

การปรับลักษณะตำแหน่งอ้างอิงเพื่อลดการสั่นสะเทือนในการเคลื่อนที่ของแกนทรีเครน สองท่อน

Reference Position Shaping to Reduce Vibration in Slewing of a Two-Link Gantry Crane

เอกนรินทร์ สุรรักษา^{1*} และ วิทิต จัตรรัตน์กุลชัย²

¹ บริษัท สหวิริยา สตีล อินดัสตรี จำกัด (มหาชน) 9 ม.7 ต.แม่รำพึง อ.บางสะพาน จ.ประจวบคีรีขันธ์ 77140

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถ.งามวงศ์วาน เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

*tontan_kku@hotmail.com, 086-3200-650

บทคัดย่อ

การเคลื่อนย้ายวัตถุโดยใช้แกนทรีเครนสองท่อนจะมีการสั่นสะเทือนของวัตถุที่เคลื่อนย้ายเนื่องจากระบบมีการแกว่งไปมา บทความนี้เสนอการการประยุกต์ใช้เทคนิค input shaping ร่วมกับ PID controller สำหรับลดการสั่นสะเทือนของแกนทรีเครนสองท่อน ผลการทดลองพบว่าการควบคุมระบบการเคลื่อนที่ของแกนทรีเครนสองท่อนโดยใช้เทคนิค input shaping ร่วมกับการควบคุมแบบ PID มีประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือนของลูกตุ้มที่เคลื่อนย้ายได้ และมีการสั่นสะเทือนตกค้างน้อยมากเมื่อเทียบกับการควบคุมแบบ PID ที่ไม่ใช้เทคนิค Input shaping

คำหลัก: การลดการสั่นสะเทือน, แกนทรีเครนสองท่อน, การควบคุมแบบ PID, ลูกตุ้มนาฬิกาสองแกน.

Abstract

Payload manipulation using a two-link gantry crane has residual vibration due to system oscillation. This research presents controlling residual vibration of a two-link gantry crane using input shaping techniques with PID controller. The simulation and experimental results show that payload manipulation using a two-link gantry crane with input shaping techniques and PID control has success for reduce payload vibration and trivial residual vibration compared with PID control without using input shaping techniques.

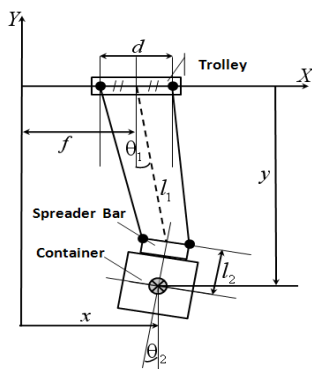
Keywords: Vibration reduction, Two-link gantry crane, PID controller, Double pendulum.

1. บทนำ

แกนทรีเครนเป็นเครื่องจักรที่ทำหน้าที่ยกเคลื่อนย้ายวัตถุ มีความสามารถในการเคลื่อนย้ายวัตถุมีขนาดใหญ่และน้ำหนักมากได้ มีลักษณะของโครงสร้างเป็นคานที่มีเสายกสูรับน้ำหนักคานทั้งสองข้างและ

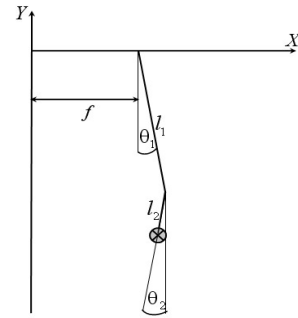
โครงสร้างของคานและเสานั้นขึ้นอยู่กับกรออกแบบเพื่อรองรับวัตถุประสงคในการเคลื่อนย้ายตามขนาดและภาระน้ำหนักของวัตถุซึ่งมีทั้งแบบคานเดี่ยว คานคู่ เสาคู่เดี่ยว เสาคู่และที่ฐานของเสามีล้อที่ทำหน้าที่เคลื่อนตำแหน่งของแกนทรีเครนไปตามทิศทางของ

รางที่ต่ำกว่าระดับพื้นหรือที่เป็นแบบลอยๆ จะไม่มีราง ล้อแต่ก็จะเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของล้อ ขอบเขต ความสามารถในการเคลื่อนย้ายวัตถุของแกนทรีเครน มีขอบเขตจำกัดตามพื้นที่ที่คานผ่านได้เท่านั้น ซึ่งทิศทาง การเคลื่อนย้ายวัตถุของแกนทรีเครนมี 6 ทิศทางมี ดังนี้ 2 ทิศทางของแกน X (TRAVELING) คือ ด้านซ้ายและด้านขวา 2 ทิศทางของแกน Y (TRAVERSING) คือ ด้านหน้าและด้านหลัง 2 ทิศทาง ของแกน Z หรือแนวระดับ (HOISTING) คือ ขึ้นบน และลงล่าง เมื่อมีการดำเนินการเคลื่อนย้ายวัตถุ อย่างเช่นตู้คอนเทนเนอร์ Spreader Bar จะทำหน้าที่ จับกับตู้คอนเทนเนอร์และ Trolley จะทำหน้าที่ เคลื่อนย้ายตู้คอนเทนเนอร์โดยมีมอเตอร์เป็นตัว ขับเคลื่อนนั้น ความเร็วในการเคลื่อนที่ของ Trolley ดังกล่าวจะส่งผลทำให้เกิดการแกว่งไกวหรือการ สั่นสะเทือนระหว่างตู้คอนเทนเนอร์กับ Trolley ตาม ระยะห่างระหว่าง Trolley กับตู้คอนเทนเนอร์ ซึ่ง รูปแบบการสั่นในลักษณะนี้จะมีรูปแบบคล้ายกับการ สั่นที่เป็น Double – Pendulum หรือการสั่นสะเทือน ของลูกตุ้มนาฬิกาสองแกน โดยความสัมพันธ์ของการ สั่นจะอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของ Trolley กับตำแหน่ง กึ่งกลางของตู้คอนเทนเนอร์ ดังจะแสดงลักษณะของ การเกิดการสั่นในภาพที่ 1 และ ภาพที่ 2 ดังนี้



รูปที่ 1 แสดงลักษณะของการเกิดการสั่นที่มีการ เคลื่อนย้ายตู้คอนเทนเนอร์โดย Trolley

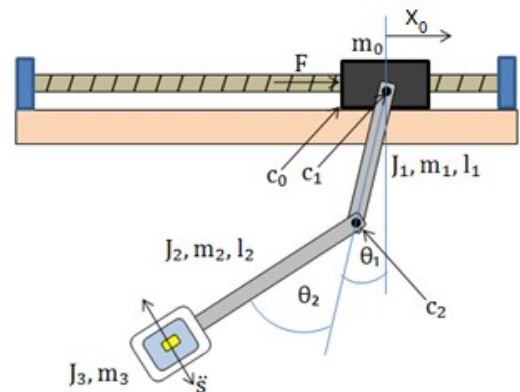
การเคลื่อนที่ของจุดศูนย์กลางมวลเมื่อแกนทรี เครนเคลื่อนย้าย จะมีความสัมพันธ์ตามระยะของแกน สองแกนคือ l_1 เป็นระยะจาก Trolley ถึง Spreader Bar และ l_2 เป็นระยะจาก Spreader Bar ถึงจุด ศูนย์กึ่งกลางมวลของวัตถุที่ทำการเคลื่อนย้าย



รูปที่ 2 แสดงลักษณะของการสั่นแบบลูกตุ้มนาฬิกา สองแกน (Double – Pendulum)

2. การออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การออกแบบตัวควบคุมที่ต้องใช้แบบจำลอง (model-based control) จำเป็นที่จะต้องมีการจำลอง ของระบบก่อน งานวิจัยนี้ใช้วิธีสมการลากรางจ์ในการ หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งสมการลากรางจ์ สำหรับระบบพลศาสตร์สามารถเขียนได้ดังนี้



รูปที่ 3 ระบบแกนทรีเครนสองท่อน

สมการพลศาสตร์ของระบบสามารถเขียนได้จาก สมการลากรางจ์ (Lagrange's equation) คือ

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} = F_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

เมื่อ T แทนพลังงานจลน์รวมของระบบ U แทน พลังงานศักย์รวมของระบบ q_i แทน Generalize coordinate i คืออันดับของพิกัด ซึ่งในที่นี้ ประกอบด้วย 3 พิกัด ประกอบด้วย x_0 แทนตำแหน่ง รถ θ_1 แทนองศาของลูกตุ้มล่าง θ_2 แทนองศาของ ลูกตุ้ม และ F_i แทน Generalize force สมการการ เคลื่อนที่ที่สามารถเขียนได้อยู่ในรูปของสมการไม่เชิง เส้น เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้จึงทำสมการดังกล่าว

ให้อยู่ในรูปเชิงเส้นโดยให้ระบบทำงานรอบจุดสมดุล
บน $(\theta_1, \theta_2 \rightarrow 0)$ [1] โดยแทนค่า $\sin(\theta) = \theta$,
 $\cos(\theta) = 1$, $\dot{\theta} = 0$ สมการการเคลื่อนที่ที่สามารถ
เขียนได้เป็นโดยที่

$$T = \frac{1}{2}(m_0 + m_1 + m_2 + m_3)\dot{x}_0^2 + \frac{1}{2}\left(m_1\left(\frac{l_1}{2}\right)^2 + m_2l_1^2 + m_3l_1^2 + J_1\right)\dot{\theta}_1^2$$

$$+ \frac{1}{2}\left(m_2\left(\frac{l_2}{2}\right)^2 + m_3l_2^2 + J_2\right)\dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2}[-m_1l_1\dot{x}_0\cos\theta_1 - 2m_2l_1\dot{x}_0\cos\theta_1$$

$$- 2m_3l_1\dot{x}_0\cos\theta_1]\dot{\theta}_1 + \frac{1}{2}(-m_2l_1\dot{x}_0\cos\theta_2 - 2m_3l_2\dot{x}_0\cos\theta_2)\dot{\theta}_2^2$$

$$+ \left(\frac{1}{2}m_2l_1l_2 + m_3l_1l_2\right)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\cos(\theta_1 - \theta_2)$$

$$U = -m_1g\left(\frac{l_1}{2}\cos\theta_1\right) - m_2g\left(l_1\cos\theta_1 + \frac{l_2}{2}\cos\theta_2\right) - m_3g(l_1\cos\theta_1 + l_2\cos\theta_2)$$

โดยแทนค่า $\sin(\theta) = \theta$, $\cos(\theta) = 1$, $\dot{\theta} = 0$ สมการ
การเคลื่อนที่ที่สามารถเขียนได้เป็นโดยที่

$$(m_0 + m_1 + m_2 + m_3)\ddot{x}_0 + \frac{1}{2}(-m_1l_1 - 2m_2l_1 - 2m_3l_1)\ddot{\theta}_1$$

$$+ \frac{1}{2}(-m_2l_1 - 2m_3l_2)\ddot{\theta}_2 = F - c_0\dot{x}_0 \quad (2)$$

$$\left(\frac{-m_1l_1}{2} - m_2l_1 - m_3l_1\right)\ddot{x}_0 + \left(\frac{m_1l_1^2}{4} + m_2l_1^2 + m_3l_1^2 + J_1\right)\ddot{\theta}_1$$

$$+ \left(\frac{m_2l_1l_2}{2} + m_3l_1l_2\right)\ddot{\theta}_2$$

$$= -c_1\dot{\theta}_1 - \frac{m_1l_1\theta_1g}{2} - m_2l_2\theta_1g - m_3l_1\theta_1g \quad (3)$$

$$\left(\frac{-m_2l_1}{2} - m_3l_2\right)\ddot{x}_0 + \left(\frac{m_2l_1l_2}{2} + m_3l_1l_2\right)\ddot{\theta}_1$$

$$+ \left(\frac{m_1l_1^2}{4} + m_2l_1^2 + m_3l_1^2 + J_2\right)\ddot{\theta}_2$$

$$= -c_2\dot{\theta}_2 - \frac{m_2l_2\theta_2g}{2} - m_3l_2\theta_2g \quad (4)$$

ค่าพารามิเตอร์ได้จากการทำ System identification
โดยความหมายและค่าต่างๆมีดังนี้

ตารางที่ 1 คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
m_0, m_1, m_2, m_3	มวล
l_1, l_2	ความยาวแกนลูกตุ้ม
c_0, c_1, c_2	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
J_1, J_2, J_3	โมเมนต์ความเฉื่อย

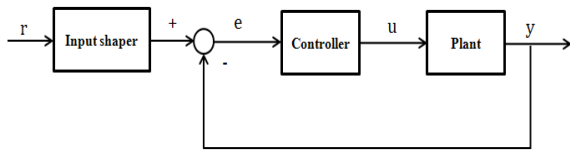
หมายเหตุ ตัวห้อย 0 หมายถึงรถ 1 หมายถึง
แกนลูกตุ้มบน 2 หมายถึง แกนลูกตุ้มล่าง และ
หมายถึง ลูกตุ้ม

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ต่างๆของระบบ

สัญลักษณ์	ปริมาณ
m_0	1.0 kg
m_1	0.3 kg
m_2	0.3 kg
m_3	0.2 kg
l_1	0.3 m
l_2	0.6 m
c_0	0.1 N·s/m
c_1	0.0011 N·s/m
c_2	0.0004 N·s/m
J_1	0.0034 kg·m ²
J_2	0.0117 kg·m ²
J_3	0.0010 kg·m ²

3. ทฤษฎีของเทคนิค Input shaping

เทคนิค Input shaping ได้นำเสนอโดย [2] เป็น
เทคนิคแบบ Feed forward ที่ใช้งานภายนอกของรอบ
การควบคุม (Loop) ซึ่งมีหลักการการทำงานคือ การสร้าง
อนุกรมของ Impulse ซึ่งเรียกว่า Input shaper จาก
การคำนวณตำแหน่งการเคลื่อนที่ (Position shaping)
ของระบบเชิงเส้น (Linear) มีการสั่นสะเทือนแบบ
อิสระ (Free vibration) และเป็นระบบแบบ
Underdamped หลังจากนั้นจะนำ Input shaper เข้า
ไปรวมกับสัญญาณควบคุมระบบ (Command) ผลที่
ได้จะเป็น Shaped command ที่ส่งเข้าไปในระบบ
ควบคุมแบบปิดซึ่งแสดงดังรูปที่ 4 เมื่อ r คือสัญญาณ
ควบคุม (Command), e คือ ค่าความผิดพลาดของ
ระบบ (Error), u คือ สัญญาณตัวควบคุม, y คือ
สัญญาณขาออกของระบบ (Output)

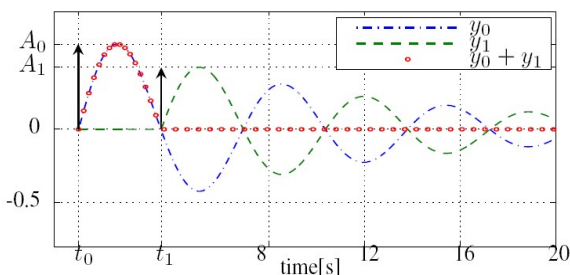


รูปที่ 4 แสดงวงจรการควบคุมระบบแบบปิด (Closed loop control)

เทคนิค Input shaping สามารถลดการสั่นสะเทือนของระบบได้ แม้ว่าจะระบบนั้นจะมีค่าความไม่แน่นอนของระบบอยู่ก็ตาม เช่นระบบที่มีลักษณะแบบยืดหยุ่น (Flexible systems) ก็สามารถลดการสั่นสะเทือนได้ ด้วยการเพิ่ม Constraint เข้าไปในระบบเพื่อทำให้ระบบเป็น Insensitivity [3]-[8],[10]-[12] สำหรับระบบหนึ่งองศาอิสระ ไม่มีแรงใด ๆ กระทำกับระบบและระบบมีความหน่วงนั้น จะมีผลตอบสนองของแรงกระตุ้นที่สำคัญคือ ที่มาจาก

$$y(t) = \left[A \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n(t-t_0)} \right] \sin \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} (t-t_0) \quad (7)$$

เมื่อ A คือแอมพลิจูด (Amplitude) ของแรงกระตุ้น, ω_n คือความถี่ธรรมชาติของระบบ, ζ คืออัตราหน่วงของระบบ, t คือเวลา, t_0 เวลาของแรงกระตุ้นที่จะป้อนเข้าไปในระบบ



รูปที่ 5 แสดงการป้อนแรงกระตุ้นและผลหลังจากแรงกระตุ้นที่สอง

จากรูปที่ 5 จะพิสูจน์ว่าแรงกระตุ้นที่สองสามารถหักล้างการสั่นที่เกิดจากแรงกระตุ้นที่หนึ่งได้หรือไม่ โดยอาศัยความสัมพันธ์ของตรีโกณมิติดังนี้

$$B_1 \sin(\alpha t + \Phi_1) + B_2 \sin(\alpha t + \Phi_2) = A_{amp} \sin(\alpha t + \varphi)$$

เมื่อ

$$A_{amp} = \sqrt{(B_1 \cos \Phi_1 + B_2 \cos \Phi_2)^2 + (B_1 \sin \Phi_1 + B_2 \sin \Phi_2)^2}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{B_1 \cos \Phi_1 + B_2 \cos \Phi_2}{B_1 \sin \Phi_1 + B_2 \sin \Phi_2} \right)$$

แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนสำหรับ Multi-impulse input หาได้โดย

$$A_{amp} = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^N B_j \cos \Phi_j \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^N B_j \sin \Phi_j \right)^2} \quad (8)$$

$$\Phi_j = \omega_n t_j \sqrt{1-\zeta^2}$$

B_j คือค่าสัมประสิทธิ์แอมพลิจูดของเทอม Sine ในสมการ (7) สำหรับแต่ละแรงกระตุ้นที่ N และ t_j คือเวลาที่เกิดแรงกระตุ้น การจัดการสั่นสะเทือนหลังการป้อนแรงกระตุ้นค่า A_{amp} จะเท่ากับ ศูนย์ ถ้าเป็นจริงเทอมกำลังสองของสมการ (8) ทั้ง 2 เทอมต้องเป็นศูนย์

$$B_1 \cos \Phi_1 + B_2 \cos \Phi_2 + \dots + B_N \cos \Phi_N = 0 \quad (9)$$

$$B_1 \sin \Phi_1 + B_2 \sin \Phi_2 + \dots + B_N \sin \Phi_N = 0 \quad (10)$$

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

เมื่อ A_j แอมพลิจูดของแรงกระตุ้นที่ N, t_j เวลาของแรงกระตุ้นที่ n, t_n คือเวลาของแรงกระตุ้นสุดท้าย สมการ (9) และ (10) สามารถจัดให้อยู่ในรูปอย่างง่ายคือ

$$\sum_{j=1}^N A_j e^{-\zeta\omega_n(t_N - t_j)} \sin \omega_n t_j \sqrt{1-\zeta^2} = 0 \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^N A_j e^{-\zeta\omega_n(t_N - t_j)} \cos \omega_n t_j \sqrt{1-\zeta^2} = 0 \quad (12)$$

การแยกประเภทของเทคนิค Input shaping มีดังนี้

3.1 Zero vibration (ZV)

Zero vibration (ZV) คือ เป็นการออกแบบ Input shaper ด้วย Impulse 2 ค่า และ Input shaping แบบ ZV เหมาะกับการใช้ในกรณีที่มีแบบจำลองทางพลศาสตร์มีความแม่นยำสูง ซึ่งการทำงานกับ

สัญญาณควบคุมของ Input shaping แบบ ZV มีเวลาหน่วง (Delay) เกิดขึ้นในระบบไม่มาก แต่ ZV มีความอ่อนไหว (Sensitivity) กับความไม่แน่นอนของแบบจำลองทางพลศาสตร์สูง [9] การคำนวณหาค่าแอมพลิจูด (Amplitude) และเวลาที่ Impulse แต่ละแรงกระทำต่อสัญญาณควบคุม (Command)

ขั้นตอนในการคำนวณ Input shaping แบบ ZV ใช้สมการที่ (11) และสมการที่ (12) มีดังต่อไปนี้

1. กำหนดจำนวน Impulse และค่าเริ่มต้น (Initial condition) $N = 2, t_1 = 0, \sum_{i=1}^N A_i = 1$

2. แทนค่าเริ่มต้นในสมการที่ (11) และ สมการที่ (12) จะได้สมการ (13) และ (14)

$$0 = A_1 + A_2 e^{\zeta \omega_n t_2} \cos \omega_n t_2 \sqrt{1-\zeta^2} \quad (13)$$

$$0 = A_2 e^{\zeta \omega_n t_2} \sin \omega_n t_2 \sqrt{1-\zeta^2} \quad (14)$$

สำหรับระบบที่มีสองแรงกระตุ้นกำหนดเงื่อนไขบังคับในสมการดังนี้

$$A_1 + A_2 = 1$$

ดังนั้น

$$0 = A_1 - (1 - A_1) e^{\zeta \omega_n t_2} \cos \omega_n t_2 \sqrt{1-\zeta^2}$$

$$A_1 = \frac{e^{\zeta \omega_n t_2} \cos \omega_n t_2 \sqrt{1-\zeta^2}}{1 + e^{\zeta \omega_n t_2} \cos \omega_n t_2 \sqrt{1-\zeta^2}}$$

$$A_2 = \frac{1}{1 + e^{\zeta \omega_n t_2} \cos \omega_n t_2 \sqrt{1-\zeta^2}}$$

แทนในสมการที่ (14)

$$0 = \left[\frac{1}{1 + e^{\zeta \omega_n t_2} \cos \omega_n t_2 \sqrt{1-\zeta^2}} \right] \sin \omega_n t_2 \sqrt{1-\zeta^2}$$

ดังนั้นสมการจะเป็น 0 ก็ต่อเมื่อ

$$\omega_n t_2 \sqrt{1-\zeta^2} = n\pi, \quad t_2 = \frac{n\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}$$

เมื่อ $n = 1$ จะได้

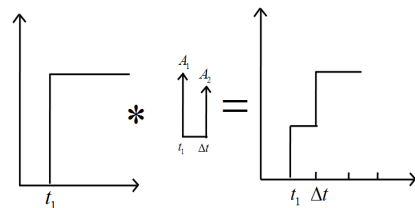
$$t_2 = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}$$

แทนค่าตัวแปล

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

จาก $\sum_{i=1}^N A_i = 1$ จะได้ $A_1 + A_2 = 1$ จะได้ค่าแอมพลิจูด (Amplitude) และ เวลาตั้งต่อไปนี้

$$\begin{pmatrix} A_1 = \frac{1}{K+1} & A_2 = \frac{K}{K+1} \\ t_1 = 0 & t_2 = \Delta t \end{pmatrix}$$



รูปที่ 6 แสดงการประยุกต์ใช้งานเทคนิค Input shaping แบบ ZV กับสัญญาณแบบ Step

3.2 Zero vibration and derivative (ZVD)

Zero vibration and derivative (ZVD) คือเทคนิค

Input shaping ที่ประกอบด้วยค่า Impulse 3 ซึ่ง

Constraint ที่ใช้คำนวณแบบ ZVD ได้มีการหา

Derivative จากสมการที่ (11) และ (12) เกี่ยวกับ

ความถี่ของระบบ (ω) สามารถได้ Constraint ที่

เรียกว่า Robustness uncertainties in Natural

frequency ซึ่งสามารถเพิ่ม Robustness ให้กับระบบ

ที่ส่งผลกับ Sensitivity ของความผิดพลาดใน

แบบจำลองทางพลศาสตร์ (Model error) แต่สิ่งที่ต้อง

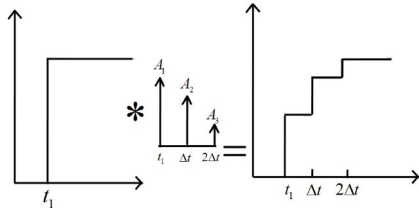
แลกมากับการลดกระสั่นสะเทือนคือค่าเวลาหน่วง

(Delay) ที่เพิ่มมากขึ้น และขั้นตอนในการคำนวณ

Input shaping แบบ ZVD คล้ายกับการคำนวณ Input

shaping แบบ ZV แต่เพิ่มสมการ Derivative ของสมการที่ (11) และของสมการที่ (12) อีก 2 สมการ เพื่อหาค่า A_1, A_2, A_3 และ Δt ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปร่างง่ายได้ตามสมการดังนี้

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



รูปที่ 7 แสดงการประยุกต์ใช้งานเทคนิค Input shaping แบบ ZVD กับสัญญาณแบบ Step

4. ผลการทดลอง

ผลการทดลองจากระบบจริงที่ได้จัดทำขึ้น ซึ่งมีขั้นตอนในการออกแบบดังนี้

4.1 การศึกษาผลตอบสนองของระบบ

การศึกษาผลตอบสนองของระบบว่าระบบมีเสถียรภาพหรือไม่ โดยดูจากตำแหน่งโพลของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ ซึ่งระบบลูกตุ้มสองแกนมีผลตอบสนองเชิงเวลาของระบบอันดับที่ 6 ซึ่งสามารถหาค่าตำแหน่งโพลและซีโรของระบบได้ดังตารางที่ 3 ตารางที่ 3 ค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนของแต่ละค่าโพล

ค่าโพล	ค่าความถี่ธรรมชาติ (rad/sec)	ค่าอัตราส่วน
0.000	0.00	-1.000
-0.167	0.167	1.000
-0.151 + 3.58i	3.58	0.042*
-0.151 - 3.58i	3.58	0.042*
-0.233 + 11.3i	11.30	0.0206*
-0.233 - 11.3i	11.30	0.0206*

หมายเหตุ * คืออัตราส่วนที่เลือกใช้

จากตารางที่ 3 ระบบมีค่าลักษณะเฉพาะอยู่บน LHP ดังนั้นระบบจึงมีเสถียรภาพ นำค่าตำแหน่ง

โพลที่ได้แทนค่าในฟังก์ชัน Under damped system ดังนี้ศึกษาเพิ่มเติมได้ที่ [13]

$$\text{อันดับที่ 1} \quad s + \frac{1}{\tau_1}, s + \frac{1}{\tau_2}$$

$$\text{อันดับที่ 2} \quad s^2 + 2\zeta_1\omega_1s + \omega_1^2, s^2 + 2\zeta_2\omega_2s + \omega_2^2$$

จะได้ค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนดังตาราง

4.2 การหาค่าแอมพลิจูดของ Impulse และช่วงของเวลา Impulse

สำหรับค่าความถี่ธรรมชาติที่ 3.58 (rad/sec) และมีอัตราส่วนที่ 0.042 สามารถคำนวณหาค่าแอมพลิจูดของ Impulse และช่วงของเวลาสำหรับการใช้ Impulse ได้ดังนี้

$$\left(\begin{array}{ccc} A_1 = 0.2841 & A_2 = 0.4978 & A_3 = 0.2181 \\ t_1 = 0 & t_2 = 0.8783 & t_3 = 1.7566 \end{array} \right)$$

สำหรับค่าความถี่ธรรมชาติที่ 11.30 (rad/sec) และมีอัตราส่วนที่ 0.0206 สามารถคำนวณหาค่าแอมพลิจูดของ Impulse และช่วงของเวลาสำหรับการใช้ Impulse ได้ดังนี้

$$\left(\begin{array}{ccc} A_1 = 0.2664 & A_2 = 0.4995 & A_3 = 0.2341 \\ t_1 = 0 & t_2 = 0.2781 & t_3 = 0.5562 \end{array} \right)$$

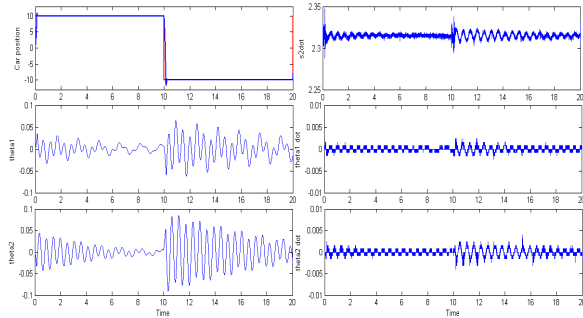
นำค่าแอมพลิจูดของ Impulse และช่วงของเวลา มาคูณกัน ซึ่งเรียกขั้นตอนนี้ว่า convolution impulse sequences

4.3 การศึกษาพฤติกรรมของระบบต่อการเพิ่มอัตราขยายสัญญาณ

การปรับค่าอัตราขยายสัญญาณของระบบเพื่อให้ระบบมีการตอบสนองตามความต้องการเป็นสิ่งที่ไม่หลีกเลี่ยงไม่ได้สำหรับการควบคุมแบบ PID การศึกษาพฤติกรรมของระบบต่อการเพิ่มอัตราขยายสัญญาณนั้นจะเป็นแนวทางในการเพิ่มอัตราขยายสัญญาณของการควบคุมระบบ ซึ่งสามารถศึกษาได้จากแผนภาพ Root locus พบว่าการเพิ่มอัตราขยายสัญญาณควบคุมระบบมากขึ้นจะส่งผลต่อตำแหน่งโพลให้เคลื่อนไปในทิศทางเพิ่มค่าจำนวนจินตภาพ (Imaginary) มากขึ้นแต่ค่าจำนวนจริง (Real) มีค่าคงที่ แสดงให้เห็นว่าระบบจะมีค่าความถี่ธรรมชาติของ

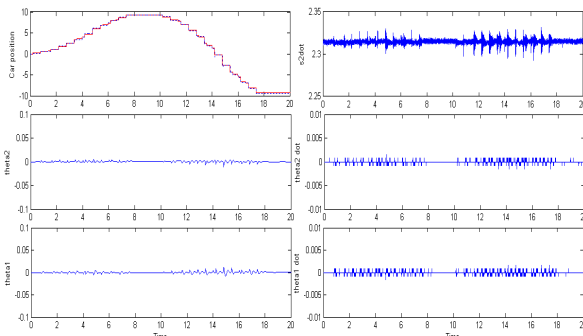
ระบบเพิ่มขึ้นแต่ค่าอัตราส่วนของระบบมีค่าลดลง จึงส่งผลให้ระบบมีการสั่นสะเทือนเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราการขยายของสัญญาณควบคุม

4.4 ผลการทดลองกับระบบจริง

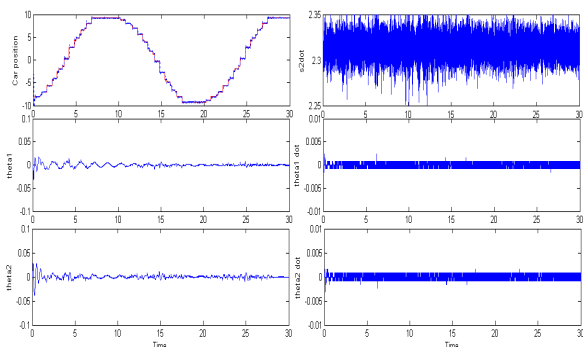


รูปที่ 12 แสดงผลตอบสนองของระบบจริงเมื่อปรับค่า $K_p = 10, K_i = 0, K_d = 0$

จากรูปภาพที่ 12 แสดงให้เห็นถึงการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของลูกตุ้ม



รูปที่ 13 แสดงผลตอบสนองของระบบจริงเมื่อปรับค่า $K_p = 10, K_i = 0, K_d = 0$ ที่ใช้เทคนิค Input shaping



รูปที่ 14 แสดงผลตอบสนองของระบบจริงเมื่อปรับค่า $K_p = 10, K_i = 0.1, K_d = 0$ ที่ใช้เทคนิค Input shaping

5. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาระบบพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของแกนที่เครื่องสองท่อนและการออกแบบตัวควบคุมแบบ P และตัวควบคุมแบบ PI เพื่อควบคุมระยะของการเคลื่อนที่ของแกนที่เครื่องนั้นยังขาดประสิทธิภาพทั้งด้านระยะของตัวรถที่มีการเกิดค่า Overshoot และการเกิดการสั่นสะเทือนขึ้นดังนั้นผู้วิจัยจึงนำเทคนิค Input shaping เข้ามาทำงานควบคู่กับตัวควบคุมแบบ P และตัวควบคุมแบบ PI เพื่อลดปัญหาการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในระบบ เมื่อทำการทดสอบโดยใช้เทคนิค Input shaping ทำงานควบคู่กับการควบคุมแบบ P และการควบคุมแบบ PI แล้วเปรียบเทียบกับการทำงานของระบบที่ใช้การควบคุมแบบ P และการควบคุมแบบ PI ที่ไม่ใช้เทคนิค Input shaping ผลปรากฏว่า การใช้เทคนิค Input shaping ทำงานควบคู่กับการควบคุมแบบ P และการควบคุมแบบ PI ทำให้ค่า Overshoot ที่เกิดขึ้นลดลงและการสั่นสะเทือนของระบบลดลง ด้านประสิทธิภาพของการทำงานของระบบนั้นการใช้เทคนิค Input shaping ทำงานควบคู่กับการควบคุมแบบ P มีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้เทคนิค Input shaping ทำงานควบคู่กับการควบคุมแบบ PI ซึ่งสามารถสังเกตได้จากค่า θ_1 และค่า θ_2

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Singhose, W. and Towell, S.T. (1998). Double-Pendulum Gantry Crane Dynamics and Control, pp. 1205-1209 In *IEEE International Conference on Control Applications*. 1-4 September 1998, Trieste, Italy.
- [2] Singer, N.C. and Seering, W.P. (1990). Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration, *ASME Journal of Dynamic Systems* 112: 76-81.

- [3] Cleary, K., Nguyen, L. and Frisch, H. (1992). A Demonstration of Vibration Reduction for A Flexible Beam Using Input Shaping, pp. 1711-1716 In *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 7-10 July 1992, Raleigh, North Carolina, USA.
- [4] Singhose, W., Singer, N. and Seering, W.P. (1995). Comparison of Command Shaping Methods For Reducing Residual Vibration. In *European Control Conference*. 5-8 September 1995, Rome, Italy.
- [5] Tuttle, D.T. and Seering, P.W. (1996). Creating Time-Optimal Commands for Systems with Denominator Dynamics, pp. 385-390. In *IEEE International Conference on Controls Applications*. Dearborn.
- [6] Singhose, W., Porter, L. and Seering, W.P. (1997). Input Shaped Control of a Planar Gantry Crane With Hoisting, pp. 97-100 In *The American Control*, Albuquerque, New Mexico, USA.
- [7] Kenison, M. and Singhose, W. (1999). Input Shaping Design for Double-Pendulum Planar Gantry Cranes, pp. 539-544 In *IEEE International Conference on Control Applications*. 22-27 August 1999, Kohala Coast-Island of Hawaii, Hawaii, USA.
- [8] Park, B.J., Hong, K.S. and Huh, W.D. (1999). Time-Efficient Input Shaping Control of Container Crane Systems, pp. 80-85 In *IEEE International Conference on Control Applications*. 25-27 September 2000, Anchorage, Alaska, USA.
- [9] Singh, T. and Singhose, W. (2002). Tutorial on Input Shaping/Time Delay Control of Maneuvering Flexible Structures, pp. 1717-1731 In *The American Control Conference*. 8-10 May 2002, Anchorage, Alaska, USA.
- [10] Steahlin, U. and Singh, T. (2003). Design of Close-Loop Input Shaping Controllers, pp. 5167-5172 In *The American Control Conference*. 4-6 June 2003, Denver, Colorado, USA.
- [11] Stergiopoulos, J., Manesis, S., Tzes, A. and Nikolakopoulos, G. (2005). Control via Input Shaping of a Pneumatic Crane System, pp. 545-550 In *The American Control Conference*. 8-10 June 2005, Portland, Oregon, USA.
- [12] Sorensen, K.L., Singhose, W. and Dickerson, S. (2007). A controller enabling precise positioning and sway reduction in bridge and gantry cranes. *ScienceDirect Journal of Control Engineering* 15: 825-835
- [13] สุวัฒน์ กุลชนปรีดา (2552). วิศวกรรมการควบคุมอัตโนมัติ. สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.