

การควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของหุ่นยนต์สองล้อด้วยการวัดความเอียงแบนด์วิธสูง Optimal Control of a Two-wheeled Robot with High Bandwidth Tilt Measurement

กิตติพงษ์ เยาวจา^{1*} และ วิฑิต ฉัตรรัตนกุลชัย²

ห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสั่นสะเทือน (CRV Lab) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จุฬจักร กรุงเทพฯ 10900

โทร 0-2942-8567 ต่อ 506 อีเมล yaovaja@hotmail.com¹, fengwtc@ku.ac.th²

บทคัดย่อ

หุ่นยนต์สองล้อถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสตรงสองตัวที่เป็นอิสระต่อกันแต่มีแกนหมุนร่วมกัน หุ่นยนต์สองล้อเป็นระบบที่มีเสถียรภาพอย่างมีขอบเขต ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาได้ออกแบบตัวควบคุมประเภทต่างๆ สำหรับให้หุ่นยนต์สองล้อรักษาเสถียรภาพและการตอบสนองของระบบมีประสิทธิภาพ และในบทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมอาศัยตัวคุมค่ากำลังสองเชิงเส้นของหุ่นยนต์สองล้อ ตัวสังเกตลูนเบอร์เกอร์ถูกใช้ประมวลสัญญาณบ่อนกลับจากเซนเซอร์ตรวจวัดความเอียงและเซนเซอร์วัดอัตราความโน้มเอียงเพื่อให้ได้สัญญาณความเอียงที่มีความแม่นยำมากขึ้น ตัววัดความเอียงที่ได้มีประสิทธิภาพดีในย่านความถี่สูงแสดงในทั้งผลการจำลองและทดลอง ผลการจำลองและทดลองการควบคุมระบบดังกล่าวแสดงผลที่น่ายอมรับและมีประสิทธิภาพของตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้

Abstract

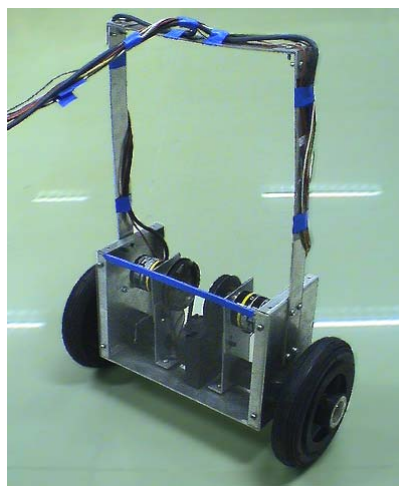
A two-wheeled robot is independently driven by two concentric motors. The two-wheeled robot is a marginally stable plant. Over the last decade, researchers have designed controllers for stabilizing the robot and obtaining some desired responses. In this paper, the LQR control of a two-wheeled robot is designed and implemented. Luenberger Observer is also presented in order to improve tilt measurement from an inclinometer and a rate gyroscope. Tilt measurement is accurate over a high frequency range as shown in both simulation and experiment. Simulation and experimental results demonstrate the reliability and effectiveness of the proposed control scheme.

1. คำนำ

การควบคุมหุ่นยนต์สองล้อประกอบด้วยการควบคุมการเคลื่อนที่ตามรอยสัญญาณอ้างอิงและการทรงตัวของหุ่นยนต์ การตามรอยสัญญาณอ้างอิงแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ มุมหมุนล้อเฉลี่ยและมุมเฉลี่ย ในขณะที่ต้องรักษาการทรงตัวหรือมุมเอียงของหุ่นยนต์ โดยที่มีเพียงสองสัญญาณบ่อนเข้าคือ แรงดันไฟฟ้ามอเตอร์ซ้ายและขวา

การรักษาการทรงตัวคือการรักษาสมดุลของลูกตุ้มนาฬิกากลับหัว ซึ่งระบบดังกล่าวไม่มีเสถียรภาพและไม่เป็นเชิงเส้น และการควบคุมหุ่นยนต์สองล้อยังมีลักษณะไม่ใช่มุมเฟสน้อยสุด

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมางานวิจัยสำหรับการออกแบบตัวควบคุมมากขึ้นเรื่อยๆ เพื่อรักษาเสถียรภาพและมีการตอบสนองของระบบเป็นไปตามที่ต้องการ ตัวควบคุมที่แพร่หลายที่สุดหรือตัวควบคุม PID ถูกนำมาใช้และอาศัยการออกแบบด้วยแบบจำลอง เช่น วิธีการวางตำแหน่งโพล [1] ตัวคุมค่ากำลังสองเชิงเส้น [2], [3], [4], [5], [6] หรือตัวควบคุมอื่นๆ [7], [8], [9], [10] บางครั้งหุ่นยนต์สองล้อถูกเพิ่มความซับซ้อนมากขึ้น [11], [12] โดยตัวคุมค่ากำลังสองเชิงเส้นเป็นการออกแบบตัวควบคุมวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพ บทความนี้นำวิธีดังกล่าวมาออกแบบระบบควบคุมหุ่นยนต์สองล้อที่อยู่ในห้องปฏิบัติการ CRV ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 หุ่นยนต์สองล้อในห้องปฏิบัติการ CRV

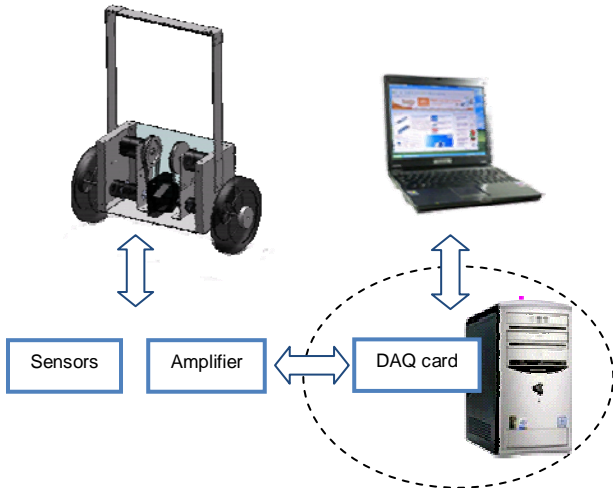
งานวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมหุ่นยนต์สองล้อแพร่หลายมากขึ้น ส่วนหนึ่งเนื่องมาจากเทคโนโลยีของตัวตรวจวัด [13], [14] บทความนี้วัดความเอียงด้วยตัวสังเกตแบบลูนเบอร์เกอร์ (Luenberger Observer) ซึ่งคล้ายกับ Kalman Filter [14] ที่ไม่มีผลของสัญญาณรบกวน

ส่วนที่ 2 กล่าวถึงการออกแบบหุ่นยนต์สองล้อและอุปกรณ์การทดลอง ส่วนที่ 3 กล่าวถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยสมการลากรางจ์และการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบ ส่วนที่ 4 อธิบาย

การออกแบบตัวควบคุมด้วยคําคู่มือค่ากำลังสองเชิงเส้น และตั้งสังเกตแบบลูนเบอร์เกอร์ ส่วนที่ 5 และ 6 แสดงผลการจำลองโดยโปรแกรม Matlab และผลการทดลอง ในส่วนสุดท้ายกล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะ

2. การออกแบบระบบหุ่นยนต์สองล้อ

การออกแบบตัวควบคุมและการจำลองผลผ่านคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม Matlab ในขณะที่ตัวควบคุมถูกอิมพลีเมนต์ผ่านโปรแกรม LabVIEW Real-time และมีอุปกรณ์สำหรับการทดลองดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 อุปกรณ์การทดลอง

หุ่นยนต์สองล้อมีขนาด 14.7 x 36.6 x 52.0 เซนติเมตร น้ำหนัก 2.5 กิโลกรัม ประกอบด้วยมอเตอร์กระแสตรงขนาด 12 โวลต์ 2 ชุดที่ขับเคลื่อนล้ออย่างอิสระต่อกันและติดตั้งเอนโคเดอร์เซนเซอร์สำหรับบ็อนกลับสัญญาณ และสเตตของความเร็วได้จากเซนเซอร์วัดความเอียง (Inclinometer) ที่มีความละเอียด 2,500 CPR และ Rate Gyroscope (ADXRS300)

ตัวควบคุมสร้างด้วยซอฟต์แวร์ คอมพิวเตอร์โน้ตบุคสำหรับออกแบบตัวควบคุมและสัญญาณอ้างอิง ต่อกับคอมพิวเตอร์ที่เป็นตัวควบคุมโดยติดตั้งการ์ดรับส่งข้อมูล (NI PCI-6221) ซึ่งทำหน้าที่รับสัญญาณสเตตย้อนกลับและส่งสัญญาณควบคุมไปยังตัวขยายสัญญาณ (Power Amplifier) ซึ่งขับสัญญาณออกด้วยการแปรผันแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์กระแสตรงซ้ายและขวา

เนื่องจากการติดตั้งเอนโคเดอร์เซนเซอร์กับส่วนหมุนของมอเตอร์แบบ Planetary Gear และวัตุมุมรอบมอเตอร์แทนการวัดมุมล้อส่งผลของ Backlash ที่อาจทำให้เกิดการสั่นที่ความถี่สูงภายในมอเตอร์ บางครั้งอาจทำให้ชุดเกียร์ภายในเสียหาย จึงกรองสัญญาณจากเอนโคเดอร์ด้วยตัวกรองความถี่สูงที่ 5 เฮิร์ต

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

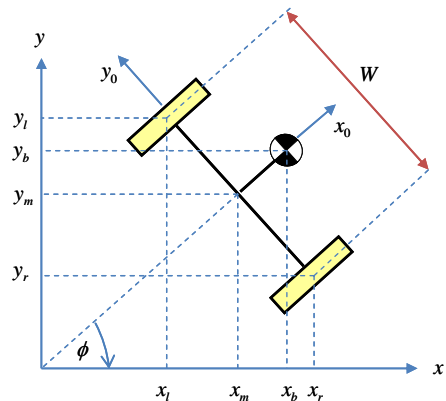
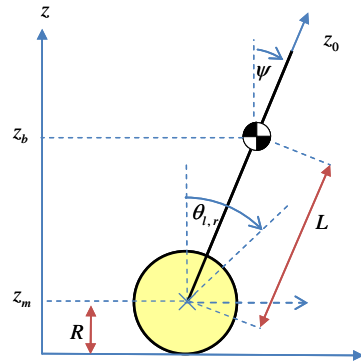
การหาเอกลักษณ์ของระบบจากข้อมูลอินพุตและเอาท์พุต สเตตของระบบอาจไม่มีความหมายและไม่สามารถวัดได้ อีกวิธีคือการสร้างแบบจำลองจากสมการทางกายภาพซึ่งสามารถหาได้จากหลายวิธี เช่นวิธีของนิวตัน และวิธีของเคน [3] บทความนี้อาศัยสมการลากรางจ์

โดยพิจารณาจากรูปที่ 3 เมื่อพิจารณาแกนพิกัดทั้งสาม (θ, ψ, ϕ) สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ได้คือ

$$\begin{aligned} & [(2m_w + m_b)R^2 + 2J_w + 2J_o] \ddot{\theta} \\ & + (m_b LR - 2J_o) \ddot{\psi} = \frac{1}{2}(F_l + F_r) \end{aligned} \quad (1)$$

$$(m_b L^2 + J_\psi + 2J_o) \ddot{\psi} + (m_b LR - 2J_o) \ddot{\theta} - m_b g L \psi = F_\psi \quad (2)$$

$$\left[\frac{1}{2} m_w W^2 + J_\phi + \frac{W^2}{2R^2} (J_o + J_w) \right] \ddot{\phi} = \frac{R}{W} (F_r - F_l) \quad (3)$$



รูปที่ 3 แผนภาพหุ่นยนต์ในแกน x, y, z

θ คือมุมหมุนเฉลี่ยของล้อซ้ายและล้อขวา ψ คือมุมเอียงหุ่นยนต์สองล้อ และ $\phi = (\theta_r - \theta_l)R/W$ คือมุมเลี้ยวของหุ่นยนต์สองล้อ m_b และ m_w คือ ค่ามวลตัวถังและล้อ n, n_2 คืออัตราทดรอบของมอเตอร์และเอนโคเดอร์ f_m คือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานส่วนหมุน R_m คือค่าความต้านทานมอเตอร์ k_b คือค่าคงที่แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับมอเตอร์และ k_t คือค่าคงที่แรงบิดมอเตอร์

จากการพิจารณาพลังงานจลน์การหมุน โมเมนต์ความเฉื่อยส่วนต่าง ๆ ถูกนำมาพิจารณา ได้แก่ J_ϕ คือโมเมนต์ความเฉื่อยหุ่นยนต์รอบแกน z_0 J_ψ, J_w หมายถึงโมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกน y_0 ของตัวถังและล้อ และโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ (J_m) เกียร์ทดรอบมอเตอร์ (J_g) เกียร์ทดรอบเอนโคเดอร์ (J_r) และเอนโคเดอร์ (J_e) กำหนดให้ $J_o = n^2 (J_m + J_g) + n^2 n_2^2 (J_e + J_r)$ (4)

สมการที่ (1) และ (2) แสดงถึงพลศาสตร์การเคลื่อนที่แบบเส้นตรง และการโน้มเอียงของหุ่นยนต์ ส่วนสมการที่ (3) แสดงถึงการควบคุม การเลี้ยวของหุ่นยนต์ บางครั้งการควบคุมการเลี้ยวถูกแยกพิจารณา เนื่องจากมีผลกระทบน้อยต่อการควบคุมในส่วนแรก โดยแรงที่กระทำ กับล้อและหุ่นยนต์สามารถหาได้จากจากความสัมพันธ์ของแรงขับของ มอเตอร์ลบบกับแรงเสียดทานดังสมการที่ (5), (6) และ (7)

$$F_l = nK_l i_l + f_m (\dot{\psi} - \dot{\theta}_l) - f_w \dot{\theta}_l \quad (5)$$

$$F_r = nK_l i_r + f_m (\dot{\psi} - \dot{\theta}_r) - f_w \dot{\theta}_r \quad (6)$$

$$F_\psi = -nK_l i_l - nK_l i_r - f_m (\dot{\psi} - \dot{\theta}_l) - f_m (\dot{\psi} - \dot{\theta}_r) \quad (7)$$

ประมาณสมการดังกล่าวให้เป็นเชิงเส้นที่ $\psi = 0$ และเขียนสมการในรูป ปริภูมิเวกเตอร์ ดังสมการที่ (8)

$$\dot{x} = Ax + Bu = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_2 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} u \quad (8)$$

เมื่อ $x = [\theta, \psi, \dot{\theta}, \dot{\psi}, \phi, \dot{\phi}]^T$, $u = [V_l, V_r]^T$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 4.416 & -0.0234 & 0.00152 \\ 0 & 15.71 & -0.0785 & -0.0889 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.0628 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0.05395 & 0.05395 \\ -3.153 & -3.153 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -0.8395 & 0.8395 \end{bmatrix}$$

สมการที่ (8) แสดงถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถไป วิเคราะห์ในการออกแบบตัวควบคุม เมตริกซ์ A และ B แสดงถึง พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลอง และค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบส่วน ที่ตั้งไม่ได้กล่าวถึงได้แก่

ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยและระยะของจุดศูนย์กลางมวลจากแกนล้อ

คำนวณจากการสร้างภาพ 3 มิติ ด้วยโปรแกรมเขียนแบบ SolidWorks

ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ได้จากการหาเอกลักษณ์ของระบบด้วย วิธีกำลังสองน้อยที่สุดตั้งนี้ เริ่มจากสมการสมมูลของมอเตอร์กระแสตรง เขียนได้คือ

$$T_m = nK_t i = \frac{nK_t V}{R_m} - \frac{nK_t K_b \dot{\theta}_m}{R_m} \quad (9)$$

ในระบบขับเคลื่อนของหุ่นยนต์ในแต่ละด้านประกอบด้วยมอเตอร์ กระแสตรงที่ติดตั้งล้อและเอนโคเดอร์เซนเซอร์ สมการการเคลื่อนที่ ของการหมุนดังกล่าวคือ

$$T_m = (J_w + J_g + nJ_m + n_2 n (J_e + J_r)) \ddot{\theta}_w \quad (10)$$

T_m คือแรงบิดจากมอเตอร์ใดๆ $\ddot{\theta}_w$ คือความเร่งเชิงมุมล้อและ $\dot{\theta}_m$ คือความเร็วเชิงมุมมอเตอร์ จัดรูปสมการ (9) และ (10) ใหม่สำหรับ วิธีการกำลังสองน้อยที่สุด

$$V = [\ddot{\theta}_w, \dot{\theta}_m]^T [A \ B]^T = \Phi \Theta \quad (11)$$

$$[\hat{A} \ \hat{B}]^T = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T V \quad (12)$$

ค่าประมาณของเทอม \hat{A} และ \hat{B} คือส่วนประกอบของ ค่าพารามิเตอร์ที่เราต้องการ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (12) โดยการป้อนสัญญาณคลื่นไซน์ที่แปรผันความถี่ระหว่าง 0.1 ถึง 1 เฮิร์ต ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่ครอบคลุมการทำงานของมอเตอร์ และจากการ ทดลอง 35 ครั้งจะได้ค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ของมอเตอร์คือ $K_b = 0.0040$ และ $K_t / R_m = 0.0038$

4. การออกแบบระบบควบคุม

การออกแบบด้วยตัวควบคุมค่ากำลังสองเชิงเส้น (Linear Quadratic Regulator, LQR) เป็นการหาคำตอบของปัญหาตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุด โดยบทความนี้อาศัยการหาค่าเหมาะสมในช่วงที่ค่าจริงจะได้ค่าอัตราขยาย คงที่และสามารถนำมาประยุกต์ใช้จริงได้ด้วยอุปกรณ์ที่ไม่ซับซ้อน

4.1 การควบคุมแบบตัวควบคุมค่ากำลังสองเชิงเส้น

ระบบการควบคุมหุ่นยนต์สองล้อได้พิสูจน์แล้วว่า เป็นระบบสามารถ ควบคุมได้ (controllability) ดังนั้นระบบสามารถประยุกต์การออกแบบ ตัวควบคุมด้วยวิธีตัวควบคุมค่ากำลังสองเชิงเส้นได้ โดยกำหนดให้ $x_{ref} = [\theta_{ref}, \psi_{ref}, 0, 0, \phi_{ref}, 0]$ แก่ปัญหาการตามรอยเส้นได้จากค่า ผิดพลาด $e = x_{ref} - x(t)$ หลักการดังกล่าวคือการควบคุมเหมาะสม ที่สุด โดยปรับค่าตรรกะนิสมรรถนะหรือสมการที่ (13) ให้มีค่าน้อยที่สุด

$$J = \int_0^{\infty} [e^T(t) Q e(t) + u^T(t) R u(t)] \quad (13)$$

เมื่อค่า Q คือ เมตริกซ์ถ่วงน้ำหนักสำหรับการให้ความสำคัญใน แต่ละเสตดซึ่งมีลักษณะเป็นบวกแน่นอน เช่นเดียวกับค่า R เมตริกซ์ ถ่วงน้ำหนักสำหรับจำกัดขนาดของสัญญาณควบคุมไม่ให้มากเกินไป การอิมิตัวของอุปกรณ์ขับเคลื่อนที่จะทำให้เพิ่มความไม่เป็นเชิงเส้นมาก ขึ้น ค่าอัตราขยาย K และสัญญาณควบคุม u สามารถหาได้จาก สมการ (14) และ (15) โดยค่าเมตริกซ์ P คำนวณได้จากสมการของ ริคคาที่ (16)

$$K = R^{-1} B^T P \quad (14)$$

$$u = -Kx + Kx_{ref} \quad (15)$$

$$PA + A^T P - PBR^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (16)$$

4.2 ตัวสังเกตแบบลูนเบอร์เกอร์

การวัดสเตตของความเอียงหุ่นยนต์จากเซนเซอร์ Inclinator สามารถตอบสนองได้ดีเฉพาะในช่วงความถี่ต่ำ ส่วน Rate Gyroscope สามารถวัดสัญญาณความเร็วเชิงมุมของความเร็วที่ความถี่สูงได้ดี แต่ เมื่อทำการอินทิเกรตด้วยวิธีเชิงตัวเลขจะเกิดการเบี่ยงเบนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ มักเรียกว่า Gyro Drift การประมาณค่าสเตตเพื่อแก้ปัญหา ดังกล่าวมีหลายวิธี เช่น ตัวสังเกตแบบลูนเบอร์เกอร์

ลักษณะของ Inclinator คือเอนโคเดอร์เซนเซอร์ที่เป็นลูกตุ้ม อยู่ภายในดังแสดงในรูปที่ 4 เมื่อเกิดการหมุนด้วยมุม θ_l ที่เวลาใดๆ

ลูกตุ้มจะเคลื่อนที่จากแรงโน้มถ่วงเป็นมุม θ_2 โดยตำแหน่งศูนย์กลางของ Inclinometer ต่อร่วมแกนหมุนกับมอเตอร์จึงไม่มีความเร่งเชิงเส้นและไม่นำมาพิจารณา วิธีการหาเอกลักษณ์จะได้ค่า $ml/J = 1.0314$ และ $J/c = 0.0022$ และสมการการเคลื่อนที่ดังกล่าวคือ

$$J(\ddot{\theta}_1 - \ddot{\theta}_2) = c\dot{\theta}_2 - mgl \sin(\theta_1 - \theta_2) \quad (17)$$

$$\frac{\theta_2(s)}{\theta_1(s)} = \frac{s^2 + mgl/J}{s^2 + c/Js + mgl/J} \quad (18)$$

เขียนในรูปปริภูมิสถานะได้คือ

$$\dot{z} = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -c/J & -c/J & 1 \\ 0 & -mgl/J & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1.212 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \omega_g \quad (19)$$

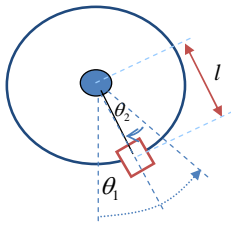
$$\theta_2 = [1 \ 1 \ 0]z$$

θ คือมุมเอียงจริง ω_g คืออัตราโน้มเอียงจาก Rate Gyro และ z_1, z_2

ไม่มีความหมายทางกายภาพ โดยประมาณค่ามุมเอียง $\hat{\theta}$ ได้จาก

$$\dot{\hat{z}} = A\hat{z} + K(\theta_2 - C\hat{z}) + Bu \quad (20)$$

สามารถหาค่า K ด้วยวิธีการวางโพลเพื่อให้ $A - KC$ มีเสถียรภาพ ดังนั้นค่ามุมเอียงจริงลบด้วยค่าประมาณย่อมมีค่าลู่เข้า



รูปที่ 4 แบบจำลองของ Inclinometer อย่างง่าย

5. ผลการจำลองโดยโปรแกรม Matlab

จากผลลัพธ์ในหัวข้อที่ 3 คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวถูกนำมาใช้เป็นแบบจำลอง และใช้วิธีตัวคุมค่ากำลังสองเชิงเส้น โดยการสุ่มปรับค่าในเมตริกซ์ถ่วงน้ำหนักที่มีลักษณะเมตริกซ์ขงมุม ค่าดังกล่าวเป็นตัวกำหนดความสำคัญของการคุมค่าในแต่ละเสตต ในระบบนี้ต้องการตัวควบคุมที่เน้นการรักษาสมดุลหรือการควบคุมมุม ψ ให้มีค่าน้อยๆ จึงต้องปรับให้ค่าถ่วงเสตตที่ 2 และ 4 มีค่าสูง จากการปรับค่าให้เหมาะสมแล้วอัตราขยายของระบบคือ

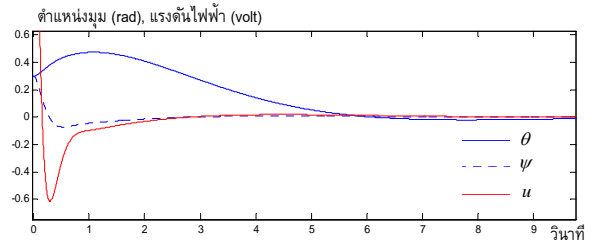
$$K = \begin{bmatrix} -0.7746 & -14.1376 & -2.5177 & -2.0062 & -0.5000 & -1.1662 \\ -0.7746 & -14.1376 & -2.5177 & -2.0062 & 0.5000 & 1.1662 \end{bmatrix}$$

เทอมที่ 5 และ 6 มีเครื่องหมายกลับทางนั้นแสดงถึงการควบคุมการเลี้ยวแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์ซ้ายและขวาอย่างมกลับทิศทางกัน

5.1 จำลองการรักษาสมดุล

หัวข้อนี้เป็นการจำลองการรักษาสมดุลเมื่อกำหนดค่าเริ่มต้นมุม θ และ ψ เท่ากับ 0.3 เรเดียน ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 5 ค่าของมุม ψ แสดงให้เห็นถึงการรักษาสถดุลว่าระบบจะเข้าสู่ภาวะคงตัวใช้เวลาประมาณ 4 วินาที แต่การเคลื่อนของหุ่นยนต์หรือมุม θ กลับเพิ่มขึ้น

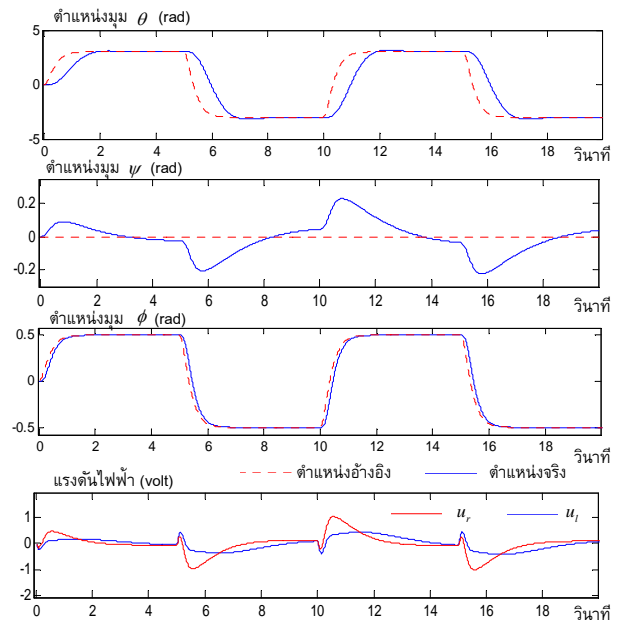
ในช่วงแรกเนื่องจากอิทธิพลที่มากกว่าของมุม ψ แต่อย่างไรก็ตามหุ่นยนต์จะค่อยๆ วิ่งกลับเข้าสู่ตำแหน่งศูนย์



รูปที่ 5 การจำลองการรักษาสมดุล

5.2 จำลองการเคลื่อนที่ตามเส้นทางอ้างอิง

เส้นทางการเคลื่อนที่สำหรับทดสอบคือฟังก์ชันสี่เหลี่ยมที่ผ่านตัวกรองความถี่สูงดังแสดงในรูปที่ 6 และแสดงการจำลองเมื่อป้อนสัญญาณอ้างอิง



รูปที่ 6 ผลการจำลองระบบเคลื่อนที่ตามเส้นทางอ้างอิง

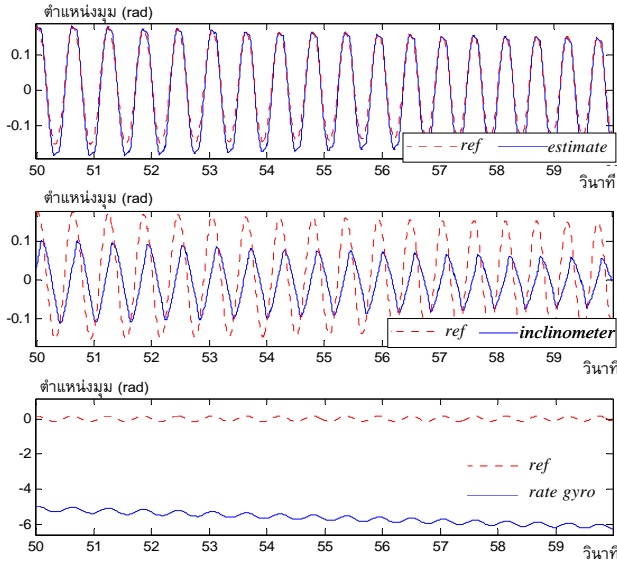
ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการควบคุมมุม θ ทำได้ช้าเนื่องจากเป็นระบบไม่ใช้มุมเฟสน้อยสุด สังเกตได้จากแรงดันไฟฟ้าจะย้อนกลับก่อนที่จะขับเคลื่อนในทิศทางอ้างอิง และในขณะที่เดียวกันต้องพยายามควบคุมมุม ψ ให้มีค่าน้อยๆ ในกรณีที่ต้องการเคลื่อนที่ตามเส้นทางอ้างอิงมากขึ้นหรือควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้ต่ำลง ผลลัพธ์ทำให้มุม ψ เบี่ยงเบนจากศูนย์มากทำให้ระบบเพิ่มความไม่เป็นเชิงเส้นหรือไม่มีเสถียรภาพ ส่วนมุมเลี้ยวสามารถควบคุมได้ง่ายกว่า และแรงดันไฟฟ้ามอเตอร์น้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าอิมิตวของระบบซึ่งอยู่ที่ ± 2.5 โวลต์

5.3 ประสิทธิภาพการวัดมุมเอียงที่แบนด์วิธสูง

จากตัวสังเกตแบบลูนเบอร์เกอร์ของระบบ (19) ถูกนำมาเขียนด้วยโปรแกรม Matlab เมื่อค่า K ของสมการ (20) ได้จากการวางโพลตำแหน่งการวางโพลดังกล่าวมีผลต่อการตอบสนองของมุมประมาณ

ตำแหน่งโพลโกลแกนจินตภาพให้การตอบสนองช่วงความถี่สูงได้ดีและลดการ drift ของสัญญาณ

หุ่นยนต์สองล้อนอกจากต้องการการตอบสนองช่วงความถี่ประมาณ 1 เฮิร์ต โดยมีสัญญาณอ้างอิงความถี่ถูกต้องคือ สัญญาณเอนโคเดอร์ เพื่อให้สอดคล้องจึงกำหนดตำแหน่งโพลที่ (-10, -20, -300)



รูปที่ 7 ผลการจำลองระบบมุมเอียงแบบดีวิทีสูง

รูปที่ 7 ในรูปบนแสดงผลการจำลองค่าประมาณมุมเอียง $\hat{\theta}$ ว่ามีประสิทธิภาพในการบอกสัญญาณได้อย่างรวดเร็วแม้ความถี่สูง ในขณะที่ Inclinometer แสดงผลมุมเอียงได้ไม่ดีเพราะมีการตอบสนองต่อความถี่สูงได้ต่ำ และรูปล่าง Gyroscope สามารถตอบสนองต่อความถี่สูงได้ดีแต่เกิดการ drift ของสัญญาณจึงไม่สามารถนำมาใช้ในหุ่นยนต์สองล้อได้โดยตรง

6. ผลการทดลอง

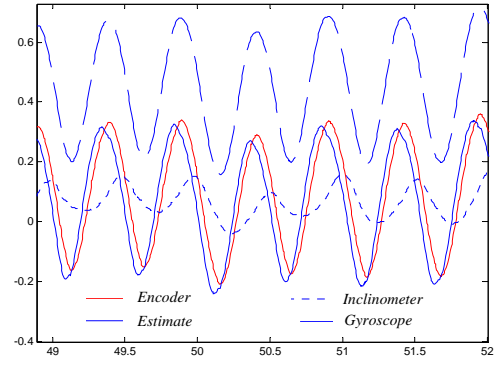
หลังจากออกแบบตัวควบคุมและตัวสังเกตในโปรแกรม Matlab ในท้ายสุดเป็นการนำสิ่งที่ได้ออกแบบมาอิมพลีเม้นท์กับหุ่นยนต์สองล้อจริงซึ่งแสดงในรูปที่ 1

6.1 การทดสอบค่ามุมประมาณที่แบนด์วิธสูง

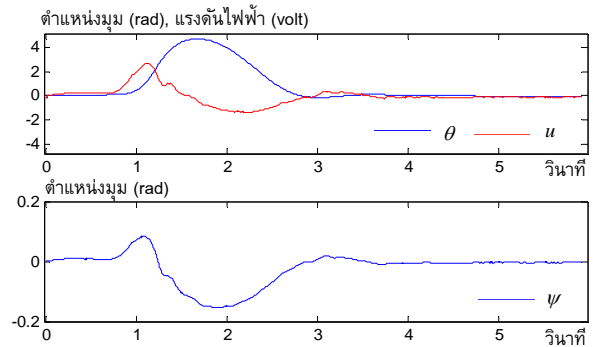
การทดลองเริ่มจากแบบจำลอง (19) จากหัวข้อ 5.3 ค่า K ที่ได้คือ (133, -128, 4696.7) การทดลองนี้ใช้ Inclinometer และ Rate Gyroscope ต่อรวมแกนหมุนกับเอนโคเดอร์ รูปที่ 8 แสดงผลการทดลองที่ความถี่ประมาณ 2 เฮิร์ต จากที่กล่าวไว้แล้วว่า Inclinometer มีการตอบสนองช้าจึงได้ผลผิดพลาดสูง ส่วน Rate Gyroscope มีการ drift และการตอบสนองของมุมประมาณ $\hat{\theta}$ โกลเดียวกับ เอนโคเดอร์ ซึ่งค่ามุมประมาณนี้ถูกนำไปใช้ในการทดลอง 6.2 และ 6.3

6.2 ทดสอบการรักษาสมดุลต่อสิ่งรบกวนภายนอก

หัวข้อนี้เป็นการทดสอบระบบควบคุมซึ่งคล้ายกับหัวข้อ 5.1 โดยป้อนแรงกระทำกับหุ่นยนต์ที่เวลา 0.5 - 1 วินาที ระบบพยายามชดเชยมุมเอียงก่อนในขณะที่ยังมีค่ามุมล้นเพิ่ม แต่มุมทั้งสองเข้าสู่ค่าศูนย์ในที่สุดระยะเวลาเพียง 4 วินาที



รูปที่ 8 ผลการทดลองการออกแบบการวัดมุมเอียง



รูปที่ 9 ผลการทดลองการรักษาสมดุลจากแรงรบกวนภายนอก

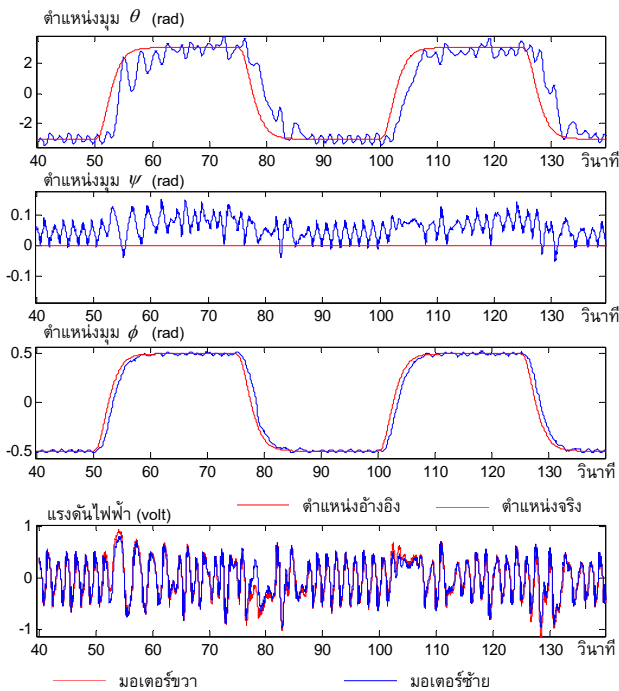
6.3 ทดสอบการเคลื่อนที่ตามเส้นทางอ้างอิง

การทดสอบสุดท้ายบอกถึงประสิทธิภาพของระบบควบคุมได้ดี โดยมีสัญญาณอ้างอิงเหมือนกับหัวข้อ 5.2 และรูปที่ 10 แสดงผลการทดลองมุม θ มีการตอบสนองที่ค่อนข้างช้าเป็นไปตามผลการจำลอง แต่เกิดการแกว่งซึ่งเกิดจากปัจจัยภายนอก เช่น น้ำหนักบางส่วนของสายไฟและแรงเสียดทานไม่เชิงเส้นของล้อและระบบขับเคลื่อน แต่สามารถควบคุมมุมเอียงได้ดี ($\psi < 0.2$ เรเดียน) และผลการควบคุมมุมเอียงที่ดีแสดงให้เห็นว่ามุมเอียงไม่เชื่อมโยงกับมุมเอียงมาก ค่ามุม ϕ มีค่าผิดพลาดต่ำทั้งในช่วงกระตุ้นและคงตัว สุดท้ายแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้ามอเตอร์มีค่าเป็นที่น่าพอใจ

7. บทสรุป

งานในบทความนี้เน้นสองส่วนคือ การออกแบบการควบคุมหุ่นยนต์สองล้อและการออกแบบการวัดความเอียงแบบดีวิทีสูง การวัดความเอียงอาศัยตัวสังเกตแบบลูนเบอร์เกอร์และถูกนำไปอิมพลีเม้นท์ต่อในระบบควบคุม การออกแบบตัวควบคุมโดยประมาณแบบจำลองเป็นเชิงเส้น ใช้เทคนิคตัวคุมค่ากำลังสองเชิงเส้น โดยการปรับค่าเมกตริกซ์ถ่วงน้ำหนักให้สอดคล้องกับแต่ละสแตต

การวัดความเอียงแบบดีวิทีสูงสามารถตอบสนองความถี่ในช่วง 0.1 - 2 เฮิร์ตได้ดีและไม่มีผลของการ drift ทั้งในการจำลองและการทดลอง ผลการจำลองและการทดลองการควบคุมให้ผลมีแนวโน้มเดียวกัน การเคลื่อนที่ออกตัวของหุ่นยนต์ช้าเนื่องจากเป็นระบบไม่เชิงมุมเฟสน้อยสุด บางส่วนในการทดลองให้ผลดี เช่น การรักษาระดับมุมเอียง ระดับพลังงานที่ใช้ โดยเฉพาะการควบคุมมุมเอียงที่ค่าผิดพลาด



รูปที่ 10 ผลการทดลองการเคลื่อนที่ตามเส้นทางอ้างอิง

ต่ำเนื่องจากไม่เชื่อมกับมุมเอียงมากนัก แรงเสียดทานและแรงภายนอก เป็นปัจจัยทำให้เกิดการแกว่ง และการสั่นไหวของล้อหรือกรณีที่ล้อลอยจากพื้นทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ

หุ่นยนต์สองล้อยังคงเป็นหัวข้อที่น่าสนใจ ในอนาคตการออกแบบตัวควบคุมขั้นสูงจะถูกนำมาใช้มากขึ้นเพื่อการตอบสนองที่แน่นอนและทนทาน เช่น การควบคุมแบบจำลองไม่เชิงเส้น หรือการใช้ตัวควบคุมแปรผันค่าได้ก็เป็นอีกทางเลือกที่ดี

8. กิตติกรรมประกาศ

งานนี้ทำที่ห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสังเคราะห์ (CRV Lab) ซึ่งตั้งอยู่ที่และได้รับการสนับสนุนบางส่วนจากสถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDIP) แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ผลการวิจัยภายใต้โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินทุนอุดหนุนโครงการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรมจากส่วนงานกลาง สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

เอกสารอ้างอิง

[1] Grasser, F., Arrigo, A. D., Colombi, S. and Ruffer, A., JOE: A Mobile, Inverted Pendulum. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 49, No. 1, February 2002.

[2] Ha, Y., Yuta, S., Trajectory Tracking Control for Navigation of The Inverse Pendulum Type Self-contained Mobile Robot. Robotic and Autonomous System, Vol 17, Issue 1-2 SPEC. ISS., pp 65-80, April 1996.

[3] Kim, Y. H., Kim, S. H. and Kwak, Y. K., Dynamic Analysis of a Nonholonomic Two-wheeled Inverted Pendulum Robot. Proceedings of the 8th on Artificial Life and Robotics, Vol. 21, No. 3, pp. 505-513, June, 2005.

[4] Imamura, R., Takeji, T. and Yuta, S., Sensor Drift Compensation and Control of a Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot. Proceedings of Advanced Motion Control, 10th IEEE International Workshop, pp 137 -142, March 26-28, 2008.

[5] Saleno, A. and Angeles, J., The Control of Semi-Autonomous Two-Wheeled Robots Undergoing Large Payload-Variations. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 2, pp. 1740 – 1745, Apr 26-May 1, 2004.

[6] Yomamoto, Y., 2008, NXTway-GS (Self-Balancing Two-Wheeled Robot) Controller Design. [Online] Available: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/loadFile.do?objectId=19147>

[7] Pathak, T. , Franch, J. and Agrawal, S. K., Velocity and position control of a wheeled inverted pendulum by partial feedback linearization. IEEE Transactions on Robotic and Automation, Vol. 21, No. 3, pp. 505-513, June, 2005.

[8] Ren, T-J. , Chen, T-C. and Chen, C-T, Motion control for a two-wheeled vehicle using a self-tuning PID controller. Control Engineering Practice, Vol. 16, pp 365 – 375, 2008.

[9] Tirmant, H., Baloh, M., Vermeiren, L., Guerra, T. M. and Parent, M., B2, An Alternative Two Wheeled Vehicle for an Automated Urban Transportation System. Proceedings of Intelligent Vehicle Symposium, 2002. IEEE Vol. 2, pp. 594 – 603, June 17-21, 2002.

[10] Hatakeyama, N. and Shimada, A., Movement Control using Zero Dynamics of Two-wheeled Inverted Pendulum Robot. Proceedings of Advanced Motion Control, 10th IEEE International Workshop, pp. 38 – 43, March 26-28, 2008.

[11] Abeygunawardhana, P.K. W. and Toshiyuki, M., An Adaptive Based Approach to Improve the Stability of Two Wheel Mobile Manipulator. Proceedings of Industrial Electronics Society, 33rd Annual Conference, pp. 2712 - 2717, IEEE Nov 5-8, 2007

[12] Jeong, S. and Takahashi, T., Wheeled Inverted Pendulum Type Assistant Robot: Inverted Mobile, Standing, and Sitting Motions. Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Diego, CA, USA, Oct 29- Nov 2, 2007.

[13] Rehbinder, H. and Hu, X., Drift-free attitude estimation for accelerated rigid bodies. Automatica, Vol. 40, pp. 653-659, 2004.

[14] Leavitt, J., Sideris, A. and Bobrow, J. E., High Bandwidth Tilt Measurement Using Low-Cost Sensors. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 11, No. 3, June, 2006.