ตัวควบคุมติดตามทางเดินแบบปรับตัวได้สำหรับระบบจานหมุนทางกล

Adaptive Trajectory Tracking Controller for a Mechanical Disk Plant

ธนะชัย วิภาวรศิลป์, รัชทิน จันทร์เจริญ* และ ศุภวุฒิ จันทรานุวัฒน์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

*ผู้ติดต่อ: E-mail: Ratchatin.C@eng.chula.ac.th, โทรศัพท์: (662) 2186643, โทรสาร: (662) 2522889

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอนำเสนอการควบคุมทางเดินแบบปรับตัวได้สำหรับระบบจานหมุนทางกล ตัวควบคุมได้รับการออกแบบบนระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง โดยใช้พื้นฐานของการแปลงระบบควบคุมให้เป็นระบบเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับ และทำการชดเชยพลวัติของระบบ แบบจำลองของระบบปิดจะมีลักษณะเป็นสมการทางพีชคณิตของความสัมพันธ์กล่าวคือ เอาต์พุตในอนาคตเท่ากับอินพุตที่เวลาปัจจุบันโดยมีเวลาหน่วงคงที่ ซึ่งเอื้อต่อการนำไปใช้ในการควบคุมเส้นทางเดินของอินพุต อีกทั้งตัวควบคุมถูกออกแบบให้สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเองได้ในกรณีที่แบบจำลองของระบบมีพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า และสัญญาณอ้างอิงเป็นฟังก์ชันเป็นคาบ ทำให้การแปลงระบบควบคุมให้เป็นระบบเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับและการชดเชยพลวัติของระบบมีความถูกต้องมากขึ้น ผลการทดลองควบคุมระบบจริงแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมที่นำเสนอสามารถปรับค่าได้อย่างเหมาะสม ส่งผลให้เอาต์พุตลู่เข้าสู่เส้นทางเดินอ้างอิงจนกระทั่งสามารถติดตามเส้นทางเดินอ้างอิงได้อย่างสมบูรณ์

คำหลัก: การควบคุมแบบปรับตัวได้ การควบคุมติดตามทางเดิน การแปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับ

Abstract

This paper proposes a technique to adaptive control for mechanical disk plant to follow a trajectory. A controller is designed based on feedback linearization and suppression of the system dynamics in discrete-time. The resulting closed loop system behavior is thus in algebraic form, i.e., the output in the future equals the current input with a constant time delay. In this way, the control of the output trajectory is easy. The controller is designed to be adaptive in case that the system model contains unknown parameter and trajectory is periodic to adjust accurate feedback linearization and dynamic compensation. The experiment on the disk plant demonstrates that the proposed controller is able to adapt properly, lead to the plant output perfectly track desired smooth trajectory.

Keywords: Adaptive Control, Trajectory tracking Control, Feedback Linearization

1. บทนำ

วิธีการควบคุมส่วนใหญ่ได้รับการออกแบบให้สามารถควบคุมค่าให้คงที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ยกตัวอย่างเช่น ตัวควบคุมพีไอดีซึ่งเป็นตัวควบคุมที่มีความโดดเด่นสำหรับระบบเชิงเส้นที่มีอินพุตเดียว-เอาต์พุตเดียว [1] หรือการออกแบบโดยใช้แบบจำลองปริภูมิสเตต (State space model) [2,3] ซึ่งมีความเหมาะสมกับระบบที่มีความยุ่งยากซับซ้อนคือ ระบบเป็นสมการดิฟเฟอร์เรนเชียลทีมีอันดับสูง หรือมีหลายอินพุต-หลายเอาต์พุต และสำหรับระบบไม่เชิงเส้นตัวควบคุมจะถูกออกแบบบนพื้นฐานของการประมาณระบบให้เป็นเชิงเส้นรอบจุดสมดุลหรือจุดทำงาน [4,5] โดยวิธีการดังกล่าวจะให้ผลการควบคุมไม่เป็นที่น่าพอใจสำหรับระบบซึ่งทำงานบนช่วงการทำงานที่กว้าง เนื่องจากตัวควบคุมแบบเชิงเส้นที่ออกแบบโดยใช้การประมาณระบบให้เป็นเชิงเส้นรอบจุดทำงานเพียงจุดเดียวนั้นไม่สามารถชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้นที่ครอบคลุมช่วงการทำงานได้อย่างเหมาะสม วิธีการที่ถูกนำมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบไม่เชิงเส้นอย่างได้ผลคือ การแปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับ (Feedback linearization) [6] ซึ่งเป็นวิธีการที่ตรงไปตรงมาคือการชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบด้วยการป้อนกลับเพื่อให้ระบบปิดมีพฤติกรรมเป็นเชิงเส้น

เมื่อหลายปีที่ผ่านมาการออกแบบตัวควบคุมทางเดินที่ความแม่นยำและนำไปใช้ได้จริงกับระบบไม่เชิงเส้นในการติดตามสัญญาณอ้างอิงที่มีการเปลี่ยนแปลงได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นในภาคอุตสาหกรรม เช่น ชุดส่งกำลังทางกลในยานยนต์ต่างๆ ถูกแทนที่ด้วยเทคโนโลยีทางอิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่า “By-wire” [7] หุ่นยนต์ทางการแพทย์ซึ่งเป็นอุปกรณ์มาสเตอร์/สเลฟ [8] เป็นต้น

ในความเป็นจริงแล้วระบบทางกลล้วนแล้วแต่เป็นระบบไม่เชิงเส้น ระบบโดยทั่วไปจะประกอบด้วยแรงเสียดทานซึ่งจะมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงเมื่อมีแรงเสียดทานแห้ง (dry friction) รวมอยู่ด้วย ความไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากแรงโน้มถ่วง และการเปลี่ยนแปลงของความเฉื่อยหรือภาระ ทำให้ตัวควบคุมพีไอดีให้ผลการควบคุมไม่เป็นที่น่าพอใจ โดยเฉพาะการควบคุมทางเดิน ตัวควบคุมนี้ไม่สามารถควบคุมทำให้ค่าความผิดพลาดของการติดตามทางเดิน (Tracking error) ลู่เข้าสู่ศูนย์ได้

หากต้องการควบคุมให้เอาต์พุตของระบบทางกลที่ไม่เป็นเชิงเส้นติดตามทางเดิน (Trajectory Tracking Control) ได้อย่างแม่นยำ การแปลงระบบควบคุมให้เป็นระบบเชิงเส้นตามที่ต้องการนั้นไม่เพียงพอ แต่จำเป็นต้องควบคุมให้ค่าความผิดพลาดของการติดตามทางเดินลู่เข้าสู่ศูนย์ด้วย สำหรับระบบเชิงเส้นพลวัติผกผัน (Inverse dynamics) ของระบบ [5] จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณสัญญาณควบคุม ในส่วนของระบบไม่เชิงเส้นจะต้องใช้ทั้งการป้อนกลับสเตตเพื่อชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ และใช้การคำนวณบนพื้นฐานของวิธีการพลวัติผกผันของระบบเชิงเส้น [6]

ปัญหาสำคัญของการควบคุมติดตามทางเดินด้วยวิธีการแปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับโดยทั่วไปคือ การคำนวณสัญญาณควบคุมบนพื้นฐานของวิธีการพลวัติผกผันจำเป็นต้องใช้อนุพันธ์อันดับหนึ่งและอันดับสองของสัญญาณอ้างอิงในการคำนวณสัญญาณควบคุม ซึ่งจะมีปัญหาอย่างมากในกรณีที่สัญญาณอ้างอิงถูกสร้างขึ้นจากอุปกรณ์อินพุต (Input device) ที่ควบคุมโดยมนุษย์เพราะอาจทำให้สัญญาณตำแหน่งอ้างอิงมีการสั่นหรือเป็นสัญญาณที่ไม่เรียบ (Unsmooth) ส่งผลถึงความผิดพลาดของสัญญาณอินพุตต่อเนื่องไปถึงผลการควบคุมทั้งนี้อนุพันธ์อันดับหนึ่งและอนุพันธ์อันดับสองของตำแหน่งอ้างอิงจะต้องถูกคำนวณในเวลาจริง (real-time) หรือต้องถูกตรวจวัดในเวลาจริง ซึ่งจำเป็นต้องความสามารถในการคำนวณของฮาร์ดแวร์ที่สูงหรือเพิ่มอุปกรณ์ตรวจวัดจึงเป็นการเพิ่มต้นทุนของระบบควบคุม อีกทั้งการแปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นต้องทราบแบบจำลองของระบบไม่เชิงเส้นที่มีความแม่นยำเพียงพอ

แต่อย่างไรก็ตามปัญหามากมายในการควบคุมเกิดขึ้นจากความไม่แน่นอนในพารามิเตอร์ของ

แบบจำลอง ซึ่งอาจหมายถึงการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์อย่างช้าๆ (เช่น ความดันอากาศระหว่างการเดินทางของเครื่องบิน) หรือการแปลงพารามิเตอร์แบบทันทีทันใด (เช่น ความเฉื่อยของหุ่นยนต์เมื่อจับวัตถุชิ้นใหม่) ตัวควบคุมแบบเชิงเส้นที่ได้รับผลจากความผิดพลาดหรือค่าที่ล้าหลังของพารามิเตอร์ของแบบจำลอง อาจมีประสิทธิภาพลดลงอย่างมีนัยสำคัญหรือแม้กระทั่งขาดเสถียรภาพ แต่ความไม่เป็นเชิงเส้นนี้สามารถเพิ่มเข้าไปในส่วนของตัวควบคุม เพื่อทำให้สามารถทนต่อความไม่แน่นอนของแบบจำลองได้ จึงเป็นที่มาของการควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive control) [9] ซึ่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมสามารถเปลี่ยนแปลงได้ โดยมีกลไกสำหรับการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบออนไลน์ขึ้นกับสัญญาณในระบบ

สิ่งเหล่านี้นำมาซึ่งวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ต้องการนำเสนอแนวคิดวิธีการควบคุมติดตามทางเดินระบบทางกลที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยไม่จำเป็นต้องใช้อนุพันธ์ของสัญญาณอ้างอิง ด้วยการออกแบบบนพื้นฐานของการแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับให้สามารถชดเชยพลวัติของระบบได้ พร้อมทั้งออกแบบให้ตัวควบคุมสามารถปรับค่าตัวเองได้ เพื่อให้สามารถรับมือกับกรณีที่แบบจำลองมีพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า โดยจะเป็นการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบจานหมุนทางกลที่ไม่เป็นเชิงเส้น

2. การควบคุมทางเดินโดยทั่วไป

ระบบจานหมุนทางกลที่สนใจเป็นระบบไม่เชิงเส้นแบบอินพุตเดียวเอาต์พุตเดียว ระบบมีเสถียรภาพแบบ BIBO (bounded input bounded output) และไม่มี internal dynamic โดยมีแบบจำลองพลวัติของระบบ [13] คือ

$$\tau = J\ddot{\theta} + f\left(\theta,\dot{\theta}\right) \qquad (1)$$

โดยที่ τ คืออินพุตทอร์ก

J คือโมเมนต์ความเฉื่อย

θ คือตำแหน่งของจานหมุนหรือเอาต์พุต

$f\left(\theta,\dot{\theta}\right)$ คือฟังก์ชันความไม่เป็นเชิงเส้นของแรงเสียดทานและแรงโน้มถ่วง

การควบคุมให้ตำแหน่งของจานหมุนติดตามทางเดินโดยทั่วไปจะต้องชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบด้วยการป้อนกลับเพื่อทำให้ระบบมีพฤติกรรมเป็นเชิงเส้นโดยให้

$$\tau = v + f\left(\theta,\dot{\theta}\right) \qquad (2)$$

จะได้ความสัมพันธ์ของอินพุตและเอาต์พุตในรูปแบบเชิงเส้น ดังนี้

$$J\ddot{\theta} = v \qquad (3)$$

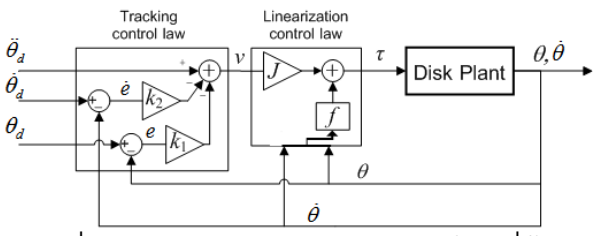
จากนั้นควบคุมให้ค่าความผิดพลาดของการติดตามทางเดินลู่เข้าสู่ศูนย์โดยกำหนดให้

$$v = J\left(\ddot{\theta}_d - k_1 e - k_2\dot{e}\right) \qquad (4)$$

โดยที่ θ_d เป็นเส้นทางเดินที่ต้องการ $e = \theta - \theta_d$ คือค่าความผิดพลาดของการติดตามทางเดิน และเลือก k_1, k_2 ให้ $p^2 + k_2 p + k_1$ เป็นพหุนามที่มีเสถียรภาพ จะได้พลวัติของระบบควบคุมซึ่งทำให้ค่าความผิดพลาดของการติดตามทางเดินลู่เข้าสู่ศูนย์แบบเอกซ์โพเนนเชียลดังสมการ (5) และมีแผนผังของระบบควบคุมเป็นดังรูปที่ 1

$$\ddot{e} + k_2\dot{e} + k_1 e = 0 \qquad (5)$$

แม้ว่าวิธีการดังกล่าวจะให้ผลลัพธ์ของการติดตามทางเดินที่มีความแม่นยำ แต่ก็อยู่บนสมมุติฐานที่ว่าแบบจำลองพลวัติของระบบมีความแม่นยำ อีกทั้งจำเป็นต้องใช้สัญญาณอ้างอิงของตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งที่ถูกต้องในการคำนวณสัญญาณควบคุม



รูปที่ 1 แผนภาพระบบควบคุมทางเดินโดยทั่วไป

3. ตัวควบคุมที่นำเสนอ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือพัฒนาวิธีการควบคุมติดตามทางเดินที่สามารถนำไปใช้ได้กับระบบจริง นั่นคือตัวควบคุมต้องไม่เพียงแค่ชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบแต่จะต้องสามารถชดเชยพลวัติของ

ระบบได้ด้วย ซึ่งจะส่งผลให้ไม่จำเป็นต้องใช้สัญญาณความเร็วและความเร่งอ้างอิงในการคำนวณสัญญาณควบคุม พร้อมทั้งออกแบบตัวควบคุมให้ปรับตัวได้เพื่อให้สามารถชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบได้อย่างถูกต้อง

3.1 กฎการควบคุม

วิธีการที่นำเสนอเป็นการออกแบบตัวควบคุมบนระบบเวลาไม่ต่อเนื่องบนพื้นฐานของการแปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับ โดยเริ่มจากการแปลงระบบจานหมุน (1) ให้อยู่ในรูปแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง (Discretization method) ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite difference method) [12] โดยประมาณให้ (T คือเวลาสุ่ม)

$$\dot{\theta} \approx \frac{\theta_k - \theta_{k-1}}{T} \tag{6}$$

$$\ddot{\theta} \approx \frac{\theta_{k+1} - 2\theta_k + \theta_{k-1}}{T^2} \tag{7}$$

แทน (6) และ (7) ลงในสมการ (3) จะได้แบบจำลองในรูปสมการดิฟเฟอเรนซ์

$$\tau_k = J\left(\frac{\theta_{k+1} - 2\theta_k + \theta_{k-1}}{T^2}\right) + f\left(\theta_k, \frac{\theta_k - \theta_{k-1}}{T}\right) \tag{8}$$

$$\theta_{k+1} = 2\theta_k - \theta_{k-1} - F\left(\theta_k, \theta_{k-1}\right) + \frac{T^2}{J}\tau_k \tag{9}$$

โดยที่ $F\left(\theta_k, \theta_{k-1}\right) = \frac{T^2}{J} f\left(\theta_k, \frac{\theta_k - \theta_{k-1}}{T}\right)$

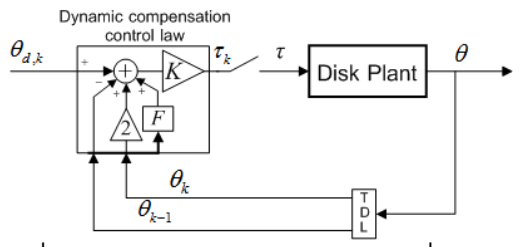
ให้กฎการควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้นรวมไปถึงพลวัติของระบบดังนี้

$$\tau_k = K\left[\theta_{d,k} - 2\theta_k + \theta_{k-1} + F\left(\theta_k, \theta_{k-1}\right)\right] \tag{10}$$

โดยที่ $K = \frac{J}{T^2}$

จะได้ระบบควบคุมแบบปิดอยู่ในรูปสมการพีชคณิต (11) และแผนผังของระบบควบคุมติดตามทางเดินจะเป็นดังรูปที่ 2

$$\theta_{k+1} = \theta_{d,k} \tag{11}$$



รูปที่ 2 แผนภาพระบบควบคุมทางเดินที่นำเสนอ

จากระบบปิด (11) พบว่าเราสามารถควบคุมให้ระบบควบคุมติดตามทางเดินที่ต้องการได้โดยให้ $\theta_{d,k}$ เป็นตำแหน่งทางเดินอ้างอิงที่ต้องการ ณ เวลา k ซึ่งจะให้เอาต์พุตที่มีเวลาหน่วงคงที่เท่ากับเวลาสุ่ม กล่าวคือค่าความผิดพลาดของการติดตามทางเดินจะไม่ลู่เข้าสู่ศูนย์แต่จะมีค่าเท่ากับผลต่างของสัญญาณทางเดินอ้างอิงที่เวลา k กับที่เวลา $k+1$ ดังสมการ

$$e_k = \theta_{d,k} - \theta_k = \theta_{d,k} - \theta_{d,k-1} \tag{12}$$

3.2 กฎการปรับตัว

ในกรณีที่ไม่ทราบแบบจำลองพลวัติของระบบจานหมุนทั้งหมด โดยมี f เป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้นที่ไม่ทราบค่า (Unknown function) เมื่อให้กฎการควบคุมซึ่งคำนวณโดยใช้แบบจำลองดังกล่าว

$$\tau_k = K\left[\theta_{d,k} - 2\theta_k + \theta_{k-1} + \hat{F}\left(\theta_k, \theta_{k-1}\right)\right] \tag{13}$$

โดยที่ $\hat{F}\left(\theta_k, \theta_{k-1}\right) = \frac{T^2}{J}\hat{f}\left(\theta_k, \frac{\theta_k - \theta_{k-1}}{T}\right)$

เมื่อแทนกฎการควบคุม (13) ลงในระบบจานหมุน (9) จะทำให้ระบบควบคุมมีความผิดพลาดซึ่งเกิดจากฟังก์ชันที่ไม่ทราบค่า

$$\theta_{k+1} = \theta_{d,k} + e\left(\theta_k, \theta_{k-1}\right) \tag{14}$$

โดยที่ $e\left(\theta_k, \theta_{k-1}\right) = F\left(\theta_k, \theta_{k-1}\right) - \hat{F}\left(\theta_k, \theta_{k-1}\right)$

พิจารณาระบบควบคุม (14) จะพบว่าเราสามารถประมาณค่าฟังก์ชัน e แบบออนไลน์ เพื่อนำมาใช้ในการปรับแก้ฟังก์ชันไม่ทราบค่า $\hat{F}$ ของตัวควบคุมได้ ดังสมการ (15) จะส่งผลให้ความผิดพลาดที่เกิดจากแบบจำลองลดลงได้

$$\hat{F}_{new} = \hat{F}_{old} + \hat{e} \tag{15}$$

3.3 การประมาณค่าแบบออนไลน์

จากระบบควบคุม (14) ค่าของฟังก์ชันความผิดพลาด e ณ จุดข้อมูลต่างๆ สามารถคำนวณได้จากค่าอินพุตและเอาต์พุตของระบบควบคุม ดังสมการ

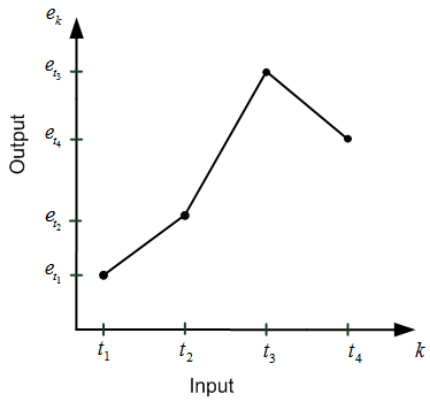
$$e\left(\theta_k,\theta_{k-1}\right)=\theta_{d,k}-\theta_{k+1} \qquad (15)$$

ดังนั้นจึงสามารถประมาณค่าฟังก์ชัน e ได้จากข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตของระบบควบคุม

แต่อย่างไรก็ตามการประมาณค่าฟังก์ชัน e ซึ่งเป็นฟังก์ชันสองตัวแปรนั้นจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจำนวนมากจึงไม่เหมาะสมต่อการประมาณค่าแบบออนไลน์ ดังนั้นจึงกำหนดเงื่อนไขให้เส้นทางเดินอ้างอิงที่ต้องการมีลักษณะเป็นฟังก์ชันเป็นคาบ (Periodic Function) เพื่อให้ฟังก์ชัน F และ e เป็นฟังก์ชันของตัวแปรเวลาเพียงตัวแปรเดียว นั่นคือ

$$e\left(\theta_k,\theta_{k-1}\right)=e_k=F_k-\hat{F}_k \qquad (16)$$

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกฟังก์ชันประมาณของ e ให้อยู่ในรูปของตารางค้นหา (Look-up table) ซึ่งมีความเหมาะสมกับฟังก์ชันที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง และมีวิธีการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน [10] โดยใช้ตารางค้นหาหนึ่งมิติที่มีอินพุตเป็นเวลา k และเอาต์พุตเป็นค่าประมาณของความผิดพลาด $\hat{e}$ ณ เวลานั้น รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างตารางค้นหาหนึ่งมิติที่ประกอบด้วยจุดข้อมูล 4 จุด ซึ่งเอาต์พุตของตารางค้นหาจะถูกคำนวณโดยใช้จุดในตารางค้นหาที่อยู่ใกล้ที่สุดทางด้านซ้ายและด้านขวาของอินพุตของแบบจำลอง และคำนวณด้วยวิธีการประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้น (Linear Interpolation) กับค่าทั้งสอง ทำให้ได้เอาต์พุตของตารางค้นหาหนึ่งมิติเป็นดังสมการ (17)



รูปที่ 3 ตารางค้นหา 1 มิติที่มีข้อมูล 4 จุด

$$\hat{e}_k=\frac{e_{t_{\text{left}}}\left(t_{\text{right}}-k\right)+e_{t_{\text{right}}}\left(k-t_{\text{left}}\right)}{t_{\text{right}}-t_{\text{left}}} \qquad (17)$$

ขั้นตอนของการจัดเก็บข้อมูลลงในตารางค้นหา (Measurement of look-up table) ข้อมูลที่วัดได้ไม่จำเป็นต้องตรงกับจุดข้อมูลในตารางค้นหา t_j อย่างแม่นยำ แต่จะยอมให้มีความคลาดเคลื่อน (tolerance) Δt ได้ โดยจะนำข้อมูลที่ได้จากบริเวณโดยรอบมาเฉลี่ยหาค่าของฟังก์ชัน $\hat{e}_{t_j}$ แล้วจึงจัดเก็บเอาต์พุตที่คำนวณได้ลงในตารางค้นหา ซึ่งการทำเช่นนี้จะช่วยลดสัญญาณรบกวนได้ โดยการประมาณค่าเฉลี่ยด้วยวิธีการคำนวณแบบวนซ้ำมีสูตรการคำนวณดังต่อไปนี้

พิจารณาข้อมูลที่วัดได้รอบจุดข้อมูลในตารางค้นหา

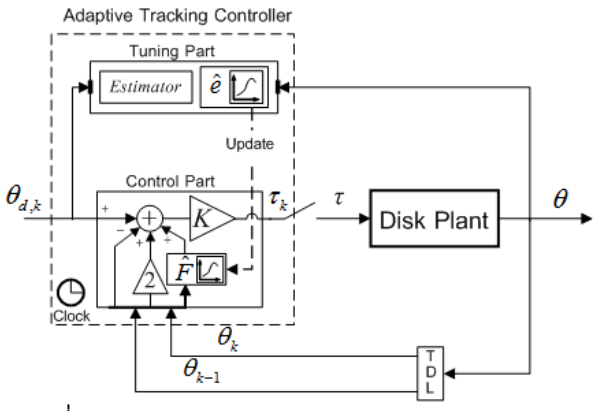
$$t_j-\frac{\Delta t}{2}\le k\le t_j+\frac{\Delta t}{2} \qquad (18)$$

เมื่อ n เป็นจำนวนครั้งในการวัดข้อมูล

$$\hat{e}_{t_j}\left(n+1\right)=\hat{e}_{t_j}\left(n\right)+\frac{1}{n+1}\left[\hat{e}_k\left(n+1\right)-\hat{e}_{t_j}\left(n\right)\right] \qquad (19)$$

$$n=0,1,2,\ldots$$

เมื่อพิจารณาวิธีการที่ได้นำเสนอไปนั้น จะพบว่าวิธีการดังกล่าวไม่จำเป็นต้องใช้สัญญาณความเร็วและความเร่งอ้างอิงในการคำนวณสัญญาณควบคุม อีกทั้งตัวควบคุมยังมีความสามารถในการปรับตัวเพื่อลดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากแบบจำลองมีฟังก์ชันที่ไม่ทราบค่าหรือพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า โดยโครงสร้างของระบบควบคุมจะเป็นดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนภาพระบบควบคุมติดตามทางเดินแบบปรับตัวได้ที่นำเสนอ

3.4 การนำไปใช้ในการควบคุม

ในการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้ที่ได้นำเสนอไปนั้น มีขั้นตอนวิธีในการนำตัวควบคุมไปใช้งาน และการปรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ดังนี้

(ก) กำหนดขนาดของตารางค้นหาและค่าเริ่มต้นของฟังก์ชัน $\hat{e}$ สำหรับตัวประมาณค่าและฟังก์ชัน $\hat{F}$ สำหรับตัวควบคุม

(ข) วัดข้อมูลอินพุต-เอาต์พุตของระบบควบคุม และเวลา เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณ $\hat{e}_k$ แล้วจัดเก็บลงในตารางค้นหา

(ค) เมื่อครบรอบเวลาของการปรับปรุงค่า คำนวณค่าความผิดพลาดของการติดตามทางเดินที่ต้องการ โดยพิจารณาจากผลรวมค่าผิดพลาดกำลังสองเมื่อชดเชยเวลาหน่วง (Sum square error) $\mathrm{SSE} = \sum_{k=1}^{n} [\theta_{d,k-1} - \theta_k]^2$ ทั้งนี้เพื่อพิจารณาเฉพาะความผิดพลาดที่เกิดจากแบบจำลองเท่านั้น

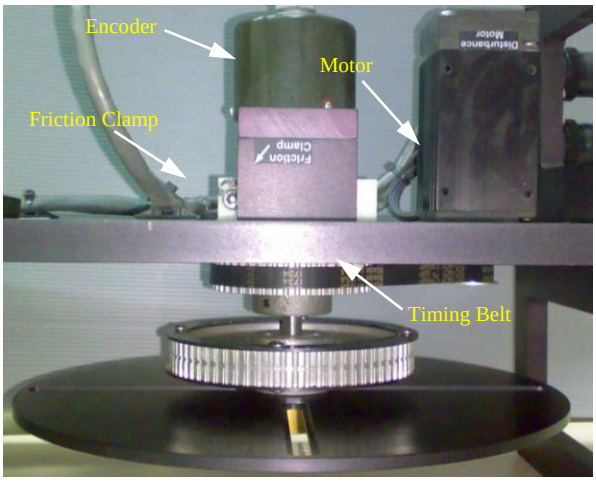
(ง) เมื่อค่าที่ได้ใน (ค) เบี่ยงเบนเกินจากค่าที่กำหนดไว้ ε ให้นำฟังก์ชันประมาณ $\hat{e}$ ไปปรับปรุงฟังก์ชัน $\hat{F}$ ของตัวควบคุม แต่ถ้าค่าความผิดพลาดน้อยกว่าที่กำหนดให้หยุดลูพของการปรับปรุงค่า

(จ) ตั้งค่าเริ่มต้นของตัวประมาณค่าและฟังก์ชัน $\hat{e}$ ใหม่ จากนั้นเริ่มคำนวณซ้ำในขั้นตอน (ข) ต่อไป

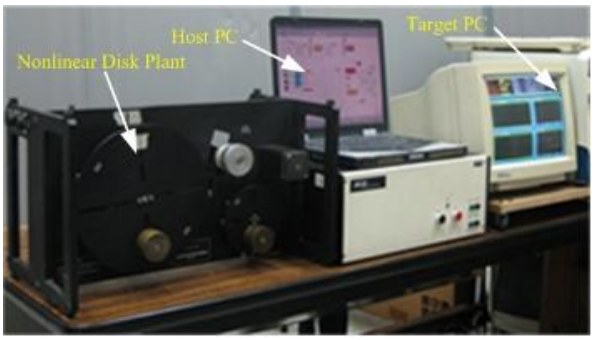
4. ระบบจานหมุนทางกล

ระบบจานหมุนทางกลที่ใช้ในการทดลองเพื่อแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของตัวควบคุม คือระบบจานหมุน Educational Control Products (ECP) model 220 ดังแสดงในรูปที่ 5ก โดยระบบมีกลไกที่ทำให้สามารถปรับโมเมนต์ความเฉื่อย และอัตราทดได้ นอกจากนี้ยังสามารถจำลอง แรงเสียดทาน ความยืดหยุ่น (Drive flexibility) และแบ็กแล็ช (backlash) ชุดทดลองจะประกอบด้วยจานหมุนสองจาน จานหมุนเล็ก (input disk) ใช้เป็นอุปกรณ์สร้างเส้นทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่องใดๆ (Arbitrary trajectory) ขณะที่จานหมุนใหญ่ (pendulum disk) เป็นระบบไม่เชิงเส้นที่ต้องการควบคุม โดยมอเตอร์ที่ใช้ขับจานหมุนเป็น brushless DC servo motor ซึ่งใช้งานร่วมกับเอ็นโค้ดเดอร์ความละเอียด 4000 PPR และใช้ตัวควบคุมคือ Matlab® xPC Real time Controller ในการทดลองควบคุมทางเดินในเวลาจริง ดังรูป 5ข

(ก) ระบบทางกล



(ข) รายละเอียดของระบบทางกล



(ค) Matlab® xPC Real time Controller

รูปที่ 5 ระบบจานหมุน ECP model 220

แบบจำลองทางคณิตของระบบจานหมุนคือ

$$0.0232\ddot{\theta} + f\left(\theta,\dot{\theta}\right) = u \qquad (19)$$

โดยที่ u คือ สัญญาณแรงดันควบคุมมอเตอร์

$f\left(\theta,\dot{\theta}\right)$ คือ ฟังก์ชันไม่เชิงเส้นที่ไม่ทราบค่า

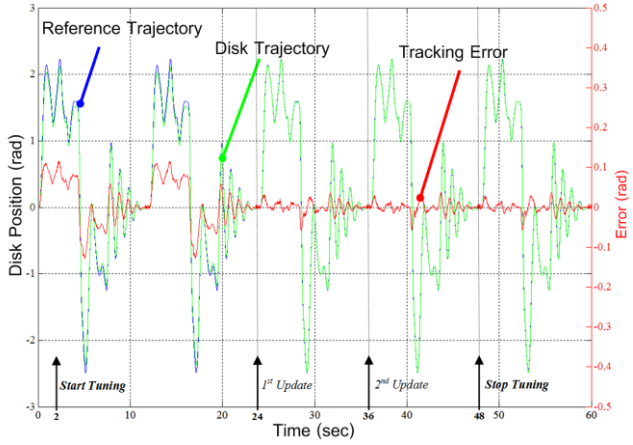
จานหมุนใหญ่ซึ่งเป็นระบบไม่เชิงเส้นที่ต้องการควบคุม จะถูกติดตั้งยางที่แกนของจานหมุนเพื่อสร้างแรงเสียดทานแห้ง และติดมวลทองเหลืองบนจานหมุนเพื่อสร้างผลกระทบจากแรงโน้มถ่วงซึ่งไม่เป็นเชิงเส้น

โปรแกรมควบคุมที่ออกแบบบน Matlab® Simulink จะถูกนำไปใช้ในการควบคุมด้วย Matlab® xPC Real time target PC สำหรับการควบคุมทางเดินของจานหมุน ซึ่ง target PC ประกอบด้วย Pentium processor, RAM 100 MB, การ์ด AD 8133 และการ์ด AD 726 โดยใช้อัตราการสุ่ม (sampling rate) 200 เฮิร์ตซ์

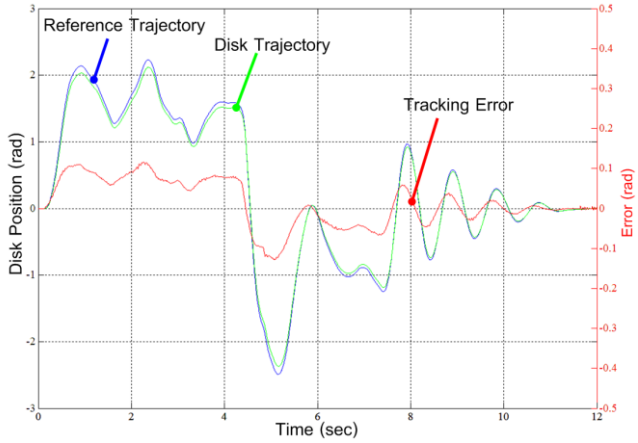
5. ผลการทดลองควบคุม

การทดลองควบคุมให้จานหมุนติดตามสัญญาณทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่องใดๆ โดยสัญญาณอ้างอิงถูกสร้างขึ้นจากจานหมุนเล็ก และบันทึกเก็บไว้ จากนั้นนำสัญญาณอ้างอิงดังกล่าวส่งให้แก่ระบบควบคุมในลักษณะของฟังก์ชันเป็นคาบ ซึ่งมีคาบเวลา 12 วินาที โดยกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวควบคุมดังต่อไปนี้

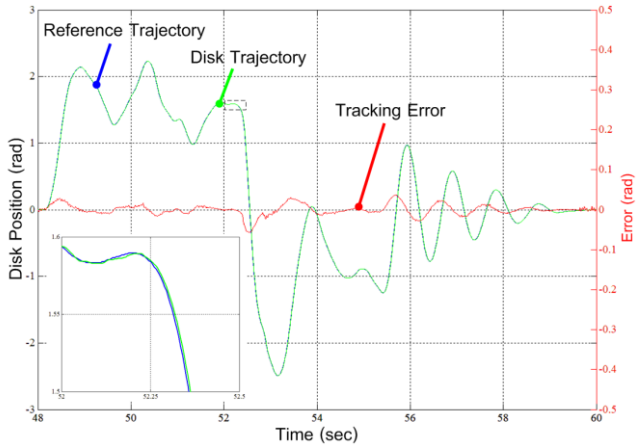
- ตารางค้นหาขนาด 301 จุดข้อมูล ช่วงของอินพุตตั้งแต่ 0 ถึง 12 วินาที ช่องว่างระหว่างจุดข้อมูลเป็น 0.04 วินาที และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ Δt เท่ากับ 0.04 วินาที
- กำหนดคาบเวลาของการปรับปรุงค่าในรอบแรกที่เวลา 24 วินาที และทุก 12 วินาทีสำหรับรอบต่อไป
- กำหนดให้ผลรวมค่าผิดพลาดในการติดตามทางเดินกำลังสองเมื่อชดเชยเวลาหน่วงที่ยอมรับได้ ε เท่ากับ 0.0096 (ค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 0.002 เรเดียน)
- ค่าเริ่มต้นของฟังก์ชัน $\hat{e}$ และฟังก์ชัน $\hat{F}$ ในตารางค้นหาเป็นศูนย์



(ก) ผลลัพธ์ที่เวลา 0 ถึง 60 วินาที

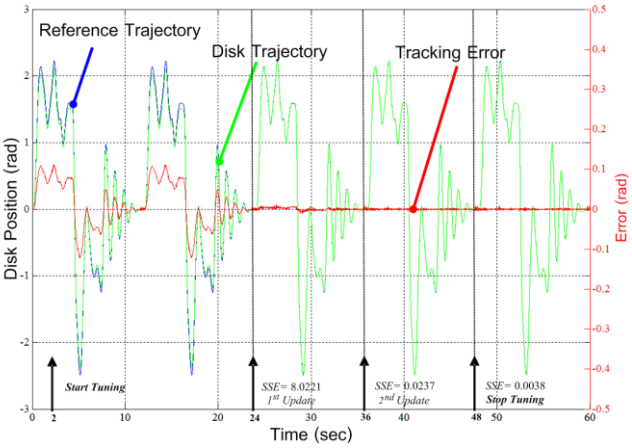


(ข) ผลลัพธ์ที่เวลา 0 ถึง 12 วินาที

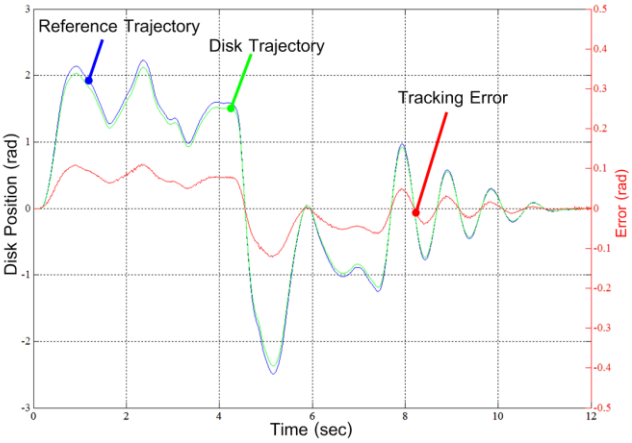


(ค) ผลลัพธ์ที่เวลา 48 ถึง 60 วินาที

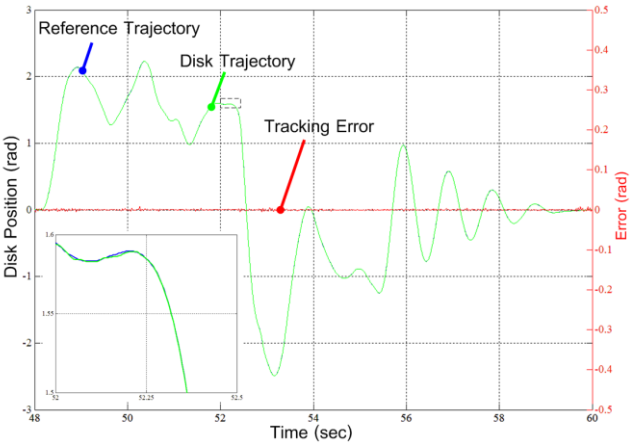
รูปที่ 6 ผลการควบคุมให้ระบบติดตามทางเดินแบบต่อเนื่องใดๆ



(ก) ผลลัพธ์ที่เวลา 0 ถึง 60 วินาที

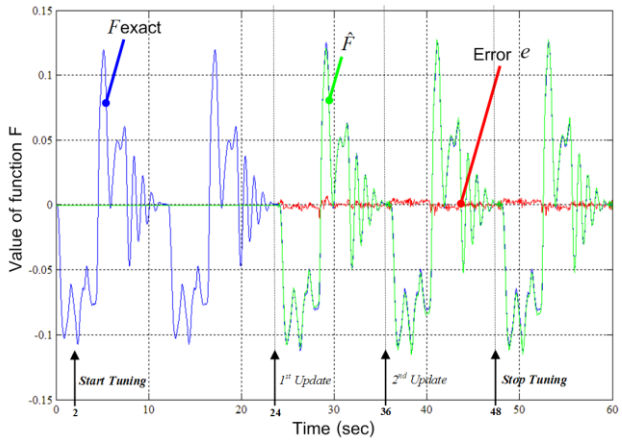


(ข) ผลลัพธ์ที่เวลา 0 ถึง 12 วินาที



(ค) ผลลัพธ์ที่เวลา 48 ถึง 60 วินาที

รูปที่ 7 ผลลัพธ์เมื่อชดเชยเวลาหน่วงของการควบคุมให้ระบบติดตามทางเดินแบบต่อเนื่องใดๆ



รูปที่8 การลู่เข้าของฟังก์ชัน $\hat{F}$ สู่ค่าจริง

ผลลัพธ์การควบคุมรูปที่ 6 และผลลัพธ์เมื่อชดเชยเวลาหน่วงรูปที่ 7 ชี้ให้เห็นว่าเอาต์พุตของระบบจะลู่เข้าสู่ทางเดินอ้างอิง ทำให้ค่าความผิดพลาดของการติดตามทางเดินลดลงจนกระทั่งมีเพียงความผิดพลาดเนื่องจากเวลาหน่วงเท่านั้น ทั้งนี้การลู่เข้าของฟังก์ชัน $\hat{F}$ รูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมสามารถปรับปรุงค่า $\hat{F}$ ให้ลู่เข้าสู่ค่าจริงได้ ส่งผลให้ค่าความผิดพลาดของการติดตามทางเดินเมื่อชดเชยเวลาหน่วงลดลงจนกระทั่งต่ำกว่าค่าที่กำหนดได้ในรอบที่ 3 ของการปรับปรุงค่า และทำให้เอาต์พุตของระบบติดตามทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่องใดๆ ได้เป็นอย่างดีโดยมีเวลาหน่วงคงที่

6. สรุป

บทความนี้ประสบความสำเร็จในการนำวิธีการควบคุมติดตามทางเดินแบบปรับตัวได้ที่นำเสนอมาใช้ในการควบคุมระบบจานหมุนทางกลไม่เชิงเส้น จากผลการทดลองแสดงเห็นว่า ในกรณีที่แบบจำลองของระบบมีฟังก์ชันหรือพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า และสัญญาณอ้างอิงเป็นฟังก์ชันเป็นคาบ ตัวควบคุมสามารถปรับตัวได้อย่างเหมาะสม ทำให้การแปลงระบบควบคุมให้เป็นระบบเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับและการชดเชยพลวัติของระบบมีความถูกต้องมากขึ้น ส่งผลให้เอาต์พุตลู่เข้าสู่เส้นทางเดินอ้างอิงจนกระทั่งสามารถติดตามเส้นทางเดินอ้างอิงได้อย่างสมบูรณ์

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์เครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้การสนับสนุนเครื่องมืออุปกรณ์และเงินทุนแก่งานวิจัยในครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Astrom, K.J. and Hagglund, T. (1995). *PID Controller: Theory, Design and Tuning*, 1st edition, Instrument Society of America, North Carolina.

[2] Zadeh, L.A. and Desoer, C.A. (1963). *Linear System Theory: the State Space Approach*, McGraw-Hill, New Jersey.

[3] Friedland, B. (2004). *Control System Design: An Introduction to State Space Methods*, Dover, New York.

[4] Wilson, J. Rugh (1981). *Nonlinear System Theory: The Volterra/Wiener Approach*, Johns Hopkins University Press, Baltimore.

[5] Astrom, K.J. and Murray, R.M. (2008). *Feedback System: An Introduction for Scientist and Engineers*, Princeton University Press, New Jersey.

[6] Slotine, J.E. and Li, W. (1991). *Applied nonlinear control*, Prentice-Hall, New Jersey.

[7] Setlur, P., Wagner, J.R., Dawson, D.M. and Braganza, D. (2006). A Trajectory Tracking Steer-by-Wire Control System for Ground Vehicles, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 55, no. 1, January 2006, pp. 76 – 85.

[8] Berkelman, P. and Ma, J. (2009). A Compact Modular Teleoperated Robotic System for Laparoscopic Surgery, *The International Journal of Robotics Research Applied*, vol. 28, May 2009, pp. 1198 – 1215.

[9] Astrom, K.J. and Wittenmark, B. (1989). *Adaptive Control*, 1st edition, Addison-Wesley, New York.

[10] Nelles, O. (2001). *Nonlinear System Identification: From Classical Approaches to Neural Networks and Fuzzy Models*, Springer, Berlin.

[11] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ (2548). *การควบคุมระบบพลศาสตร์*, พิมพ์ครั้งที่ 2, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

[12] Kulakowski, B.T., Gardner, J.F. and Shearer, J.L. (2007). *Dynamic Modeling and Control of Engineering System.* 3rd edition, Cambridge University Press, New York.

[13] Craig, J.J. (1989). *Introduction to Robotics: Mechanics and Control.* 2nd edition, Addison-Wesley Publishing Company.