

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25
19-21 ตุลาคม 2554 จังหวัดกระบี่

พาหนะสองล้อบรรทุกคนขนาดเล็ก NEW DIMENSION TWO WHEELED VEHICLE

กิตตินันท์ ประเสริฐสม¹ และ วิฑิต ฉัตรรัตนกุลชัย²

ห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสัมผัสเทียม (CRV Lab) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

ติดต่อ: โทรศัพท์: 0-2942-8567 ต่อ 506

E-mail: ultra_nut@hotmail.com¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อสร้างต้นแบบของพาหนะสองล้อบรรทุกคนขนาดเล็ก ลักษณะคล้ายกับรถยี่ห้อ Segway หรือ Winglet ที่มีขายในราคาสูงอยู่ตามท้องตลาด ในงานวิจัยต้องการพัฒนาพาหนะสองล้อบรรทุกคนขนาดเล็กขึ้นเองจากศูนย์ ซึ่งออกแบบให้พาหนะสองล้อบรรทุกคนขนาดเล็กให้มีขนาดเล็กกระทัดรัดกว่าเดิม ในต้นแบบพาหนะสองล้อบรรทุกคนขนาดเล็กประกอบด้วยมอเตอร์และเซ็นเซอร์ที่จำเป็นเท่านั้น ส่วนการควบคุมทั้งหมดอยู่ด้านนอกของพาหนะสองล้อบรรทุกคนขนาดเล็ก โดยเชื่อมกันด้วยสายเคเบิล วิธีการแบบนี้ทำให้เราสามารถสร้างพาหนะสองล้อบรรทุกคนขนาดเล็กเพื่อทดลองหรือปรับเปลี่ยนแก้ไขได้อย่างรวดเร็วซึ่งสำหรับการสร้างต้นแบบขึ้นมาก่อนการสร้างพาหนะสองล้อบรรทุกคนขนาดเล็กจริง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงการออกแบบพาหนะสองล้อบรรทุกคนขนาดเล็กขึ้นมาใหม่เพื่อออกแบบพาหนะสองล้อบรรทุกคนขนาดเล็กนั้นให้มีขนาดเล็กลง กระทัดรัด มีน้ำหนักเบา เหมาะสำหรับใช้ชีวิตประจำวัน โดยมีราคาต้นทุนที่ต่ำกว่าท้องตลาด

ผลการทดลองได้ออกแบบพาหนะสองล้อบรรทุกคนขนาดเล็กขึ้นมาใหม่ให้มีขนาดเล็กกระทัดรัด ซึ่งมีขนาด 20 x 52 x 15 เซนติเมตร ซึ่งวัสดุอุปกรณ์โดยรวมอยู่เกณฑ์ที่ต่ำกว่าสินค้าทั่วไปในท้องตลาด ยกเว้นอุปกรณ์สำหรับการควบคุมซึ่งใช้อุปกรณ์ของ National Instrument ที่มีราคาสูง แต่สามารถอิมพลีเมนต์ตัวควบคุมได้อย่างรวดเร็ว ทำให้สามารถสร้างต้นแบบได้ในระยะเวลาจำกัด

คำหลัก: หุ่นยนต์สองล้อบรรทุกคนขนาดเล็ก, ลูกตุ้มกลับหัว, SEGWAY, WINGLET

Abstract

This research aims to create a prototype of New dimension two wheeled vehicle, it is similar to the Segway and Winglet brand sold in high price in the market. This research develops a New dimension two wheeled vehicle from scratch. The two wheeled vehicle is designed to carry people in a small compact vehicle than ever. The New dimension two wheeled vehicle has two small motors and consists of only necessary sensors. All control system is outside of the new dimension two wheeled vehicle, linking with a cable. This approach allows us to create a New dimension two wheeled vehicle for small changes and a quick fix for building the first prototype of a New dimension two wheeled vehicle.

This research studies the design of New dimension two wheeled vehicle to be smaller, compact, and light-weighted for everyday use with lower cost.

The New dimension two wheeled vehicle has a new small size (compact) with a size 20x52x15 cm. The materials and equipment used are cheaper than those of the products in the market. However, the National Instrument' s control implementation equipment is still expensive, but they can implement the control system quickly, enabling the creation of the prototype in a limited time.

Keyword : *New dimension two wheeled vehicle, Segway, Winglet*

1. บทนำ

พาหนะสองล้อนี้เป็นยานพาหนะที่ค่อนข้างแปลกตาในปัจจุบัน ถึงแม้ว่าความคิดในการประดิษฐ์พาหนะสองล้อดังกล่าวนั้นมีมานานแล้ว แต่สำหรับการออกแบบทางด้านโครงสร้าง การออกแบบทางด้านการทรงตัว การออกแบบทางด้านระบบควบคุมอัตโนมัติของพาหนะสองล้อยังคงเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อนในปัจจุบัน เนื่องจากมีล้อเพียงสองล้อเท่านั้นที่เป็นตัวกำหนดทั้งการเคลื่อนที่ในสองมิติและการทรงตัว แต่ทว่าการเคลื่อนที่ด้วยล้อเพียงสองล้อนั้นกลับทำให้พาหนะสองล้อสามารถเคลื่อนที่ได้คล่องแคล่ว เช่น การหมุนตัวเองอยู่กับที่ และการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของพาหนะสองล้อบรรทุกคนที่มิประโยชน์สำหรับการขึ้นลงทางลาดชัน เป็นต้น และพาหนะสองล้อยังมีลักษณะการทรงตัวที่ใกล้เคียงมนุษย์มากยิ่งขึ้น ในหลายอุตสาหกรรมได้พัฒนาพาหนะสองล้อเล็กประเภทนี้สำหรับเป็นพาหนะทางเลือกใหม่แทนที่มีแต่เดิมอยู่ เช่น Segway PT และ Winglet เป็นต้น

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา มีงานวิจัยสำหรับการออกแบบตัวควบคุมมากขึ้นเรื่อยๆ เพื่อรักษาเสถียรภาพและมีการตอบสนองของระบบเป็นไปตามที่ต้องการ ตัวควบคุม PID ถูกนำมาใช้และอาศัยการออกแบบด้วยแบบจำลอง เช่น วิธีการวางตำแหน่งโพล [1] ตัวคุมกำลังสองเชิงเส้น [2], [3], [4], [5], [6] โดยบทความที่กล่าวมานำวิธีดังกล่าวมาประยุกต์ออกแบบระบบควบคุมพาหนะสองล้อที่อยู่ในห้องปฏิบัติการ CRV ดังรูปที่ 1

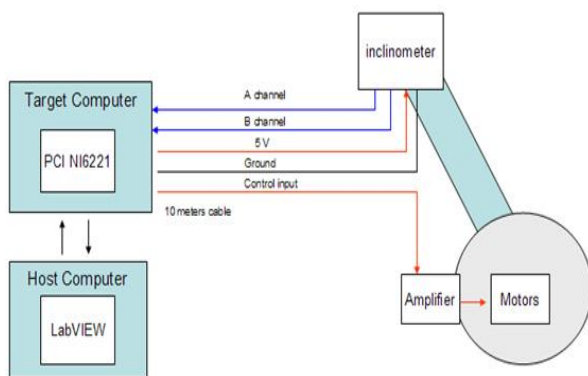


รูปที่ 1 พาหนะสองล้อในห้องปฏิบัติการ CRV Lab

ส่วนที่ 2 กล่าวถึงการออกแบบพาหนะสองล้อ และอุปกรณ์ ส่วนที่ 3 กล่าวถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยกฎของนิวตัน ส่วนที่ 4 การออกแบบการเข้าโค้งด้วยความเร็วของล้อทั้งสองข้างมีค่าเท่ากัน ส่วนที่ 5 และ 6 แสดงผลการจำลองโดยโปรแกรม Matlab และผลการทดลองในส่วนสุดท้ายกล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะ

2. การออกแบบพาหนะสองล้อและอุปกรณ์

การออกแบบตัวควบคุมและการจำลองผลผ่านคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม Matlab ในขณะที่ตัวควบคุมถูกอิมพลีเมนต์ผ่านโปรแกรม LabVIEW Real-time และอุปกรณ์สำหรับการทดลอง ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 อุปกรณ์การทดลอง

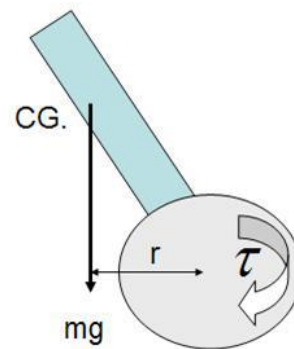
พาหนะสองล้อมีขนาด 20x52x15 เซนติเมตร น้ำหนัก 15 กิโลกรัม ประกอบด้วยมอเตอร์กระแสตรงขนาด 12 โวลต์ 2 ชุด เพื่อที่จะขับเคลื่อนล้ออย่างอิสระต่อกันและเสถียรของความเอียงได้จากเซนเซอร์วัดความเอียง(Inclinometer) ที่มีความละเอียด 2,500 CRP และ Rate Gyroscope (ADXRS 300)

ตัวควบคุมสร้างด้วยซอฟต์แวร์ คอมพิวเตอร์ โน้ตบุ๊คสำหรับออกแบบตัวควบคุมและสัญญาณอ้างอิงต่อกับคอมพิวเตอร์ที่เป็นตัวควบคุมโดยการรับส่งข้อมูล (NI PCI-6221) ซึ่งทำหน้าที่รับสัญญาณสเตตย้อนกลับและส่งสัญญาณควบคุมไปยังตัวขยายสัญญาณ (Power Amplifier) ซึ่งรับสัญญาณออกจาก

การแปรผันแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์กระแสตรงซ้ายและขวา

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การหาเอกลักษณ์ของระบบจากข้อมูลอินพุตและเอาพุต คือการสร้างแบบจำลองจากสมการทางกายภาพซึ่งสามารถหาได้จากหลายวิธี เช่น วิธีของนิวตัน และวิธีของเคน บทความนี้อาศัยวิธีของนิวตันมาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยพิจารณาจากรูปที่ 3



รูปที่ 3 Moment diagram of balancing

จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่า การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพาหนะสองล้อ จะเป็นแบบลูกตุ้มนาฬิกากลับหัว การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงใช้รูปแบบลูกตุ้มนาฬิกากลับหัว

ค่าทอร์กของมอเตอร์ที่สร้างขึ้นคือ

$$v = IR_m + k_b k_g \dot{\theta}_w \quad (1)$$

และ

$$T = k_g k_m I \quad (2)$$

เมื่อ

v คือค่าแรงดันที่ใช้ขับมอเตอร์

I คือค่ากระแสในขดลวด

R_m คือค่าความต้านทานของขดลวดในมอเตอร์ (Motor armature resistance)

T คือค่าแรงบิดของมอเตอร์

K_b คือค่า Motor back emf constant

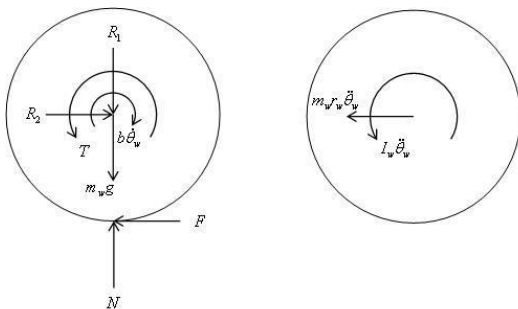
K_m คือค่า Motor torque constant

K_g คือค่า Gear ratio
 $\dot{\theta}_w$ คือค่าความเร็วล้อของพาหนะสองล้อ

จากสมการที่ (1) และ (2) จะได้

$$T = \frac{k_g k_m V}{R_m} - \frac{k_b k_m k_g^2 \theta_w}{R_m} \quad (3)$$

ล้อของพาหนะสองล้อ ดังรูปที่ 4

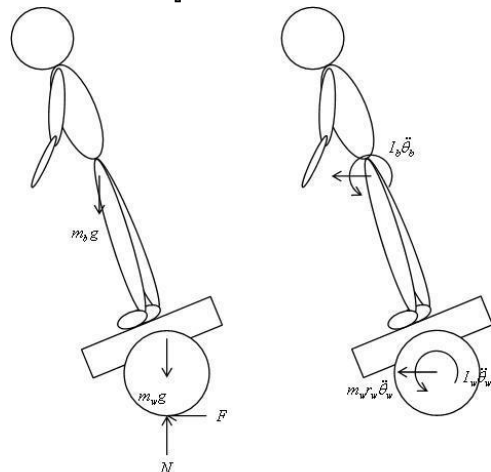


รูปที่ 4 FBD ของล้อพาหนะสองล้อ

จากกฎของนิวตันจะได้

$$T - b\dot{\theta}_w - Fr_w = I_w \ddot{\theta}_w \quad (4)$$

พาหนะสองล้อกับผู้ใช้ขี่



รูปที่ 5 FBD ของพาหนะสองล้อกับผู้ใช้ขี่

ดังรูปที่ 5 FBD ของพาหนะสองล้อกับผู้ใช้ขี่ จากกฎของนิวตัน จะได้

$$F = m_b r_b \ddot{\theta}_b + 2m_w r_w \ddot{\theta}_w \quad (5)$$

$$\begin{aligned} m_b g (r_b \sin \theta_b) &= I_b \ddot{\theta}_b + I_w \ddot{\theta}_w \\ &+ (m_b r_b \ddot{\theta}_b + m_b r_w \ddot{\theta}_w) (r_b \cos \theta_b + r_w) \\ &+ (m_w r_w \ddot{\theta}_w) (r_w) \end{aligned} \quad (6)$$

เมื่อรวมสมการจากมอดูลเตอร์กระแสตรง ล้อของพาหนะสองล้อ และพาหนะสองล้อกับผู้ใช้ขี่ จะได้

$$\begin{aligned} &[I_w + (r_b \cos \theta_b + r_w) m_b r_w + m_w r_w r_w] \ddot{\theta}_w \\ &+ [I_b + (r_b \cos \theta_b + r_w) m_b r_b] \ddot{\theta}_b \\ &= m_b g (r_b \sin \theta_b) \end{aligned} \quad (7)$$

เมื่อ

m_b คือค่าน้ำหนักของพาหนะสองล้อ
 m_w คือค่าน้ำหนักของผู้ขี่พาหนะสองล้อ

ล้อ

r_b คือค่ารัศมีของล้อพาหนะสองล้อ
 r_w คือค่าจุดศูนย์กลางของผู้ขี่พาหนะสองล้อถึงรัศมีล้อ

พาหนะสองล้อถึงรัศมีล้อ

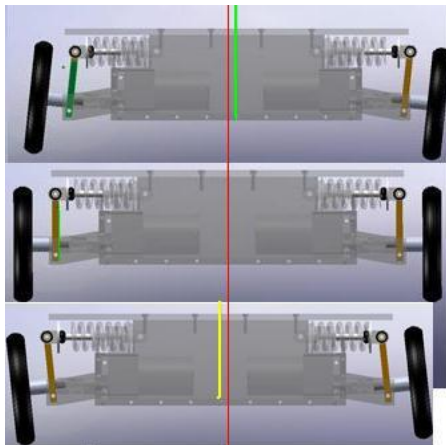
b คือค่าแรงปฏิกิริยาระหว่างลูกปืนล้อของพาหนะสองล้อ

I_b คือค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของผู้ขี่พาหนะสองล้อ

I_w คือค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพาหนะสองล้อ

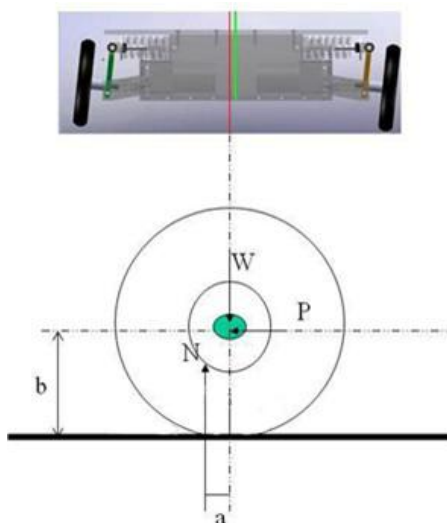
4. การออกแบบการเข้าโค้งด้วยความเร็วของล้อ ทั้งสองข้างมีค่าเท่ากัน

การเข้าโค้งโดยการถ่ายเทน้ำหนักของผู้ขับขี่
พาหนะสองล้อ หลักการเข้าโค้งโดยการถ่ายเทน้ำหนัก
คือ เคลื่อนจุดศูนย์กลางมวลของผู้ขับขี่ไปทางด้านที่
ต้องการจะเลี้ยว เพราะการเคลื่อนที่ของจุดศูนย์กลาง
มวลทำให้ล้อด้านที่ผู้ขับขี่พาหนะต้องการเลี้ยวมีแรง
ต้านการหมุนของล้อเพิ่มขึ้นทำให้ความเร็วของล้อด้าน
ที่ต้องการเลี้ยวมีค่าลดน้อยลง ทำให้ล้อของพาหนะ
ด้านตรงข้ามมีความเร็วมากกว่าทำให้เกิดการ
หมุนรอบตัวเองของพาหนะสองล้อ



รูปที่ 8 การย้ายตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลของผู้
ขับขี่

หลักการถ่ายเทน้ำหนัก



รูปที่ 9 การถ่ายเทน้ำหนักไปทางด้านขวา(บน)
แรงปฏิกิริยาที่กระทำต่อล้อพาหนะสองล้อ(ล่าง)

เมื่อ P คือแรงที่กระทำให้ล้อกลิ้งไปบนถนน
ด้วยความเร็วคงที่ แรงต้านการหมุนของล้อจะมีค่า
เท่ากับแรง P ในขณะนั้น จากรูปที่ 9 จะได้

$$\sum F_y = 0 \quad N = W \quad (8)$$

$$\sum M_A = 0 \quad Pb - Na = 0 \quad (9)$$

$$P = \frac{Na}{b} = \frac{Wa}{b} \quad (10)$$

เมื่อ

P คือค่าแรงที่ทำให้ล้อพาหนะสองล้อ

หมุน

W คือค่าน้ำหนักของผู้ขับขี่ที่ลงในแต่ละ
ล้อของพาหนะ

N คือค่าแรงปฏิกิริยาที่พื้นทำกับล้อ
ของพาหนะ

a/b คือค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุน
ของล้อ

เนื่องจากการถ่ายเทน้ำหนักของผู้ขับขี่
พาหนะสองล้อไปทางด้านขวาทำให้จุดศูนย์กลางมวล
เคลื่อนที่ไปทางด้านขวาห่างจากจุดศูนย์กลางมวลเดิม
4 เซนติเมตร ทำให้อัตราส่วนของน้ำหนักที่ลงล้อของ
พาหนะด้านขวามีปริมาณเพิ่มขึ้น 13.56 เปอร์เซ็นต์
ในทางกลับกันล้อทางด้านซ้ายของพาหนะมีปริมาณ
ลดลง 13.56 เปอร์เซ็นต์ ตามที่ได้ออกแบบให้พาหนะ
สองล้อบรรทุกผู้ขับขี่ได้ 80 กิโลกรัม 13.56
เปอร์เซ็นต์ มีค่า 10.840 กิโลกรัม จะได้ $W_{\text{ล้อซ้าย}} =$
 678.4596 N , $W_{\text{ล้อขวา}} = 891.1404 \text{ N}$, $a/b = 0.4$

จาก (10) จะได้

ที่ล้อด้านซ้าย $P = 271.3838 \text{ N}$

ที่ล้อด้านขวา $P = 356.4562 \text{ N}$

จากการคำนวณแสดงให้เห็นว่า ล้อทางด้านขวาของพาหนะสองล้อมีแรงต้านการหมุนมากกว่าล้อด้านซ้ายของพาหนะสองล้อ จากผลดังกล่าวทำให้ผู้ขับขี่พาหนะสองล้อสามารถเลี้ยวขวาโดยอาศัยหลักการถ่ายเทน้ำหนักได้

จากหลักการที่ใช้ในการเลี้ยวขวา นำมาประยุกต์ใช้กับการเลี้ยวด้านซ้ายของพาหนะสองล้อ ทำให้ผู้ขับขี่พาหนะสองล้อสามารถเลี้ยวซ้ายโดยอาศัยหลักการถ่ายเทน้ำหนักได้

5. ผลการจำลองโดยโปรแกรม Matlab

รูปสัญญาณตอบสนองของระบบควบคุมแบบปิดเมื่อกำหนดให้ อัตราตัวควบคุมแบบ PID มีค่าเท่ากับ $K_p = 80$, $K_i = 400$, $K_d = 1$

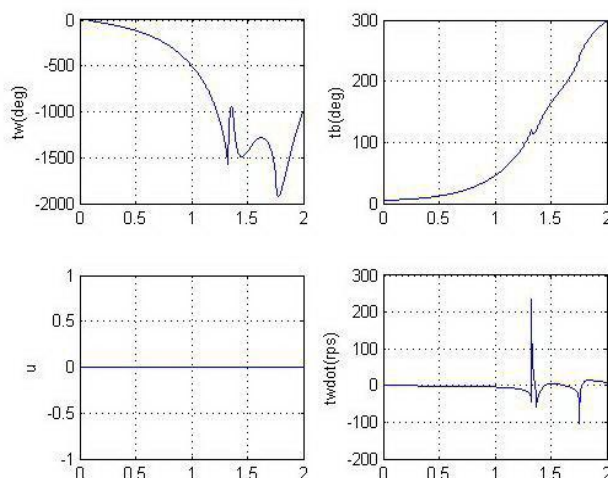
กำหนดให้

$tw(deg)$ คือค่ามุมล้อของพาหนะสองล้อ

$tb(deg)$ คือค่ามุมของผู้ขับขี่พาหนะสองล้อ

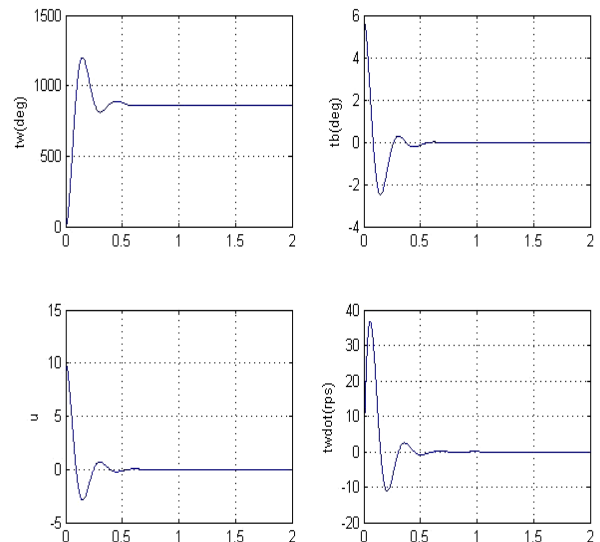
$twdot(rps)$ คือค่าความเร็วล้อของพาหนะสองล้อ

u คือค่าสัญญาณป้อนเข้าระบบ

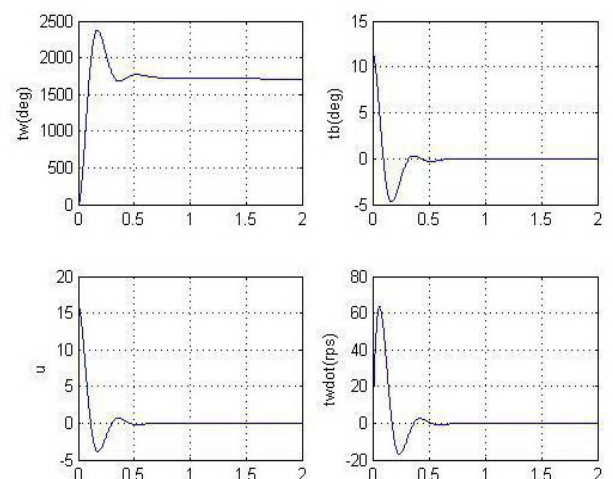


รูปที่ 10 ผลของการจำลองระบบแบบไม่มีตัวควบคุม โดยให้แกนนอนคือเวลา(วินาที)

ดังรูปที่ 10 ที่แสดงให้เห็นถึงระบบของพาหนะสองล้อ เมื่อไม่มีตัวควบคุม จะทำให้ผู้ขับขี่ไม่สามารถรักษาสมดุลได้ หรือผู้ขับขี่ล้มลง

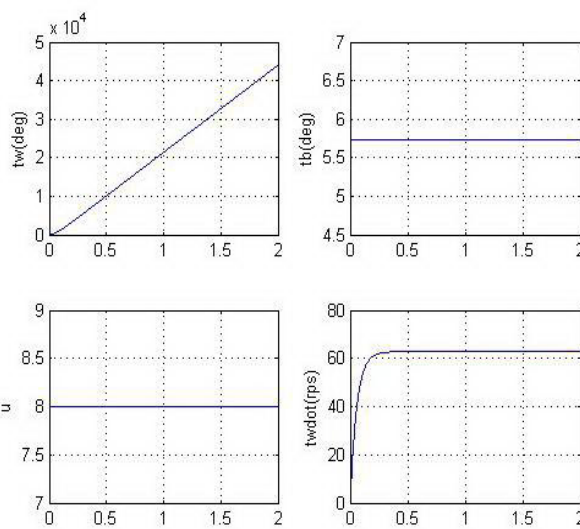


รูปที่ 11 ผลของการจำลองระบบเมื่อให้มุมเริ่มต้นที่ค่า 0.1 เรเดียน โดยให้แกนนอนคือเวลา(วินาที)



รูปที่ 12 ผลของการจำลองระบบเมื่อให้มุมเริ่มต้นที่ค่า 0.2 เรเดียน โดยให้แกนนอนคือเวลา(วินาที)

ดังรูปที่ 11 และ รูปที่ 12 ที่แสดงให้เห็นถึงตัวควบคุมแบบ PID ที่สามารถทำให้ผู้ขับชี่รักษาสมดุลได้ เมื่อให้มุมเริ่มต้นมีค่า 0.1 เรเดียน และ 0.2 เรเดียน ระบบจะเข้าสู่จุดสมดุลเมื่อเวลา 0.5 วินาที จากกราฟจะเห็นได้ว่าการควบคุมพาหนะสองล้อนั้นต้องอาศัยทั้งระบบควบคุมที่แม่นยำและมีความไวสูง เนื่องจากต้องเผชิญกับความโน้มถ่วงของโลกที่มีลักษณะไม่เชิงเส้นที่จะทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ



รูปที่ 13 ผลของการจำลองระบบเมื่อให้ผู้ขับชี่พาหนะสองล้อเอนมุมคงที่ ที่ 0.1 เรเดียน

ดังรูปที่ 13 ที่แสดงให้เห็นว่า เมื่อผู้ขับชี่เอนมุมคงที่ ที่ 0.1 เรเดียน ผลที่ได้คือ จะทราบค่าความเร็วที่ล้อ ของพาหนะสองล้อและสามารถทำแบบจำลองนี้ออกแบบหาค่าของความเร็วรอบของมอเตอร์ได้

6. สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

ในการทดลองจริงแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกคือโครงสร้างพาหนะสองล้อสามารถรองรับผู้ขับชี่พาหนะสองล้อที่มีน้ำหนักไม่เกิน 80 กิโลกรัมได้ โดยโครงสร้างไม่เกิดการเสียหาย ส่วนที่สองการเลี้ยวโดยการถ่ายเทน้ำหนักของผู้ขับชี่พาหนะสองล้อ สามารถเลี้ยวได้เมื่อถ่ายเทน้ำหนักไปด้านที่ต้องการจะเลี้ยว และสามารถกลับสู่จุดสมดุลได้ คือจุดศูนย์กลางมวลของผู้ขับชี่พาหนะสองล้ออยู่ตรงกลางระหว่างระยะห่างล้อข้างซ้ายกับล้อข้างขวาของพาหนะสองล้อ มีระยะเท่ากัน ส่วนที่สามระบบควบคุมสามารถตอบสนองผู้ขับชี่ได้เมื่อต้องการไปด้านหน้าโดยการโน้มตัวไปด้านหน้า และไปด้านหลังโดยการโน้มตัวไปด้านหลัง โดยที่ระบบควบคุมสามารถรักษาสถิติของผู้ขับชี่พาหนะสองล้อไม่ให้ล้มได้

ในการจำลองระบบด้วยโปรแกรม MATLAB วิธีการ Ziegler-Nichols ไม่สามารถใช้กับระบบที่มีเสถียรภาพอย่างมีขอบเขตได้ เนื่องจากไม่สามารถปรับค่า K ให้ระบบเริ่มการแกว่งได้ เนื่องจากระบบนั้นมีจุดสมดุลอยู่ที่ตำแหน่งเอียงศูนย์กลางเท่านั้น มีเช่นนั้นแรงโน้มถ่วงของโลกจะทำให้พาหนะสองล้อล้มลง เพราะการทรงตัวของพาหนะสองล้อถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสตรงที่เป็นอิสระต่อกันแต่มีแกนหมุนร่วมกัน พาหนะสองล้อประเภทนี้จะลักษณะทางพลศาสตร์แบบลูกตุ้มนาฬิกากลับหัว จึงเป็นพาหนะสองล้อที่มีเสถียรภาพอย่างมีขอบเขต เมื่อไม่มีแรงภายนอกกระทำ

6.2 ข้อเสนอแนะ

การออกแบบระบบควบคุมนี้อยู่บนพื้นฐานของการควบคุมแบบเชิงเส้น การหาแบบจำลองของระบบด้วยกฎข้อที่สองของนิวตัน อาจจะเลยแรงปฏิกิริยาในบางส่วน และการประมาณระบบดังกล่าวเป็นเชิงเส้นทำให้ผลการควบคุมที่ห่างจากมุมศูนย์กลางมากขึ้นยังมีความคลาดเคลื่อนมากขึ้น การส่งสัญญาณวัดมุมเอียงยังช้าอยู่เนื่องจาก Inclinator

เป็นแบบลูกตุ้มนาฬิกากลับหัวทำให้ตัว Inclinometer เองมีความเฉื่อย เวลาที่มีสิ่งรบกวนจากภายนอก ติดต่อกันเป็นเวลานานทำให้ระบบเสียเสถียรภาพได้ คาดว่าการปรับเปลี่ยนให้เป็นระบบไม่เชิงเส้นนั้นน่าจะ ทำให้สามารถควบคุมพาหนะสองล้อได้ดีขึ้นรวมถึง การใช้แบบแปรผันค่าได้ (Adaptive Control) เช่น Neural Network หรือ Fuzzy Logic ก็น่าจะเป็นอีก ทางที่เหมาะสม

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ทำที่ห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์ และการสั่นสะเทือน (CRV Lab) และได้รับการ สนับสนุนบางส่วนจากสถาบันค้นคว้าและพัฒนา เทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDIP) แห่ง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

8. เอกสารอ้างอิง

8.1 บทความจากวารสาร

- [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.

8.2 บทความจากเอกสารประกอบการประชุม

- [3] กิตติพงษ์ เขียววาจา , วิจิต จัตรรัตนกุลชัย (2551) การควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของหุ่นยนต์สองล้อด้วย การวัดความเอียงแบบดิจิทัลสูง , การประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต , หน้า 376-381

- [4] 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.
- [5] Imamura, R., Takei, 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.
- [6] 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.

8.2 หนังสือ

- [7] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. 2548. การควบคุมระบบ พลศาสตร์. ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- [8] Norman S.Nise. 2004. Control Systems Engineering. 4 ed. JOHN WILEY & SONS, United States of America.
- [9] ปราโมทย์ เตชะอำไพ และ วิโรจน์ ลิ้มตระการ. 2552. การประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย SolidWorks Simulation. ครั้งที่ 1. สมาคมส่งเสริม เทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.
- [10] Hansen, S. 2008. Learning and Apply SolidWorks 2008-2009 Step by Step. .1 ed. Industrial Press, Inc, New York.
- [11] Kurowski, P. M. 2009. Analysis with COSMOSWorks Professional 2008. 1 ed. Schroff Development Corporation, Mission, Kansas.