

การลดการแกว่งของระบบ สำหรับการควบคุมด้วยมือในการเคลื่อนที่ตามตำแหน่ง โดยวิธีปรับแต่งสัญญาณป้อนเข้า

Input shaping to Reduce Oscillatory Dynamics System of Manual Tracking Control

วรวิมล กังหัน^{1,2*}, วิจิต ฉัตรรัตนกุลชัย¹ และ ดำรงค์ศักดิ์ กิจเดชะ¹

¹ ห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสั่นสะเทือน (CRV Lab) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี นองแขม กรุงเทพฯ 10160

*ติดต่อ: yuyag_tm@hotmail.com, เบอร์โทรศัพท์: 083-3248057

บทคัดย่อ

ในการควบคุมระบบที่มีการแกว่งไปมาโดยใช้มนุษย์สั่งการ เพื่อต้องการควบคุมให้เคลื่อนที่ตามตำแหน่งที่กำหนดได้อย่างแม่นยำในกรณีที่ต้องการเคลื่อนย้ายสิ่งของจากตำแหน่งหนึ่งไปยังตำแหน่งหนึ่งปัญหาคือ เมื่อระบบมีการแกว่งไปมาทำให้ผู้สั่งการ ไม่สามารถควบคุมระบบไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้ และทำให้เกิดการผิดพลาดในการสังเกตการณ์ของผู้สั่งการเป็นผลทำให้ระบบมีการแกว่งอย่างรุนแรงและมีความยุ่งยากในการสั่งการ ส่งผลให้เกิดการเสียหายของสิ่งของที่ต้องการเคลื่อนย้ายได้ สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเพื่อลดการแกว่งของระบบโดยวิธีการปรับรูปร่างสัญญาณนำเข้า โดยใช้ความถี่ธรรมชาติ และอัตราส่วนความหน่วงของระบบ ในการออกแบบตัวปรับรูปร่างสัญญาณนำเข้า โดยได้สุ่มเส้นทางของเป้าหมายเพื่อไม่ให้ผู้สั่งการทราบก่อนล่วงหน้าเพื่อจำลองสถานการณ์โดยเปรียบเทียบผลความสามารถโดยใช้มนุษย์ในการสั่งการเพื่อให้เคลื่อนที่ตามเป้าหมายของระบบที่ใช้วิธีปรับรูปร่างสัญญาณนำเข้าและระบบที่ไม่ใช้วิธีปรับรูปร่างสัญญาณนำเข้าผลที่ได้พบว่าประสิทธิภาพในการใช้มนุษย์เป็นผู้สั่งการสำหรับวิธีปรับรูปร่างสัญญาณนำเข้าเพื่อลดการแกว่งของระบบ มีความสามารถในการสั่งการให้เคลื่อนที่ตามเป้าหมายได้ประสิทธิภาพ 90% ขึ้นไป และไม่ได้ใช้วิธีปรับรูปร่างสัญญาณนำเข้า มีความสามารถในการสั่งการให้เคลื่อนที่ตามเป้าหมายได้ประสิทธิภาพไม่เกิน 75% จากงานวิจัยสรุปว่าระบบที่ใช้วิธีปรับรูปร่างสัญญาณนำเข้า ได้ประสิทธิภาพที่ดี และลดความยุ่งยาก ของระบบที่มีมนุษย์เป็นผู้สั่งการควบคุม

คำหลัก: ระบบที่มีมนุษย์เป็นผู้สั่งการควบคุม, ระบบการแกว่ง, การปรับรูปร่างสัญญาณนำเข้า

Abstract

With an oscillatory dynamics system by human control .The oscillatory dynamics from one to another set position is when the system itself starts to oscillatory dynamics causing mistake in the observation and resulting in the oscillatory dynamics becomes too hectic damaging the object. This research is the study on the reduction of the oscillatory dynamics of the system. To design the input shaper, the natural frequencies and damping ratios are obtained from experiments. The tests were done to find the capability of the system and done to compare the result with that of the system without the input shaper design. Was found that the Tracking performance of the system with the input shaper improvement to accurately oscillatory dynamics to the set position was at 90%. The Tracking performance of the system is not design the input shaper improvement was not over 75%. Thus, it can be concluded that the system with the input design improvement is Tracking performance and task difficulty than the system without the improvement when control by human.

Keywords: Manual Control Tracking, Oscillatory Dynamics, Input shaping

1. บทนำ

ปั้นจั่นชนิดมีขาห้อยซักรอก (Gantry crane) เป็นอุปกรณ์สำคัญที่อำนวยความสะดวกในด้านการขนถ่ายวัสดุ มีหลายขนาดตามลักษณะการใช้งานเมื่อพิจารณาการทำงานของปั้นจั่นชนิดมีขาห้อยซักรอกพบว่าจะเกิดการแกว่งของตัวสายเคเบิล (Cable) ซึ่งการแกว่งของสายเคเบิล อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของส่วนขับเคลื่อนอาจส่งผลให้เกิดอุบัติเหตุระหว่างการปฏิบัติงานในส่วนของการทำงานเคลื่อนที่ของปั้นจั่นชนิดมีขาห้อยซักรอก ส่วนใหญ่ในงานอุตสาหกรรมจะใช้มนุษย์เป็นผู้ควบคุม และสิ่งที่ตามมาคือมนุษย์มีโอกาสเกิดการผิดพลาด เป็นสาเหตุทำให้เกิดอุบัติเหตุ และทำให้ชิ้นงานที่ต้องการเคลื่อนย้ายเสียหาย โดยการแกว่งของปั้นจั่นชนิดมีขาห้อยซักรอก เป็นผลทำให้ผู้ควบคุมสามารถควบคุมทำได้ยาก

ในงานอุตสาหกรรมตัวอย่างที่ต้องการความแม่นยำในการเคลื่อนย้ายสิ่งของเช่น อุตสาหกรรมเตาหลอมเหล็ก ต้องมีการใช้ปั้นจั่นชนิดมีขาห้อยซักรอก เป็นอุปกรณ์ในการเคลื่อนย้ายถ้ำเหล็ก และอุตสาหกรรมในการส่งของต้องมีการเคลื่อนย้ายตู้คอนเทนเนอร์ โดยอุตสาหกรรมตัวอย่างที่กล่าวมาข้างต้นนี้ ต้องมีการใช้งานปั้นจั่นชนิดมีขาห้อยซักรอก และสิ่งสำคัญคือต้องใช้มนุษย์เป็นผู้ควบคุมในเคลื่อนย้ายสิ่งของ ในงานที่ต้องการความแม่นยำในการควบคุมปั้นจั่นชนิดมีขาห้อยซักรอกนี้ เป็นสิ่งสำคัญอย่างมากสำหรับผู้ควบคุมสามารถควบคุมได้ง่ายและแม่นยำไปยังตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการเพื่อให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด



(a)



(b)

รูปที่ 1 ภาพอุตสาหกรรมตัวอย่าง (a) อุตสาหกรรมขนส่งตู้คอนเทนเนอร์ (b) อุตสาหกรรมเตาหลอมเหล็ก

การแก้ปัญหาดังกล่าวส่วนใหญ่เป็นการนำทฤษฎีการออกแบบระบบควบคุมที่ซับซ้อนมาใช้งาน ทั้งในส่วนของ การใช้วิธีการแบบปริภูมิสเตรจ เช่น การออกแบบระบบควบคุมแบบเชิงเส้น [1] หรือการนำตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุด [2] มาเสริมการทำงานเพื่อลดการแกว่งปั้นจั่นชนิดมีขาห้อยซักรอก นอกจากนี้ยังมีการนำทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้นมาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบ [3,4] แต่เป็นที่ทราบกันดีว่าทฤษฎีการออกแบบทั้งหมดที่กล่าวมาจำเป็นต้องใช้แบบจำลองที่แม่นยำ [5] ส่งผลให้ขั้นตอนการออกแบบระบบควบคุมดังกล่าวมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น และในกรณีที่ปั้นจั่น มีการบรรทุกสัมภาระ ค่าพารามิเตอร์ของระบบมีการเปลี่ยนแปลง ถ้าตัวควบคุมมีความทนทานไม่พออาจทำให้ระบบเกิดการทำงานผิดพลาดได้

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงสนใจเทคนิคอินพุตเซปปิง (Input-shaping) เนื่องจากเทคนิคนี้สามารถจัดการกับ การแกว่งในระบบได้ดี และการที่เทคนิคดังกล่าวมีลักษณะเป็น Feed forward control เทคนิคอินพุตเซปปิง จึงเหมาะกับการปรับปรุง ประสิทธิภาพการทำงานของปั้นจั่นชนิดมีขาห้อยซักรอก เนื่องจากตัวเทคนิคทางานภายนอกการควบคุม จึงสามารถนำเทคนิคนี้ไปทำงานร่วมกับตัวควบคุมเดิมของระบบได้ทันที โดยไม่ต้องติดตั้ง อุปกรณ์เพิ่มเติม ดังนั้นจึงสามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้อย่างมาก

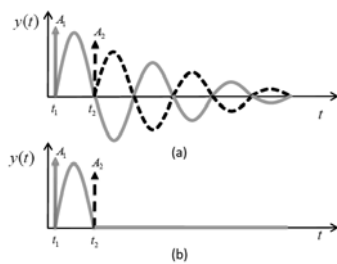
เทคนิคนี้ถูกคิดค้นโดย Singer และ Seering ในปี ค.ศ.1990 [6] ค่าพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ สำหรับการคำนวณคือ ค่าความถี่ธรรมชาติ (ω_n) และ ค่าอัตราส่วนความหน่วง (ζ) [7] จุดเด่นอีกประการ ของเทคนิคอินพุตเซปปิงคือ สามารถเพิ่มความ ทนทาน (Robustness) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติ และอัตราส่วนความหน่วงของระบบ ส่งผล ให้เทคนิคนี้

สามารถลดการแกว่งได้ทั้งสภาวะ การทำงานปกติ และสภาวะการบรรทุกน้ำหนัก

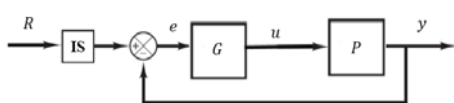
งานวิจัยกล่าวถึงพื้นฐานของเทคนิคอินพุตเซปปี้ง และการหา ค่าความถี่ธรรมชาติ,ระบบเสมือน และอัตราส่วนความหน่วง สำหรับการคำนวณ เทคนิคอินพุตเซปปี้ง ส่วนต่อไปสร้างชุดทดลองสำหรับการการควบคุม บันจันชนิดมีขาหยั่งจักรอก ส่วนสุดท้ายแสดงผลการทดลองพร้อมสรุปผลการทดลอง

2. พื้นฐานเทคนิคอินพุตเซปปี้ง

ส่วนนี้กล่าวถึงพื้นฐานของเทคนิคอินพุตเซปปี้ง เมื่อพิจารณาผลตอบสนองของแรงดลต่อระบบเชิงเส้น ที่เป็นระบบความหน่วงต่ำ มีองศาอิสระเป็นหนึ่ง และ ไม่มีแรงภายนอกมากระทำ ผลตอบสนองดังกล่าว สามารถแสดงได้ดัง รูปที่2(a) จากรูปพบว่าแรงดล และ สร้างผลตอบสนองเป็นรูปคลื่นไซน์ที่แอมพลิจูดลดลงแบบเลขชี้กำลัง จนสุดท้ายค่าแอมพลิจูด ิ่งเข้าสู่ศูนย์ จากรูปถ้าแรงดล มีขนาดที่เหมาะสม และคอนโวลูชันในเวลาที่ถูกต้อง การสั้นสะเทือนจะถูก ทักล้างกันสามารถแสดงได้ดัง รูปที่2(b)



รูปที่ 2 แสดงผลตอบสนองของระบบกับแรงดล



รูปที่ 3 แสดงระบบควบคุมแบบป้อนกลับกับเทคนิคอินพุตเซปปี้ง

เทคนิค Input shaping เป็นเทคนิคแบบ Feed forward ที่ทำการประยุกต์ใช้งานนอกloop (Loop) ของการควบคุม สามารถแสดงได้ดัง รูปที่ 3 เมื่อ R คือสัญญาณควบคุม (Command), e คือ ค่าความผิดพลาดของระบบ (Error), u คือ สัญญาณตัวควบคุม, y คือสัญญาณขาออกของระบบ (Output), G คือตัวควบคุม (controller), P คือระบบ (System) หรือ Plant จากภาพแสดงให้เห็นว่าสัญญาณควบคุมถูกรวมกับอนุกรม Impulse เป็น Shaped command ก่อนที่สัญญาณนี้ถูกส่งเข้าไปใน Loop ของการควบคุมแบบป้อนกลับ

หลักการทางานของเทคนิคอินพุตเซปปี้งคือปรับเปลี่ยนสัญญาณอ้างอิงใหม่โดยทา การคอนโวลูชัน (Convolution) ระหว่างแรงดลกับเวลาที่เหมาะสม ผลที่ได้คือ Shaped command โดย Input shaper แบบพื้นฐาน ที่ไม่มีการเพิ่มความหน่วงต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติ และอัตราส่วนความหน่วง เรียกได้ว่า Input shaper แบบ ZV (Zero vibration) คือ เป็นการออกแบบ Input shaper ประกอบด้วย Impulse 2 แรง และInput shaping ในแบบ ZV เหมาะกับการใช้ในกรณี ที่แบบจำลองทางพลศาสตร์มีความแม่นยำ สูงซึ่งการทำงานกับสัญญาณควบคุมของ Input shaping แบบ ZV มีเวลาหน่วง (Delay) เกิดขึ้นในระบบไม่มาก แต่ ZV มีความอ่อนไหว (Sensitivity) กับความไม่แน่นอนของแบบจำลองทางพลศาสตร์สูงการคำนวณหาค่าแอมปริจูด (Amplitude) และเวลาที่ Impulse แต่ละแรงกระทำ ต่อสัญญาณควบคุม (Command) โดยที่กำหนดค่าเริ่มต้น (Initial condition) ของการคำนวณดังนี้ $N = 2$ (จำนวน Impulse ที่กำหนดในการคำนวณ)

$t_1 = 0, A_1 = 1, \sum_{i=1}^{N=2} A_i = 1$ ผลรวมของจำนวนแอมปริจูด (Amplitude) ทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 1 จากทั้งหมดที่กล่าวมาได้ค่าแอมปริจูด (Amplitude) และ เวลาดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} A_1 = \frac{1}{K+1} & A_2 = \frac{K}{K+1} \\ t_1 = 0 & t_2 = \Delta t \end{bmatrix} \quad (1)$$

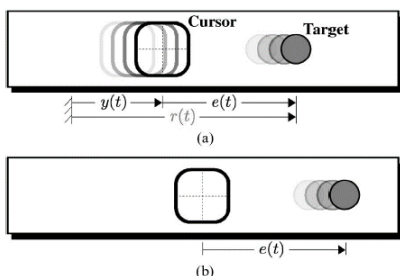
โดยที่ $K = e^{-\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}}$ และ $\Delta t = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}}$

จะได้ $A_1 + A_2 = 1$

การเพิ่มความทนทานให้กับตัวเทคนิคอินพุตเซปป์สามารถทำได้โดยการหาอนุพันธ์ย่อยเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วง สิ่งที่ได้มาคือจำนวนแรงดลมี 3 แรงดล สามารถเรียก อินพุตเซปป์ชนิดนี้ว่า Input shaper แบบ ZVD (Zero vibration derivative) ซึ่งค่าความทนทานต่อการเปลี่ยนค่าความถี่ธรรมชาติอยู่ที่ $\pm 15\%$ [8] ถ้า ระบบมีการเปลี่ยนแปลงสูงสามารถเพิ่มขีดจำกัดได้ โดยการหาอนุพันธ์เทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติ จะได้ Input shaping แบบ ZVDD ค่าความทนทานที่ได้จะ เพิ่มมาเป็น $\pm 25\%$ ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ธรรมชาติ

3. หลักการมนุษย์เป็นผู้ควบคุม

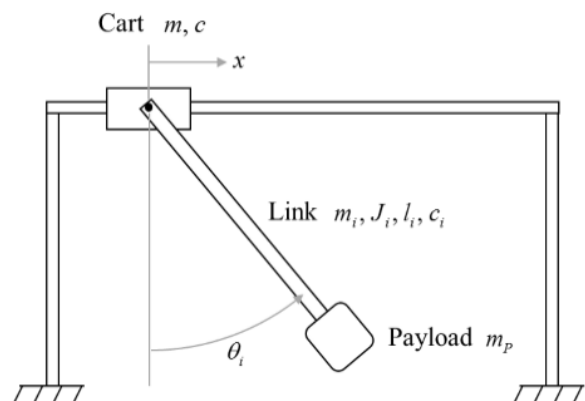
พฤติกรรมของมนุษย์ถือว่าเป็นระบบที่มีความซับซ้อน และไม่สามารถคาดเดาได้ในบางกรณี แต่ก็แสดงให้เห็นว่าสำหรับการควบคุมบางอย่าง พฤติกรรมของมนุษย์ค่อนข้างนิ่งและเกือบที่จะเป็นเชิงเส้นในส่วนของระบบที่ต้องการปรับปรุงการสั่งการโดยใช้การควบคุมด้วยมือ (Improving manual tracking) ก็ยังเป็นสิ่งที่ต้องการเป็นอย่างมากโดยสำหรับการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และลดความยุ่งยากสำหรับการควบคุมระบบที่มีความยืดหยุ่น



รูปที่ 4 ระบบที่มีการเคลื่อนที่ติดตามเป้าหมายสำหรับใช้มนุษย์เป็นผู้สั่งการ [9] a) แสดงการเคลื่อนที่ตามเป้าหมาย b) แสดงการเคลื่อนที่ตามเป้าหมายโดยมีการชดเชย

ในการควบคุมโดยมีมนุษย์เป็นผู้สั่งการใช้ Cursor เป็นตัวแทนของการควบคุมของมนุษย์ และ Target คือตำแหน่งเป้าหมายสำหรับการติดตาม, $y(t)$ การเคลื่อนที่ของ Cursor ไปยังตำแหน่งเป้าหมาย, $r(t)$ เส้นกำหนดทางเดินของตำแหน่งเป้าหมาย และ $e(t)$ ความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งที่มนุษย์ควบคุมเมื่อเทียบกับเป้าหมาย ในการควบคุมโดยมีมนุษย์เป็นผู้สั่งการนั้น อาจเกิดความผิดพลาดมาจากสองส่วนคือ ส่วนแรกเกิดจากตัวผู้สั่งการเองไม่มีความชำนาญสำหรับการควบคุม นั้นๆทำให้เกิดความผิดพลาดดังกล่าว ส่วนที่สองเกิดจากระบบที่มนุษย์เป็นผู้ควบคุมนั้นมีความยุ่งยากทำให้เกิดความผิดพลาด สำหรับการปรับปรุงระบบที่มีการควบคุมโดยมีมนุษย์เป็นผู้สั่งการนั้นจะเป็นการศึกษาเพื่อต้องการปรับปรุงระบบให้เคลื่อนที่ตามเป้าหมายได้อย่างรวดเร็วและมีความแม่นยำในการเคลื่อนที่

4. สมการแบบจำลองของบั้งจันชนิดมีขาห้อยชักรอก



รูปที่ 5 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของบั้งจันชนิดมีขาห้อยชักรอก

ตารางที่ 1 ตารางค่าพารามิเตอร์ของ pendulum-cart

Parameter	Description	Values
l_i	Link length	0.2825 m
m_i	Link mass	0.18 kg
J_i	Link mass moment of inertia about C.G.	0.00478 kg-m ²
c_i	Link viscous damping constant	0.00023517 kg-s ⁻¹
m, m_p	Cart mass, payload mass	2.28 kg, 0 kg
c	Cart viscous damping constant	11.278 kg-s ⁻¹
R, L_m, k_r, k_f, k_a	Motor coil resistance, motor coil inductance, back-EMF constant, current-to-push force gain, amplifier gain	100, 0.01, 0.01, 2000, 9.6

โดยในการเคลื่อนที่ของ pendulum และ cart มีการเคลื่อนที่โดยเมื่อ cart มีการเคลื่อนที่ที่เดินหน้าหรือถอยหลัง โดยการ pendulum จะเกิดการสั่นสำหรับการเคลื่อนที่ของ pendulum และ cart ถือว่าเป็นการเคลื่อนที่ที่สัมพันธ์กัน โดยเมื่อระยะทางของ cart (x) เคลื่อนที่ ทำให้ก้าน pendulum (θ) แกว่ง

$$(m + m_i + m_p)\ddot{x} + (m_i + 2m_p)l_i\ddot{\theta}_i + c\dot{x} = F \quad (2)$$

$$(m_i + 2m_p)l_i\ddot{x} + ((m_i + 4m_p)l_i^2 + J_i)\ddot{\theta}_i + c_i\dot{\theta}_i + (m_i + 2m_p)gl_i\theta_i = 0, i = 1, 2, 3. \quad (3)$$

$$\frac{\theta}{X} = -\frac{(m_i + 2m_p)l_i s^2}{((m_i + 4m_p)l_i^2 + J_i)s^2 + c_i s + (m_i + 2m_p)gl_i} \quad (4)$$

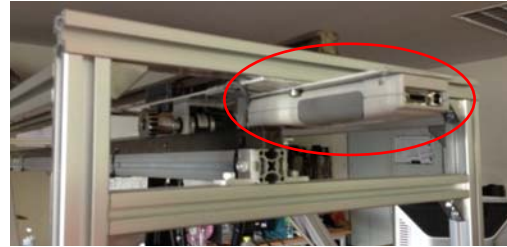
$$(5)$$

$$\frac{X}{F} = \frac{1}{(m + m_i + m_p)s^2 + cs + \left[\frac{(m_i + 2m_p)l_i s^2 (m_i + 2m_p)l_i s^2}{((m_i + 4m_p)l_i^2 + J_i)s^2 + c_i s + (m_i + 2m_p)gl_i} \right]}$$

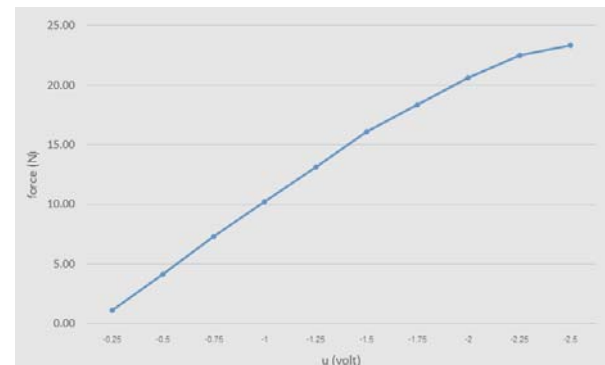
$$\frac{F}{U} = \frac{k_a k_f}{R} \quad (6)$$

โดยที่สมการ (4) คือสมการถ่ายโอนการเคลื่อนที่ของระบบเมื่ออินพุตระยะทางการเคลื่อนที่ของ cart และเอาต์พุตคือองศาการแกว่งของ pendulum เมื่อระบบมีการเคลื่อนที่ สมการ (5) คือสมการถ่ายโอนการเคลื่อนที่ของระบบเมื่ออินพุต คือแรงผลักรของ cart มีหน่วยของนิวตัน และ เอาต์พุต คือระยะทางการเคลื่อนที่ของ cart

สมการ (6) สมการถ่ายโอนเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากับแรงผลักรสำหรับการเคลื่อนที่ของ cart



(a)

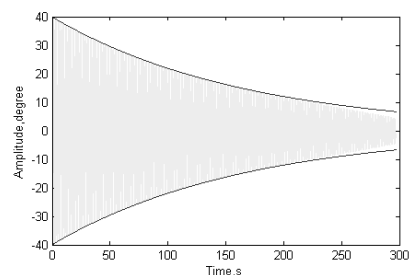


(b)

รูปที่ 6 (a) อุปกรณ์สำหรับการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากับแรงผลักรของ cart (b) กราฟเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากับแรงผลักรของ cart

4.1 การหาค่าความถี่ธรรมชาติ และอัตราส่วนความหน่วง ของแบบจำลองอันดับสามเชิงซ้อน

การหาช่วงความถี่ธรรมชาติของระบบโดยการให้ปัญหาค่าเริ่มต้นให้ Pendulum เริ่มต้นที่ 40 องศาของการแกว่งแล้วทำการปล่อยให้ Pendulum แกว่งเพื่อบันทึกผลแล้วนำมาวิเคราะห์หาค่า ความถี่ธรรมชาติ (ω_n) และ ค่าอัตราส่วนความหน่วง (ξ)



รูปที่ 7 การทดลองเก็บค่าการแกว่งของ Pendulum

$$E(t) = Ae^{(-\zeta\omega_n t)} \quad (7)$$

โดยที่ $\theta = 40^\circ = 0.6981 \text{ rad}$

$$E(t) = 0.6981e^{(-0.006t)} \quad (8)$$

$$\zeta\omega_n = 0.006 \quad (9)$$

$$\zeta = \frac{0.006}{2\pi f_n} \quad (10)$$

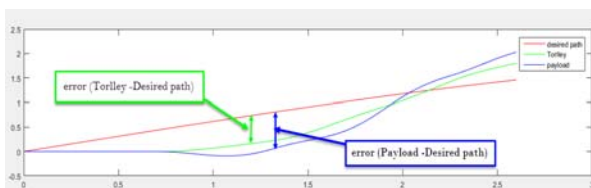
โดยที่ $f_n = 0.8$

จากการทดลองดังกล่าวก็จะได้ค่าความถี่ธรรมชาติ ($\omega_n = 5.0420 \text{ rad/s}$) และ ค่าอัตราส่วนความหน่วง ($\zeta = 0.00119$)

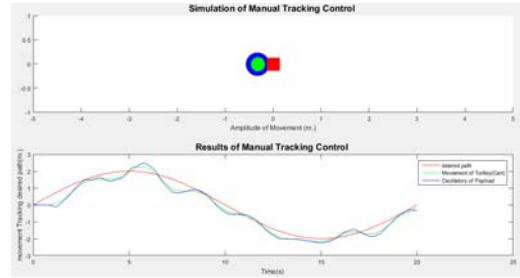
5. การทดลอง

การทดลองผลสำหรับงานวิจัยนี้เป็นการเปรียบเทียบการบังคับการจำลองของคอนกรีตจริงโดยการเปรียบเทียบผลการควบคุมโดยใช้นุขย์เป็นผู้สั่งการเป็นเทียบ ไม่ใช่เทคนิคอินพุตเซปป์, ใช้ ZV-Input shaper และ ZVD-Input shaper เพื่อดูประสิทธิภาพการควบคุมของมนุษย์ โดยใช้เวลาในการควบคุม 20 วินาที โดยแสดงประสิทธิภาพโดยใช้ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean square , เขียนย่อ RMS) ดังสมการที่ 11 โดยมีการจำลองการควบคุมคอนกรีต ดังภาพที่ 9, 10 (a, 10(b)

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N error_i^2} \quad (11)$$



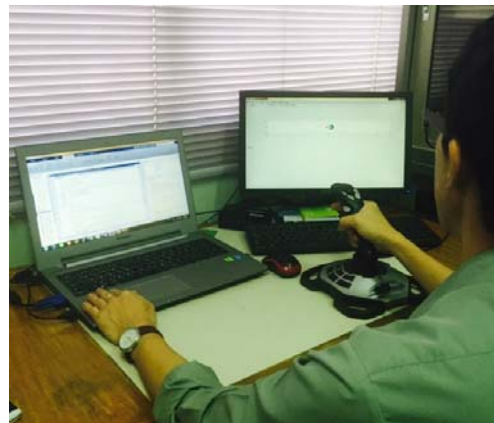
รูปที่ 8 ความผิดพลาดเมื่อเทียบกับเส้นอ้างอิง



รูปที่ 9 หน้าต่างแบบจำลองการควบคุมคอนกรีตจริง



(a)



(b)

รูปที่ 10 ภาพอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

โดยการทดลองใช้กลุ่มตัวอย่างเป็นผู้ที่ปฏิบัติงานทางด้านทางควบคุมคอนกรีตมาเบื้องต้นจำนวนทั้งหมด 15 คน เพื่อศึกษาพฤติกรรมกรรมการควบคุมโดยแยกผลการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ส่วนที่ 1 การควบคุมโดยใช้นุขย์เป็นผู้สั่งการและไม่ใช่เทคนิคอินพุตเซปป์ ส่วนที่ 2 การควบคุมโดยใช้นุขย์เป็นผู้สั่งการและใช้การควบคุม ZV-Input shaper ส่วนที่ 3 การควบคุมโดยใช้นุขย์เป็นผู้สั่งการและใช้การควบคุม ZVD-Input shaper สำหรับการจำลองเส้นทางเดิน (desired path) เพื่อให้ผู้ทดลองได้ทำการควบคุมให้เคลื่อนที่ตามแบบจำลอง sine wave

ตั้งสมการที่ 12 และ 13 เพื่อหาค่าประสิทธิภาพของการเคลื่อนที่ตามตำแหน่งโดยใช้ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean square)

$$r(t) = 2\sin(\omega t + \phi) \quad (12)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (13)$$

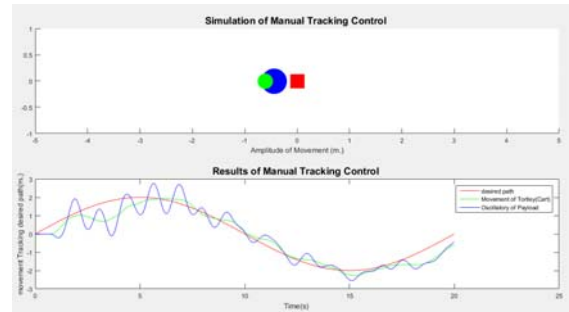
โดยที่ $t = 0 - 20s, f = 0.05\text{rad} / s, \phi = 0^\circ$

6. ผลการทดลอง

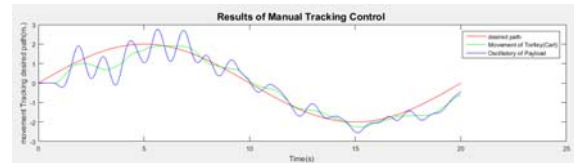
จากการทดลองการควบคุมโดยใช้มนุษย์เป็นผู้สั่งการจำนวน 15 คน (MC1-15) โดยผลการทดลองใช้ desired path เป็นตำแหน่งอ้างอิงเพื่อให้มนุษย์เป็นผู้ควบคุมให้ Trolley (cart) เคลื่อนที่แล้วส่งผลให้ Payload เคลื่อนที่ตามผู้ควบคุมจะพยายามควบคุมให้ Payload เคลื่อนที่ตามตำแหน่ง desired path โดยการสั่งเกิดของมนุษย์จะแทนการป้อนกลับของความผิดพลาด โดยผู้ควบคุมจะพยายามควบคุมให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับตำแหน่ง desired path

ตารางที่ 2 ตารางผลการทดลองประสิทธิภาพโดยใช้ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) เพื่อแสดงค่าความผิดพลาดโดยการควบคุมโดยใช้มนุษย์เป็นผู้สั่งการ

	ZV-MC		ZVD-MC		Unshaped-MC	
	Cart	Payload	Cart	Payload	Cart	Payload
MC-1	0.4950	1.4040	1.1050	1.4056	2.7788	3.3524
MC-2	0.3332	1.4028	0.5263	1.4032	1.0692	3.0871
MC-3	0.7438	1.4021	0.6147	1.4050	0.8456	3.6813
MC-4	0.4962	1.3997	0.5955	1.4077	0.7778	3.2999
MC-5	0.647	1.3998	0.7358	1.3974	0.6402	1.5411
MC-6	0.6548	1.3562	0.5694	1.3956	0.7628	3.2999
MC-7	0.7452	1.5698	0.5564	1.4587	0.7778	3.8532
MC-8	0.4523	1.4456	0.6215	1.3485	0.6523	3.2156
MC-9	0.5214	1.5987	0.5689	1.4569	0.5697	3.5842
MC-10	0.5982	1.5692	0.5897	1.4856	1.7264	2.5411
MC-11	0.4782	1.5674	0.6251	1.3954	0.5564	3.0871
MC-12	0.3526	1.4597	0.5791	1.4792	0.5684	3.8569
MC-13	0.5124	1.5692	0.5897	1.3659	0.6952	3.6578
MC-14	0.4123	1.5846	0.5742	1.3564	0.7854	3.3524
MC-15	0.4785	1.4568	0.5698	1.5485	0.9645	3.6973
SD-MC	0.1265	0.0865	0.1400	0.0547	0.5848	0.5911
Average-MC	0.5281	1.4790	0.6281	1.4206	0.9447	3.2738



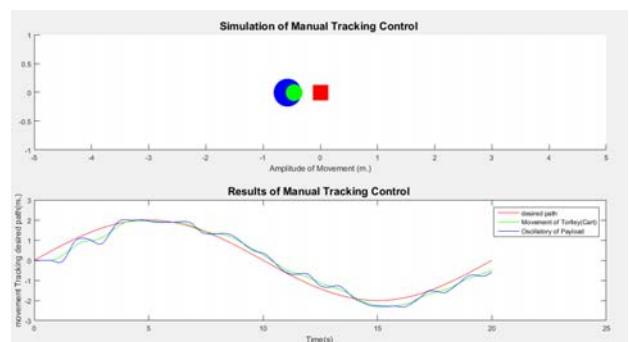
(a)



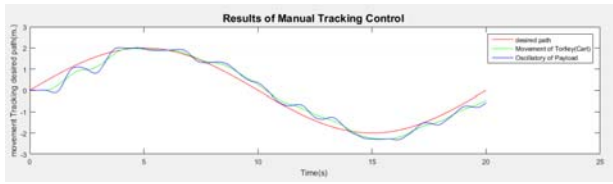
(b)

รูปที่ 10 a) ตัวอย่างหน้าตาการควบคุมโดยใช้มนุษย์เป็นผู้สั่งการและไม่ใช่เทคนิคอินพุตเซปปีง b) ผลการทดลองควบคุมโดยใช้มนุษย์เป็นผู้สั่งการและไม่ใช่เทคนิคอินพุตเซปปีง

จากผลการทดลอง รูปที่ 10(b) การควบคุมโดยใช้มนุษย์เป็นผู้สั่งการ (MC1-15) โดยไม่ใช่เทคนิคอินพุตเซปปีง ความสามารถในการควบคุมให้เคลื่อนที่ตามเส้น desired path จากการควบคุมจะเห็นว่าผลการแกว่งของ Payload ที่เกิดขึ้นจะเกิดมากส่งผลให้ผู้ควบคุมสั่งการไม่สามารถควบคุม Payload ให้เคลื่อนที่ตามตำแหน่งที่กำหนดได้โดยผลการทดลองใช้ผู้ควบคุม 15 คน (MC1-15) ได้ผลการทดลอง RMS เท่ากับ 0.5911



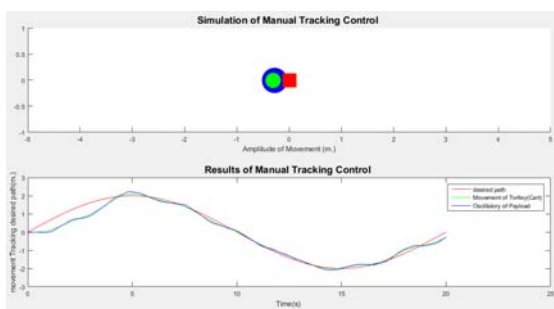
(a)



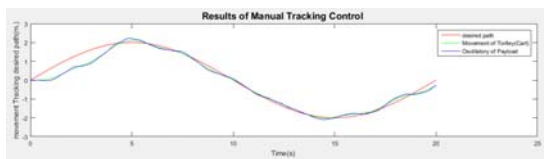
(b)

รูปที่ 11 a) หน้าต่างการควบคุมโดยใช้มนุษย์เป็นผู้สั่งการ และใช้การควบคุม ZV-Input shaper b) ผลการควบคุมโดยใช้มนุษย์เป็นผู้สั่งการและใช้การควบคุม ZV-Input shaper

จากผลการทดลอง รูปที่ 11(b) การควบคุมโดยใช้มนุษย์เป็นผู้สั่งการ (MC1-15) โดยใช้งานร่วมกับเทคนิคการควบคุม ZV-Input shaper ความสามารถในการควบคุมเพื่อให้เคลื่อนที่ตามเส้น desired path จากการควบคุมจะเห็นว่าผลการแกว่งของ Payload ที่เกิดขึ้นลดลงอย่างมากแต่ในการควบคุมบางช่วงยังมีการแกว่งแต่ยังอยู่ในสถานะที่ผู้สั่งการยังถือว่าควบคุมได้ ส่งผลให้ผู้ควบคุมสั่งการสามารถควบคุม Payload ให้เคลื่อนที่ตามตำแหน่งที่กำหนด โดยผลการทดลองใช้ผู้ควบคุม 15 คน (MC1-15) ได้ผลการทดลองได้ RMS เท่ากับ 0.0865



(a)



(b)

รูปที่ 12 a) หน้าต่างการควบคุมโดยใช้มนุษย์เป็นผู้สั่งการ และใช้การควบคุม ZVD-Input shaper b) ผลการ

ควบคุมโดยใช้มนุษย์เป็นผู้สั่งการและใช้การควบคุม ZVD-Input shaper

จากผลการทดลอง รูปที่ 12(b) การควบคุมโดยใช้มนุษย์เป็นผู้สั่งการ (MC1-15) โดยใช้งานร่วมกับเทคนิคการควบคุม ZVD-Input shaper ความสามารถในการควบคุมเพื่อให้เคลื่อนที่ตามเส้น desired path จากการควบคุมจะเห็นว่าผลการแกว่งของ Payload ที่เกิดขึ้นลดลงอย่างมากแทบจะเคลื่อนที่ตามตำแหน่งของ Trolley (cart) แต่ในการควบคุมบางช่วงยังมีการแกว่งแต่ยังอยู่ในสถานะที่ผู้สั่งการยังถือว่าควบคุมได้ดีอย่างมาก เมื่อเทียบกับทั้งสองวิธีที่กล่าวไว้ข้างต้น ส่งผลให้ผู้ควบคุมสั่งการสามารถควบคุม Payload ให้เคลื่อนที่ตามตำแหน่งที่กำหนด โดยผลการทดลองใช้ผู้ควบคุม 15 คน (MC1-15) ได้ผลการทดลองได้ RMS เท่ากับ 0.0547 เมื่อเทียบกับทั้งสองวิธีแล้วถือว่า การควบคุมโดยใช้มนุษย์เป็นผู้สั่งการและใช้การควบคุม ZVD-Input shaper สามารถควบคุมได้เป็นอย่างดีเมื่อสังเกตจากค่า RMS ที่ลดลง

7. อภิปรายผล

จากผลการทดลองพบว่า การควบคุมสั่งการโดยมนุษย์เป็นผู้สั่งการหลังการลดการแกว่งของระบบแล้วมีการควบคุมที่มีประสิทธิภาพดีขึ้นจากการดูจากค่า RMS ที่เกิดขึ้นโดยผลการทดลอง ควบคุมโดยใช้มนุษย์เป็นผู้สั่งการและใช้การควบคุม ZV-Input shaper และ ZVD-Input shaper สามารถทำให้ผู้สั่งการที่เป็นมนุษย์สามารถควบคุมให้เคลื่อนที่ตามเป้าหมายได้ดีเมื่อเทียบกับระบบไม่ได้ลดการแกว่งของระบบแต่อย่างไรก็ตามพฤติกรรมของการควบคุมของมนุษย์ก็ยังคงเป็นสิ่งที่ไม่แน่นอน และในบางกรณีก็ไม่สามารถเดาพฤติกรรมได้ทำให้การออกแบบระบบยังคงต้องศึกษาต่อไปเพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับระบบที่ใช้มนุษย์เป็นผู้สั่งการ

8. 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] l-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 boptimal delay extraction algorithm using adaptive time delay 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.
- [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, and pp.153-168.
- [9] J. J. Potter and W. Singhose, 2013, Improving manual tracking of systems with oscillatory dynamics, IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 46–52
- [10] J. J. Potter and W. Singhose, 2012, using manual tracking performance to tune a specified-negative-amplitude input shaper, IEEE SMC, 1503–1508.
- [11] J. J. Potter and W. E. Singhose, 2015, Design and human-in-the-loop testing of reduced-modification input shapers, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1–8