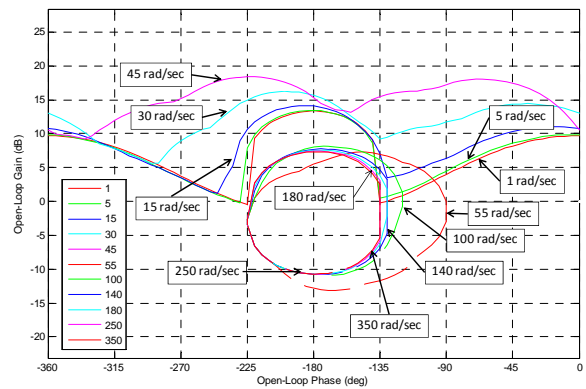
$$\left| \frac{u}{n} \right| = \left| \frac{G}{1+PGH} \right| < \delta_c$$

การออกแบบตัวควบคุมด้วยเทคนิค QFT จะใช้สมการทางคณิตศาสตร์ของระบบ เพื่อสร้าง Plant Template (รูปที่ 11) และ Bounds (รูปที่ 12) โดยที่สมการทางคณิตศาสตร์หาได้โดยวิธีการหาเอกลักษณ์ของระบบ (system identification) จะได้ตั้งสมการที่ (6) ซึ่งความแม่นยำของสมการ เท่ากับ 83.23

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{2641}{s^2 + 41.47s + 2677} \quad (6)$$

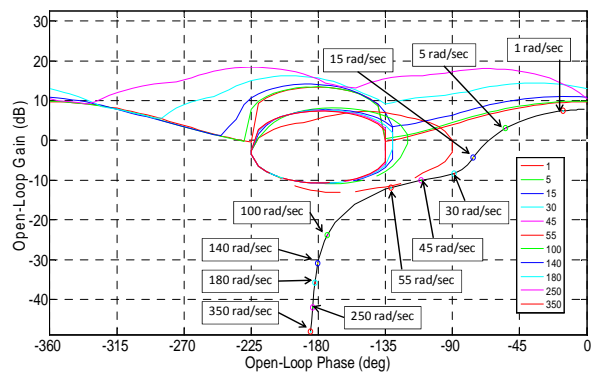


รูปที่ 11 plant template



รูปที่ 12 bounds

รูปที่ 13 แสดงการออกแบบตัวควบคุม โดยใช้เงื่อนไขของสมการ 1) และ 4) หลังจากนั้น เลือกฟังก์ชันถ่ายโอนพื้นฐานเพื่อทำให้ตัวควบคุมอยู่ในขอบเขตที่ต้องการ โดยตัวควบคุมที่ได้ ประกอบด้วยค่า Gain, Real Pole และ Real Zero จะได้ตั้งสมการที่ 7



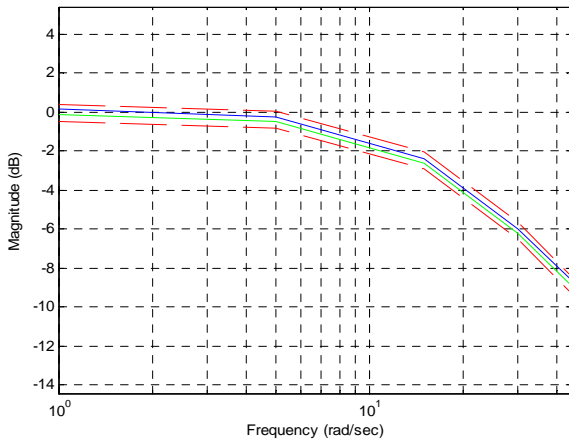
รูปที่ 13 การออกแบบตัวควบคุมด้วยเทคนิค QFT

DRC-25

$$G = \frac{14.64(s/68.89+1)}{(s/76.26+1)} \quad (7)$$

เมื่อออกแบบตัวควบคุมเสร็จแล้ว จึงทำการออกแบบตัวกรอง เพื่อให้ระบบสามารถควบคุมอยู่ในขอบเขตที่กำหนด (upper และ lower bound) ดังเส้นปะในรูปที่ 14 โดยการออกแบบตัวกรองทำได้โดยการเลือกฟังก์ชันถ่ายโอนเหมือนกับกรอกแบบตัวควบคุม ทำให้ได้ดังสมการที่ (8)

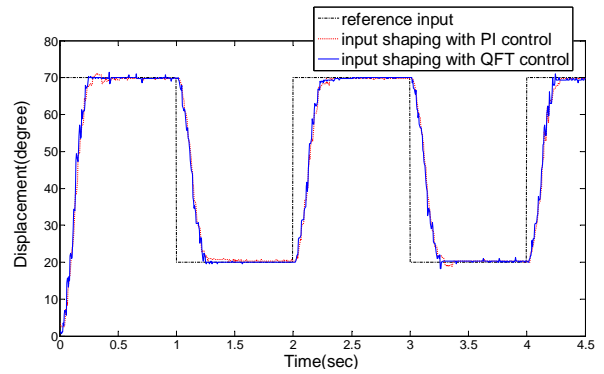
$$F = \frac{1}{(s/43.76+1)} \quad (8)$$



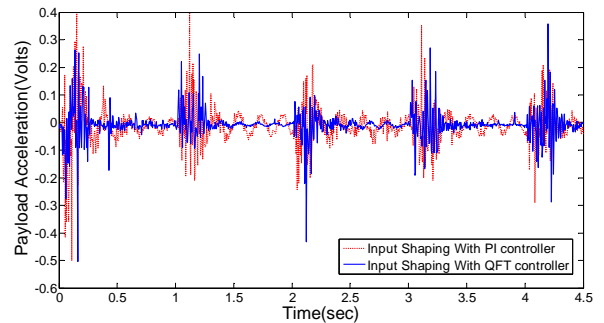
รูปที่ 14 การออกแบบตัวกรองของเทคนิค QFT

7. ผลการทดลอง

รูปที่ 15 และ 16 แสดงผลตอบสนองและการสั่นสะเทือนของแขนกล ในกรณีเพิ่มมวลที่ปลายของแขนกล จะสังเกตว่า การใช้เทคนิคอินพุตเชปปี้งร่วมกับเทคนิค QFT ผลตอบสนองและการสั่นสะเทือนจะดีกว่าการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมชนิด PI ร่วมกับเทคนิคอินพุตเชปปี้ง โดยสามารถลดการสั่นสะเทือนในช่วงเวลาสู่สมดุลได้ดีกว่าอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 15 ผลการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายของการใช้ตัวควบคุมของเทคนิค QFT และ ชนิด PI



รูปที่ 16 ผลการสั่นสะเทือนระหว่างการใช้ตัวควบคุมของเทคนิค QFT และ ชนิด PI

8. สรุปผลการทดลอง

การควบคุมการสั่นสะเทือนที่ตำแหน่งเป้าหมายของแขนกลชนิดยัดหยุนสามารถจัดการได้โดยการใช้เทคนิคอินพุตเชปปี้ง เพื่อปรับเปลี่ยนลักษณะสัญญาณเข้าให้มีความเหมาะสมไม่ให้เกิดกับโหมดของความถี่ธรรมชาติที่ทำงานและเพื่อเพิ่มความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของความไม่แน่นอนและสิ่งรบกวนต่อระบบ การใช้เทคนิค QFT สามารถออกแบบตัวควบคุมให้อยู่บนขอบเขตของความไม่แน่นอนและสิ่งรบกวนนั้นได้

ดังนั้น การใช้เทคนิคอินพุตเชปปี้งร่วมกับเทคนิค QFT สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลชนิดยัดหยุน ให้สามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างรวดเร็วบนขอบเขตของความไม่แน่นอนและสิ่งรบกวน นอกจากนั้น ยังสามารถลดการสั่นสะเทือนที่ตำแหน่งเป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

DRC-25

9. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ Craig Borghesani บริษัท Terasoft ที่ให้การสนับสนุนโปรแกรม QFT Toolbox สำหรับการออกแบบตัวควบคุม และห้องปฏิบัติการควบคุม หุ่นยนต์และการสั่นสะเทือนและฝ่ายเครื่องจักรกล การเกษตรแห่งชาติ สำหรับอุปกรณ์และสถานที่ที่ใช้ในการทำงานวิจัย

10. เอกสารอ้างอิง

- [1] Singer, N.C. and W.P. Seering, 1990. Preshaping command inputs to reduce system vibration. *J. Dyn. Syst. Meas. Control.* 112: 76-82.
- [2] Ahmad, M.A., Z. Zulkifely and M.A. Zawawi. 2010. Experimental Investigations of Input Shaping Schemes for Sway Control of a Gantry Crane System. *Second International Conference on Computer and Network Technology*: 483-486.
- [3] Vaughan, J., J. Yoo, N. Knight, and W. Singhose. 2013. Multi-Input Shaping Control for Multi-Hoist Cranes. *American Control Conference*. Washington, DC, USA: 3449-3454.
- [4] Pao, L. Y. 1999. Multi-input shaping design for vibration reduction. *Automatica* 35 :81-89.
- [5] Horowitz, I., 1984. History of Personal Involvement in Feedback Control Theory. *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 22-23.
- [6] Yaniv, O., 1999. *Quantitative Feedback Design of Linear and Nonlinear Control Systems*. Kluwer Academy Publishers, United State of America.
- [7] ภาวดี โพธิ์แดง และวิฑิต ฉัตรรัตน์กุลชัย. 2551. การควบคุมป้อนกลับเชิงปริมาณของแขนกลหัวอ่านฮาร์ดดิสก์. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต: 414-419.
- [8] ชาคกริต ศรีนางแย้ม และวิฑิต ฉัตรรัตน์กุลชัย. 2551. การควบคุมป้อนกลับเชิงปริมาณของแขนกล

ชนิดสองข้อต่อ. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต: 393-398.

[9] Chatlatanagulchai, withit., P. Poedaeng and P. H .Meckl. 2014. Integrating n Input Shaper with a Quantitive-Feedback-Theory-Based Controller to Effectively Reduce Residual Vibration in Slewing of a Two-Stage Pendulum with Uncertain Payload. *Karetsart J.(Nat. Sci.)*48: 150-166.