

## การปรับตำแหน่งอ้างอิงเพื่อลดการสั่นสะเทือนตกค้างของตัวแบบปั้นจั่นชนิดมีขาห้อย ชักรอกบรรทุกน้ำหนักไม่แน่นอน

### Reference Position Shaping to Reduce Residual Vibration of Gantry Crane Model Carrying Uncertain Payload

ภูวดล โพธิ์แดง<sup>1,2\*</sup>, สัจจา ตะเวทิงค์<sup>1</sup> และ วิจิต จัตรรัตนกุลชัย<sup>1</sup>

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

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

\*ติดต่อ: p.poedaeng@gmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 09 0648 9995

#### บทคัดย่อ

ปั้นจั่นชนิดมีขาห้อยชักรอก (gantry crane) โดยทั่วไปประกอบด้วย ส่วนขับเคลื่อน สายเคเบิล รอก และ ส่วนบรรทุกน้ำหนัก ปัญหาสำคัญที่พบสำหรับการออกแบบระบบควบคุมปั้นจั่นชนิดมีขาห้อยชักรอก คือ การแกว่งของการบรรทุกน้ำหนัก อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของส่วนขับเคลื่อน และการบรรทุกน้ำหนักที่มีความไม่แน่นอน ด้วยเหตุนี้ทางผู้วิจัยจึงนำเทคนิคอินพุตเชปปีง (Input shaping) มาช่วยลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น หลักการทำงานของเทคนิคอินพุตเชปปีง คือ ปรับตำแหน่งสัญญาณอ้างอิงใหม่ โดยนำสัญญาณอ้างอิงเดิมมาประสาน (convolute) กับอนุกรมของแรงดลในเวลาที่เหมาะสม ทำให้เกิดการหักล้างของการสั่นสะเทือนที่เหลือจากการเคลื่อนที่ ซึ่งอนุกรมของแรงดลและเวลาที่ใส่แรงดลถูกออกแบบมาจากค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วงของระบบ ส่วนของการบรรทุกน้ำหนักไม่แน่นอน ส่งผลโดยตรงกับความแม่นยำของค่าความถี่ธรรมชาติ และอัตราส่วนความหน่วงของระบบ แต่ผลกระทบในส่วนนี้สามารถแก้ไขได้โดยเพิ่มความทนทานในด้านความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วง งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคอินพุตเชปปีง 3 ชนิด คือ Unshaped ZVD และ ZVDD ตัวแบบปั้นจั่นชนิดมีขาห้อยชักรอกที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นแขนลูกตุ้มนาฬิกา ติดตั้งกับระบบขับเคลื่อนแบบบอลสกรู และบริเวณปลายแขนลูกตุ้มนาฬิกามีกล่องสำหรับใส่เหรียญเพื่อเพิ่มน้ำหนักไม่แน่นอนให้ระบบ จุดประสงค์ของงานวิจัยคือให้แขนลูกตุ้มนาฬิกาเคลื่อนที่ตามสัญญาณแบบ Square wave และเกิดการสั่นสะเทือนน้อยที่สุด ทำการเปรียบเทียบการทดลอง 2 แบบ คือการทำงานในสภาวะไม่บรรทุกน้ำหนักไม่แน่นอน และ ทำงานในสภาวะบรรทุกน้ำหนักไม่แน่นอน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า Input shaper แบบ ZVDD มีประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือนได้ดีที่สุดในทั้งสองกรณี

**คำหลัก:** การลดการสั่นสะเทือน, อินพุตเชปปีง, ปั้นจั่นชนิดมีขาห้อยชักรอก

#### Abstract

A gantry crane consists of drive train, cable, reel and carrying payload. A main problem, found in control system design for the gantry crane, is oscillation of carrying payload due to movement of the driven train and uncertain payload. Due to this reason, we propose using input shaping technique to reduce the residual vibration. Principle of the input shaping technique is to adjust reference position by

## DRC-2021

convoluting between the reference position and a properly designed impulse sequence, causing the cancellation of residual vibration. The impulse sequence and its time interval are designed from natural frequency and damping ratio of the system. Carrying uncertain payload directly affects the accuracy of the natural frequency and damping ratio of the system. However, this effect can be improved by increasing robustness against uncertainty of the natural frequency and damping ratio. This work compares experimentally the performance of three input shaping techniques namely unshaped, ZVD input shaper and ZVDD input shaper. The gantry crane model in this work consists of a pendulum, a cart and a mono-carrier. At the tip of the pendulum, there is a coin carrying box, representing uncertain payload of the system. The objective is to make the payload track a square wave signal with minimum residual vibration. We compare the oscillation of two cases: when the pendulum has no payload and when the pendulum carries uncertain payload. Experimental results show that the ZVDD input shaper is the more effective in residual vibration reduction in both cases than the unshaped and ZVD input shaper.

**Keywords:** Vibration reduction, Input shaping, gantry crane.

### 1. บทนำ

ปั้นจั่นชนิดมีขาหยังชักรอก (Gantry crane) เป็นอุปกรณ์สำคัญที่อำนวยความสะดวกในด้านการขนถ่ายวัสดุ มีหลายขนาดตามลักษณะการใช้งาน เมื่อพิจารณาการทำงานของปั้นจั่นชนิดมีขาหยังชักรอกพบว่าตัวปั้นจั่นจะเกิดการแกว่งของตัวสายเคเบิล (Cable) ซึ่งการแกว่งของสายเคเบิล อาจส่งผลให้เกิดอุบัติเหตุระหว่างการปฏิบัติงาน

การแก้ปัญหาดังกล่าวส่วนใหญ่มักเป็นการนำทฤษฎีการออกแบบระบบควบคุมที่ซับซ้อนมาใช้งาน ทั้งในส่วนของการใช้วิธีการแบบปริภูมิสเตรจ เช่น การออกแบบระบบควบคุมแบบเชิงเส้น [1] หรือการนำตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุด [2] มาเสริมการทำงานเพื่อลดการแกว่งของปั้นจั่นชนิดมีขาหยังชักรอก นอกจากนี้ยังมีการนำทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้นมาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบ [3,4] แต่เป็นที่ทราบกันดีว่าทฤษฎีการออกแบบทั้งหมดที่กล่าวมาจำเป็นต้องใช้แบบจำลองที่แม่นยำ [5] ส่งผลให้ขั้นตอนการออกแบบระบบควบคุมดังกล่าวมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น และในกรณีที่ปั้นจั่นมีการบรรทุกสัมภาระ ค่าพารามิเตอร์ของระบบมีการเปลี่ยนแปลง ถ้าตัวควบคุมมีความทนทานไม่พอ อาจทำให้ระบบเกิดการทำงานผิดพลาดได้

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงสนใจเทคนิคอินพุตเซปปิง (Input shaping) เนื่องจากเทคนิคนี้สามารถจัดการกับการสั่นสะเทือนที่หลงเหลือในระบบได้ดี และการที่เทคนิคดังกล่าวมีลักษณะเป็น Feed forward control เทคนิคอินพุตเซปปิงจึงเหมาะกับการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของปั้นจั่นชนิดมีขาหยังชักรอก เนื่องจากตัวเทคนิคทำงานภายนอกอุปกรณ์ควบคุม จึงสามารถนำเทคนิคนี้ไปทำงานร่วมกับตัวควบคุมเดิมของระบบได้ทันที โดยไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม ดังนั้นจึงสามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้อย่างมาก

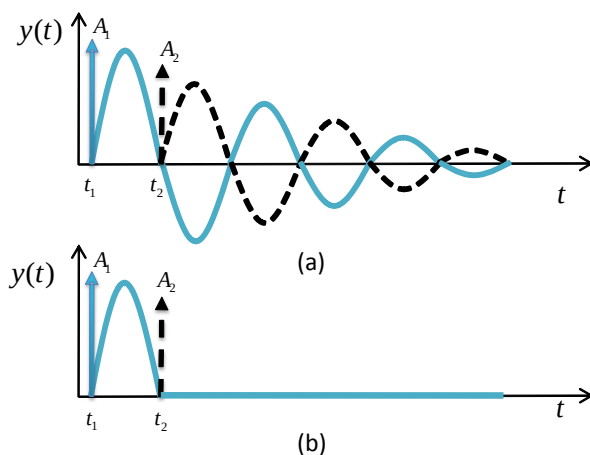
เทคนิคอินพุตเซปปิงเป็นเทคนิคที่ค่อนข้างใหม่ และพบเห็นได้น้อยในวารสารวิชาการทั้งระดับชาติและนานาชาติ เทคนิคนี้ถูกคิดค้นโดย Singer และ Seering ในปี ค.ศ.1990 [6] ค่าพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้สำหรับการคำนวณคือ ค่าความถี่ธรรมชาติ ( $\omega_n$ ) และค่าอัตราส่วนความหน่วง ( $\zeta$ ) [7] จุดเด่นอีกประการของเทคนิคอินพุตเซปปิงคือ สามารถเพิ่มความทนทาน (Robustness) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติ และอัตราส่วนความหน่วงของระบบ ส่งผลให้เทคนิคนี้สามารถลดการสั่นสะเทือนได้ทั้งสภาวะการทำงานปกติ และสภาวะการบรรทุกน้ำหนัก

## DRC-2021

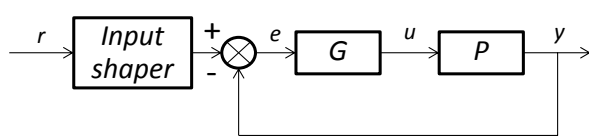
ส่วนที่สองของงานวิจัยกล่าวถึงพื้นฐานของเทคนิคอินพุตเชปปีง ส่วนที่สามกล่าวถึงลักษณะของตัวแบบป้อนจันชนิดมีขาหยั่งชั่วคราว และการหาค่าความถี่ธรรมชาติ และอัตราส่วนความหน่วงสำหรับการคำนวณเทคนิคอินพุตเชปปีง ส่วนที่สี่แสดงการจัดเตรียมอุปกรณ์การทดลอง ส่วนที่ห้าแสดงผลการทดลอง และส่วนสุดท้ายเป็นสรุปผลการทดลอง

### 2. พื้นฐานเทคนิคอินพุตเชปปีง

ส่วนนี้กล่าวถึงพื้นฐานของเทคนิคอินพุตเชปปีง เมื่อพิจารณาผลตอบสนองของแรงดลต่อระบบเชิงเส้นที่เป็นระบบความหน่วงต่ำ มีองศาอิสระเป็นหนึ่ง และไม่มีแรงภายนอกมากระทำ ผลตอบสนองดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1(a) จากรูปพบว่าแรงดล  $A_1$  และ  $A_2$  สร้างผลตอบสนองเป็นรูปคลื่นไซน์ที่แอมพลิจูดลดลงแบบเลขชี้กำลัง จนสุดท้ายค่าแอมพลิจูดวิ่งเข้าสู่ศูนย์ จากรูปถ้าแรงดล  $A_2$  มีขนาดที่เหมาะสมและคอนโวลูชันในเวลาที่ถูกต้อง การสั่นสะเทือนจะถูกหักล้างกันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1(b)



รูปที่ 1 แสดงผลตอบสนองของระบบกับแรงดล



รูปที่ 2 แสดงระบบควบคุมแบบป้อนกลับกับเทคนิคอินพุตเชปปีง

ดังที่กล่าวมาเบื้องต้นเทคนิคอินพุตเชปปีงเป็นเทคนิคแบบ Feed forward control สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2 เมื่อ  $G$  คือตัวควบคุม,  $P$  คือ ระบบ,  $r$  คือ สัญญาณอ้างอิง,  $y$  คือสัญญาณขาออกของระบบ,  $e$  คือค่าความผิดพลาด และ  $u$  คือ สัญญาณควบคุม

หลักการทํางานของเทคนิคอินพุตเชปปีงคือปรับเปลี่ยนสัญญาณอ้างอิงใหม่โดยการคอนโวลูชัน (Convolution) ระหว่างแรงดลกับเวลาที่เหมาะสม ผลที่ได้คือ Shaped command โดย Input shaper แบบพื้นฐานที่ไม่มีการเพิ่มความหนาทนต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติ และอัตราส่วนความหน่วง เรียกได้ว่า Input shaper แบบ ZV (Zero vibration) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1(b) ค่าตัวแปร  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $t_1$  และ  $t_2$  สามารถหาได้จาก (1) เมื่อ  $\zeta$  คือค่าอัตราส่วนความหน่วง,  $\omega_n$  คือค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ ส่วนค่า  $t_1$  กำหนดให้เป็น 0 วินาที เพื่อลดเวลาหน่วง (Delay) ของระบบ

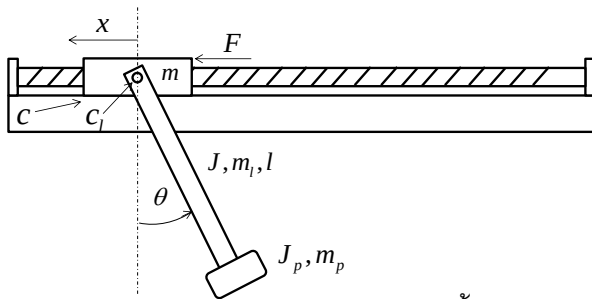
$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{1}{K+1} & t_1 &= 0 \\ A_2 &= \frac{K}{K+1} & t_2 &= \Delta t \end{aligned} \quad \left| \quad \begin{aligned} K &= e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \\ \Delta t &= \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

การเพิ่มความหนาทนให้กับตัวเทคนิคอินพุตเชปปีงสามารถทำได้โดยการหาอนุพันธ์ย่อยเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วง สิ่งที่ได้มาคือจำนวนแรงดลมี 3 แรงดล สามารถเรียกอินพุตเชปปีงชนิดนี้ว่า Input shaper แบบ ZVD (Zero vibration derivative) ซึ่งค่าความหนาทนต่อการเปลี่ยนค่าความถี่ธรรมชาติอยู่ที่  $\pm 15\%$  [8] ถ้าระบบมีการเปลี่ยนแปลงสูง สามารถเพิ่มขีดจำกัดได้โดยการหาอนุพันธ์เทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติ จะได้ Input shaping แบบ ZVDD ค่าความหนาทนที่ได้จะเพิ่มมาเป็น  $\pm 25\%$  ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติ

## DRC-2021

### 3 การหาค่าความถี่ธรรมชาติ และอัตราส่วนความหน่วง ของแบบจำลองปั่นจั่นแบบขาหยั่งชนิดชักกรอก

ลักษณะแบบจำลองของปั่นจั่นชนิดมีขาหยั่งชักกรอกที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแขนลูกตุ้มนาฬิกาติดกับรถลาก (Cart) ตัวขับเคลื่อนแบบ Mono-carrier ดังนั้นความแตกต่างที่ชัดเจนระหว่างตัวแบบและปั่นจั่นชนิดมีขาหยั่งชักกรอกของจริงคือ สายเคเบิลเป็นแบบแข็งเกร็ง และระยะยึดของสายเคเบิลมีขนาดคงที่ สามารถแสดงไดอะแกรมได้ตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงไดอะแกรมของแบบจำลองปั่นจั่นแบบขาหยั่งชนิดชักกรอก

จากรูปที่ 3 ระบบดังกล่าวเป็นระบบที่เป็น Under actuate มีอินพุตเป็นแรงที่เกิดจากมอเตอร์ ส่วนเอาพุตของระบบเป็นระยะทางของรถลาก ( $x$ ) และองศาการแกว่งของแขนลูกตุ้มนาฬิกา ( $\theta$ ) เมื่อพิจารณาการทำงานของระบบพบว่าการแกว่งของแขนลูกตุ้มนาฬิกาเกิดจากการเคลื่อนที่ของรถลาก การหาสมการการเคลื่อนที่ที่สามารถหาได้โดยวิธี Lagrange's method ดังนี้

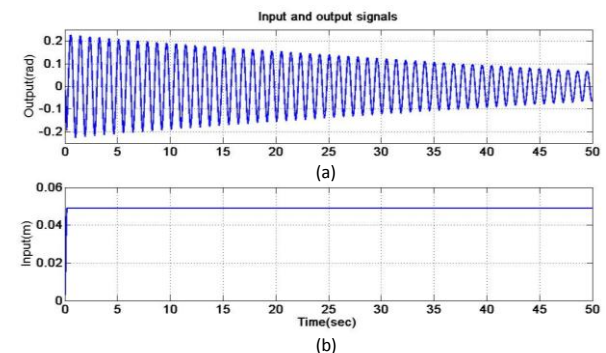
$$\begin{aligned} m\ddot{x} + m_l(\ddot{x} - \frac{l}{2}\ddot{\theta}) + m_p(\ddot{x} - l\ddot{\theta}) &= F - c\dot{x} \\ -m_l \frac{l}{2}(\ddot{x} - \frac{l}{2}\ddot{\theta}) - m_p l(\ddot{x} - l\ddot{\theta}) & \\ + J\ddot{\theta} + J_p\ddot{\theta} + m_l g \frac{l}{2}\theta + m_p g l\theta &= -c_l\dot{\theta} \end{aligned} \quad (2)$$

เมื่อ  $J$  คือโมเมนต์ความเฉื่อยของแขนลูกตุ้มนาฬิกาที่รอบจุดหมุน  $o$ ,  $m$  คือมวลของรถลาก,  $m_l$  คือมวลของแขนลูกตุ้มนาฬิกา,  $J_p$  คือโมเมนต์ความเฉื่อยของมวลบรรทุกไม่แน่นอน,  $m_p$  คือมวลบรรทุก

ไม่แน่นอน และ  $c, c_l$  คือ Viscous damping ของรถลาก และข้อต่อของแขนลูกตุ้มนาฬิกา กับตัวรถลาก และ  $l$  คือความยาวของแขนลูกตุ้มนาฬิกา สามารถเขียนเป็นสมการเชิงเส้นโดยทำการประมาณค่ารอบจุดสมดุลสามารถเขียนได้ตาม (2) กำหนดให้จุดศูนย์กลางมวลมีการเคลื่อนที่ในแนวระดับ จากนั้นทำการจัดรูป (2) และทำการแปลงลาปลาซเพื่อหาความสัมพันธ์ในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน สามารถเขียนได้ตาม (3)

$$\begin{aligned} \frac{\theta(s)}{F(s)} &= \frac{Bs^2}{(As^2 + cs)(Cs^2 + c_l s + D) - Bs^2 Bs^2} \\ A &= m + m_l + m_p, B = m_l \frac{l}{2} + m_p l \\ C &= m_l \frac{l^2}{4} + m_p l^2 + J + J_p \\ D &= m_l g \frac{l}{2} + m_p g l \end{aligned} \quad (3)$$

การหาเอกลักษณ์ของระบบ เน้นเฉพาะการหาค่าความถี่ธรรมชาติ และอัตราส่วนความหน่วงของแขนลูกตุ้มนาฬิกา เนื่องจากอุปกรณ์ดังกล่าวเป็นสาเหตุหลักของการสั่นสะเทือนในระบบ ต่อมาทำการออกแบบตัวควบคุมของรถลากโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี กำหนดให้รถลากเคลื่อนที่ตามสัญญาณแบบขั้นบันได โดยเคลื่อนที่จาก 0 cm ไปยัง 5 cm แสดงได้ตามรูป 4(a) และสัญญาณเอาพุตที่ได้คือองศาการแกว่งของแขนลูกตุ้มนาฬิกาตามรูป 4(b) ซึ่งรูปภาพทั้งหมดได้จากการทดลองจริง



รูปที่ 4 แสดงสัญญาณอินพุตและเอาพุตของระบบ

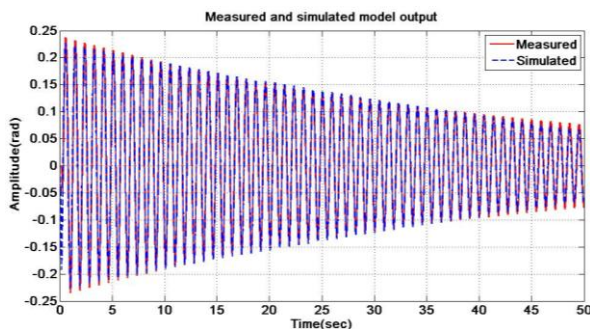
การหาค่าพารามิเตอร์ของระบบทางผู้วิจัยใช้ Identification toolbox ซึ่งเป็นเครื่องมือเสริมในโปรแกรม Matlab จากการทำการทดลองทั้งหมด 32



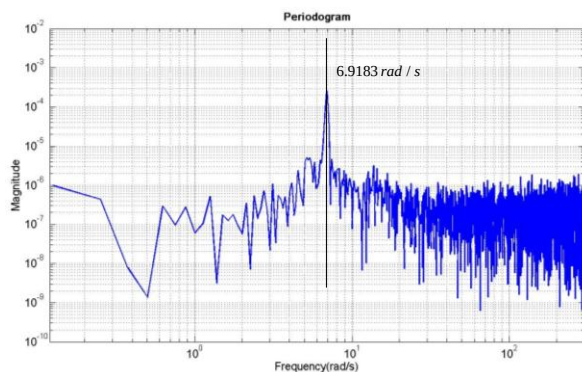
## DRC-2021

พบว่า ค่าความแม่นยำของแบบจำลองที่สร้างอยู่ในช่วง 88.6- 92.21 % โดยหาได้จากค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย สามารถแสดงการเปรียบเทียบจากการวัดจริง และการจำลองได้ตามรูปที่ 5 จากการหาเอกลักษณ์ของระบบ พบว่าค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้อยู่ในช่วง  $[6.702 \ 6.941] \text{ rad/s}$  และ ค่าอัตราส่วนความหน่วงของระบบอยู่ในช่วง  $[3.25 \times 10^{-3} \ 3.35 \times 10^{-3}]$

เพื่อเป็นการยืนยันว่าค่าความถี่ธรรมชาติที่หาได้จากกระบวนการหาเอกลักษณ์ของระบบ มีความใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติจริง จึงนำสัญญาณความเร่งที่เก็บมาทำการ Fast Fourier Transform (FFT) แสดงได้ดังรูปที่ 6 จากรูปพบว่าช่วงที่มีช่วงกว้างมากที่สุดคือช่วงที่เป็นความถี่ธรรมชาติเกิดขึ้นที่ย่านความถี่ประมาณ  $10^{0.84} \text{ rad/s}$  หรือประมาณ  $6.92 \text{ rad/s}$



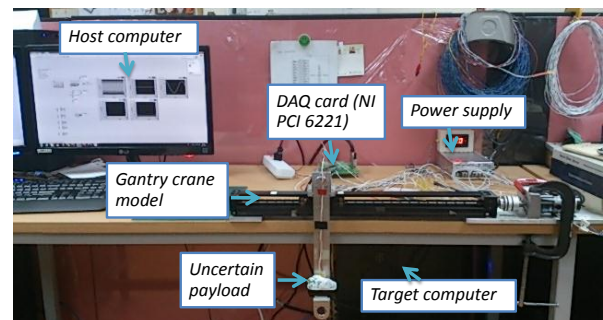
รูปที่ 5 แสดง Model validate ของค่าที่วัดได้และค่าที่แบบจำลองสร้าง



รูปที่ 6 แสดงผลการแปลงอนุกรมฟูเรียร์ของสัญญาณความเร่ง

## 4. การจัดเตรียมอุปกรณ์

อุปกรณ์สำหรับการทดลอง สามารถแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ Host computer, Target computer และ ชุดทดลองตัวแบบปั่นจั่นชนิดมีขาหยั่งจักรอก ส่วนแรก Host computer เป็นส่วนที่ผู้วิจัยใช้ควบคุมและป้อนคำสั่ง มีส่วนประกอบหลักเป็นซอฟต์แวร์ เช่น ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ โปรแกรม Labview และ โปรแกรม Matlab เป็นต้น การควบคุมและสั่งงานสามารถส่งผ่านข้อมูลทางสายแลนไปยังเครื่อง Target computer ส่วนที่สองคือ Target computer ทำหน้าที่รับส่งสัญญาณและทำการประมวลผลแบบ Real time ส่วนประกอบหลักของตัว Target computer คือ ชุด Multifunction Data Acquisition card ของบริษัท National instrument (NI) รุ่น PCI 6221 และส่วนสุดท้ายเป็นตัวแบบปั่นจั่นชนิดมีขาหยั่งจักรอก อุปกรณ์ส่วนนี้ เน้นไปทางด้าน Actuator และ ตัวรับรู้ (Sensor) เช่น แหล่งจ่ายกระแสไฟ (Power supply), วงจรขยายสัญญาณ (Power amplifier), Encoder และ มาตรความเร่ง (Accelerometer) เป็นต้น การต่ออุปกรณ์ทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แสดงการจัดเตรียมอุปกรณ์การทดลอง

## 5. ผลการทดลอง

การทดลองมีจุดประสงค์เพื่อทดสอบความทนทานของเทคนิคอินพุตเซปป์ึงต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติ และอัตราส่วนความหน่วงของระบบ จากส่วนที่ 3 สาเหตุของการสั่นในระบบปั่นจั่นแบบมีขาหยั่งชนิดจักรอกคือ แขนลูกตุ้มนาฬิกาที่ติดกับตัวรถลากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นสามารถใช้เทคนิคอินพุตเซปป์ึงเพื่อจัดการได้โดยทำการปรับ

## DRC-2021

สัญญาณอ้างอิงของรถลาก งานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบการทดลอง 3 แบบคือ เทคนิคอินพุตเชปป์แบบ ZVD, ZVDD และ ไม่ใช่เทคนิคอินพุตเชปป์ (Unshaped) โดยสัญญาณอ้างอิงใหม่ที่ได้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8 จากรูปเส้นไขว้ปลาสีน้ำเงินคือเส้นทางการเคลื่อนที่ของระบบที่กำหนดให้รถลากเคลื่อนที่ตามสัญญาณ Square wave ที่มีช่วงกว้าง 0.08 เมตร และความถี่มีค่าเท่ากับ 0.05 Hz ระยะเวลาทำการทดลองทั้งหมด 100 วินาที เส้นทึบสีแดงคือ Input shaper แบบ ZVD สามารถคำนวณได้จาก (4) ส่วนเส้นปะสีดำคือ Input shaper แบบ ZVDD สามารถคำนวณได้จาก (5) โดยที่ K หาได้จาก (1) ส่วนค่าความถี่ธรรมชาติ ( $\omega_n$ ) ใช้ค่ากลางที่ 6.93 rad/s และอัตราส่วนความหน่วงใช้ค่า 0.0033

$$A_1 = \frac{1}{K^2 + 2K + 1} \quad t_1 = 0$$

$$A_2 = \frac{2K}{K^2 + 2K + 1} \quad t_2 = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (4)$$

$$A_3 = \frac{K^2}{K^2 + 2K + 1} \quad t_3 = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}}$$

$$A_1 = \frac{1}{K^3 + 3K^2 + 3K + 1} \quad t_1 = 0$$

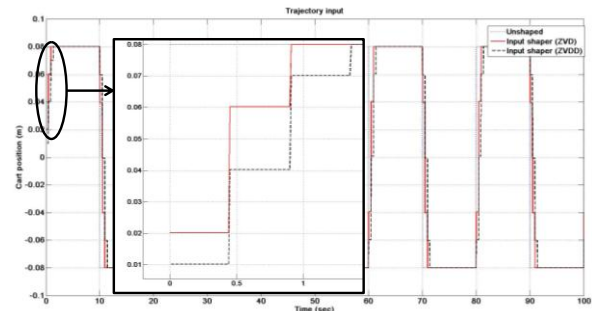
$$A_2 = \frac{3K}{K^3 + 3K^2 + 3K + 1} \quad t_2 = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (5)$$

$$A_3 = \frac{3K^2}{K^3 + 3K^2 + 3K + 1} \quad t_3 = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}}$$

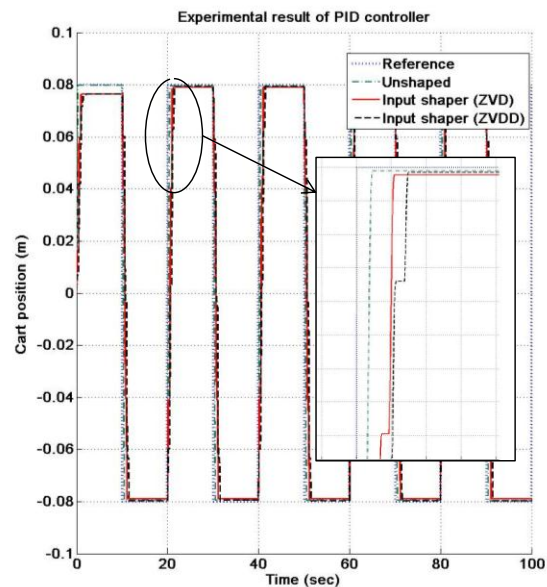
$$A_4 = \frac{K^3}{K^3 + 3K^2 + 3K + 1} \quad t_4 = \frac{3\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}}$$

เมื่อให้รถลากเคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิงตามรูปที่ 8 พบว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ใช้ควบคุมตำแหน่งรถลาก สามารถขับเคลื่อนรถลากไปตามสัญญาณอ้างอิงได้ต้องการได้ดี พิจารณาได้จากรูปที่ 9 จากรูปกราฟเส้นปะไขว้ปลาสีเขียว เป็นผลการทดลองแบบไม่ปรับสัญญาณอ้างอิง มีผลตอบสนองที่เร็วที่สุด รองลงมาเป็นกราฟเส้นทึบสีแดง ซึ่งกราฟดังกล่าวเป็นการปรับสัญญาณอ้างอิงโดยใช้ Input shaper แบบ

ZVD สุดท้ายเป็นกราฟเส้นปะสีดำถูกปรับสัญญาณอ้างอิงโดย Input shaper แบบ ZVDD จากช่วงแรกของผลการทดลองพบว่าระบบเคลื่อนที่ไม่ถึงค่าสถานะอยู่ตัวที่ต้องการทั้งในส่วนของการ Input shaper แบบ ZVD และแบบ ZVDD ปัญหาที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากสัญญาณตกค้างในระบบ สำหรับช่วงการทำงานอื่นระบบสามารถทำงานได้ตามปกติ



รูปที่ 8 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถลาก



รูปที่ 9 แสดงผลการเคลื่อนที่ของ Cart เมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี

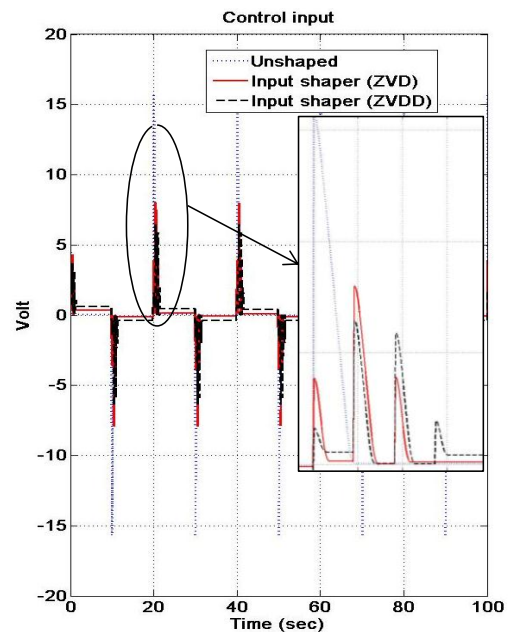
ค่า Control input ที่ป้อนเข้าสู่ระบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10 จากรูปพบว่าเมื่อไม่มีการปรับสัญญาณอ้างอิง มีการใช้ค่า Control input ที่สูงมากแสดงได้จากกราฟเส้นไขว้ปลาสีน้ำเงิน เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟเส้นทึบสีแดงซึ่งปรับสัญญาณอ้างอิงโดย Input shaper แบบ ZVD และกราฟเส้นปะสีดำซึ่งปรับ

## DRC-2021

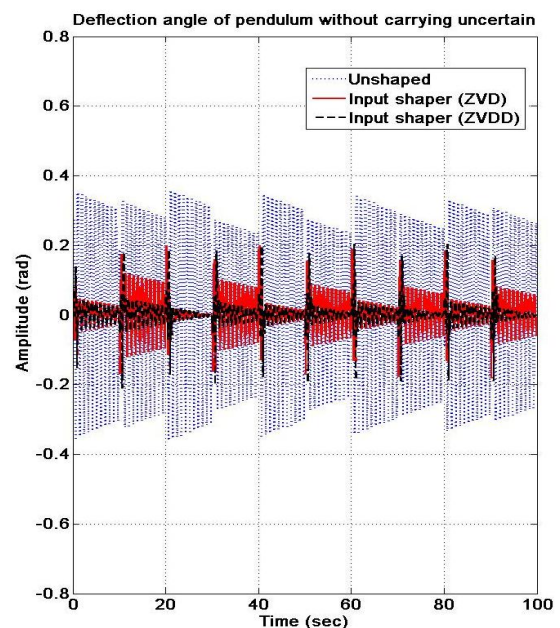
สัญญาณอ้างอิงโดย Input shaper แบบ ZVDD พบว่า ช่วงค่าสูงสุดของ Control input เมื่อใช้ Input shaper ทั้งสองชนิดลดลงมากกว่า 50 % เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองในส่วนที่ไม่ปรับสัญญาณอ้างอิง การทดลองทั้งในส่วนของการสภาวะการทำงานปกติ และ สภาวะเพิ่มน้ำหนักบรรทุกที่ไม่แน่นอน ตัวควบคุมแบบ พีไอดี และสัญญาณอ้างอิงที่ป้อนให้รถลากถูก กำหนดให้มีค่าคงที่ โดยน้ำหนักที่ใช้คือเหรียญหนึ่ง บาทจำนวน 40 เหรียญ มีน้ำหนักรวมประมาณ 140 กรัม

การทดลองในสภาวะการทำงานปกติต้องคาดการณ์ ของแขนลูกตุ้มนาฬิกาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 11 จากรูปกราฟเส้นไขว้ปลาสีน้ำเงินคือผลการทดลองเมื่อ ไม่ปรับสัญญาณอ้างอิง มีค่าองศาการสั่นเฉลี่ยอยู่ที่  $0.2087 \text{ rad}$  กราฟเส้นทึบสีแดงแสดงผลการปรับ สัญญาณอ้างอิงโดย Input shaper แบบ ZVD มีค่า องศาการสั่นเฉลี่ยอยู่ที่  $0.0531 \text{ rad}$  และสุดท้ายกราฟ เส้นปะสีดำคือการปรับสัญญาณอ้างอิงโดย Input shaper แบบ ZVDD มีค่าองศาการสั่นเฉลี่ยอยู่ที่  $0.0348 \text{ rad}$  จากกราฟพบว่าช่วงกว้างของการสั่นมี ขนาดสลับกัน เนื่องมาจากความถี่ของแขนลูกตุ้ม นาฬิกาที่มีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของรถลาก ทำให้เกิดการหักล้างและเสริมกัน ผลการทดลองในส่วนนี้ พบว่า Input shaper แบบ ZVDD มีประสิทธิภาพใน การลดการสั่นสะเทือนสูงที่สุด

เมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกที่ไม่แน่นอน สามารถ พิจารณาได้จากรูปที่ 12 กราฟเส้นไขว้ปลาสีน้ำเงินมี การสั่นสะเทือนเกิดขึ้นอย่างมาก ช่วงกว้างของการสั่น มีแนวโน้มขยายขนาดขึ้น สามารถวัดค่าองศาการสั่น เฉลี่ยอยู่ที่  $0.7447 \text{ rad}$  เมื่อทำการปรับสัญญาณอ้างอิง โดยใช้ Input shaper แบบ ZVD แสดงได้ดังกราฟเส้น ทึบสีแดงพบว่า การสั่นที่เกิดขึ้นยังมีขนาดที่สูง โดย ค่าเฉลี่ยการสั่นอยู่ที่  $0.1531 \text{ rad}$  สุดท้ายเป็นกราฟ แสดงการสั่นของแขนกลเมื่อปรับสัญญาณอ้างอิงโดย Input shaper แบบ ZVDD จากกราฟแสดงเป็นเส้นปะ สีดำ ซึ่งค่าการสั่นที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองใน สภาวะการทำงานปกติ คืออยู่ที่ประมาณ  $0.0397 \text{ rad}$



รูปที่ 10 แสดงพลังงานที่ป้อนเข้าสู่ระบบ



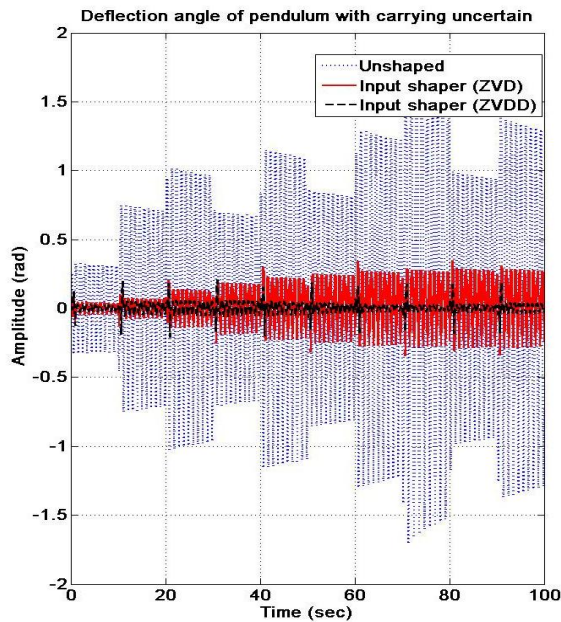
รูปที่ 11 แสดงการแกว่งของแขนลูกตุ้มนาฬิกาใน สภาวะการทำงานปกติ

ผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาในตารางพบว่า Input shaper แบบ ZVDD มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการลดการ สั่นสะเทือน แต่สิ่งที่แลกมาคือ เวลาที่เข้าสู่สถานะอยู่ ตัวของรถลากมีค่าสูงขึ้น อันเนื่องมาจากเวลาหน่วง ของตัวเทคนิคอินพุตเชปป์ และ Input shaper แบบ



## DRC-2021

ZVD มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติ และอัตราส่วนความหน่วง ถ้าค่าตัวแปรดังกล่าวเกินขอบเขตที่กำหนดความสามารถในการลดการสั่นสะเทือน



รูปที่ 12 แสดงการแกว่งของแขนลูกตุ้มนาฬิกาในสภาวะเพิ่มน้ำหนักบรรทุกที่ไม่แน่นอน

ตารางที่ 1 แสดงผลการทดลองของการลดการสั่นสะเทือนของแขนลูกตุ้มนาฬิกาทั้งสภาวะการทำงานปกติและการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกที่ไม่แน่นอน

| Condition                  | Types of shaper | Settling time of cart (sec) | Deflection angle (rad) |
|----------------------------|-----------------|-----------------------------|------------------------|
| Normal                     | Unshaped        | 0.27                        | 0.2087                 |
|                            | ZVD             | 1.04                        | 0.0531                 |
|                            | ZVDD            | 1.51                        | 0.0348                 |
| Carrying uncertain payload | Unshaped        | 0.27                        | 0.7447                 |
|                            | ZVD             | 1.04                        | 0.1531                 |
|                            | ZVDD            | 1.51                        | 0.0397                 |

## 6. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่า Input shaper แบบ ZVDD มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการลดการสั่นสะเทือนทั้งในสภาวะการทำงานปกติ และสภาวะบรรทุกน้ำหนักที่ไม่แน่นอน แต่เมื่อพิจารณาผลตอบแทน

ชั่วคราวของรถลากพบว่า Input shaper แบบ ZVDD มีผลตอบแทนที่ดีที่สุดเช่นกัน ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาตามความเหมาะสมของระบบ และเทคนิคดังกล่าวเป็นเทคนิคแบบ Feed forward control เทคนิคจึงเหมาะกับงานทางด้านปรับปรุงคุณภาพการทำงานภายใต้ข้อจำกัดด้านรายจ่าย

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Fliess, M., Levine, J., & Rouchon, P. (1991). A simplified approach of crane control via a generalized state-space model. In Proceedings of the 30th conference on decision and control, Brighton, England.
- [2] I-Garni, A. Z., Moustafa, K. A. F., and Nizami, S. S. A. K. J., "Optimal Control of Overhead Cranes," Control Eng. Practice vol. 3, 1995, pp. 1277–1284.
- [3] J. H. Park and S. Rhim, Experiments of optimal delay extraction algorithm using adaptive timedelay filter for improved vibration suppression, Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 23 (4), (2009), pp. 997-1000.
- [4] Fang, Y., Dixon, W. E., Dawson, D. M., & Zergeroglu, E. (2001). Nonlinear coupling control laws for a 3-DOF overhead crane system, In Proceedings of the 40th IEEE conference of decision and control, Orlando, FL, USA.
- [5] Moustafa, K. A. F., and Ebeid, A. M., "Nonlinear Modeling and Control of Overhead Crane Load Sway," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol. 110, (1988), pp. 266–271.
- [6] Singer, N. C., and Seering, W. P., "Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol. 112, (1990), pp. 76–82.



## **DRC-2021**

[7] Singh and W. Singhose, (2002), Tutorial on input shaping/time delay control of maneuvering flexible structures, Proceedings of the American Control Conference, Anchorage, USA.

[8] William S, (2009). Command shaping for flexible system: A Review of the first 50 years, International journal of precision engineering and manufacturing, vol 10, No. 4, pp.153-168.