

การควบคุมการทรงตัวของหุ่นยนต์สองล้อที่ไม่ทราบจุดศูนย์กลางมวล Control of a Two-Wheel Balancing Robot with Unknown Center of Mass

ประวิณ ชีโนะวณิก ภิญโญ พวงมะลิ และ วีระพงษ์ ว่องรัตนะไพศาล*

วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

*ติดต่อ: wong@dome.eng.cmu.ac.th, (6653) 944146, (6653) 944145

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์การควบคุมการทรงตัวของหุ่นยนต์ 2 ล้อสำหรับการเคลื่อนที่ 2 องศาอิสระ ในการศึกษาได้เน้นพิจารณาแง่มุมการชดเชยความไม่แน่นอนของการประมาณจุดศูนย์กลางมวลของหุ่นยนต์ ซึ่งอาจเกิดจากการติดตั้งชุดเซ็นเซอร์ไม่ตรงกับแนวจุดศูนย์กลางมวล หรือชุดเซ็นเซอร์วัดมุมเอียงมีค่า offset ในตำแหน่งสมดุลงาน หรือมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวล ในการศึกษาได้ใช้การควบคุมแบบ linear quadratic regulator + integral action (LQR+I) โดยในบทความได้แสดงการวิเคราะห์เชิงโครงสร้างให้เห็นถึงความสามารถในการชดเชยค่าความไม่แน่นอนของจุดศูนย์กลางมวล และความเป็นไปได้ในการประมาณหามุมระหว่างแกนของเซ็นเซอร์และเส้นตรงที่ผ่านจุดศูนย์กลางมวลของหุ่นยนต์ด้วย ในการศึกษาได้สร้างหุ่นยนต์ 2 ล้อทรงตัวอัตโนมัติขึ้นมาเพื่อทดสอบการควบคุม โดยหุ่นยนต์ที่สร้างมีลักษณะคล้าย skateboard แต่มีเพียง 2 ล้อซึ่งติดตั้งรวมแนวแกนเดียวกัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงความสามารถของตัวควบคุมแบบ LQR+I ในการชดเชยความไม่แน่นอนของตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวล โดยหุ่นยนต์สามารถปรับตัวเข้าสู่สมดุลงานทั้งกลับสู่ตำแหน่งเดิมได้ ทั้งในกรณีเมื่อมีการปรับค่า offset ที่เซ็นเซอร์วัดมุมเอียงและกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงจุดศูนย์กลางมวลของหุ่นยนต์

คำหลัก: หุ่นยนต์ทรงตัว, ค่า offset ของเซ็นเซอร์, การควบคุมแบบ LQR+I

Abstract

This paper presents control analysis of a two-wheel balancing robot under two degree-of-freedom motion. Especially, the study focuses on how to deal with unknown center of mass, which is usually caused by misalignment of sensors with robot's center of mass or tilt sensor offset or simply the center of mass has changed its location. We provide analysis for a Linear Quadratic Regulator with Integral action (LQR+I) control which, through its structure, shows the ability to deal with these issues and possibly to predict the angle between the sensor axis and the line that passes the center of mass. A two-wheel skateboard-like balancing robot has been built in order to test the control concept. The test results showed the effectiveness of the LQR+I controller for which the robot could remain in balance and return to its original position both for case of sensor offset disturbance and also for actual shift in the robot's center of mass.

Keywords: balancing robot, sensor offset, LQR+I control

DRC-2015

1. บทนำ

การควบคุมระบบที่ขาดเสถียรภาพโดยธรรมชาติ ถือเป็นงานหนึ่งที่มีความท้าทาย ตัวอย่างระบบที่ขาดเสถียรภาพเช่น ตั้มเหวี่ยงหัวกลับ (inverted pendulum) จรวด หรือ หุ่นยนต์ 2 ล้อทรงตัว เป็นต้น การใช้งานของระบบดังกล่าวจะต้องมีการควบคุมที่ดี เพราะนอกจากจะไม่มีเสถียรภาพแล้ว โดยส่วนใหญ่ยังเป็นระบบมีจำนวนองศาอิสระการควบคุมน้อยกว่าจำนวนองศาอิสระของการเคลื่อนที่ (เรียกว่า underactuated system) ทำให้การควบคุมซับซ้อน ที่ผ่านมามีการศึกษาวิธีการต่างๆ ในการควบคุม inverted pendulum มากมาย โดยสามารถพิจารณาจากบทความบททวน [1] ในการควบคุมมีทั้งการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นสำหรับการเคลื่อนที่ใกล้จุดสมดุล และการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นสำหรับการเคลื่อนที่ในช่วงกว้าง [2] และมีทั้งงานที่ศึกษาการควบคุมที่มีหลายองศาอิสระ [3] เป็นต้น

หุ่นยนต์ 2 ล้อทรงตัว เป็นระบบที่ขาดเสถียรภาพอีกระบบหนึ่งซึ่งมีความคล้ายคลึงกับ inverted pendulum แต่ต่างกันที่ความซับซ้อนของระบบ เช่น เซอร์วอตัมม มีงานวิจัยจำนวนหนึ่งที่ศึกษาระบบควบคุมของหุ่นยนต์ทรงตัวสองล้อ เช่น [4,5] ปัจจุบันรูปแบบหนึ่งของหุ่นยนต์ 2 ล้อทรงตัวถูกนำมาใช้เป็นยานพาหนะเพื่ออำนวยความสะดวกในการเดินทางระยะสั้น เช่น Segway [6]

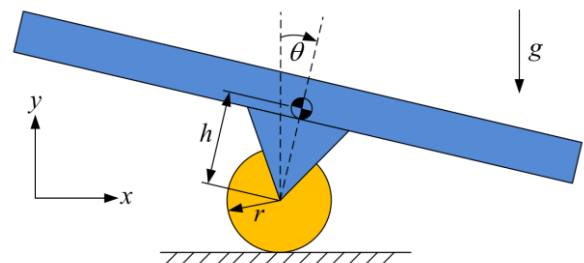
ในการศึกษาการควบคุมที่ผ่านมามีการใช้ค่ามุมเอียงของหุ่นยนต์เป็นสัญญาณป้อนกลับ โดยกำหนดให้มุมเอียงมีค่าเป็นศูนย์ที่ตำแหน่งสมดุล และการควบคุมจะอยู่ในรูปแบบที่ regulate ให้มุมเอียงนี้เป็นศูนย์ อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติมักจะเป็นไปได้อย่างยากที่จะติดตั้งให้เซ็นเซอร์วัดมุมมีค่าเป็นศูนย์ที่ตำแหน่งสมดุล เนื่องจากเรามักไม่ทราบจุดศูนย์กลางมวลที่แน่นอน และยิ่งไปกว่านั้นจุดศูนย์กลางมวลอาจเปลี่ยนตำแหน่งได้โดยง่าย เช่น หากมีการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์บนหุ่นยนต์หรือมีการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม หรืออาจเกิดจากกรณีที่ตัวเซ็นเซอร์เองเมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณแล้วมีค่า offset เกิดขึ้นจากวงจร

ได้ ทำให้สัญญาณค่ามุมที่เป็นศูนย์ไม่จำเป็นต้องตรงกับตำแหน่งที่หุ่นยนต์อยู่ในสมดุล ปัญหาในการควบคุมลักษณะนี้คือ จะต้องมีการชดเชยค่า offset ซึ่งไม่ทราบค่าที่แน่นอนทุกครั้งที่หุ่นยนต์เริ่มทำงาน และหากชดเชยได้ไม่สมบูรณ์ ระบบอาจจะพยายามบังคับการเคลื่อนที่ให้อยู่รอบๆ จุดที่ไม่สมดุลนี้ งานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมามีการได้สืบทอด ยังไม่มีการอภิปรายถึงประเด็นนี้โดยตรง งานวิจัยนี้จึงมุ่งวิเคราะห์ถึงผลของค่า offset ของมุมเอียงที่มีต่อการรักษาสมดุล รวมทั้งนำเสนอวิธีที่จะสามารถจัดการปัญหานี้ได้โดยอัตโนมัติ

บทความนี้มีเนื้อหา ดังนี้ หัวข้อที่ 2 อธิบายถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลของ offset ของมุมเอียงที่มีต่อสมดุล รวมทั้งรูปแบบของการควบคุม หัวข้อที่ 3 อธิบายหุ่นยนต์ที่สร้างขึ้นสำหรับการทดสอบ หัวข้อที่ 4 แสดงผลการทดสอบ และหัวข้อที่ 5 นำเสนอบทสรุป

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการควบคุม

2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 1 พิกัดของหุ่นยนต์

ตามรูปที่ 1 แสดงภาพด้านข้างของหุ่นยนต์ 2 ล้อทรงตัวเคลื่อนที่ในแนวราบ โดยจะพิจารณาเฉพาะการเคลื่อนที่ใน 2 มิติ กำหนดให้ x คือตำแหน่งในแนวราบของหุ่นยนต์วัดเทียบกับจุดศูนย์กลางมวลที่เทียบเท่ากับจุดศูนย์กลางของโลก เพื่อให้การพิจารณาเป็น 2 มิติ จะถือว่าหุ่นยนต์ถูกควบคุมไม่ให้เคลื่อนที่หมุนรอบแกน y ในกรณีนี้ใช้วิธี Lagrange จะสามารถหาสมการการเคลื่อนที่ได้เป็น

DRC-2015

$$(m_w + \frac{J_w}{r^2} + m_b)\ddot{x} - m_b h \sin(\theta)\dot{\theta}^2 + m_b h \cos(\theta)\ddot{\theta} = \frac{T}{r} \quad (1)$$

$$m_b h \cos(\theta)\ddot{x} + (m_b h^2 + J_b)\ddot{\theta} - m_b g h \sin(\theta) = \frac{-T}{n} \quad (2)$$

โดย m_w คือมวลของล้อ J_w คือโมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกน z ของล้อ m_b คือมวลของตัวหุ่นยนต์ J_b คือโมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกน z ของตัวหุ่นยนต์ T คือแรงบิดที่ล้อ มอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนล้อถูกติดตั้งกับตัวหุ่นยนต์โดยมีการทดรอบเป็น 1:n

สำหรับหุ่นยนต์ที่มีการควบคุมที่มีเสถียรภาพ การเคลื่อนที่จะมีการเปลี่ยนแปลงค่า θ น้อยๆ รอบจุด θ ที่เป็นศูนย์ ทำให้สามารถประมาณพฤติกรรมของระบบเป็นแบบเชิงเส้นคือ

$$\ddot{x} = a_1 \theta + b_1 T$$

$$\ddot{\theta} = a_2 \theta + b_2 T \quad (3)$$

$$\text{โดย } a_1 = -\frac{r^2 m_b g h^2}{M}$$

$$b_1 = \frac{r(J_b n + m_b h^2 n + r h m_b)}{M n}$$

$$a_2 = \frac{m_b g h (m_b r^2 + m_w r^2 + J_w)}{M}$$

$$b_2 = -\frac{m_b h r n + m_b r^2 + m_w r^2 + J_w}{M n}$$

$$M = m_b r^2 J_b + m_w r^2 m_b h^2 + m_w r^2 J_b + J_w m_b h^2 + J_w J_b$$

จากสมการ (3) จะเห็นว่า θ แสดงถึงพฤติกรรมแบบ second-order ของระบบที่ไม่ขึ้นอยู่กับค่า x แต่ในทางกลับกัน พฤติกรรมของ x ขึ้นอยู่กับ θ

2.2 การควบคุมการทรงตัว

ในงานวิจัยหลายชิ้นที่ผ่านมา มักจะเลือกใช้การควบคุมในรูปแบบ feedback ดังนี้

$$T = k_1 e_x + k_2 \dot{e}_x - k_3 \theta_m - k_4 \dot{\theta}_m \quad (4)$$

โดยตัวห้อย m หมายถึงสัญญาณที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ และ $e_x = x_d - x$ คือความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าตั้ง (set-point) ของการเคลื่อนที่ในแนวราบ x_d และค่าการเคลื่อนที่จริง x (โดยสมมุติว่าเราสามารถวัดค่าการ

เคลื่อนที่ x โดยไม่มีความคลาดเคลื่อน) ค่า gain $k_i, i = 1, \dots, 4$ ที่เหมาะสมสามารถหาได้จากวิธีการเชิง optimal เช่น linear quadratic regulator (LQR) เป็นต้น

หากพิจารณาสัญญาณจากเซ็นเซอร์วัดมุมเอียงของตัวหุ่นยนต์ตามสมการ (4) นั้น θ_m จะต้องให้ค่าเป็นศูนย์เมื่อระบบอยู่ในสมดุล แต่ในทางปฏิบัตินั้น การติดตั้งเซ็นเซอร์วัดมุมเอียงให้สัญญาณมีค่าเป็นศูนย์ ณ ตำแหน่งสมดุลนั้นเป็นไปได้ยาก ตามที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้ระบบจะอยู่ในสมดุลเมื่อ $\theta_m \neq 0$ และหากใช้กฎการควบคุมตามสมการ (4) นั้น ระบบจะอยู่ในสมดุลจริง (โดย $T = 0$) ณ ตำแหน่งที่ $e_x \neq 0$ ซึ่งหมายถึงจะเกิดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งหุ่นยนต์ในแนวราบ

ในทางปฏิบัติ พิจารณาสัญญาณที่วัดได้จากการที่เซ็นเซอร์ให้ค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าจริงดังนี้

$$\theta_m = \theta + d_1 \quad (5)$$

โดย d_1 คือ offset ของค่ามุมเอียง แทนค่าสมการ (5) ในสมการ (4) จะได้

$$T = k_1 e_x + k_2 \dot{e}_x - k_3 (\theta + d_1) - k_4 \dot{\theta} \quad (6)$$

เมื่อแทนค่าสมการ (6) ใน (3) แล้วทำการแปลง Laplace เราจะสามารถหา transfer function $E_x(s)/D_1(s)$ และ $\Theta(s)/D_1(s)$ ได้ ซึ่งหากระบบมี offset ค่าความคลาดเคลื่อน ณ สภาวะคงตัว (steady-state error) ของระบบจะเป็น

$$(e_x)_{ss} = \frac{k_3}{k_1} d_1 \quad (7)$$

$$(\theta)_{ss} = 0$$

จะเห็นว่า d_1 ไม่มีผลต่อสมดุลของมุมเอียง แต่จะทำให้หุ่นยนต์มีค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งแนวราบ ซึ่งจะไปสมดุลอยู่ในตำแหน่งที่ต่างจากค่า set-point

หากพิจารณาการควบคุมในรูปแบบ

$$T = k_1 e_x + k_2 \dot{e}_x - k_3 \theta_m - k_4 \dot{\theta}_m + k_5 \int_{t_0}^{t_f} e_x dt \quad (8)$$

ซึ่งเพิ่มเทอมอินทิกรัลของ e_x ไปด้วย เช่นเดียวกัน ค่า $k_i, i = 1, \dots, 5$ ที่เหมาะสมสามารถหาได้จากวิธีเชิง

DRC-2015

optimal เช่น LQR+integral action (ในที่นี้จะเรียกว่า LQR+I) โดยในกรณีนี้พบว่าค่าความคลาดเคลื่อน ณ สภาวะคงตัวของระบบเนื่องมาจากผลของ offset เป็น

$$\begin{aligned}(e_x)_{ss} &= 0 \\ (\theta)_{ss} &= 0\end{aligned}\quad (9)$$

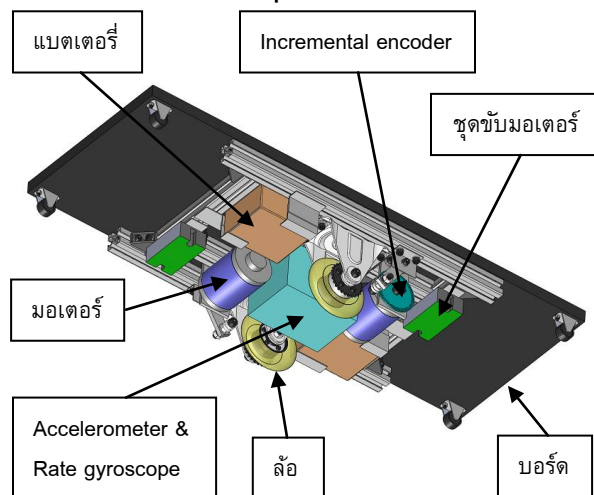
จากสมการ (9) จะเห็นว่าการควบคุมแบบ LQR+I สามารถรักษาสมดุลและกำจัดค่าความคลาดเคลื่อน ณ สภาวะคงตัวจากผลของ offset ได้โดยไม่ขึ้นอยู่กับค่าของ offset นอกจากนั้นเรายังอาจประเมินค่า offset ได้โดยพิจารณาจากสมการที่ (8) ที่สภาวะคงตัว ($T = 0$, $e_x = 0$, $\theta = 0$) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}0 &= -k_3\theta_m + k_5\int_{t_0}^{t_f} e_x dt \\ 0 &= -k_3(\theta + d_1) + k_5\int_{t_0}^{t_f} e_x dt \\ d_1 &= \frac{k_5}{k_3}\int_{t_0}^{t_f} e_x dt\end{aligned}\quad (10)$$

เพื่อพิสูจน์หลักการควบคุมนี้ เราได้สร้างหุ่นยนต์ 2 ล้อทรงตัว ตามรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

3. หุ่นยนต์ทดสอบ

3.1 ส่วนประกอบของหุ่นยนต์



รูปที่ 2 หุ่นยนต์ 2 ล้อทรงตัว

หุ่นยนต์ต้นแบบที่สร้างขึ้นมีลักษณะดังรูปที่ 2 โดยบอร์ดทำจากแผ่นไม้อัดขนาด 30x80 เซนติเมตร ล้อจำนวน 2 ล้อซึ่งติดตั้งขนานกันอยู่กลางบอร์ดถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 100

วัตต์ 24 โวลต์ ผ่านโซ่ด้วยอัตราทด 1:3 กระแสไฟฟ้าที่ส่งไปยังมอเตอร์ถูกควบคุมด้วยด้วย servo drive (Elmo: VIO-STARTER) ใน torque mode เซ็นเซอร์ที่ใช้คือ accelerometer (Freescale Semiconductor: MMA7361L) rate gyroscope (Analog Devices: ADXRS300) และ optical incremental encoder (ความละเอียด 90 พัลส์ต่อรอบ) ซึ่งทำมาจากแผ่นอะคริลิกที่บดแสงเจาะรูและตัวรับส่งแบบ optical transistor แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับมอเตอร์คือ แบตเตอรี่ตะกั่วกรดขนาด 12 โวลต์ 5.4 แอมแปร์ ชั่วโมง จำนวน 2 ก้อนต่ออนุกรมกันเพื่อให้ได้ค่าแรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ การควบคุมหุ่นยนต์อาศัยระบบ dSpace (ds1104) ตารางที่ 1 แสดงค่าประเมินของพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์ที่สร้างขึ้น

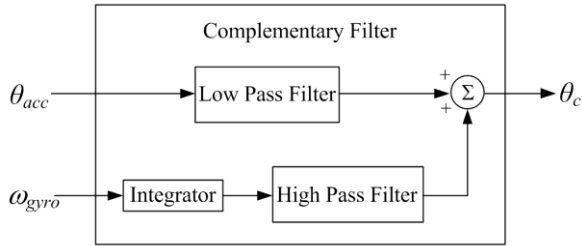
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์

ตัวแปร	ค่า	ตัวแปร	ค่า
m_w	0.9151 kg	r	0.049 m
J_w	0.0018 kg.m ²	G	9.81 m/s ²
m_b	14.3470 kg	h	0.0782 m
J_b	0.3583 kg.m ²	n	3

3.2 การออกแบบระบบวัดความเอียง

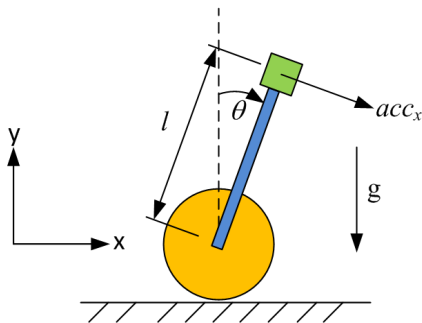
ในการวัดมุมเอียงและความเร็วเชิงมุม เราได้ออกแบบ complementary filter ซึ่งรวมสัญญาณจาก accelerometer และ rate gyroscope เข้าด้วยกันเพื่อใช้ประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์ให้เหมาะสมกับช่วงความถี่ของการตอบสนองของเซ็นเซอร์แต่ละตัว ทั้งนี้เนื่องจาก accelerometer จะถูกรบกวนได้ง่ายทั้งจากการสั่นสะเทือนและความเร่งจากการเคลื่อนที่ของตัวหุ่นยนต์เองในช่วงความถี่สูง ส่วนสัญญาณจาก rate gyroscope ก็มีข้อเสียคือมีการเบี่ยงเบนตามเวลาและอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป (drift) ในช่วงความถี่ต่ำ โดย complementary filter นี้มีการทำงานดังรูปที่ 3

DRC-2015



รูปที่ 3 รูปแบบของ complementary filter

จากรูป θ_{acc} คือมุมเอียงของตัวหุ่นยนต์ที่วัดได้จาก accelerometer (ติดตั้งตามรูปที่ 4) ω_{gyro} คืออัตราเร็วเชิงมุมของตัวหุ่นยนต์ที่วัดได้จาก rate gyroscope และ θ_c คือมุมเอียงของตัวหุ่นยนต์ที่ได้จาก complementary filter



รูปที่ 4 ลักษณะการติดตั้ง accelerometer

จากรูปที่ 4 l คือระยะระหว่าง accelerometer กับจุดศูนย์กลางล้อ จากการวิเคราะห์เชิงเรขาคณิต จะได้

$$acc_x = \ddot{x} \cos(\theta) + l\ddot{\theta} + g \sin(\theta) \quad (11)$$

โดย acc_x คือค่าที่อ่านได้จากแกน x ของ accelerometer ซึ่งในทางปฏิบัติ accelerometer จะวัดความเร่งในการเคลื่อนที่มีทิศทางกับแกน x ของ accelerometer ซึ่งในทางปฏิบัติ accelerometer จะวัดความเร่งในการเคลื่อนที่มีทิศทางกับแกน x ของ accelerometer ซึ่งในทางปฏิบัติ accelerometer จะวัดความเร่งในการเคลื่อนที่มีทิศทางกับแกน x ของ accelerometer

$$\theta_{acc} \approx \frac{acc_x + \ddot{x}}{g} \quad (12)$$

โดย $\ddot{x}$ ได้จากการประเมินจาก observer (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 3.3) ส่วน low pass filter (LPF) และ high pass filter (HPF) มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น

$$G_{LPF}(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (13)$$

$$G_{HPF}(s) = \frac{\tau s}{\tau s + 1} \quad (14)$$

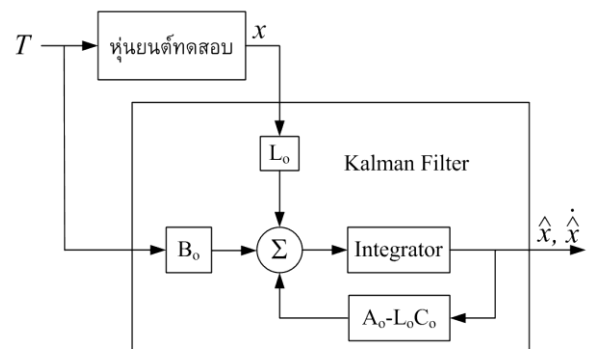
โดย τ คือค่า time constant ของ filter

3.3 การประเมินการเคลื่อนที่ในแนบราบ

โดยทั่วไปแล้ว การหาอัตราเร็วในการเคลื่อนที่โดยใช้ incremental encoder มักจะทำโดยการวัดความถี่ของพัลส์ หรือการวัดคาบระหว่างพัลส์ ทั้งสองวิธีล้วนมีข้อเสียเมื่อใช้ incremental encoder ที่มีความละเอียดต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อวัดที่ความเร็วต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากวิธีวัดความถี่จะเกิด quantization error มาก ส่วนวิธีวัดคาบจะมี sampling rate ต่ำ ดังนั้นเราจึงได้ประยุกต์ใช้ Kalman filter ร่วมกับแบบจำลองของระบบ เพื่อช่วยปรับปรุงความแม่นยำในการหาความเร็วของหุ่นยนต์ แบบจำลองที่ใช้คือ

$$(m_w + \frac{J_w}{r^2} + m_p)\ddot{x} = \frac{T}{r} \quad (15)$$

แบบจำลองข้างต้นเป็นแบบจำลองที่ไม่คำนึงถึงการเอียงของหุ่นยนต์ เนื่องจากความเอียงมีผลต่อการคำนวณการเคลื่อนที่ในแนบราบน้อยมาก โดย Kalman filter มีการทำงานดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การทำงานของ Kalman Filter

โดยที่ $A_o = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$

$$B_o = \begin{bmatrix} 0 & (m_w r + \frac{J_w}{r} + m_p r) \end{bmatrix}^T$$

$$C_o = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

จากรูปที่ 5 ตัวแปร $\hat{x}$, $\dot{\hat{x}}$ คือตำแหน่งและความเร็วที่ได้จาก Kalman filter L_o คือ gain matrix เมื่อใช้

DRC-2015

สัญญาณจาก incremental encoder ในการประมาณค่า นั้น มีการกำหนดอัตราส่วนเมตริกถ่วงน้ำหนักของ process noise ต่อเมตริกถ่วงน้ำหนักของ measurement noise เป็น 50000:1 เนื่องจากสัญญาณจาก incremental encoder มีสัญญาณรบกวนน้อยมาก Kalman filter จึงสามารถยึดถือสัญญาณจากเซ็นเซอร์เป็นหลัก มากกว่าที่จะยึดถือจากแบบจำลอง ซึ่งอาจคลาดเคลื่อนไปได้มากจากระบบจริงของหุ่นยนต์

4. ผลการทดลอง

เพื่อทดสอบผลของค่า offset ของมุมเอียงต่อการควบคุมแบบต่างๆ จึงได้มีการจัดการทดสอบดังนี้

- 4.1 การควบคุมเฉพาะมุมเอียงของหุ่นยนต์
- 4.2 การควบคุมทั้งมุมเอียงและตำแหน่งในแนวราบของหุ่นยนต์
- 4.3 การควบคุมทั้งมุมเอียงและตำแหน่งในแนวราบของหุ่นยนต์ด้วยเทคนิค LQR+I

ในการทดสอบ เริ่มแรกระบบจะถูกควบคุมให้อยู่ในสมดุลซึ่งถือว่าสภาวะนี้คือสภาวะที่ตัวแปรสถานะทุกตัวมีค่าเป็นศูนย์ หลังจากนั้น จะปรับค่า offset เป็น 5 องศา ณ วินาทีที่ 1 และทำการสังเกตผลตอบสนองของหุ่นยนต์ โดยค่า gain ที่ใช้ในการทดสอบหาได้จากการออกแบบแบบ LQR+I ซึ่งกำหนดเมตริกถ่วงน้ำหนักของตัวแปรสถานะ (Q) และเมตริกถ่วงน้ำหนักของสัญญาณควบคุม (R) เป็นดังนี้

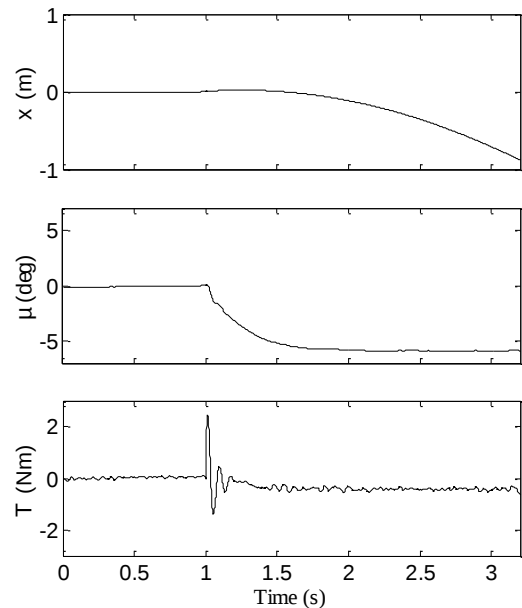
$$Q = \begin{bmatrix} 1300 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 760 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1300 \end{bmatrix}$$

$$R = [100]$$

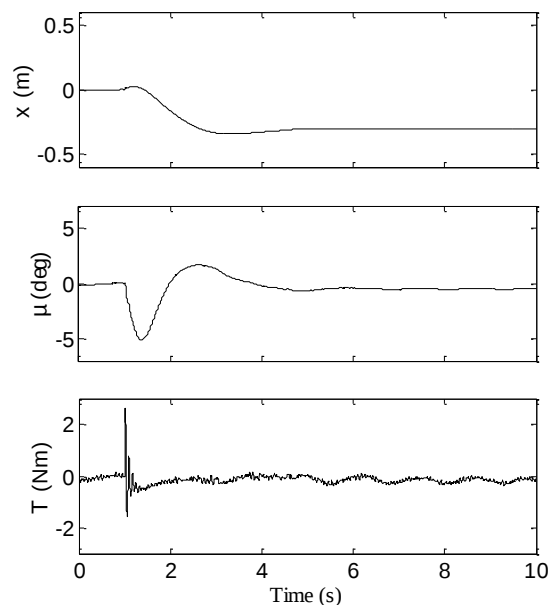
4.1 การควบคุมเฉพาะมุมเอียงของหุ่นยนต์

ในการทดสอบ ได้ตั้งค่า $k_1 = 0$, $k_2 = 0$, $k_3 = -29.85$, $k_4 = -5.86$, $k_5 = 0$ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 6 จะเห็นว่า เมื่อมีค่า offset หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ต่อเนื่องไปในแนวราบโดยไม่หยุดอยู่กับที่

โดยค่ามุมเอียงจะค้างอยู่ที่ประมาณ -5.5 องศา ในกรณีนี้ระบบขาดเสถียรภาพในการเคลื่อนที่แนวราบ



รูปที่ 6 ผลการทดสอบการควบคุมเฉพาะมุมเอียงของหุ่นยนต์

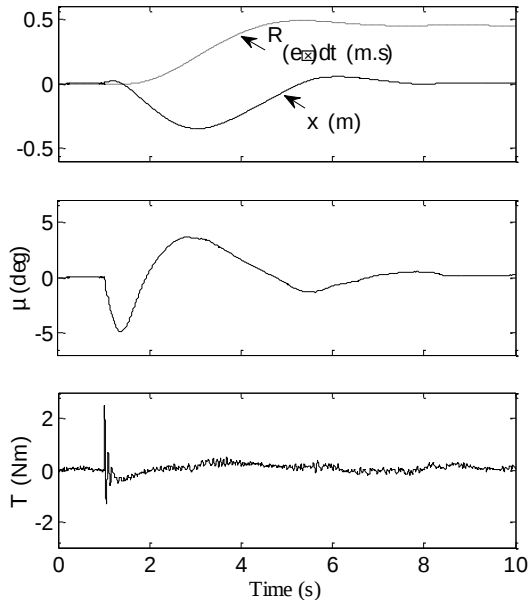


รูปที่ 7 ผลการทดสอบการควบคุมทั้งมุมเอียงและตำแหน่งในแนวราบของหุ่นยนต์

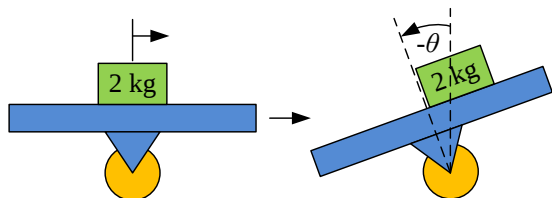
4.2 การควบคุมทั้งมุมเอียงและตำแหน่งในแนวราบของหุ่นยนต์

DRC-2015

รูปที่ 7 แสดงผลการทดสอบโดย $k_1 = -7.99$, $k_2 = -7.05$, $k_3 = -29.85$, $k_4 = -5.86$, $k_5 = 0$ จะเห็นว่าหุ่นยนต์สามารถรักษาเสถียรภาพไว้ได้หลังจากปรับ



รูปที่ 8 ผลการทดสอบการควบคุมทั้งมุมเอียงและตำแหน่งในแนวราบของหุ่นยนต์ด้วยเทคนิค LQR+I



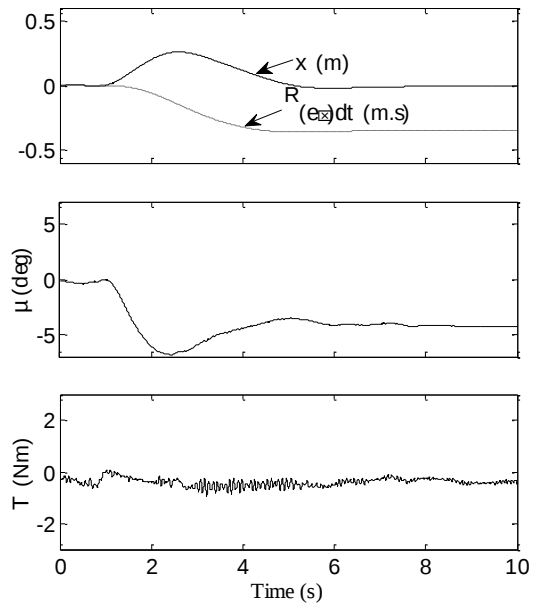
รูปที่ 9 ทดลองเปลี่ยนจุดศูนย์กลางมวล

offset แต่ตำแหน่งในแนวราบของหุ่นยนต์ ณ สภาวะคงตัวไม่เป็นศูนย์ โดยไปอยู่ที่ประมาณ -0.3 เมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณด้วยสมการ (7) คือ -0.326 เมตร ในกรณีนี้ ระบบรักษาสมดุลไว้ได้แต่มีความคลาดเคลื่อนถาวรเกิดขึ้นในแนวราบ

4.3 การควบคุมทั้งมุมเอียงและตำแหน่งในแนวราบของหุ่นยนต์ด้วยเทคนิค LQR+I

ในการทดสอบได้ตั้งค่า $k_1 = -7.99$, $k_2 = -7.05$, $k_3 = -29.85$, $k_4 = -5.86$, $k_5 = -3.6$ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 8 จะเห็นว่าหุ่นยนต์สามารถรักษาเสถียรภาพรวมทั้งสามารถ

เคลื่อนที่กลับสู่ตำแหน่งเดิมได้ ถึงแม้จะมีค่า offset โดยหากนำค่าของ $\int_1^\infty e_x dt$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.45 เมตรวินาที ไปคำนวณเพื่อหา offset จากสมการ (10) จะพบว่า offset มีค่าเท่ากับ 3.11 องศา ซึ่งคลาดเคลื่อนจาก offset ที่ปรับตั้งเข้าไป ทั้งนี้



รูปที่ 10 ผลการทดสอบการควบคุมด้วยเทคนิค LQR+I เมื่อมีการย้ายมวลที่วางบนหุ่นยนต์

ความคลาดเคลื่อนคาดว่าเกิดจากแรงเสียดทานที่มีอยู่ในระบบ โดยแรงบิดจากมอเตอร์ส่วนหนึ่งถูกใช้สำหรับชดเชยค่าแรงเสียดทานนี้

สำหรับตัวควบคุมชนิดนี้ ได้ทดลองการตอบสนองเมื่อมีการเปลี่ยนจุดศูนย์กลางมวลด้วย โดยได้นำมวล 2 กิโลกรัม มาวางตรงกลางบอร์ด เมื่อหุ่นยนต์เข้าสู่สมดุลแล้ว จึงเลื่อนตำแหน่งมวลไปประมาณ 5 เซนติเมตร ในทิศทางทาง $+x$ ตามรูปที่ 9 ซึ่งได้ผลการตอบสนองดังรูปที่ 10 จะเห็นว่าระบบมีการปรับตัวไปสู่สมดุลที่มุมเอียงประมาณ -4.5 องศา และสามารถเลื่อนกลับสู่ตำแหน่งในแนวราบเดิมได้ เมื่อประมาณค่ามุมระหว่างแกนของเซ็นเซอร์วัดมุมเอียงและแนวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางมวลที่เปลี่ยนไปจากสมการ (10) โดย $\int_1^\infty e_x dt$ เท่ากับ -0.35 เมตรวินาที จะได้ค่า offset ประมาณ -2.42 องศา ซึ่ง

DRC-2015

ต่างจากค่าที่แท้จริงอยู่ประมาณ 2 องศาเนื่องจากแรงเสียดทานในระบบดังที่กล่าวมา

5.สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอผลของค่า offset ของเซ็นเซอร์วัดมุมเอียงของหุ่นยนต์ 2 ล้อทรงตัว ต่อความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งของหุ่นยนต์ ซึ่งการควบคุมแบบ LQR+I สามารถรองรับการปรับเปลี่ยนของทั้งค่า offset ของเซ็นเซอร์วัดมุมเอียงและการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลหุ่นยนต์ได้ โดยสามารถรักษาทั้งสมดุลของหุ่นยนต์และตำแหน่งของหุ่นยนต์ได้ดี

ค่าอินทิกรัลของความคลาดเคลื่อนในแนวราบสามารถนำมาใช้ประมาณค่า offset ของเซ็นเซอร์หรือในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงจุดศูนย์กลางมวลสามารถประมาณค่ามุมระหว่างแกนของเซ็นเซอร์วัดมุมเอียงกับแนวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของมวลที่เปลี่ยนไป แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับของแรงเสียดทานที่มีอยู่ในระบบ

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Boubaker, O. (2012). The inverted pendulum: A fundamental benchmark in control theory and robotics, paper presented in the 2012 International Conference on Education and e-Learning Innovations (ICEELI)., Sousse, Tunisia, July 2012.
- [2] Karl J. Åström and Katsuhisa Furuta. Swinging up a pendulum by energy control. Automatica, 36:287-295, 2000.
- [3] Lundberg, Kent H. and Roberge, James K. (2003). Classical dual-inverted-pendulum control, paper presented in Proceedings of the IEEE

Conference on Decision and Control, pages 4399-4404, Maui, December 2003.

[4] Grasser, F., D'Arrigo, A., Colombi, S. and Rufer, A.C. (2002). JOE: A Mobile, Inverted Pendulum, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 49, No. 1, February 2002, pp. 107-114.

[5] Huantham, V. Kongratana, S. Gulphanich and V. Tipsuwanporn (2012). Controller Design Base on Servo State Feedback for Two-wheeled Balancing Robot, paper presented in Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, Jeju Island, South Korea, March, 2012.

[6] Segway Inc, URL:<http://www.segway.com>, access on 29/06/2013.