

การปรับเปลี่ยนสัญญาณขาเข้าแบบต่อต้านความล่าช้าสำหรับการ ควบคุมปั่นจั่นแกนทรีด้วยมนุษย์ Anti-Delayed Input Shaping for Manual Control of a Gantry Crane

ภาณุวัฒน์ วณิชวิวัฒน์วงศ์^{1*} และ วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย^{1**}

¹ ห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสั่นสะเทือน (CRV LAB) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาลัทยเกษตรศาสตร์ เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

*ติดต่อ: phanuwat_aom@hotmail.com, โทร 091-902-7221

**ติดต่อ: fengwtc@ku.ac.th, 0-2797-0999 #1858

บทคัดย่อ

บทความนี้แนะนำเสนอการควบคุมปั่นจั่นแกนทรีด้วยมนุษย์ โดยการใช้การปรับเปลี่ยนสัญญาณขาเข้าหรือเทคนิคอินพุตเชปปีง (Input Shaping) เพื่อให้ผลตอบสนองของระบบมีความถูกต้อง แม่นยำ และปราศจากการสั่นสะเทือน จากเทคนิคอินพุตเชปปีงเพื่อสร้างลำดับอิมพัลส์ให้เหมาะสมกับความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วงของระบบทำให้สัญญาณเข้าใหม่ไม่ให้เกิดการสั่นพ้อง อีกทั้งยังจัดการปัญหาจากสัญญาณรบกวนสัญญาณเสียง และความไม่เป็นเชิงเส้นสูงของระบบ ซึ่งเทคนิคอินพุตเชปปีงจะปรากฏทอมของเวลาที่ล่าช้าทำให้ในทางปฏิบัติ เวลาที่ล่าช้าทำให้ระบบไม่ตอบสนองตามที่ต้องการ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบจะเปรียบเทียบระหว่างการวางอินพุตเชปเปอร์อยู่นอกการวางอินพุตเชปเปอร์อยู่ในลูบ และการวางอินพุตเชปเปอร์อยู่ในลูบโดยใช้ตัวทำนายแบบสมิทเข้ามาช่วยเพื่อลดความล่าช้าของระบบ ซึ่งจากการทดลองกับระบบดับเบิลเพนดูลัมพบว่า การวางอินพุตเชปเปอร์อยู่นอกลูบความล่าช้าของเทคนิคจะไม่ส่งผลกระทบต่อ Close-loop control การควบคุมปั่นจั่นแกนทรีด้วยมือมนุษย์ด้วยการวางอินพุตเชปเปอร์อยู่นอกลูบโดยให้มนุษย์ควบคุมตามเกิดความล่าช้าน้อยที่สุด

คำหลัก: การลดการสั่นสะเทือน, อินพุตเชปปีง, ปั่นจั่นแกนทรี

Abstract

This paper presents the manual control of a gantry. By using the input signal modification creates new signal called “input shaping technique”, causing the system responsibility more accurate, precise and stable. The new signal has design and created by using the input shaping technique accord with system’s natural frequency and damping ratio, that doesn’t cause system’s resonance called “Impulse sequence”. Moreover, the impulse sequence solves disturbance of noise signals and nonlinearities of the system. Input shaping technique can also create term of time delay, causing system uncontrollable. Therefore, this research is designed to compare between outside-the-loop input shaping (OLIS), closed-loop signal shaping (CLSS) and inside-the-loop input shaping with Smith’s predictor. From experimental results with the two-link pendulum, outside-the-loop input shaping will not affect the Close-loop control. Manual control of a gantry crane by outside-the-loop input shaping (OLIS) least time delay.

Keywords: Vibration reduction, Input shaping, Gantry crane

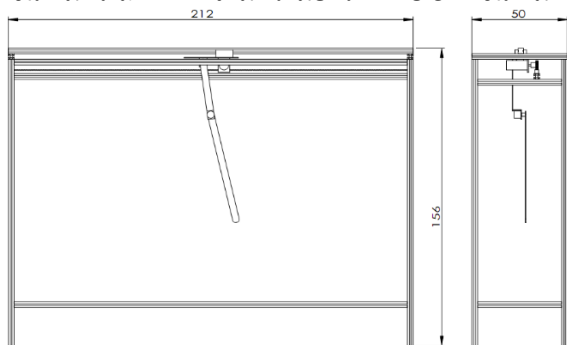
1. บทนำ

ในปัจจุบันการเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยีทำให้เกิดการพัฒนาทางเทคนิคควบคุมอัตโนมัติเป็นไปอย่างรวดเร็วเพื่อเพิ่มผลผลิตภายใต้ความถูกต้องและแม่นยำกับระยะเวลาอันสั้น ทำให้ต้นทุนในการผลิตลดลงและได้ผลผลิตที่มีคุณภาพ จากประเด็นเหล่านี้ระบบควบคุมอัตโนมัติจึงกลายเป็นหัวใจหลักของกระบวนการควบคุมระบบแทนที่กระบวนการแบบดั้งเดิม

ในระบบควบคุมอัตโนมัติสามารถลดความคลาดเคลื่อนของผลตอบสนองของระบบแต่มีปัจจัยอย่างอื่นที่สามารถลดประสิทธิภาพการควบคุมของระบบ หนึ่งในนั้นคือ การสั่นพ้อง (resonance) อันเนื่องมาจากการกระตุ้นระหว่างความถี่ของสัญญาณขาเข้ากับความถี่ธรรมชาติของระบบที่ไม่เหมาะสม ทำให้ระบบไม่สามารถควบคุมหรือสามารถควบคุมค่อนข้างยาก ในปี ค.ศ. 1990 [1] ตัวกรองอินพุตเซปเปอร์ได้ถูกพัฒนาจากการหาลำดับอิมพัลส์เพื่อหาวิธีเปลี่ยนรูปแบบสัญญาณขาเข้า ทำให้ได้สัญญาณขาเข้ารูปแบบใหม่ที่เหมาะสมกับการป้องกันการสั่นพ้องของระบบ

2. การออกแบบจำลองปั่นจั่นแกนทรี

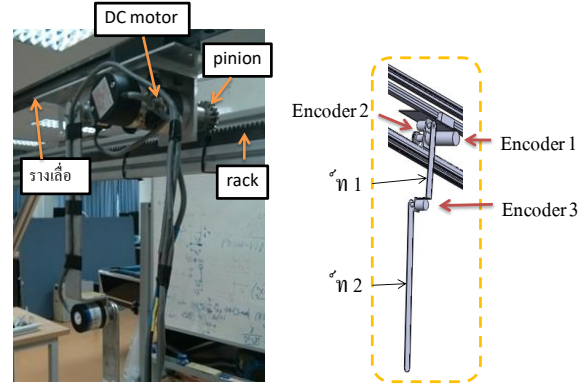
ในการจำลองจะจำลองในระบบดับเบิลเพนดูลัม โดยโครงสร้างของปั่นจั่นแกนทรีของงานวิจัยนี้จะถูกจำลองให้มีขนาด กว้าง 50 เซนติเมตร ยาว 212 เซนติเมตร สูง 156 เซนติเมตร ดังรูปที่ 1 และมีส่วนประกอบของดับเบิลเพนดูลัมที่มีความยาวลิงค์ที่ 1 จะมีความยาวเท่ากับ 26 เซนติเมตร ลิงค์ที่ 2 จะมีความยาวเท่ากับ 57 เซนติเมตร



รูปที่ 1 ขนาดของปั่นจั่นแกนทรี

ลิงค์ทั้งสองถูกติดตั้งเข้ากับรางเลื่อน (linear slide) โดยลิงค์จะสามารถเคลื่อนที่ได้โดยมอเตอร์ขับเคลื่อนและมีเอนโคเดอร์ 1 (encoder 1) ติดตั้งอยู่กับมอเตอร์เพื่อใช้วัดการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ ส่วนเอนโคเดอร์ 2

(encoder 2) ถูกติดตั้งไว้บนตำแหน่งด้านบนของลิงค์ 1 เพื่อวัดมุมการแกว่งของลิงค์ 1 และเอนโคเดอร์ 3 (encoder 3) จะถูกติดตั้งในตำแหน่งปลายลิงค์ 1 และบนลิงค์ 2 เพื่อวัดมุมแกว่งของลิงค์ 2 ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตำแหน่งมอเตอร์และเอนโคเดอร์

3. การหาความถี่ธรรมชาติ

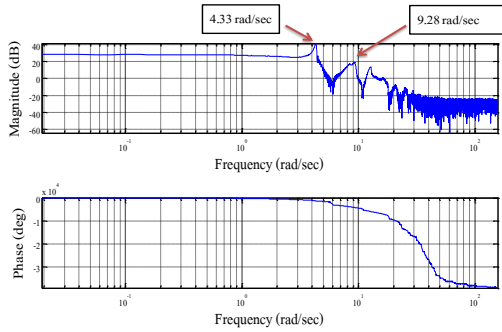
และอัตราส่วนความหน่วงของระบบ

พารามิเตอร์ที่ต้องใช้สำหรับการออกแบบเทคนิคการลดการสั่นสะเทือนของงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย ความถี่ธรรมชาติ (ω_n) กับ อัตราส่วนความหน่วง (ζ)

3.1 การหาความถี่ธรรมชาติ

ความถี่ธรรมชาติจากการวิเคราะห์ด้วยด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (fast fourier transform) หรือ FFT จะแสดงข้อมูลของขนาด (magnitude, dB) ในแต่ละช่วงความถี่ (frequency, rad/sec) โดยที่ [2] ได้แบ่งพลศาสตร์ของระบบทางกลออกเป็น 2 ส่วน คือ 1. ส่วนที่มีโครงสร้างไม่ยืดหยุ่น (rigid-body dynamic) และ 2. ส่วนที่มีโครงสร้างยืดหยุ่น (flexible dynamic) เป็นต้น

งานวิจัยนี้ประกอบด้วย 2 โหมดการสั่นสะเทือนจากลิงค์ที่ 1 และลิงค์ที่ 2 ขั้นตอนการหา ความถี่ธรรมชาติทำได้โดยการกระตุ้นระบบให้เกิดการสั่นสะเทือนอย่างอิสระ ด้วยการปล่อยให้ลิงค์ทั้งสองเกิดการแกว่งแล้วทำการบันทึกค่าของการแกว่ง ด้วยเวลาชักตัวอย่าง (sampling time) เท่ากับ 0.02 วินาที รอนจนกระทั่ง ลิงค์ทั้งสองหยุดแกว่ง หลังจากนั้นนำข้อมูลการแกว่งที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วโดยการเขียนสมการบนโปรแกรม matlab ดังรูปที่ 3 แสดงความถี่ธรรมชาติของลิงค์ที่ 1 และลิงค์ที่ 2 เท่ากับ 4.33 และ 9.28 เรเดียนต่อวินาที ตามลำดับ



รูปที่ 3 การหาความถี่ธรรมชาติของลิงค์ที่ 1 และลิงค์ที่ 2
3.2 การหาอัตราส่วนความหน่วงของระบบ

การหาอัตราส่วนความหน่วงด้วยวิธีส่วนลดลงแบบลอการิทึมของแอมพลิจูดการสั่น [3] ระบบที่มีการหน่วงต่ำ ($\zeta < 1.0$) ที่สั้นอย่างอิสระและมีการหน่วงด้วยความหนืดจะพบว่าแอมพลิจูดของการสั่นจะลดลงกับเวลาสามารถหาได้โดยอาศัยการทดลองจากการวัดการสั่น โดยวัดขนาดของการหน่วงจากอัตราส่วนของแอมพลิจูดที่ต่อเนื่องกันซึ่ง เรียกว่า ส่วนลดลงแบบลอการิทึม (logarithmic decrements)

ส่วนลดลงแบบลอการิทึม คือ ลอการิทึมธรรมชาติของอัตราส่วนระหว่างแอมพลิจูดสองค่าที่อยู่ต่อเนื่องกันบนกราฟการสั่นของระยะกระจัดที่สามารถวัดค่าได้ ถูกนำมาใช้สำหรับการหา อัตราส่วนความหน่วงของระบบที่มีการหน่วงต่ำ (underdamp system) โดยใช้หาลดลงของค่าแอมพลิจูดสูงสุดทางด้านบวกที่ต่อเนื่องกัน 2 ค่า พิจารณาจากสมการที่ 1 แสดงส่วนลดแบบลอการิทึม

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

จากสมการที่ 1 นำไปคำนวณกับสมการที่ 2 จะได้อัตราส่วนความหน่วง ของระบบ

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

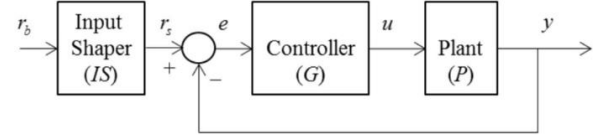
ในงานวิจัยนี้ อัตราส่วนความหน่วงของระบบจะแบ่งเป็นสองลิงค์ จะได้อัตราส่วนความหน่วงของลิงค์ 1 และ ลิงค์ 2 เท่ากับ 0.005 และ 0.007 ตามลำดับ

4. Input shaping

4.1 อินพุตเชปเปอร์อยู่นอกloop

อินพุตเชปเปอร์อยู่นอกloop (Outside-the-loop input shaping: OLSS) [4] จะวางก่อนเข้าloopดังรูปที่ 4

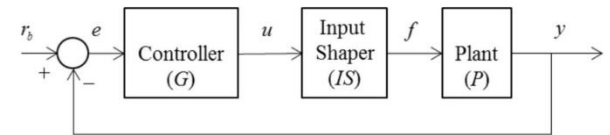
เมื่อ r_b เป็นสัญญาณขาเข้า, IS เป็นตัวกรอง input shaping, r_s เป็นสัญญาณที่ถูกปรับเปลี่ยนแล้ว, e เป็นค่าเออเรอร์, G เป็นตัวควบคุม, P เป็นแพลน, y เป็นเอาพุต



รูปที่ 4 Outside-the-loop input shaping

4.2 อินพุตเชปเปอร์อยู่ในloop

อินพุตเชปเปอร์อยู่ในloop (Closed-loop signal shaping: CLSS) ควบคุมทำได้โดยการวางหลังจากตัวควบคุม เพื่อปรับเปลี่ยนโครงสร้างของค่าความพยายามควบคุมก่อนส่งไปควบคุมระบบ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 Closed-loop signal shaping

ในงานวิจัยนี้ อินพุตเชปเปอร์ที่ถูกนำมาใช้เป็นแบบ ZVD^k ประกอบด้วย 2 โหมดการสั่นสะเทือน ซึ่งการคำนวณหาได้จากสมการ zero-vibration and order derivatives โดยตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบประกอบด้วย

แอมพลิจูด (A_i) แสดงถึงค่าของลำดับอิมพัลส์ของแต่ละโหมดการสั่นสะเทือน หาได้จากสมการที่ 3

$$A_i = \frac{\binom{k+1}{i-1} K^{i-1}}{\sum_{j=0}^{k+1} \binom{k+1}{j}} K^j \quad (3)$$

เมื่อตัวแปรมาจากสมการที่ 4 ดังนี้

$$K = e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (4)$$

โดยที่ $K = 0, 1, 2, \dots$,

เวลาของอิมพัลส์ (t_i) คือ เวลาที่แต่ละอิมพัลส์จะมีผลกระทบต่อการปรับเปลี่ยนสัญญาณพิจารณาจากสมการที่ 5

$$t_i = (i-1) \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (5)$$

โดยที่ $t_i = 1, 2, \dots, k + 2$

ผลของจำนวนอิมพัลส์ทั้งหมด (n) จนถึงสัญญาณขาเข้า (r) สามารถหาได้จากสมการ ที่ 6

$$\binom{n}{r} = \frac{n!}{r!(n-r)!} \quad (6)$$

ดังนั้น เทคนิค IS ชนิด ZVD^k ในการออกแบบกับหลายโหมดการสั่นสะเทือน (multi-mode) สามารถอธิบายผลเฉลยของสมการ (closed form) ได้ดังสมการที่ 7

$$S = \prod_{j=1}^{n-1} IS(j) \quad (7)$$

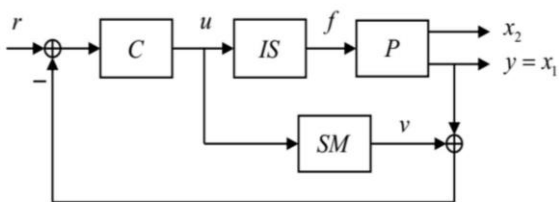
เมื่อ

$$IS(j) = \sum_{i=1}^{k+2} A_i e^{-t_i s} \quad (8)$$

ทฤษฎีของเทคนิค IS จะปรากฏเทอมของความล่าช้า $e^{-t_i s}$ ดังแสดงในสมการที่ 8 ซึ่งเป็นที่ทราบไว้ว่า ถ้าในระบบควบคุมแบบป้อนกลับมีเทอมของความล่าช้าจะทำให้การตอบสนองของระบบ ไม่เป็นไปตามที่ต้องการและยากต่อการออกแบบระบบควบคุม

4.3 การปรับเปลี่ยนสัญญาณภายในลูปควบคุมที่ต่อต้านความล่าช้า

จากปัญหาของระบบ มีความล่าช้าเกิดขึ้นในระบบควบคุม ดังที่กล่าวข้างต้น ดังนั้นในงานวิจัย ตัวทำนายแบบสมิทจึงถูกประยุกต์เข้าไปในระบบควบคุม เพื่อนำไปสู่เทคนิคที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการควบคุมระบบด้วยวิธีการควบคุมด้วยมือกับระบบที่มีความยืดหยุ่นสูงเพื่อลดการสั่นสะเทือนอย่างมีประสิทธิภาพ หรือเรียกว่าเทคนิคการปรับเปลี่ยนสัญญาณภายในลูปควบคุมที่ต่อต้านความล่าช้า (anti-delay closed-loop input shaping: ACIS) จากงานวิจัยของ [5,6] สามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 Anti-delay closed-loop input shaping

จากรูปที่ 6 แสดงการรวมตัวทำนายแบบสมิท (SM) เข้าไปในระบบควบคุมรวมกับระบบ $CLSS$ ซึ่งสามารถเขียนสมการอธิบายหลักการของ ได้ดังสมการที่ 9

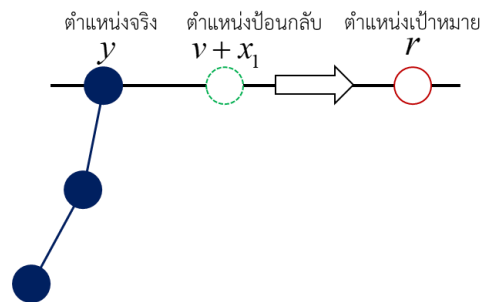
$$SM(s) = \hat{P}(s) - \hat{P}(s)IS(s) \quad (9)$$

เมื่อ \hat{P} คือ สมการทางคณิตศาสตร์ของระบบจริง (P) ซึ่งถ้าสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบมีค่าเท่ากับระบบจริงอย่างถูกต้องและแม่นยำ ($P = \hat{P}$) ฟังก์ชันถ่ายโอนจาก r ไป y สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 10

$$\frac{y(s)}{r(s)} = \frac{C(s)IS(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)} \quad (10)$$

5. วิธีการควบคุมการเคลื่อนที่ทั้ง 3 เทคนิค

ทั้ง 3 เทคนิคจะทำการควบคุมผ่านหน้าจอแสดงผล โดยจะมีตำแหน่งขึ้นมาให้ควบคุมไปยังตำแหน่งที่กำหนด แต่ในขั้นตอนการออกแบบควบคุมของเทคนิค ACIS จะทำการสร้างวงกลมเส้นประเพื่อให้ได้ผลตอบสนองป้อนกลับ โดยค่าผลตอบสนองป้อนกลับ ($v + x_1$) คือการรวมของสัญญาณขาออกของตัวทำนายแบบสมิท (v) กับผลตอบสนองการเคลื่อนที่ของระบบ ($y = x_1$) [6]

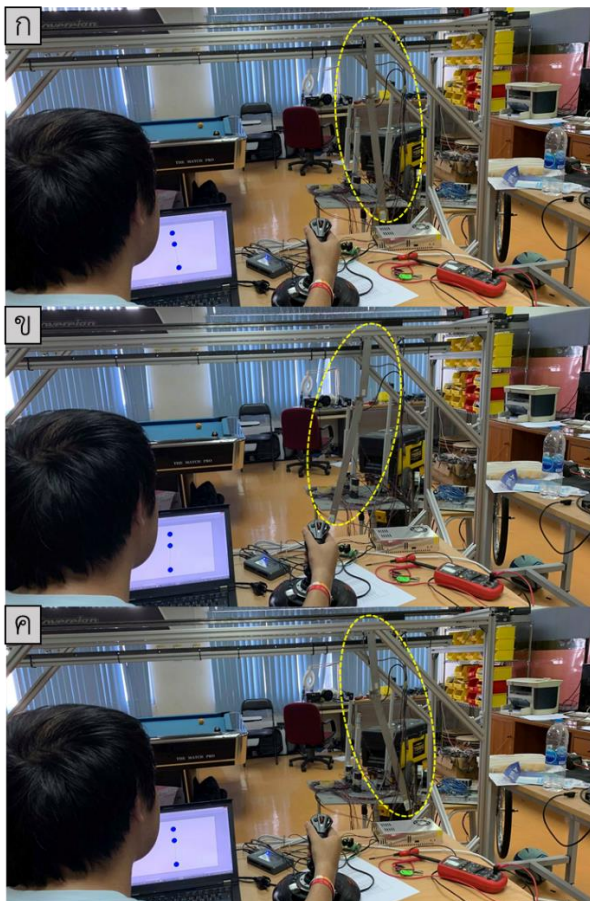


รูปที่ 7 จอแสดงผลการเคลื่อนที่ด้วยเทคนิค ACIS

จากรูปที่ 7 บนหน้าจอแสดงผลของโปรแกรมควบคุม จะปรากฏวงกลมเส้นทึบ คือ ตำแหน่งเป้าหมาย (desired position, r) ได้จากการกำหนดตำแหน่งโดยโปรแกรมควบคุม โดยผู้ปฏิบัติงานต้องทำการควบคุมตำแหน่งของสัญญาณป้อนกลับ (feedback position, $v + x_1$) หรือวงกลมเส้นประ ให้เคลื่อนที่ตามตำแหน่งที่ต้องการโดยการบังคับจอยสติ๊ก ซึ่งจะเป็นการกำหนดเป้าหมายเพื่อให้ตำแหน่งจริงของระบบ (actual position, y) ดังวงกลมทึบให้เคลื่อนที่ในทิศทางและตำแหน่งเดียวไปอยู่ที่ตำแหน่งของสัญญาณป้อนกลับ

6. ผล

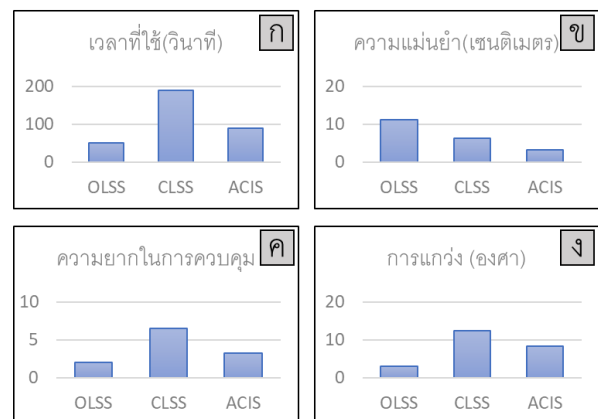
จากรูปที่ 8 แสดงการควบคุมปั่นจั่นแกนทรี จากรูปที่ 8(ก) แสดงการควบคุมด้วยเทคนิค Outside-the-loop input shaping (OLSS) จะเห็นได้ว่าการควบคุมวงกลมสีน้ำเงินไปที่ทับกับวงกลมสีแดงเกิดการแกว่งน้อยมากแต่ความแม่นยำต่ำเพราะเกิดจากการตีเลย์ของตัวกรองอินพุตเซปเปอร์ ส่วนการควบคุมด้วยเทคนิค Closed-loop signal shaping (CLSS) จากรูปที่ 8(ข) จะเห็นได้ว่าการแกว่งมากกว่า (OLSS) และการล่าช้าของระบบทำให้ความแม่นยำต่ำ และเทคนิค Anti-delay closed-loop input shaping (ACIS) จากรูปที่ 8(ค) มีความแม่นยำสูงที่สุด และการหาพลาจจากสมการในทางปฏิบัติ นั้นแม่นยำน้อยจึงทำให้การกำจัดความล่าช้าของระบบออกได้ยังไม่หมดแต่ก็ทำให้การเคลื่อนที่ใช้เวลาน้อยลง



รูปที่ 8 ทดลอง input shaping (ก) Outside-the-loop input shaping (ข) Closed-loop signal shaping (ค) Anti-delay closed-loop input shaping

7. สรุป

เทคนิค Outside-the-loop input shaping (OLSS) ไม่เหมาะสมกับการควบคุมด้วยมนุษย์เพราะเกิดจากการล่าช้าของสัญญาณขาเข้าทำให้ความแม่นยำนั้นต่ำ ดังรูปที่ 9(ข) แต่เวลาที่ใช้เคลื่อนที่จุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้ทำได้ดีมาก ดังรูปที่ 9(ก) ผลเกิดมาจากการแกว่งของแพลนดูลัมน้อย ดังรูปที่ 9(ง) จะเหมาะสมหรือได้ผลลัพธ์ที่ดีมากที่สุดกับระบบอัตโนมัติมากกว่าการควบคุมด้วยมนุษย์ ส่วนถ้าต้องการควบคุมด้วยมนุษย์จะใช้เทคนิค Anti-delay closed-loop input shaping (ACIS) ที่มีประสิทธิภาพโดยรวมมากกว่า เทคนิค Closed-loop signal shaping (CLSS) ทั้งในด้านเวลาในการเคลื่อนที่น้อยกว่า การควบคุมที่ง่ายกว่า ดังรูปที่ 9(ค) เพราะ (CLSS) จะเพิ่มความล่าช้าของเวลาเข้าไปในระบบควบคุม ทำให้การตอบสนองของระบบไม่เป็นไปตามที่ต้องการ



รูปที่ 9 เปรียบเทียบผล (ก) เวลาที่ใช้ (ข) ความแม่นยำ (ค) ความยากในการควบคุม (ง) การแกว่ง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. C. Singer and W. C. Seering, "Preshaping command inputs to reduce system vibration," ASME J. of Dynamics System, Measurement and Control, vol. 112, pp. 76-82, March 1990.
- [2] Chatlatanagulchai, W. 2015. Input shaping for vibration suppression in flexible systems. Misterkopy. Bangkok, Thailand.
- [3] มนตรี พิรุณเกษตร. 2551. การสั่นสะเทือนเชิงกล. บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, กรุงเทพฯ.
- [4] Chatlatanagulchai, W., Kijdech, D. Benjalersyarnon, T. and Damyot, S. *Quantitative*



feedback input shaping for flexible-joint robot manipulator, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol. 138, pp. 1 -13, June 2016.

[5] Chatlatanagulchai, W., Poedaeng, P. and Pongpanich, N. *Improving Closed-Loop Signal Shaping of Flexible Systems with Smith Predictor and Quantitative Feedback*, Engineering Journal, vol. 20, pp. 155-168, 2016.

[6] Chatlatanagulchai, W. and Poedaeng, P. *Closed-Loop Input Shaping with Smith Predictor and Quantitative Feedback Control*, in the 29th Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand, Nakhon Ratchasima, 2015, pp. 846-853.