

การควบคุมระยะไกลที่มีเวลาหน่วงโดยใช้ตัวแปรคลื่น Teleoperation Control with Time Delay using Wave Variables

วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ และ ธงชัย วินิจกำธร

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330 โทร 0-2218-6610-1 โทรสาร 0-2252-8889

E-Mail: Viboon.S@eng.chula.ac.th , reverserp@eng.chula.ac.th

Viboon Sangveraphunsiri and Thongchai Vinijkomthon

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

Phyathai Road, Patumwan, Bangkok 10330

E-Mail: Viboon.S@eng.chula.ac.th , reverserp@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมระบบที่มีตัวหน่วงเวลา โดยใช้วิธีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่นโดยอิงจากความอิสระเท่ากับ 2 ซึ่งการควบคุมด้วยวิธีนี้จะทำให้พลังงานของหุ่นมาสเตอร์ที่ส่งให้กับหุ่นสเลฟ มีค่ามากกว่าพลังงานที่หุ่นสเลฟส่งกลับมายังหุ่นมาสเตอร์ หรือเรียกว่าทำให้ระบบเป็นพาสซีฟ(Passive) จากนั้นผลต่างของพลังงานส่งจากหุ่นมาสเตอร์ไปยังหุ่นสเลฟกับพลังงานที่หุ่นสเลฟส่งให้หุ่นมาสเตอร์จะค่อยๆลดลงจนเป็นศูนย์ นั่นคือระบบจะมีความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวเข้าใกล้ศูนย์ การทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ทำการทดลองโดยสร้างระบบเสมือน(Simulation System) แล้วทำการควบคุมระบบที่มีตัวหน่วงเวลาไม่คงที่มีค่าตัวหน่วงเวลาอยู่ 400 ถึง 1000 มิลลิวินาที โดยใช้วิธีควบคุมแบบสัดส่วนกับแบบอนุพันธ์ร่วมกับวิธี Wave variables ส่วนที่ 2 ทำการควบคุมหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟ โดยควบคุมระบบที่มีตัวหน่วงเวลาไม่คงที่มีค่าตัวหน่วงเวลาอยู่ระหว่าง 320 ถึง 400 มิลลิวินาที โดยใช้วิธีควบคุมแบบสัดส่วนกับแบบอนุพันธ์ร่วมกับวิธี Wave variables ซึ่งผลจากการควบคุมของหุ่นมาสเตอร์กับมุมของหุ่นสเลฟในระบบเสมือน พบว่าค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ส่วนในการทดลองจริงพบว่าค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวของระบบการควบคุมของข้อต่อน้อยกว่า 0.8 องศา และค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวของระบบการควบคุมตำแหน่ง (X, Y) พบว่าค่าความผิดพลาดตามแนวแกน X น้อยกว่า 1.9 มิลลิเมตรและค่าความผิดพลาดตามแนวแกน Y น้อยกว่า 1.7 มิลลิเมตร

คำหลัก เวลาหน่วง, ตัวแปรคลื่น

Abstract

This research describes the teleoperation control with time delay using PD Controller and Wave variables. Control of master-slave robot with 2 degree of freedom is based on the concept of "the

control system will be passive when the power from master robot to slave robot is more than the power from slave robot to master robot". And then the difference of the power from master robot to slave robot and the power from slave robot to master robot will decrease to be zero. The experiments have 2 parts. Part1 : The simulation system with round time delay 400 ms to 1000 ms is controlled by PD Controller and Wave variables. Part2 : The experiment by master-slave robot with round time delay 320 ms to 400 ms is controlled by PD Controller and Wave variables. The results of simulation system show that the steady state error decreases to zero. The steady state error of the joint space and cartesian space control in X and Y directions are less than 0.8 degree and less than 1.9 mm in X-direction and 1.7 mm in Y-direction, respectively.

Keywords: Time delay, Wave variable

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการนำระบบควบคุมมาใช้กับงานต่างๆมากมาย ระบบควบคุมระยะไกลเป็นอีกระบบหนึ่งซึ่งมีการค้นคว้าและวิจัยอย่างต่อเนื่องเพื่อนำไปใช้ในงานต่างๆ เช่น การสำรวจใต้ทะเลลึก การเข้าไปสำรวจยังพื้นที่ที่อันตราย การใช้ประโยชน์ทางด้านการแพทย์ เป็นต้น แต่ระบบควบคุมระยะไกล จะมีค่าตัวหน่วงเวลาแบบเปลี่ยนแปลงและตัวแปรไม่ทราบค่าเกิดขึ้น ซึ่งอาจทำให้ระบบอาจไม่เสถียรภาพได้ ดังนั้นจึงมีการพยายามหาวิธีการควบคุมระบบที่มีค่าตัวหน่วงเวลาแบบเปลี่ยนแปลงให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ

ระบบควบคุมระยะไกลเป็นระบบหนึ่งที่มีค่าตัวหน่วงเวลาทำให้ระบบไม่เสถียรภาพได้ วิธีการควบคุมระบบที่มีตัวหน่วงเวลามีหลายวิธี เช่น 1. a time forward observer developed for a supervisory

control over the Internet by Brady and Tarn 2. a position-based force-feedback scheme implemented by Oboe and Fiorini และ 3.a wave variable based technique developed by Niemeyer and Slotine และ S.Munir and W.Book ซึ่งทั้งสามวิธีนี้สามารถชดเชยผลของตัวหน่วงเวลาที่เกิดขึ้นในระบบได้ แต่สองวิธีแรกนั้นต้องการรู้ค่าตัวแปรที่อยู่ในระบบควบคุมระยะไกล ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ส่วนใหญ่ไม่สามารถหาค่าที่ถูกต้องได้ ดังนั้นเสถียรภาพของระบบในสองวิธีแรกนั้นจะขึ้นอยู่กับว่าสามารถหาค่าตัวแปรต่างที่อยู่ในระบบควบคุมระยะไกลได้แม่นยำเท่าใด ส่วนวิธีที่สามนั้นไม่ต้องทราบค่าของตัวแปรเหล่านี้ ก็สามารถทำการควบคุมระบบควบคุมระยะไกลได้ ซึ่งบทความนี้ใช้วิธีการควบคุมแบบ wave variable เพื่อเป็นพื้นฐานในการควบคุมระยะไกลผ่านระบบอินเตอร์เน็ตหรืออุปกรณ์ไร้สายอื่นๆ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง Wave Variables และ Stability for a Varying Delay

2.1 Wave Variables

พิจารณาระบบระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 1 แบบ bilateral teleoperation โดยคิดว่าหุ่นยนต์มาสเตอร์กับสเลฟมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 1 (1-DOF) เหมือนกันจะสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ที่ได้นี้

$$J_m \ddot{\theta}_m + b_m \dot{\theta}_m = \tau_m \quad (1)$$

โดยที่ J_m คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของแครง (crank inertia)

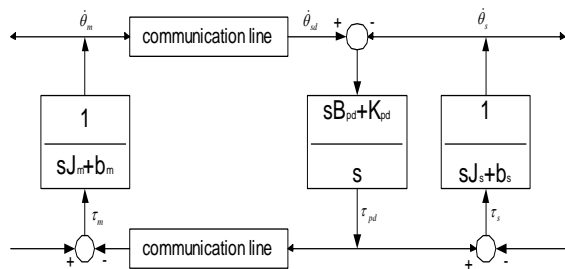
b_m คือ ค่าแดมปีงของแครง (crank damping)

$\ddot{\theta}_m$ คือ ค่าความเร่งเชิงมุมของแครง (crank acceleration)

$\dot{\theta}_m$ คือ ค่าความเร็วเชิงมุมของแครง (crank velocity)

τ_m คือ ค่าแรงบิดที่กระทำ (applied torque)

ตัวห้อย "m" คือ มาสเตอร์ และ ตัวห้อย "s" คือ สเลฟ



รูปที่ 1 ระบบระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 1 แบบ bilateral teleoperation

จากรูปที่ 1 τ_{pd} คือ แรงบิดที่ได้จากตัวควบคุมแบบสัดส่วนกับแบบ

อนุพันธ์ (PD controller)

B_{pd} คือ ค่าเกนของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (derivative gain)

K_{pd} คือ ค่าเกนของตัวควบคุมแบบสัดส่วน (proportional gain)

$$\tau_m = -\tau_{pd} \quad (2)$$

$$\tau_s = \tau_{pd} \quad (3)$$

$$\tau_{pd} = K_{pd}(\theta_m - \theta_s) + B_{pd}(\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_s) \quad (4)$$

จากรูปที่ 1 ระบบจะมีประสิทธิภาพในการควบคุม เมื่อระบบไม่มีตัวหน่วงเวลา แต่เมื่อมีค่าตัวหน่วงเวลาของระบบเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการควบคุมระบบจะลดลงและระบบจะไม่เสถียรภาพอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเกิดสถานะนอนพาสซีฟ (nonpassive) ขึ้นในสายที่ใช้ในการติดต่อสื่อสาร (communication line) ซึ่งกำลังงานในสายที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารสามารถเขียนได้ดังนี้

$$P_{in} = \dot{\theta}_m^T \tau_m - \dot{\theta}_{sd}^T \tau_{pd} \quad (5)$$

ทำการแปลงรูปสมการเพื่อให้แรงบิด และ ความเร็วเชิงมุมแยกออกจากกัน โดยวิธี Wave transformation ดังนี้

$$u_m(t) = A_w \dot{\theta}_m(t) + B_w \tau_m(t) \quad (6)$$

$$v_s(t) = C_w \dot{\theta}_{sd}(t) - D_w \tau_{pd}(t) \quad (7)$$

$$v_m(t) = C_w \dot{\theta}_m(t) - D_w \tau_m(t) \quad (8)$$

$$u_s(t) = A_w \dot{\theta}_{sd}(t) + B_w \tau_{pd}(t) \quad (9)$$

โดยที่ A_w, B_w, C_w และ D_w เป็นเมตริกซ์ขนาด $n \times n$

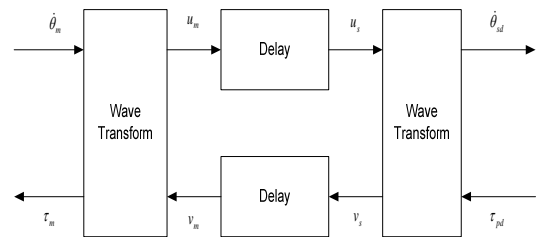
n คือ ระดับขั้นความเสรีของระบบที่ทำการควบคุม

$$A_w = C_w \quad (10)$$

$$B_w = D_w \quad (11)$$

$$I = 2A_w B_w \quad (12)$$

เมื่อทำการแยกแรงบิดกับความเร็วเชิงมุมในสมการที่ (5) โดยใช้วิธี wave transformation ตามสมการ (6) ถึงสมการ (12) เมื่อระบบมีตัวหน่วงเวลาเกิดขึ้นระบบจะไม่เกิดสถานะนอนพาสซีฟ



รูปที่ 2 การส่งสัญญาณโดยการแปลงเป็นตัวแปรคลื่น

พลังงานที่เข้าทางด้านซ้ายมือของรูปที่ 2 คิดเสมือนจุดที่ส่งพลังงานของ Niemeyer

$$P = \dot{\theta}_m^T \tau_m = \frac{1}{2} u_m^T u_m - \frac{1}{2} v_m^T v_m \quad (13)$$

พิจารณาพลังงานทั้งหมดในช่วงเวลา 0 ถึง t

$$\int_0^t P d\tau = \int_0^t \dot{\theta}_m^T \tau_m d\tau = E_{store}(t) - E_{store}(0) + \int_0^t P_{diss} d\tau \quad (14)$$

โดยที่ P_{diss} คือ กำลังที่สูญเสีย (power dissipated)

$E(0)$ คือ พลังงานสะสมตอนเริ่มต้น

$E(t)$ คือ พลังงานสะสมเมื่อเวลา t

โดยพลังงานที่ส่งผ่านสายสื่อสารในรูปของตัวแปรคลื่น "u" กับ "v" หมายถึงข้อมูลที่ส่งผ่านสายสื่อสาร ส่วนพลังงานสะสมหมายถึงข้อมูลที่อยู่ภายในสายสัญญาณซึ่งยังส่งไปไม่ถึงอีกด้านหนึ่งเพราะการควบคุมระยะไกลจะมีค่าเวลาหน่วงเกิดขึ้น แทนค่าสมการที่ (13) ลงในสมการที่ (14) จะได้

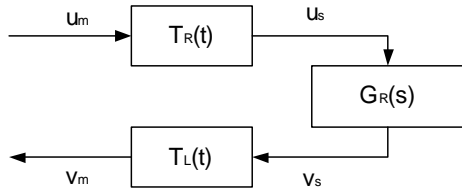
$$\frac{1}{2} \int_0^t u_m^T u_m d\tau - \frac{1}{2} \int_0^t v_m^T v_m d\tau = E_{store}(t) - E_{store}(0) + \int_0^t P_{diss} d\tau \quad (15)$$

$$\frac{1}{2} \int_0^t v_m^T v_m d\tau = \frac{1}{2} \int_0^t u_m^T u_m d\tau - E_{store}(t) + E_{store}(0) - \int_0^t P_{diss} d\tau \quad (16)$$

$$\frac{1}{2} \int_0^t v_m^T v_m d\tau \leq \frac{1}{2} \int_0^t u_m^T u_m d\tau + E_{store}(0) \quad (17)$$

ถ้าพลังงานที่สูญเสีย (energy dissipate) เป็นบวก จะได้ว่า พลังงานที่ส่งเข้าจะมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานที่ส่งกลับมาเสมอ นั่นคือ ระบบเป็นพาสซีฟ (passive) นั่นเอง

2.2 เสถียรภาพของระบบที่มีเวลาหน่วงไม่คงที่



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมของระบบเฉพาะทางด้านขาหมี

$$T_R(t) = T_R + \Delta T_R(t) \quad (18)$$

$$T_L(t) = T_L + \Delta T_L(t) \quad (19)$$

โดยที่ $\Delta T_R(t)$ คือ ค่าตัวหน่วงเวลาที่แกว่งขึ้นลง ขณะสัญญาณไปข้างหน้าทีละเวลาใดๆ

$\Delta T_L(t)$ คือ ค่าตัวหน่วงเวลาที่แกว่งขึ้นลง ขณะสัญญาณป้อนกลับทีละเวลาใดๆ

$$u_s(t) = u_m(t - T_R) - \Delta u_m(t) \quad (20)$$

$$v_m(t) = v_s(t - T_L) - \Delta v_s(t) \quad (21)$$

ระบบจะเป็นพาสซีฟเมื่อพลังงานส่งเข้ามากกว่าพลังงานที่กลับมา

$$\frac{1}{2} \int_0^t u_m^T u_m d\tau - \frac{1}{2} \int_0^t v_m^T v_m d\tau > 0 \quad (22)$$

ให้ $E_d(t)$ เป็น พลังงานสูญเสีย (energy dissipated) ในการควบคุมผ่านระบบควบคุมระยะไกล(remote system)

$$E_d(t) = \frac{1}{2} \int_0^t u_s^T u_s d\tau - \frac{1}{2} \int_0^t v_s^T v_s d\tau \quad (23)$$

เงื่อนไขของการเคลื่อนที่ของคลื่นสัญญาณทางด้านขวา คือ

$$\frac{1}{2} \int_0^t u_m^T u_m d\tau = \frac{1}{2} \int_0^t u_s^T u_s d\tau + E_{T_R}(t) - E_R(t) \quad (24)$$

เงื่อนไขของการเคลื่อนที่ของคลื่นสัญญาณทางด้านซ้าย คือ

$$\frac{1}{2} \int_0^t v_s^T v_s d\tau = \frac{1}{2} \int_0^t v_m^T v_m d\tau + E_{T_L}(t) - E_L(t) \quad (25)$$

โดยที่ $E_{T_R}(t)$ และ $E_{T_L}(t)$ เป็น instantaneous energy store ในสายที่ใช้ในการติดต่อสื่อสาร ค่า $E_R(t)$ และ $E_L(t)$ เป็นพลังงานที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากตัวหน่วงเวลาแบบเปลี่ยนแปลง แทนสมการที่ (23), (24), (25) ลงในสมการที่ (22) จะได้ว่า

$$E_d(t) + E_{T_R}(t) + E_{T_L}(t) - E_R(t) - E_L(t) > 0 \quad (26)$$

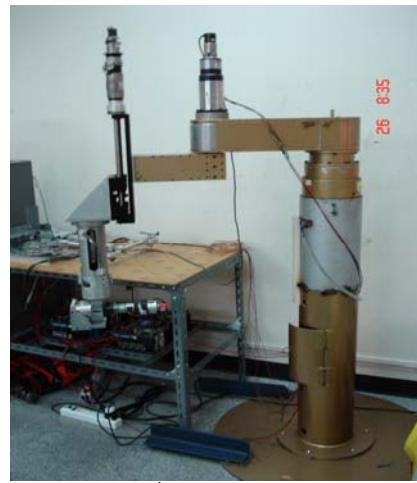
2.3 วิธีการหาค่าเมตริกซ์ซึ่งใช้ในการแปลงเป็นตัวแปรคลื่น

จากสมการที่(5)ถึง(12)เมื่อพิจารณาาระบบควบคุมซึ่งมีระดับชั้นความเร็วเท่ากับ 2 สามารถหาค่าเมตริกซ์การแปลงเป็นตัวแปรคลื่นได้โดยกำหนดให้

$$A_w = C_w = \begin{bmatrix} \frac{W_1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & \frac{W_2}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad B_w = D_w = \begin{bmatrix} \frac{1}{W_1 \times \sqrt{2}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{W_2 \times \sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

โดยที่ W_1, W_2 เป็นค่าคงที่ซึ่งใช้ในการปรับค่าเมตริกซ์การแปลงเป็นตัวแปรคลื่นให้เหมาะสมกับระบบที่นำไปใช้งานและเป็นไปตามเงื่อนไข $A_w = C_w$, $B_w = D_w$ และ $I = 2A_w B_w$

3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4 หุ่นยนต์จูปา2

รูปที่ 4 หุ่นยนต์จูปา2มี 5 ระดับชั้นความอิสระ ใช้เป็นหุ่นเสลฟ ซึ่งใช้งานเพียง 2 ข้อต่อแรกเท่านั้น

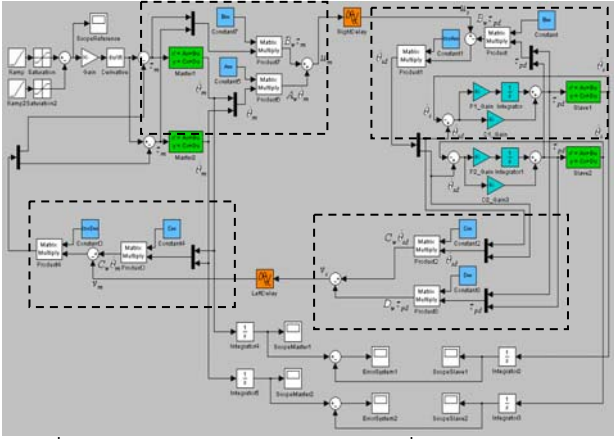


รูปที่ 5 หุ่นยนต์ Haptic Interface

รูปที่ 5 หุ่นยนต์ Haptic Interface ที่มี 3 ระดับชั้นความเร็ว ใช้เป็นหุ่นมอเตอร์ ซึ่งใช้งานเพียง 2 ข้อต่อแรกเท่านั้น

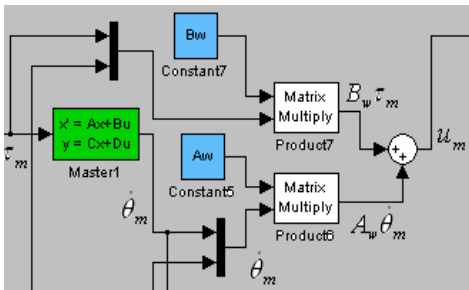
4. การทดลองโดยสร้างระบบเสมือน(Simulation System) โดยระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาทีโดยใช้ตัวแปรคลีน

ทำการแปลงสัญญาณจากความเร็วเชิงมุมกับแรงบิดให้อยู่ในรูปของตัวแปรคลีน u กับ v

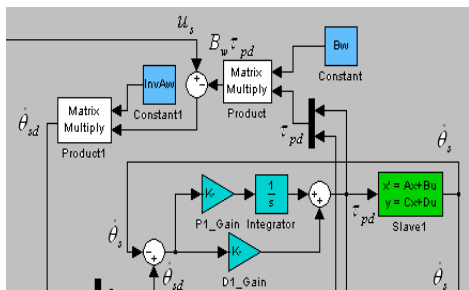


รูปที่ 6 ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาทีโดยใช้ตัวแปรคลีน

รูปที่ 6 เป็นรูปองค์ประกอบโดยรวมของระบบควบคุมที่มีระดับชั้นความเสรีเท่ากับ 2 ซึ่งมีค่าเวลาหน่วงในการส่งสัญญาณไปกลับระหว่าง 400 มิลลิวินาทีถึง 1000 มิลลิวินาทีโดยใช้วิธีการควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์ร่วมกับวิธีการแปลงเป็นตัวแปรคลีน



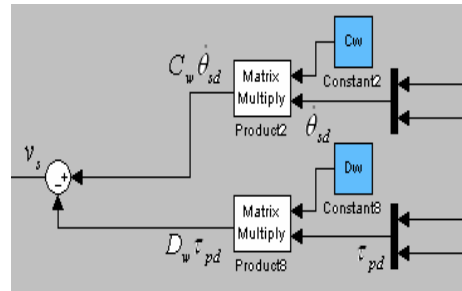
รูปที่ 7 การแปลงสัญญาณแรงบิดกับความเร็วเชิงมุมเป็นตัวแปรคลีน



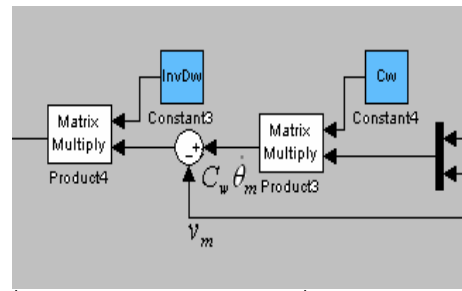
รูปที่ 8 การแปลงสัญญาณตัวแปรคลีนเป็นสัญญาณความเร็วเชิงมุม

รูปที่ 7 มาจากรูปที่ 6 ในกรอบสี่เหลี่ยมด้านบนซ้าย จากรูปทำการแปลงรูปจากค่าแรงบิดและความเร็วเชิงมุมด้านหุ่นมาสเตอร์ให้เป็นตัวแปรคลีน ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ " u_m " โดยใช้สมการ

$u_m(t) = A_w \dot{\theta}_m(t) + B_w \tau_m(t)$ เมื่อได้ u_m แล้วจึงทำการส่งสัญญาณผ่านสายสื่อสาร เมื่อสัญญาณ u_m ส่งผ่านสายสื่อสารซึ่งมีค่าเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 200 ถึง 500 มิลลิวินาทีไปยังด้านสเลฟ โดยสัญญาณตัวแปรคลีนที่มาถึงด้านสเลฟแทนด้วยสัญลักษณ์ " u_s " รูปที่ 8 มาจากรูปที่ 6 ในกรอบสี่เหลี่ยมด้านขวาบน จากรูปที่ 8 นำตัวแปรคลีน u_s ซึ่งส่งผ่านสายสัญญาณมาสมการ $u_s(t) = A_w \dot{\theta}_{sd}(t) + B_w \tau_{pd}(t)$ นำมาจัดรูปสมการใหม่เป็น $\dot{\theta}_{sd} = A_w^{-1}(u_s - B_w \tau_{pd})$ ทำให้ได้ค่าความเร็วเชิงมุมของหุ่น สเลฟที่ต้องการนำมาลบกับค่าความเร็วเชิงมุมของหุ่นสเลฟ แล้วนำค่าที่ได้มาผ่านตัวควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์เพื่อให้ได้ค่าแรงบิดสำหรับควบคุมหุ่นสเลฟ



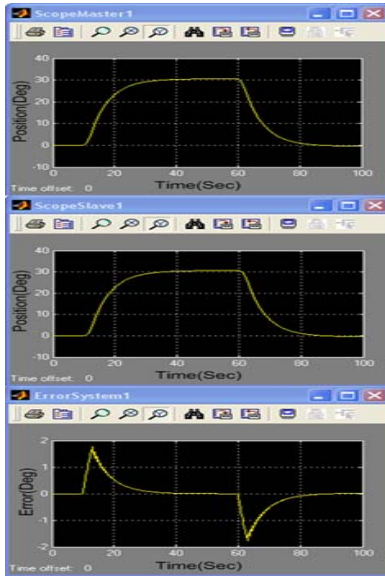
รูปที่ 9 การแปลงสัญญาณแรงบิดกับความเร็วเชิงมุมเป็นตัวแปรคลีน



รูปที่ 10 การแปลงสัญญาณตัวแปรคลีนเป็นสัญญาณแรงบิด

รูปที่ 9 มาจากรูปที่ 6 ในกรอบสี่เหลี่ยมด้านขวาล่าง จากรูปที่ 6 ทำการแปลงรูปจากค่าแรงบิดและความเร็วเชิงมุมด้านหุ่นสเลฟให้เป็นตัวแปรคลีน ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ " v_s " โดยใช้สมการ $v_s = C_w \dot{\theta}_{sd} - D_w \tau_{pd}$ เมื่อได้ค่า v_s แล้วจึงทำการส่งสัญญาณผ่านสายสื่อสาร เมื่อสัญญาณ v_s ส่งผ่านสายสื่อสารซึ่งมีค่าเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 200 ถึง 500 มิลลิวินาทีไปยังด้านหุ่นมาสเตอร์โดยสัญญาณตัวแปรคลีนที่มาถึงด้านหุ่นมาสเตอร์แทนด้วยสัญลักษณ์ " v_m " รูปที่ 10 มาจากรูปที่ 6 ในกรอบสี่เหลี่ยมด้านซ้ายล่าง จากรูปนำตัวแปรคลีน v_m ซึ่งส่งผ่านสายสัญญาณมาสมการ $v_m = C_w \dot{\theta}_m - D_w \tau_m$ นำมาจัดรูปสมการใหม่เป็น $\tau_m = D_w^{-1}(C_w \dot{\theta}_m - v_m)$ ทำให้ได้ค่าแรงบิดของหุ่นมาสเตอร์

5. ผลการทดลองโดยสร้างระบบเสมือน(Simulation System) ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาทีโดยใช้ตัวแปรคลีน



รูปที่ 11 ผลการทดลองระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาที โดยใช้ตัวแปรคลื่น

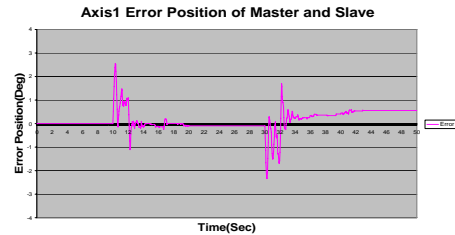
จากรูปที่ 11 แสดงผลการทดลองระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาที โดยการควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์ร่วมกับมีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่น การเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 ชื่อว่า ScopeMaster1 การเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 1 ชื่อว่า ScopeSlave1 และค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ชื่อว่า ErrorSystem1 โดยมีคำสั่งอ้างอิงให้เคลื่อนที่เมื่อวินาทีที่ 10 ด้วยความเร็วคงที่ 10 องศาต่อวินาทีจากตำแหน่ง 0 ถึง 30 องศาแล้วหยุดจนถึงวินาทีที่ 40 แล้วเคลื่อนที่กลับตำแหน่งเริ่มต้นด้วยความเร็วคงที่ 10 องศาต่อวินาที จากรูปพบว่าหุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่จากตำแหน่ง 0 องศาถึง 30 องศาคำสั่งอ้างอิง เนื่องจากการแปลงเป็นตัวแปรคลื่น แต่ทำให้สามารถควบคุมหุ่นสเลฟให้เคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ได้อย่างมีเสถียรภาพ จากรูปErrorSystem1 หุ่นสเลฟข้อต่อที่ 1 จะเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 โดยที่ค่าความผิดพลาดมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 หยุดอยู่ที่ตำแหน่ง 30 องศาหลังจากนั้นค่าความผิดพลาดจะค่อยๆลดลงจนเป็นศูนย์ ต่อมาเมื่อหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 เคลื่อนที่กลับตำแหน่งเริ่มต้น หุ่นสเลฟข้อต่อที่ 1 จะเคลื่อนที่ตามโดยที่ค่าความผิดพลาดมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งคำสั่งอ้างอิงสั่งให้หุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 หยุดอยู่ที่ตำแหน่งเริ่มต้นหลังจากนั้นค่าความผิดพลาดจะค่อยๆลดลงจนเป็นศูนย์ ส่วนผลการทดลองของข้อต่อที่ 2 มีลักษณะเหมือนกับผลการทดลองของข้อต่อที่ 1

6. ผลการทดลองควบคุมหุ่นมาสเตอร์สเลฟ

ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงระหว่าง 320 มิลลิวินาทีถึง 400 มิลลิวินาที เมื่อควบคุมทั้ง 2 ข้อต่อพร้อมกัน โดยข้อต่อที่ 1 เคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 21 องศา ในเวลา 2 วินาที และข้อต่อที่ 2 เคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 22 องศา ในเวลา 2 วินาที

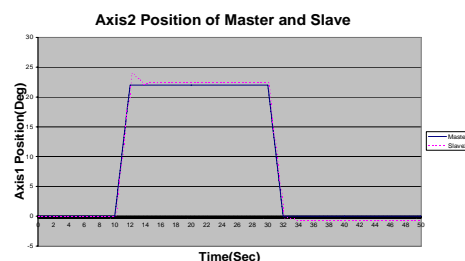


รูปที่ 12 การเคลื่อนที่ข้อต่อที่ 1 ซึ่งมีตัวหน่วงเวลาโดยใช้ตัวแปรคลื่น



รูปที่ 13 ค่าความผิดพลาดของข้อต่อที่ 1 ที่มีตัวหน่วงเวลาโดยใช้ตัวแปรคลื่น

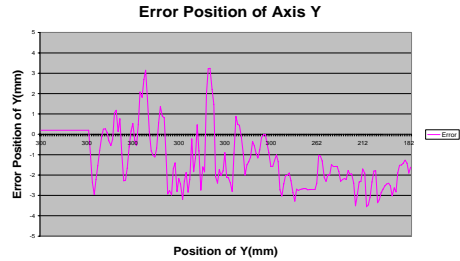
รูปที่ 12 แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 1 ในระบบที่มีตัวหน่วงเวลา ระหว่าง 320 ถึง 400 มิลลิวินาที โดยใช้ตัวแปรคลื่น โดยเส้นที่ทับแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์และเส้นปะแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟ จากรูปที่ 13 ค่าความผิดพลาดของข้อต่อที่ 1 ขณะวินาทีที่ 10 ถึงวินาทีที่ 12 เกิดจากการที่หุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ไปก่อนจากนั้นหุ่นสเลฟจึงเคลื่อนที่ตามดังนั้นตำแหน่งมุมของหุ่นมาสเตอร์จึงมากกว่ามุมของหุ่นสเลฟ ทำให้ค่าความผิดพลาดเป็นบวก จะเกิดค่าovershootขึ้นเล็กน้อย แล้วค่าความผิดพลาดจะค่อยๆลดลงเข้าใกล้ศูนย์ จากนั้นหุ่นมาสเตอร์หยุดเคลื่อนที่จนกระทั่งถึงวินาทีที่ 30 หุ่นสเลฟจึงหยุดเคลื่อนที่เช่นกัน ทำให้ค่าความผิดพลาดคงที่ ขณะวินาทีที่ 30 ถึงวินาทีที่ 32 หุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมกลับมาที่จุดเริ่มต้น หุ่นสเลฟจึงเคลื่อนที่ตามกลับมายังจุดเริ่มต้น ทำให้ความผิดพลาดเป็นลบซึ่ง จะเกิดค่าovershootขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากค่าเวลาหน่วง แล้วค่าความผิดพลาดจะค่อยๆลดลงเข้าใกล้ศูนย์ ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของข้อต่อที่ 1 ซึ่งเคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 21 องศา ตั้งแต่วินาทีที่ 10 ถึง วินาทีที่ 35 เท่ากับ 0.5 องศาและมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 0.6 องศา



รูปที่ 14 การเคลื่อนที่ข้อต่อที่ 2 ซึ่งมีตัวหน่วงเวลาโดยใช้ตัวแปรคลื่น

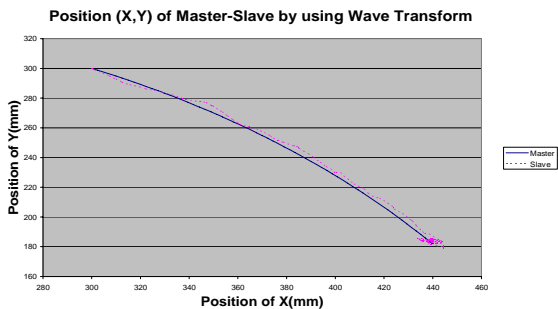


รูปที่ 15 ค่าความผิดพลาดของข้อต่อที่ 1 ที่มีตัวหน่วงเวลา โดยใช้ตัวแปรคลื่น



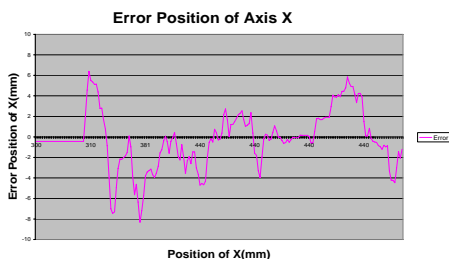
รูปที่ 18 ค่าความผิดพลาดตามแนวแกน Y

รูปที่ 14 แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 2 ในระบบที่มีตัวหน่วงเวลา ระหว่าง 320 ถึง 400 มิลลิวินาที โดยใช้ตัวแปรคลื่น ซึ่งเส้นที่บแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์และเส้นปะแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟ จากรูปที่ 15 ค่าความผิดพลาดของข้อต่อที่ 2 เกิดขึ้นเหมือนกับข้อต่อที่ 1 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของข้อต่อที่ 2 ซึ่งเคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 22 องศา ตั้งแต่วินาทีที่ 10 ถึง วินาทีที่ 35 เท่ากับ 0.8 องศาและมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 0.8 องศา ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงระหว่าง 320 ถึง 400 มิลลิวินาที ซึ่งทำการควบคุมตำแหน่งที่ปลายของแขนกลให้เคลื่อนที่ในระนาบ XY จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (440,182)



รูปที่ 16 หุ่นยนต์มาสเตอร์-สเลฟ เคลื่อนที่ในระบบที่มีตัวหน่วงเวลาโดยใช้ตัวแปรคลื่นจากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (440,182)

รูปที่ 16 แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟโดยเส้นที่บแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์และเส้นปะแสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟซึ่งพบว่าหุ่นสเลฟจะเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์เมื่อหุ่นมาสเตอร์หยุดเคลื่อนที่หุ่นสเลฟจะค่อยๆเคลื่อนที่เข้าใกล้ตำแหน่งของหุ่นมาสเตอร์



รูปที่ 17 ค่าความผิดพลาดตามแนวแกน X

รูปที่ 17 แสดงค่าความผิดพลาดตามแนวแกน X ของหุ่นสเลฟกับตำแหน่งตามแนวแกน X ของหุ่นมาสเตอร์ ซึ่งค่าความผิดพลาดเฉลี่ยขณะเคลื่อนที่ตามแนวแกน X จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (440,182) มีค่าเท่ากับ 3.5 มิลลิเมตรและมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 1.2 มิลลิเมตร รูปที่ 23 แสดงค่าความผิดพลาดตามแนวแกน Y ของหุ่นสเลฟกับตำแหน่งตามแนวแกน Y ของหุ่นมาสเตอร์ ซึ่งค่าความผิดพลาดเฉลี่ยขณะเคลื่อนที่ตามแนวแกน Y จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (440,182) มีค่าเท่ากับ 1.7 มิลลิเมตรและมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร

7. สรุป

ในการทดลองควบคุมหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟมีเป้าหมายเพื่อควบคุมให้หุ่นสเลฟเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจากผลการทดลองควบคุมระบบเสมือน(Simulation System) พบว่าระบบควบคุมที่มีเวลาหน่วงไม่คงที่ เมื่อใช้วิธีควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์ร่วมกับวิธีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่น ทำให้หุ่นสเลฟเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวเข้าใกล้ศูนย์ ส่วนในการทดลองควบคุมหุ่นมาสเตอร์สเลฟโดยวิธีควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์ร่วมกับวิธีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่น ทำให้หุ่นสเลฟเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวเข้าใกล้ศูนย์เช่นกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] ธงชัย วิจิตรภร. "การควบคุมระยะไกลที่มีเวลาหน่วงโดยใช้ตัวแปรคลื่น" วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2547.
- [2] Saghir Munir and Wayne J. Book, "Wave-Base Teleoperation with Prediction." Proc. of the American Control Conference Arlington, VA, 25-27 June 2001.
- [3] Saghir Munir and Wayne J. Book, "Internet-Based Teleoperation Using Wave Variables with Prediction." IEEE/ASME Transactions on Mechanics, June 2002.