DRC-59

การหาค่าแรงฉุดลากในเวลาจริงของรถขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าด้วยการใช้การประมาณค่าอนุพันธ์แบบเลื่อนไถลอันดับสูง

Real-time determination of traction force of electric vehicles using high order sliding-mode differentiation

พงษ์มนัส ศรีวิทยานันต์[1] และ สุวัฒน์ กุลธนปรีดา[2]

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถนนประชาราษฎร์ สาย1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์ 02-913-2500, อีเมล์: [1]subaru_stars@hotmail.com, [2]suwat@kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

การควบคุมแรงฉุดลากและการป้องกันการไถลเป็นสิ่งที่ต้องการสำหรับรถสมัยใหม่ โดยทั่วไปต้องใช้การวัดค่าแรงฉุดลากในเวลาจริง ซึ่งสามารถวัดได้โดยตรงด้วยเซนเซอร์วัดแรงบิด แต่เซนเซอร์วัดแรงบิดมีราคาสูงและยังเป็นการเพิ่มชิ้นส่วนทางกลให้กับระบบด้วย จากพื้นฐานแนวคิดของวิธีการประมาณค่าอนุพันธ์แบบเลื่อนไถลอันดับสูง งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการหาค่าแรงฉุดลากในเวลาจริงสำหรับรถขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าด้วยการใช้เซนเซอร์วัดค่ากระแสและเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมร่วมกัน ซึ่งเป็นเซนเซอร์ที่พบได้ทั่วไปในรถขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า โดยงานวิจัยนี้ทำการศึกษาทั้งการจำลองการทำงานในคอมพิวเตอร์และการทดลอง การศึกษาด้วยการจำลองในคอมพิวเตอร์ใช้สมการพลวัตการเคลื่อนที่ของรถในแนวแกนตามยาว ส่วนการทดลองใช้เครื่องจำลองการเคลื่อนที่ของรถแบบล้อเดียว ซึ่งเป็นเครื่องจำลองที่ทำหน้าที่ลอกเลียนการเคลื่อนที่ของล้อบนพื้นผิวถนน ผลของการศึกษาทั้งการจำลองในคอมพิวเตอร์และการทดลอง แสดงให้เห็นว่าวิธีการดังกล่าวสามารถใช้ในการหาค่าแรงฉุดลากในเวลาจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และไม่ไวกับสัญญาณรบกวนในสัญญาณที่อ่านได้จากเซนเซอร์

คำหลัก: แรงฉุดลาก; การหาค่าแรงฉุดลาก; รถยนต์ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า; การอนุพันธ์แบบเลื่อนไถลอันดับสูง; พลวัตในแนวแกนตามยาวของรถ

Abstract

Traction control and slip prevention are needed in modern vehicles. They usually utilize a measurement of traction in real-time, which can be measured directly by using a torque transducer. However, the transducer is expensive and this will add an additional mechanical part into the system. Based on a high-order sliding-mode differentiation technique, this paper presents a scheme to determine the traction in real-time for electric vehicles by using a current sensor and an angular velocity sensor, which are normally found in electric vehicles. The study is conducted in both computer simulations and experiments. The simulation study makes use of a dynamic equation of a vehicle longitudinal model whereas the experiment study uses a single-wheel vehicle motion simulator. The simulator mimics a

wheel rolling on a road surface. Simulation and experimental results demonstrate that the scheme can determine the traction effectively in real-time and that it is insensitive to the noises in the sensors' signals.
Key words: Traction, Traction determination, Electric vehicles, High order sliding-mode differentiation, Longitudinal vehicle dynamics.

1. บทนำ

แรงฉุดลาก (Traction) เกิดขึ้นจากแรงเสียดทานระหว่างยางล้อรถกับพื้นผิวของถนน ถือว่าเป็นแรงขับเคลื่อนหลักของรถให้เกิดการเคลื่อนที่ โดยค่าแรงเสียดทานขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ลักษณะของดอกยาง ลักษณะและสภาพพื้นผิวของถนน และการไถล (Slip) ของล้อ เป็นต้น [1-2]

รถสมัยใหม่มีการติดตั้งระบบการควบคุมแรงฉุดลากและการป้องกันการไถลเพื่อเป็นการเพิ่มสมรรถนะและความปลอดภัยในการขับขี่ โดยอาจจะต้องใช้การวัดค่าแรงฉุดลากในเวลาจริง ซึ่งโดยทั่วไปการวัดค่าแรงฉุดลากสามารถกระทำได้โดยการใช้เซนเซอร์วัดแรงบิด (Torque transducer) แต่เนื่องจากอุปกรณ์มีต้นทุนที่สูงและยังเป็นการเพิ่มชิ้นส่วนทางกลให้ระบบ อาจมีผลให้ reliability ของระบบลดลง สำหรับรถขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า (Electric vehicles) เราสามารถใช้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอเตอร์ร่วมกับค่าความเร่งเชิงมุมของการหมุนของล้อในการประมาณค่าแรงฉุดลากแทนได้ ซึ่งการหาค่าความเร่งเชิงมุมสามารถหาได้จากการอนุพันธ์ค่าความเร็วเชิงมุมของล้อ แต่การหาค่าอนุพันธ์โดยตรง จะให้ผลลัพธ์ที่ไม่ดีเนื่องจากผลของสัญญาณรบกวน (Noise) โดยทั่วไปต้องใช้ตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (Low-pass filter) ร่วมด้วย แต่ตัวกรองสัญญาณส่งผลให้เกิด delay ของสัญญาณ ซึ่งอาจจะทำให้ระบบควบคุมสูญเสียเสถียรภาพได้

วิธีการประมาณค่าอนุพันธ์แบบเลื่อนไถลอันดับสูง (High-order sliding-mode differentiation) เป็นวิธีการประมาณค่าอนุพันธ์ที่มีความคงทน (Robustness) สูง [3-4] เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้กับสัญญาณที่ไม่เรียบและมีสัญญาณรบกวนสูง ทำให้วิธีการดังกล่าวมีความเหมาะสมสำหรับใช้หาอนุพันธ์ในเวลาจริงของสัญญาณของระบบพลวัตในสภาวะสิ่งแวดล้อมที่มีสัญญาณรบกวนสูง

งานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการหาค่าแรงฉุดลากในเวลาจริงสำหรับรถขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าด้วยการใช้เซนเซอร์วัดค่ากระแสและเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมร่วมกัน โดยใช้วิธีการประมาณค่าอนุพันธ์แบบเลื่อนไถลอันดับสูงในการหาค่าความเร่งเชิงมุมของล้อจากค่าสัญญาณความเร็วเชิงมุม โดยทำการศึกษาทั้งการจำลองในคอมพิวเตอร์และการทดลอง

2. สมการพลวัตของรถยนต์

สมการพลวัตที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นสมการพลวัตตามแนวยาว (Longitudinal vehicle dynamics) ของรถยนต์ ซึ่งเป็นสมการอธิบายการเคลื่อนที่ของรถในแนวการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ไม่รวมผลของการเลี้ยวและการหมุนของตัวรถ สมการพลวัตนี้เป็นที่รู้จักกันในชื่อว่าแบบจำลองสองล้อ (Bicycle model) [5] โดยในงานวิจัยนี้กำหนดให้รถยนต์ขับเคลื่อนล้อหน้าอย่างเดียว ดังแสดงในรูปที่ 1 ดังนั้นไม่มีแรงฉุดลากของล้อหลัง ซึ่งจากการพิจารณาผลรวมแรงในแนวการเคลื่อนที่ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

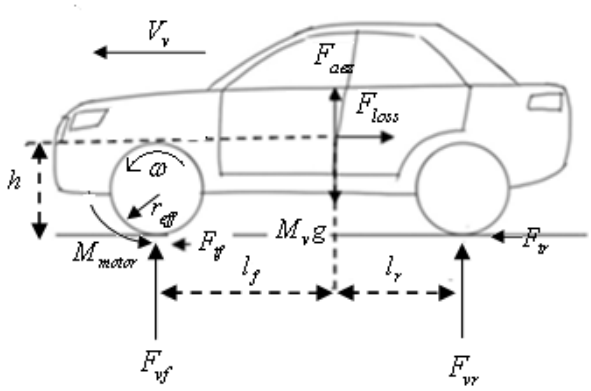
$$F_{tf} - F_{loss} = M_v \dot{V}_v \qquad (1)$$

โดยที่ F_{tf} คือแรงฉุดลากที่กระทำกับล้อหน้า, M_v คือมวลของรถ, V_v คือค่าความเร็วของรถ $F_{loss} = F_{aex} + F_{roll}$ คือแรงต้านการเคลื่อนที่ประกอบด้วย $F_{roll} = \mu_{rr} M_v g$ คือแรงต้านการกลิ้ง μ_{rr} คือค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกลิ้ง, g คือค่าความเร่งตามแรงโน้มถ่วงและ F_{aex} คือแรงต้านของอากาศในแนวราบ:

$$F_{aex} = \frac{1}{2}\rho C_x S(V_v^2 - V_a^2) \qquad (2)$$

DRC-59

โดยที่ ρ คือค่าความหนาแน่นของอากาศ, C_x คือค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศในในแนวราบ, S คือพื้นที่หน้าตัดของรถ และ V_a คือค่าความเร็วลม



รูปที่ 1 แบบจำลองสองล้อของรถยนต์

แรงฉุดลาก F_{tf} กำหนดด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานในแนวแกนตามยาว ดังนี้

$$\mu = \frac{F_{tf}}{F_{v_i}} \qquad (3)$$

โดยที่ $F_{v_i}\ ; i = \{f, r\}$ คือค่าแรงปฏิกิริยาหรือแรงกด, μ คือค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction coefficient) ขึ้นอยู่กับค่าอัตราการไถล (Slip ratio) ของล้อ และสภาวะพื้นผิวถนนเป็นหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2

ค่าอัตราการไถลของการเคลื่อนที่ในแนวแกนตามยาวในกรณีที่รถเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง กำหนดดังนี้

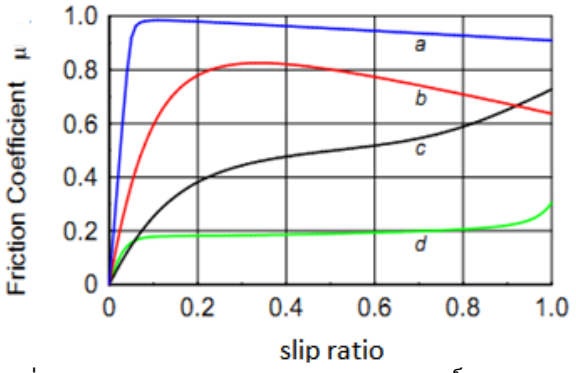
$$\lambda = 1 - \frac{V_v}{V_w} = 1 - \frac{V_v}{r_{eff}\omega} \qquad (4)$$

โดยที่ V_w คือค่าความเร็วขอบของล้อ, $r_{eff} = r$ คือรัศมีของล้อและ ω คือค่าความเร็วเชิงมุมของล้อ

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (μ) สามารถประมาณได้หลายวิธี โดยในงานวิจัยนี้ใช้สมการเมจิกฟอร์มูล่า (Magic Formula) [6] ในการจำลองการทำงาน ดังนี้

$$\mu = D\sin\{C\, arc\tan[B(1-E)\lambda + E\arctan(B\lambda)]\} \qquad (5)$$

กำหนดให้ B, C, D, E คือค่าพารามิเตอร์ลักษณะเฉพาะโดยค่าของพารามิเตอร์ดังกล่าวหาจากการทดลองเพื่อศึกษากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับค่าอัตราการไถล จากการทดลองพบว่าผลของกราฟมีลักษณะใกล้เคียงกับพื้นคอนกรีตแห้งดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างกราฟค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน: (a) พื้นคอนกรีตแห้ง, (b) พื้นคอนกรีตเปียก, (c) พื้นดินลูกรัง, (d) พื้นหิมะอัดแน่น

จากรูปที่ 1 พิจารณาผลรวมแรงในแนวดิ่งและสมการสมดุลโมเมนต์ จะได้

$$F_{vf} + F_{vr} - M_v g - F_{aez} = 0 \qquad (6)$$

และ

$$F_{vf} l_f - F_{vr} l_r + (F_{tf} + F_{tr})h = 0 \qquad (7)$$

โดยที่ F_{vf} คือแรงกดที่กระทำต่อล้อหน้าของรถ, F_{vr} คือแรงกดที่กระทำต่อล้อหลังของรถ, l_f , l_r , h คือระยะตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวล, F_{tr} แรงฉุดลากของล้อหลัง(กำหนดให้ F_{tr} = 0)และ F_{aez} คือแรงต้านอากาศในแนวดิ่ง:

$$F_{aez} = \frac{1}{2}\rho C_z S(V_v^2 - V_a^2) \qquad (8)$$

โดยที่ C_z คือค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศในแนวดิ่ง โดยทั่วไปแรงต้านอากาศในแนวนี้จะมีค่าน้อยมาก

จากสมการ(1), (6) และ (7) จะได้

$$F_{vf} = M_v g[(1-\psi) - \chi(\frac{\dot{V}_v}{g}) - (1-\psi)\frac{F_{aez}}{M_v g} + \chi\frac{F_{loss}}{M_v g}] \qquad (9)$$

โดยที่ $\chi = \frac{h}{l_f + l_r}$ และ $\psi = \frac{l_f}{l_f + l_r}$

สมการพลวัตของการหมุนของล้อประกอบด้วยสมการพลวัตทางกลของการหมุนและสมการพลวัตทางไฟฟ้าของมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3 สมการพลวัตทางกลสามารถเขียนได้ดังนี้

$$M_{motor} - c\omega - F_{tf} r_{eff} = I\dot{\omega} \quad (10)$$

$$M_{motor} = K_T i \quad (11)$$

โดยที่ M_{motor} คือแรงบิดจากมอเตอร์ที่กระทำกับล้อ, K_T คือค่าคงที่ของการแปรผันของการเกิดแรงบิดและ I คือค่าโมเมนต์ความเฉื่อยการหมุนล้อและ c คือค่าคงที่แดมฟ์ของชิ้นส่วนที่หมุนของล้อและมอเตอร์

งานวิจัยนี้กำหนดให้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จากรูปที่ 3 มอเตอร์ไฟฟ้าสามารถเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ในส่วนของวงจรไฟฟ้าได้ดังนี้

$$iR + L\frac{di}{dt} + V_b = K_0 V_{in}(t) \quad (12)$$

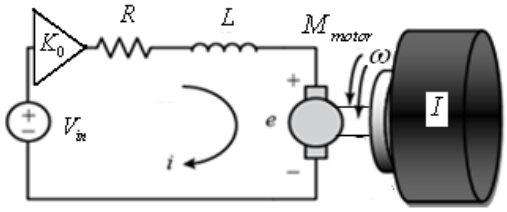
โดยที่ i คือค่ากระแสไฟฟ้า, R คือค่าความต้านทานไฟฟ้าของขดลวด, V_{in} คือค่าแรงดันไฟฟ้า, K_0 คือค่าอัตราขยายของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ (Drive), L คือค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด และ V_b คือค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากการหมุนของขดลวดมอเตอร์ตัดผ่านสนามแม่เหล็ก ซึ่ง $V_b = K_b\omega$ โดยที่ K_b คือค่าคงที่ของการแปรผัน

เนื่องจากพลวัตทางไฟฟ้าของมอเตอร์เร็วกว่าพลวัตทางกลมากๆ และมอเตอร์ไฟฟ้าโดยทั่วไป L มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าอื่นๆ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ประมาณให้พจน์ $L\frac{di}{dt} = 0$ จะได้

$$iR + V_b = K_0 V_{in}(t) \quad (13)$$

จากสมการ (10), (11) และ (13) สมการพลวัตทางกลจากแกนหมุนของมอเตอร์ที่เชื่อมกับล้อยางสามารถเขียนได้ดังนี้

$$I\dot{\omega} = K_T\left[\frac{K_0 V_{in}(t) - V_b}{R}\right] - c\omega - F_{tf} r_{eff} \quad (14)$$



รูปที่ 3 แรงกระทำที่เกิดขึ้นจากมอเตอร์ไฟฟ้า

โดยที่ $\dot{\omega}$ คือค่าความเร่งเชิงมุมของล้อยาง

3. วิธีการประมาณค่าอนุพันธ์แบบเลื่อนไถลอันดับสูง

ระบบควบคุมแบบเลื่อนไถล (Sliding-mode control systems) คือระบบควบคุมที่มีสัญญาณของการควบคุมทำงานแบบสลับเครื่องหมายไปมาด้วยความถี่สูงเพื่อบังคับให้วิถีการเคลื่อนที่อยู่บนพื้นผิวการเลื่อนไถล (Sliding surface) $s(x)$ ที่กำหนดขึ้นมาเพื่อให้ระบบควบคุมมีผลตอบสนองตามที่ต้องการ การควบคุมเลื่อนไถลเป็นการควบคุมที่มีความคงทน (Robustness) สูง การควบคุมแบบเลื่อนไถลอันดับสูง (High order sliding-mode control systems) เป็นการควบคุมที่กำหนดค่าอนุพันธ์ที่มีอันดับสูงขึ้นของ $s(x)$ ปัจจุบันได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีคุณสมบัติที่น่าสนใจเหนือกว่าการควบคุมเลื่อนไถลปกติ [7-9]

การอนุพันธ์แบบเลื่อนไถลอันดับสูง (High order sliding-mode differentiation) [3-4] เป็นการสร้างระบบเลื่อนไถลอันดับสูง โดยมีอินพุตเป็นสัญญาณที่ต้องการหาอนุพันธ์ และให้เอาต์พุตเป็นค่าประมาณของค่าอนุพันธ์ของสัญญาณที่ต้องการหา การอนุพันธ์แบบเลื่อนไถลอันดับสูงได้รับความสนใจเพราะไม่ sensitive กับสัญญาณรบกวน (Noise) มากเกินไป

การอนุพันธ์แบบเลื่อนไถลอันดับสูงได้นำเสนอไว้ใน [3] โดยสามารถสรุปได้ดังนี้ กำหนดให้ $f(t)$ คือฟังก์ชันหรือสัญญาณที่ต้องการหาอนุพันธ์ ซึ่งใน

DRC-59

สัญญาณจริงอาจจะมีสัญญาณรบกวนปนอยู่ด้วย ค่าประมาณของอนุพันธ์ฟังก์ชัน $f(t)$ อันดับที่ n สามารถหาได้ดังนี้

$$\dot{z}_0 = v_0, v_0 = -\lambda_n L^{1/(n+1)} \left| z_0 - f(t) \right|^{n/(n+1)} sign(z_0 - f(t)) + z_1,$$
$$\dot{z}_1 = v_1, v_1 = -\lambda_1 L^{1/n} \left| z_1 - v_0 \right|^{(n-1)/n} sign(z_0 - v_0) + z_2,$$
...
$$\dot{z}_{n-1} = v_{n-1}, v_{n-1} = -\lambda_{n-1} L^{1/2} \left| z_{n-1} - v_{n-2} \right|^{1/2} sign(z_{n-1} - v_{n-2}) + z_n,$$
$$\dot{z}_n = -\lambda_n L sign(z_n - v_{n-1}) \quad (15)$$

โดยที่ z_n คือค่าประมาณของอนุพันธ์ฟังก์ชัน $f(t)$ อันดับที่ n, L คือค่า Lipchitz constant ของฟังก์ชัน $f(t)$, $\lambda_i \ (i = 0,1,...,n)$ คือพารามิเตอร์ที่เป็นค่าคงที่ และ

$$sign(x) = \begin{cases} +1 & if \quad x > 0 \\ -1 & \quad x < 0 \end{cases}$$

ในงานวิจัย [4] มีข้อแนะนำให้เลือกใช้ λ_0 =1.1, λ_1=1.5 λ_2 =3, λ_3= 5, λ_4 = 8, λ_5=12 ในกรณี $\lambda_i \ (i = 0,1,...,n)$ โดยที่ $n \le 5$

4 การหาแรงฉุดลาก

จากสมการ (14) นำมาจัดรูปใหม่ ดังนี้

กำหนดให้ $F_{tf} = F_\mu$

$$F_\mu = \frac{K_t[\frac{K_0 V_{in}(t) - V_b}{R}] - c\omega - I\dot{\omega}}{r_{eff}} \quad (16)$$

ซึ่งเป็นสมการที่งานวิจัยนี้จะใช้ในการหาแรงฉุดลากต่อไป โดยค่าความเร็วเชิงมุม ω และค่ากระแส i สามารถวัดได้โดยตรงจากเซนเซอร์ ซึ่งรถขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าสมัยใหม่มีการติดตั้งเซนเซอร์ทั้ง 2 อย่างนี้อยู่แล้ว เพื่อใช้ในระบบเบรกและการจัดการพลังงานไฟฟ้า ตามลำดับ สำหรับส่วนค่าความเร่งเชิงมุม $\dot{\omega}$ ใช้วิธีการประมาณค่าอนุพันธ์แบบเลื่อนไถลอันดับสูงจากการประมาณค่าความเร็วเชิงมุม ซึ่งโดยทั่วไปเราไม่สามารถหาค่าความเร่งเชิงมุมด้วยการหาอนุพันธ์โดยตรงได้ เนื่องจากในสภาวะการทำงานจริงของรถจะมีสัญญาณรบกวนมาก

5. ผลลัพธ์จากการจำลองในคอมพิวเตอร์

ในการจำลองการทำงานในคอมพิวเตอร์ ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรถยนต์ในหัวข้อที่ 2 และสมการแรงฉุดลากในหัวข้อที่ 4 โดยค่าพารามิเตอร์ของระบบสรุปไว้ในตารางที่ 1 งานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบผลของการประมาณค่าความเร่งเชิงมุม และแรงฉุดลาก ซึ่งใช้วิธีการประมาณค่าอนุพันธ์แบบเลื่อนไถลอันดับสูง

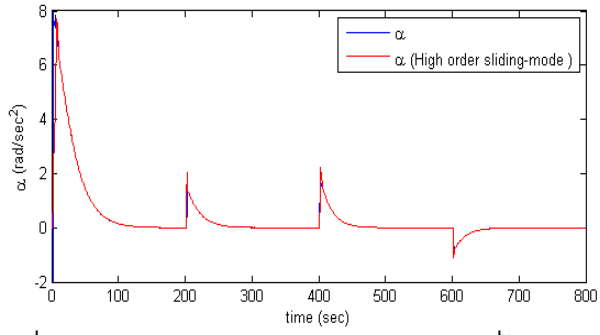
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของรถ

ตัวแปร	ค่า	ตัวแปร	ค่า
M_v	1202 kg	g	9.81 m/s^2
I	1.07 kgm^2	r_{eff}	0.32 m
l_f	1.15 m	S	0.8
l_r	1.45 m	u_{rr}	0.025
h	0.53 m	B	15.66
ρ	1.202 kg/m^3	C	0.2959
C_z	0.259	D	3.565
C_x	0.5	E	1.04

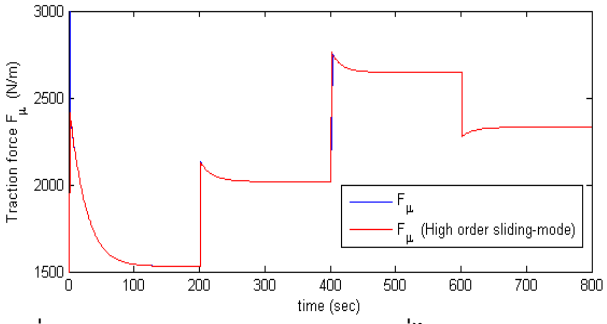
ในการทดลองได้ทำการให้ค่าแรงดันไฟฟ้า V_{in} โดยให้เปลี่ยนแปลงแบบฟังก์ชันขั้นบันได (Step function) เริ่มที่ค่าความต่างศักย์จาก 1.6 โวลต์ จากนั้นเปลี่ยนความต่างศักย์ ไปเป็น 2.0 โวลต์ ณ เวลา t = 200 วินาที และเปลี่ยนไปเป็น 2.5 โวลต์ ณ เวลา t = 400 วินาที จากนั้นทำการลดค่าความต่างศักย์เป็น 2.25 โวลต์ ณ เวลา t = 600 วินาที

ผลลัพธ์ของการจำลองการทำงานในคอมพิวเตอร์แสดงดังรูปที่ 4-5 พบว่าสามารถประมาณค่าแรงฉุดลากได้อย่างถูกต้อง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถยนต์

DRC-59



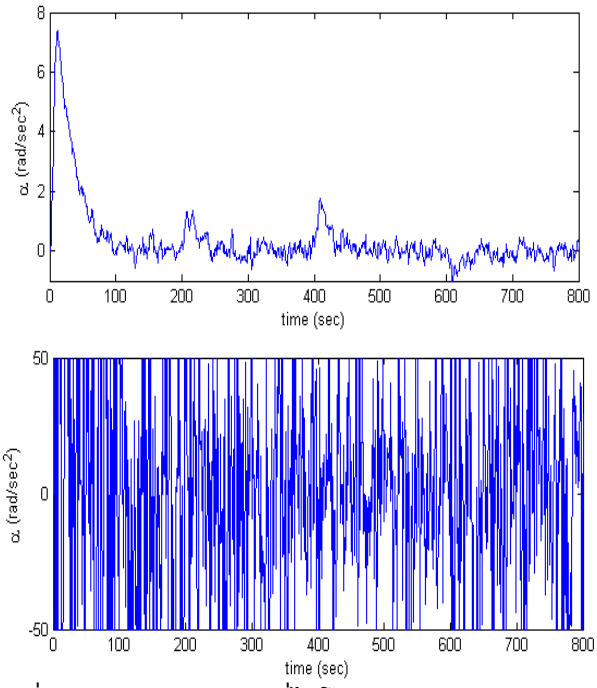
รูปที่ 4 ผลเปรียบเทียบค่าความเร่งเชิงมุมที่ได้จากวิธีการประมาณค่าอนุพันธ์แบบเลื่อนไถลอันดับสูงโดยปราศจากค่าสัญญาณรบกวน



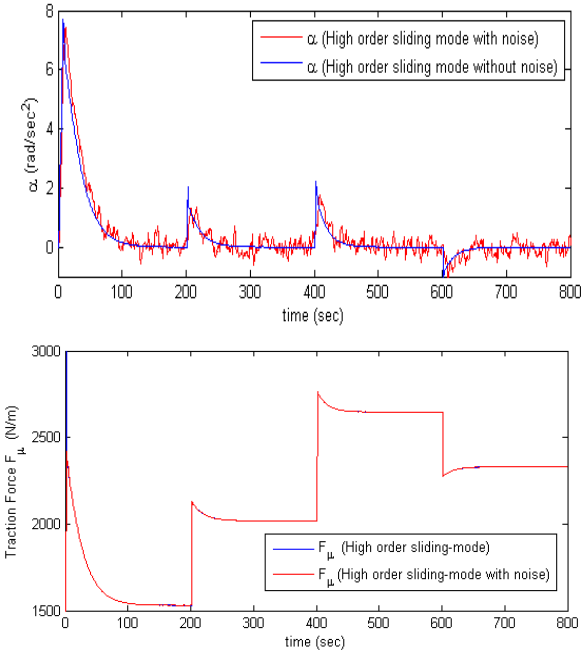
รูปที่ 5 ผลเปรียบเทียบค่าแรงฉุดที่ได้จากวิธีการประมาณค่าอนุพันธ์แบบเลื่อนไถลอันดับสูงโดยปราศจากค่าสัญญาณรบกวน

รูปที่ 6 แสดงผลเปรียบเทียบค่าเอาต์พุตที่ได้โดยจากวิธีการประมาณค่าอนุพันธ์แบบเลื่อนไถลอันดับสูงกับการหาอนุพันธ์เชิงตัวเลขโดยตรงด้วยวิธี Finite difference approximation โดยมีค่าสัญญาณรบกวนร่วมด้วยพบว่าเมื่อใส่สัญญาณรบกวนในระบบและทำการหาค่าอนุพันธ์โดยตรงจะไม่สามารถกระทำได้ แต่วิธีการประมาณค่าอนุพันธ์แบบเลื่อนไถลอันดับสูงสามารถประมาณค่าเอาต์พุตได้และมีค่าใกล้เคียงกับค่าเอาต์พุตที่ปราศจากสัญญาณรบกวน

รูปที่ 7 แสดงผลเปรียบเทียบค่าเอาต์พุตที่ได้จากวิธีการประมาณค่าอนุพันธ์แบบเลื่อนไถลอันดับสูงระหว่างผลลัพธ์ที่มีการกำหนดค่าสัญญาณรบกวนกับผลลัพธ์ปราศจากค่าสัญญาณรบกวน พบว่าค่าเอาต์พุตที่ได้มีความใกล้เคียงกัน บ่งบอกถึงประสิทธิผลของการหาแรงฉุดลาก



รูปที่ 6 ผลเปรียบเทียบค่าที่ได้โดยจากวิธีการประมาณค่าอนุพันธ์แบบเลื่อนไถลอันดับสูง (รูปบน) กับการหาค่าอนุพันธ์เชิงตัวเลขโดยตรงด้วยวิธี Finite difference approximation (รูปล่าง) โดยมีค่าสัญญาณรบกวนร่วมด้วย



รูปที่ 7 ผลเปรียบเทียบค่าแรงฉุดลากหามาได้ในกรณีมีและไม่มีสัญญาณรบกวน

6. ผลลัพธ์ของการทดลอง

ในส่วนนี้ได้ทำการประยุกต์การประมาณแรงฉุดลากกับเครื่องจำลองแบบล้อเดียว [10] ซึ่งเป็นชุดทดลองร่วมกับระบบจำลองฮาร์ดแวร์ภายในลูป (Hardware-in-loop) เพื่อสนับสนุนความสามารถในการนำไปใช้งานจริงได้ของวิธีการค่าแรงฉุดลากที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

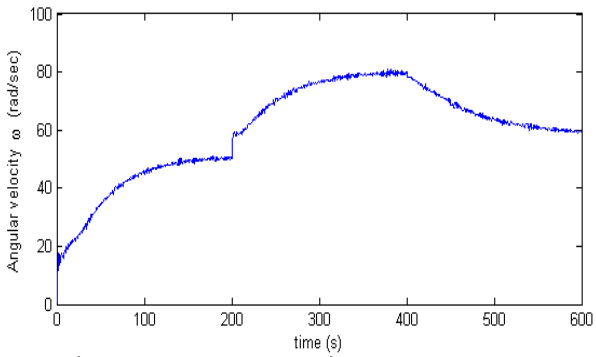
ส่วนประกอบหลักของเครื่องจำลองแบบล้อเดียว (ดังแสดงในรูปที่ 8) ประกอบด้วย มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง, ล้อยางขนาดเส้นผ่านศูนย์ 26 เซนติเมตร ซึ่งต่อเชื่อมเข้ากับเพลาของมอเตอร์, ล้อทรงกระบอกขนาดใหญ่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตรทำหน้าที่จำลองการเคลื่อนที่ของรถบนพื้นถนน, และเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม

ระบบจำลองฮาร์ดแวร์ภายในลูป คือระบบจำลองที่อาศัยการรับข้อมูลบางส่วนจากการทดลองจริงโดยผ่านตัวเชื่อม และเป็นสัญญาณจริงที่สามารถตรวจวัดได้ โดยกระบวนการจริงจะถูกแทนด้วยคอมพิวเตอร์ซึ่งมีการเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงการทำงานไว้ โดยที่นี้ชุดระบบการวัดจะเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์โดยรับ-ส่งสัญญาณผ่านการ์ดเชื่อมโยงสัญญาณ (Interface card) ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณแอนนาลอกเป็นดิจิทัล (Analog-to-Digital Converter) เพื่ออ่านสัญญาณแอนนาลอกจากเซนเซอร์ และทำการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนนาลอก (Digital-to-Analog Converter) เพื่อใช้ในการป้อนคำสั่งสำหรับชุดขับเคลื่อนมอเตอร์

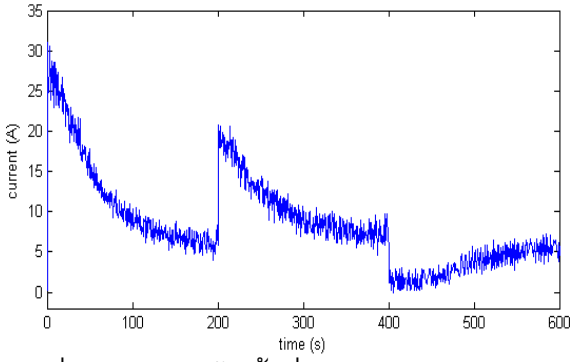
ในการทดลองด้วยเครื่องจำลองแบบล้อเดียว โดยทำการป้อนค่าความต่างศักย์ให้กับเครื่องจำลองแบบล้อเดียว และมีการเปลี่ยนแปลงแบบฟังก์ชันขั้นบันได (Step function) โดยเริ่มที่ค่าความต่างศักย์จาก 1.8 โวลต์ จากนั้นเปลี่ยนความต่างศักย์ไปเป็น 2.1 โวลต์ ณ เวลา t = 200 วินาที จากนั้นทำการลดค่าความต่างศักย์เป็น 1.9 โวลต์ ณ เวลา t = 400 วินาที โดยค่า i วัดได้จากเซนเซอร์วัดค่ากระแสและค่า ω วัดได้จากเซนเซอร์วัดค่าความเร็วเชิงมุม ร่วมกับการประมาณค่าแรงฉุดลากจากสมการที่ (16) ด้วยวิธีการประมาณค่าอนุพันธ์แบบเลื่อนไถลอันดับสูง

ผลลัพธ์การทดลองแสดงดังรูปที่ 9-11 โดยรูปที่ 9 และ 10 แสดงค่าสัญญาณความเร็วเชิงมุมและค่ากระแสที่วัดได้โดยตรงจากเซนเซอร์ รูปที่ 11 แสดงค่าแรงฉุดลากที่หามาได้ พบว่าวิธีการประมาณค่าอนุพันธ์แบบเลื่อนไถลอันดับสูงสามารถประมาณค่าค่าแรงฉุดลากในเวลาจริงสำหรับรถขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าด้วยการใช้เซนเซอร์วัดค่ากระแสและเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมร่วมกัน โดยวิธีการดังกล่าวสามารถใช้ในการหาค่าแรงฉุดลากในเวลาจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

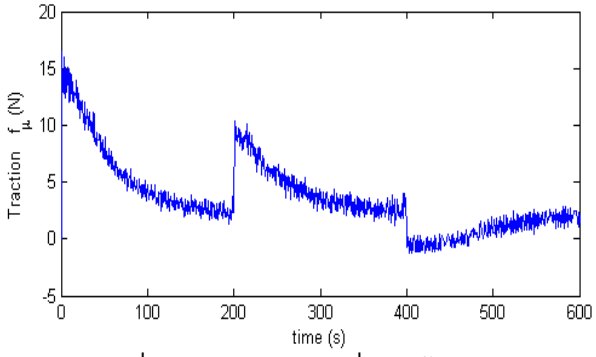
รูปที่ 8 เครื่องจำลองแบบล้อเดียว



รูปที่ 9 ค่าความเร็วเชิงมุมที่วัดมาจากเซนเซอร์



รูปที่ 10 ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดมาจากเซนเซอร์



รูปที่ 11 ค่าแรงฉุดลากที่หามาได้

7. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการหาค่าแรงฉุดลากในเวลาจริงของรถขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าด้วยการใช้การประมาณค่าอนุพันธ์แบบเลื่อนไถลอันดับสูง การศึกษาประกอบด้วยการจำลองการทำงานในคอมพิวเตอร์และการทดลองกับเครื่องจำลองฮาร์ดแวร์ภายในลูป ผลการศึกษาพบว่า การประยุกต์ใช้วิธีการประมาณค่าอนุพันธ์แบบเลื่อนไถลอันดับสูงสามารถหาแรงฉุดลากของระบบในช่วงเวลาจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพและให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

เอกสารอ้างอิง

[1] Rajamani, R. (2012). Vehicle Dynamics and Control. Springer, New York.

[2] Colli, V., Tomassi, G. and Scarano, M. (2006) Single-wheel longitudinal traction control for Vehicles, IEEE Transactions on power electronics , vol. 21, no. 3, pp 799-807

[3] Levant, A. (2003). Higher-order sliding mode, differentiation and output-feedback control, Int. J. Control, vol. 76(9/10), pp 924-941

[4] Levant, A. (2005). Homogeneity approach to High-order sliding mode design, Automatica, vol. 41, pp 823-830.

[5] El Majdoub, K., Giri, F., Ouadi, H., Dugard, L. and Chaoui, F.Z. (2012). Vehicle longitudinal motion modeling for nonlinear control , Control Engineering Practice, vol. 20, pp 69-81.

[6] Sorniotti, A. and Viglianil, A. (2006). Numerical model for tyres simulation, International Conference on Tribology, 20-22 September 2006, Parma, Italy.

[7] Levantovsky, L.V. (1993). Sliding order and sliding accuracy in sliding mode control, International Journal of Control, vol. 58(6), pp 247-263.

[8] Ha, Q.P., Nguyen, M.T., Li, J. and Kwok, N.M. (2013). Smart structures with current-driven MR dampers: modeling and second-order sliding mode control, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 18(6), pp 1702-1712.

[9] Wang, J., Zong, Q., Su, R. and Tian, B. (2014). Continuous high order sliding mode controller design for a flexible air-breathing hypersonic vehicle, ISA Transactions, vol 53(3), pp 690-698.

[10] Krathaisri, A., Kuntanapreeda, S. and Koetniyom, S. (2012). Development of a single-wheel test rig for traction dynamics and control of electric vehicles, Hong Kong International Conference on Engineering and Applied Science, 14-16 December 2012, Hong Kong, China.