ตัวควบคุมที่แปลงระบบควบคุมให้เป็นระบบเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับชนิดปรับค่าเองได้สำหรับ
ระบบจานหมุนทางกล

นาย ธนะชัย วิภาวรศิลป์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2552
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SELF-TUNING FEEDBACK LINEARIZATION CONTROLLER FOR A MECHANICAL DISK PLANT

Mr. Thanachai Viphavorasin

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ตัวควบคุมที่แปลงระบบควบคุมให้เป็นระบบเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับชนิดปรับค่าเองได้สำหรับระบบจานหมุนทางกล
โดย	นาย ธนะชัย วิภาวรศิลป์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. รัชทิน จันทร์เจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศุภวุฒิ จันทรานุวัฒน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. รัชทิน จันทร์เจริญ)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศุภวุฒิ จันทรานุวัฒน์)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร. เจตวีย์ ภัครัชพันธุ์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ธนะชัย วิภาวรศิลป์ : ตัวควบคุมที่แปลงระบบควบคุมให้เป็นระบบเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับชนิดปรับค่าเองได้สำหรับระบบจานหมุนทางกล. (SELF-TUNING FEEDBACK LINEARIZATION CONTROLLER FOR A MECHANICAL DISK PLANT) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ผศ.ดร.ศุภวุฒิ จันทรานุวัฒน์, 109 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอวิธีการควบคุมติดตามทางเดินสำหรับระบบจานหมุนทางกลที่ไม่เป็นเชิงเส้น ตัวควบคุมได้รับการออกแบบบนพื้นฐานของการแปลงระบบควบคุมให้เป็นระบบเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับและการชดเชยพลวัติของระบบในระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง แบบจำลองของระบบปิดจะมีลักษณะเป็นสมการทางพีชคณิตกล่าวคือ เอาต์พุตในอนาคตเท่ากับอินพุตที่เวลาปัจจุบันโดยมีเวลาหน่วงคงที่ ซึ่งเอื้อต่อการนำไปใช้ในการควบคุมเส้นทางเดินของระบบ และเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมที่แปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับโดยทั่วไปจะพบว่าวิธีการนี้ไม่จำเป็นต้องใช้สัญญาณความเร็วและความเร่งของเส้นทางเดินอ้างอิง ผลการทดลองควบคุมระบบจริงแสดงให้เห็นว่าวิธีการควบคุมดังกล่าวสามารถควบคุมให้ระบบติดตามเส้นทางเดินแบบต่อเนื่องที่ต้องการได้เป็นอย่างดี และเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมที่แปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับโดยทั่วไปพบว่าตัวควบคุมที่นำเสนอให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าเมื่อสัญญาณอ้างอิงไม่เรียบ ในกรณีที่แบบจำลองของระบบมีพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าและเส้นทางเดินเป็นฟังก์ชันเป็นคาบ ความสามารถในการปรับค่าเองได้จะถูกติดตั้งลงในตัวควบคุมเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า โดยวิธีการปรับค่าของตัวควบคุมนั้นประสบความสำเร็จในการนำไปใช้ควบคุมให้ระบบติดตามทางเดินที่ต้องการได้แม้ว่าในตอนเริ่มต้นพารามิเตอร์ของระบบจะมีค่าไม่ถูกต้อง ในกรณีที่สัญญาณอ้างอิงมีลักษณะเป็นขั้นบันไดหรือมีความไม่ต่อเนื่อง สัญญาณอ้างอิงจะถูกปรับให้เป็นสัญญาณแบบเรียบเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้สัญญาณควบคุมมีค่าสูงจนเกินไป โดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนของรูปมาตรฐานของระบบอันดับสองในการแปลงสัญญาณที่มีลักษณะเป็นขั้นบันไดให้เป็นสัญญาณใหม่ที่มีความเรียบ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีดังกล่าวสามารถรับมือกับสัญญาณอ้างอิงที่มีลักษณะเป็นขั้นบันไดได้อย่างมีประสิทธิผล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต ธนะชัย วิภาวรศิลป์
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
ปีการศึกษา 2552 ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

#5070294021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING
KEYWORDS : SELF-TUNING CONTROLLER / FEEDBACK LINEARIZATION

THANACHAI VIPHAVORASIN : SELF-TUNING FEEDBACK LINEARIZATION CONTROLLER FOR A MECHANICAL DISK PLANT. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. RATCHATIN CHANCHAROEN, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : ASST. PROF. SUPAVUT CHANTRANUWATHANA, Ph.D., 109 pp.

This Thesis proposes a technique to control a nonlinear 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. Compared to conventional feedback linearization, this technique does not require velocity and acceleration command. The experimentation on the disk plant demonstrates that the technique is able to control the plant to perfectly track a desired smooth trajectory. Compared to conventional feedback linearization, the proposed controller is more effective, especially when reference signal is unsmooth. In case that the system model contains unknown parameter and trajectory is periodic, a self-tuning ability is to be installed in the controller to estimate the unknown parameter. The purposed self-tuning algorithm is also successfully implemented to give a perfect tracking result even when the plant parameter is not precise at the beginning. In case that the reference trajectory contains a step or discontinuity, the trajectory should be modified such that it becomes smooth trajectory to avoid high control effort. The standard second order transfer function could be used to convert the step trajectory into a new smooth trajectory. The experiment demonstrates that this technique can effectively control the system to follow a step trajectory as well.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department : Mechanical Engineering	Student's Signature ....
Field of Study : Mechanical Engineering	Advisor's Signature ....
Academic Year : 2009	Co-Advisor's Signature ....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร. รัชทิน จันทร์เจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศุภวุฒิ จันทรานุวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ความกรุณาช่วยเหลือและให้คำปรึกษาต่างๆ ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ในระดับปริญญาโทและปริญญาเอกที่ให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงครอบครัว และเพื่อนๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจให้ตลอด

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ปลูกฝังความเป็นบัณฑิตที่สมบูรณ์ให้แก่ข้าพเจ้าตั้งแต่ระดับปริญญาตรีเป็นต้นมา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.. ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.. จ
กิตติกรรมประกาศ.. ฉ
สารบัญ.. ช
สารบัญภาพ... ฎ

หน้า

บทที่ 1 บทนำ.. 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.. 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.. 4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.. 4
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย... 5
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.. 5

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง... 6
2.1 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับ........ 6
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแบบปรับตัวได้............................ 9
2.3 ตัวควบคุมที่นำเสนอ.. 13

บทที่ 3 การแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับ................................ 14
3.1 พื้นฐานการแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับ.................................. 14
3.2 การแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับสำหรับระบบจานหมุนทางกล 17
3.2.1 ระบบจานหมุนทางกล.. 17
3.2.2 ตัวควบคุมที่ใช้การแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับสำหรับระบบจานหมุนทางกล...... 18
3.3 การจำลองการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์... 22

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

3.3.1 แบบจำลองระบบจานหมุนทางกล.. 22
3.3.2 ผลการจำลองเอาต์พุตของแบบจำลองระบบจานหมุนทางกล.......... 24
3.3.2 ผลการจำลองการควบคุมระบบจานหมุนทางกล......................... 25
3.3.3.1 ผลการจำลองควบคุมให้เอาต์พุตของระบบติดตามทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่อง.. 25
3.3.3.2 ผลการจำลองควบคุมให้เอาต์พุตของระบบติดตามทางเดินอ้างอิงแบบไม่ต่อเนื่อง.. 26
3.3.4 สรุปผลการจำลองควบคุมระบบจานหมุน.................................. 29

บทที่ 4 ตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้.. 30
4.1 บทนำ.. 30
4.2 การออกแบบตัวควบคุม.. 33
4.3 การหาเอกลักษณ์ของระบบแบบออนไลน์............................... 34
4.3.1 แบบจำลองโดยประมาณของระบบปิด.................................. 35
4.3.2 การประมาณค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์............................... 37
4.3.3 การนำไปใช้ในการควบคุม.. 38
4.4 การจำลองควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์.. 41
4.4.1 ผลการจำลองควบคุมระบบจานหมุนทางกล............................. 42
4.4.1.1 ผลการจำลองควบคุมให้เอาต์พุตของระบบติดตามทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่อง.. 42
4.4.1.2 ผลการจำลองควบคุมให้เอาต์พุตของระบบติดตามทางเดินอ้างอิงแบบไม่ต่อเนื่อง.. 48
4.4.2 สรุปผลการจำลองควบคุมด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้.............. 53

บทที่ 5 การทดลอง... 54
5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง... 54
5.2 ระบบควบคุมที่ใช้ในการทดลอง.. 57
5.3 ผลการทดลองกรณีทราบแบบจำลองของระบบทั้งหมด........................ 59

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

5.3.1 ผลการทดลองควบคุมให้จานหมุนติดตามสัญญาณทางเดินอ้างอิง ซายน์สวีป………………………………………………………………. 59

5.3.2 ผลการทดลองควบคุมให้จานหมุนติดตามสัญญาณทางเดินอ้างอิง จากจานหมุนเล็ก…………………………………………………………….. 62

5.3.3 ผลการทดลองควบคุมให้จานหมุนมีการตอบสนองตามพลวัติที่ กำหนด……………………………………………………………………. 66

5.3.4 สรุปการทดลองควบคุมระบบจานหมุนในกรณีที่ทราบแบบจำลองของ ระบบทั้งหมด…………………………………………………………….. 67

5.4 ผลการทดลองที่สองกรณีทราบแบบจำลองของระบบบางส่วน……………… 67

5.4.1 ผลการทดลองควบคุมให้จานหมุนติดตามสัญญาณทางเดินอ้างอิง ซายน์สวีป………………………………………………………………. 68

5.4.2 การทดลองควบคุมให้จานหมุนติดตามสัญญาณทางเดินอ้างอิง แบบต่อเนื่องใดๆ………………………………………………………….. 73

5.4.3 การทดลองควบคุมให้จานหมุนติดตามสัญญาณทางเดินอ้างอิง รูปคลื่นพัลส์……………………………………………………………….. 78

5.4.4 สรุปผลการด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้………………………… 82

บทที่ 6 สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ……………………………………………………… 83

6.1 สรุปผลการวิจัย……………………………………………………………….. 83

6.2 ข้อเสนอแนะ…………………………………………………………………... 84

รายการอ้างอิง………………………………………………………………………………. 86

ภาคผนวก……………………………………………………………………………………... 91

ภาคภนวก ก. โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองและควบคุมระบบจานหมุน…………... 91

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

บทความทางวิชาการที่ได้นำเสนอในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23 (The 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand) ซึ่งจัดขึ้นที่จังหวัดเชียงใหม่ระหว่างวันที่ 4-7 พฤศจิกายน 2552.... 100

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.. 109

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 3.1 ถังน้ำในระบบควบคุมระดับของเหลวในถัง.. 14
รูปที่ 3.2 แผนภาพการควบคุมทางเดินโดยการแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับ. 19
รูปที่ 3.3 แผนภาพการควบคุมทางเดินโดยการแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับในรูปแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง.. 21
รูปที่ 3.4 ระบบจานหมุนทางกลที่ใช้ในการจำลอง.. 24
รูปที่ 3.5 ผลการจำลองเอาต์พุตของแบบจำลองในรูปสมการดิฟเฟอเรนซ์ที่คาบเวลาสุ่มต่างๆ เปรียบเทียบกับเอาต์พุตของระบบ... 24
รูปที่ 3.6 แผนภาพการจำลองควบคุมทางเดินของระบบจานหมุนทางกล................... 25
รูปที่ 3.7 ผลการจำลองควบคุมระบบจานหมุนทางกลให้ติดตามทางเดินแบบต่อเนื่องที่คาบเวลาสุ่มต่างๆ 26
รูปที่ 3.8 ผลการจำลองควบคุมระบบจานหมุนทางกลให้ติดตามทางเดินแบบขั้นบันได... 27
รูปที่ 3.9 แผนภาพการจำลองควบคุมทางเดินของระบบจานหมุนทางกลสำหรับทางเดินอ้างอิงที่มีลักษณะเป็นขั้นบันได.. 28
รูปที่ 3.10 ผลการจำลองควบคุมระบบจานหมุนทางกลให้ติดตามทางเดินแบบขั้นบันไดโดยกำหนดพลวัติของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบต่างๆ.................................. 29
รูปที่ 4.1 การควบคุมแบบป้อนกลับทั่วไป... 31
รูปที่ 4.2 การควบคุมแบบปรับตัวได้... 31
รูปที่ 4.3 ตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้.. 32
รูปที่ 4.4 แผนผังแบบจำลองโดยประมาณของระบบปิด...................................... 36
รูปที่ 4.5 ตารางค้นหาหนึ่งมิติที่มีข้อมูล m จุด.. 37
รูปที่ 4.6 ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลยอมรับได้รอบจุดข้อมูลในตารางค้นหา...... 38
รูปที่ 4.7 แผนผังแสดงการปรับปรุงพารามิเตอร์ของตัวควบคุม............................ 40
รูปที่ 4.8 แผนภาพระบบควบคุมจานหมุนทางกลด้วยตัวควบคุมที่ชนิดปรับค่าเองได้...... 41
รูปที่ 4.9 แผนภาพการจำลองควบคุมทางเดินของระบบจานหมุนทางกลด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้.. 42
รูปที่ 4.10 ผลการจำลองควบคุมระบบจานหมุนให้ติดตามทางเดินแบบต่อเนื่องด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้... 45

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

รูปที่ 4.11 ผลลัพธ์เมื่อชดเชยเวลาหน่วงของการจำลองควบคุมระบบจานหมุนให้ติดตามทางเดินแบบต่อเนื่องด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้............................ 47
รูปที่ 4.12 การลู่เข้าของฟังก์ชัน $\hat{F}$ สู่ค่าจริง ในการจำลองควบคุมระบบจานหมุนให้ติดตามทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่อง.. 47
รูปที่ 4.13 แผนภาพการจำลองควบคุมทางเดินของระบบจานหมุนทางกลสำหรับทางเดินอ้างอิงที่มีลักษณะเป็นขั้นบันไดด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้................... 48
รูปที่ 4.14 ผลการจำลองควบคุมระบบจานหมุนให้ติดตามทางเดินรูปคลื่นพัลส์ด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้.. 50
รูปที่ 4.15 ผลลัพธ์เมื่อชดเชยเวลาหน่วงของการจำลองควบคุมระบบจานหมุนให้ติดตามทางเดินรูปคลื่นพัลส์ด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้............................ 52
รูปที่ 4.16 การลู่เข้าของฟังก์ชัน $\hat{F}$ สู่ค่าจริง ในการจำลองควบคุมระบบจานหมุนให้ติดตามทางเดินอ้างอิงรูปคลื่นพัลส์... 52
รูปที่ 5.1 แผงวงจร Sensoray model 626... 55
รูปที่ 5.2 ชุดทดลองระบบจานหมุนทางกล ECP model 220................................ 56
รูปที่ 5.3 ชุดทดลองควบคุมระบบจานหมุนทางกล... 56
รูปที่ 5.4 ระบบจานหมุนทางกลที่ต้องการควบคุม.. 57
รูปที่ 5.5 ระบบควบคุมทางเดินของจานหมุนทางกล... 58
รูปที่ 5.6 ผลการควบคุมระบบจานหมุนด้วยตัวควบคุมที่นำเสนอ เปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมแบบทั่วไป... 60
รูปที่ 5.7 ผลลัพธ์เมื่อชดเชยเวลาหน่วงของการควบคุมระบบจานหมุนด้วยตัวควบคุมที่นำเสนอ เปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมแบบทั่วไป.................................. 61
รูปที่ 5.8 ผลการควบคุมให้จานหมุนติดตามสัญญาณอ้างอิงจากจานหมุนเล็ก............ 63
รูปที่ 5.9 ผลลัพธ์เมื่อชดเชยเวลาหน่วงของการควบคุมให้จานหมุนติดตามสัญญาณอ้างอิงจากจานหมุนเล็ก.. 65
รูปที่ 5.10 ผลการควบคุมให้ระบบจานหมุนทางกลติดตามทางเดินแบบขั้นบันไดโดยกำหนดพลวัติของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบต่างๆ.. 66
รูปที่ 5.11 ผลการควบคุมให้ระบบจานหมุนติดตามทางเดินอ้างอิงซายน์สวีปด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้.. 70

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

รูปที่ 5.12 ผลลัพธ์เมื่อชดเชยเวลาหน่วงของการควบคุมให้ระบบจานหมุนติดตามทางเดินอ้างอิงซายน์สวีปด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้....................................... 72
รูปที่ 5.13 การลู่เข้าของฟังก์ชัน $\hat{F}$ สู่ค่าจริง ในการจำลองควบคุมระบบจานหมุนให้ติดตามทางเดินอ้างอิงซายน์สวีป.. 72
รูปที่ 5.14 ผลการควบคุมให้ระบบจานหมุนติดตามทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่องใดๆ ด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้.. 75
รูปที่ 5.15 ผลลัพธ์เมื่อชดเชยเวลาหน่วงของการควบคุมให้ระบบจานหมุนติดตามทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่องใดๆ ด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้.............................. 77
รูปที่ 5.16 การลู่เข้าของฟังก์ชัน $\hat{F}$ สู่ค่าจริง ในการจำลองควบคุมระบบจานหมุนให้ติดตามทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่องใดๆ... 77
รูปที่ 5.17 ผลการควบคุมให้ระบบจานหมุนติดตามทางเดินรูปคลื่นพัลส์ด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้.. 79
รูปที่ 5.18 ผลลัพธ์เมื่อชดเชยเวลาหน่วงของการควบคุมให้ระบบจานหมุนให้ติดตามทางเดินรูปคลื่นพัลส์ด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้.................................... 81
รูปที่ 5.19 การลู่เข้าของฟังก์ชัน $\hat{F}$ สู่ค่าจริง ในการจำลองควบคุมระบบจานหมุนให้ติดตามทางเดินอ้างอิงรูปคลื่นพัลส์... 81
รูปที่ ก.1 โปรแกรมจำลองเอาต์พุตของแบบจำลองระบบจานหมุนทางกล...................... 92
รูปที่ ก.2 หน้าต่างการกำหนดระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ในโปรแกรมจำลองของโปรแกรมแม็ทแล็บ/ซิมูลิงค์.. 92
รูปที่ ก.3 โปรแกรมจำลองควบคุมระบบจานหมุนทางกลด้วยวิธีแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับที่นำเสนอ... 94
รูปที่ ก.4 โปรแกรมจำลองควบคุมระบบจานหมุนทางกลด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้... 95
รูปที่ ก.5 หน้าต่างกำหนดพารามิเตอร์การสื่อสารของ xPC Target.............................. 96
รูปที่ ก.6 หน้าต่างสร้างบูทดิสก์สำหรับ Target PC ของ xPC Target........................... 97
รูปที่ ก.7 โปรแกรมควบคุมระบบจานหมุนทางกลด้วยวิธีแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับที่นำเสนอ... 98
รูปที่ ก.8 โปรแกรมควบคุมระบบจานหมุนทางกลด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้......... 99

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีการใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติ (Automatic control) กันอย่างแพร่หลายทั้งในอุตสาหกรรมการผลิต โรงไฟฟ้า เครื่องบิน รถยนต์ แม้แต่อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าที่ใช้ตามครัวเรือนก็ได้มีการนำระบบควบคุมอัตโนมัติมาประยุกต์ใช้ จากแต่ก่อนที่ระบบหรืออุปกรณ์ต่างๆ มีความซับซ้อนต่ำและง่ายต่อการออกแบบตัวควบคุม แต่ต่อมาเมื่อได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ เพื่อตอบสนองต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์ให้มีความสะดวกสะบายและปลอดภัยสูงสุด ส่งผลให้ระบบต่างๆ เริ่มมีความซับซ้อนขึ้น เป็นผลทำให้เกิดการค้นคว้า วิจัย และพัฒนาวิธีการ เทคนิค และทฤษฎีระบบควบคุม เพื่อให้สามารถรับมือกับระบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้นได้

การออกแบบตัวควบคุมที่ทำให้เอาต์พุตของระบบไม่เชิงเส้นติดตามทางเดินถือเป็นงานที่ท้าทาย เนื่องจากเอาต์พุตและสัญญาณควบคุมมีความสัมพันธ์แบบไม่เชิงส้น ส่งผลให้ตัวควบคุมที่ออกแบบบนพื้นฐานของการประมาณระบบให้เป็นเชิงเส้นรอบจุดสมดุลหรือจุดทำงานนั้นให้ผลการควบคุมไม่เป็นที่น่าพอใจสำหรับระบบซึ่งทำงานบนช่วงการทำงานที่กว้าง เนื่องจากตัวควบคุมแบบเชิงเส้นที่ออกแบบโดยใช้การประมาณระบบให้เป็นเชิงเส้นรอบจุดทำงานเพียงจุดเดียวนั้นไม่สามารถชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้นที่ครอบคลุมช่วงการทำงานได้อย่างเหมาะสม

เมื่อหลายปีที่ผ่านมาปัญหานี้ได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นในภาคอุตสาหกรรม ชุดส่งกำลังทางกลถูกแทนที่ด้วยเทคโนโลยีทางอิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่าบายไวร์ (By Wire) ยกตัวอย่างเช่น คันเร่งของยานยนต์ซึ่งใช้เทคโนโลยีนี้ โดยตำแหน่งของคันเร่งจะถูกตรวจจับโดยเอ็นโค้นเดอร์และส่งผ่านมาทางสายสัญญาณเพื่อนำมาใช้ในการเปิดลิ้นปีกผีเสื้อ เช่นเดียวกกันกับเทคโนโลยี “Steer by wire” ที่ถูกนำมาใช้กับยานยนต์รุ่นใหม่ในขณะนี้ นอกจากนี้ยังมีงานด้านอื่นที่ต้องการตัวควบคุมทางเดินที่มีความแม่นยำอีกเช่น อุปกรณ์มาสเตอร์/สเลฟ หุ่นยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยความเร็วสูง และเครื่องจักรซีเอ็นซีความเร็วสูง

ในความเป็นจริงแล้วระบบทางกลล้วนแล้วแต่เป็นระบบไม่เชิงเส้น ระบบโดยทั่วไปจะประกอบด้วยแรงเสียดทานซึ่งจะมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงเมื่อมีแรงเสียดทานแห้ง (Dry Friction) รวมอยู่ด้วย ความไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากแรงโน้มถ่วง และการเปลี่ยนแปลงของความ

เฉื่อยหรือภาระ ทำให้ตัวควบคุมพีไอดีให้ผลการควบคุมไม่เป็นที่น่าพอใจ โดยเฉพาะการควบคุมให้ระบบติดตามทางเดิน ตัวควบคุมนี้ไม่สามารถควบคุมให้ค่าความผิดพลาดของการติดตามทางเดิน (Tracking Error) ลู่เข้าสู่ศูนย์ได้ (Asymptotically Stability) ดังนั้นการควบคุมระบบไม่เชิงเส้นจึงถูกนำมาใช้ เนื่องจากตัวควบคุมสำหรับระบบไม่เชิงเส้นมีความสามารถในการจัดการกับความไม่เป็นเชิงเส้นได้โดยตรงบนช่วงการทำงานที่กว้าง

วิธีการที่ถูกนำมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมติดตามทางเดินอย่างได้ผลสำหรับระบบไม่เชิงเส้นคือ วิธีการแปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับ (Conventional Feedback Linearization) ซึ่งโดยทั่วไปนั้น สัญญาณควบคุมจะประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนป้อนกลับเพื่อแปลงระบบให้เป็นเชิงเส้น และส่วนควบคุมให้ระบบติดตามทางเดิน สำหรับส่วนป้อนกลับเพื่อแปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นจะคำนวณสัญญาณควบคุมบนพื้นฐานของการป้อนกลับสเตต เพื่อทำให้ระบบปิดเป็นเชิงเส้น จากนั้นสัญญาณควบคุมของส่วนควบคุมให้ระบบติดตามทางเดินจะถูกคำนวณจากระบบปิดเชิงเส้นเพื่อควบคุมให้ค่าความผิดพลาดของการติดตามทางเดินลู่เข้าสู่ศูนย์ โดยทั้งสองส่วนจะทำงานพร้อมกันในรูปแบบของตัวควบคุมติดตามทางเดินซึ่งให้ผลการควบคุมทางเดินที่มีประสิทธิภาพ

สำหรับระบบทางกลอันดับสอง (Second Order Mechanical Systems) ในกรณีที่เราทราบแบบจำลองพลวัติของระบบเชิงเส้นที่มีความแม่นยำ จะสามารถนำสัญญาณตำแหน่งอ้างอิง อนุพันธ์อันดับหนึ่งและอันดับสองของสัญญาณตำแหน่งอ้างอิงมาใช้คำนวณหาสัญญาณควบคุมโดยใช้พลวัติผกผัน (Inverse Dynamic) ของระบบเชิงเส้น ซึ่งเมื่อนำสัญญาณควบคุมที่ถูกคำนวณด้วยวิธีการนี้ไปใช้ควบคุมพลวัติของระบบเชิงเส้นจะให้ผลลัพธ์ของทางเดินที่มีความแม่นยำ และเนื่องจากระบบปิดเป็นเชิงเส้น การพิสูจน์เสถียรภาพของระบบจึงสามารถทำได้โดยใช้ทฤษฎีของระบบเชิงเส้น

ความยุ่งยากของการควบคุมให้ระบบติดตามทางเดินอ้างอิงสำหรับระบบไม่เชิงเส้นด้วยวิธีการแปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับโดยทั่วไป คือต้องใช้อนุพันธ์อันดับหนึ่งและอันดับสองของสัญญาณตำแหน่งอ้างอิง และอนุพันธ์อันดับหนึ่งของตำแหน่งจริงในการคำนวณสัญญาณควบคุม โดยเฉพาะกับอุปกรณ์มาสเตอร์/สเลฟ และอุปกรณ์บายไวร์ ซึ่งใช้อุปกรณ์อินพุต (Input device) เป็นเครื่องกำเนิดสัญญาณตำแหน่งอ้างอิงที่ถูกควบคุมโดยมนุษย์อาจทำให้สัญญาณตำแหน่งอ้างอิงมีการสั่นหรือเป็นสัญญาณที่ไม่เรียบ ส่งผลถึงความผิดพลาดของอนุพันธ์ของสัญญาณตำแหน่งอ้างอิงต่อเนื่องไปถึงผลการควบคุม ทั้งนี้อนุพันธ์อันดับหนึ่งและ

อนุพันธ์อันดับสองของตำแหน่งอ้างอิงจะต้องถูกคำนวณในเวลาจริง (real-time) หรือต้องถูกตรวจวัดในเวลาจริง ซึ่งจำเป็นต้องความสามารถในการคำนวณของฮาร์ดแวร์ที่สูงหรือเพิ่มอุปกรณ์ตรวจวัดจึงเป็นการเพิ่มต้นทุนของระบบควบคุม นอกจากนี้ในการคำนวณสัญญาณควบคุมต้องใช้ทั้งการป้อนกลับสเตตเพื่อชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ และใช้การคำนวณบนพื้นฐานของวิธีการพลวัติผกผันของระบบเชิงเส้น เพื่อนำไปใช้ในการควบคุมพลวัติของระบบให้สามารถติดตามทางเดินแบบต่อเนื่องได้เป็นอย่างดี

วิธีการจัดการกับปัญหานี้คือ สัญญาณควบคุมในส่วนของการป้อนกลับต้องไม่เพียงแต่ชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบแต่ต้องถูกออกแบบให้ชดเชยพลวัติของระบบ ทำให้ระบบปิดอยู่ในรูปสมการทางพีชคณิตของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต สัญญาณตำแหน่งอ้างอิงจึงสามารถนำมาใช้อ้างอิงได้โดยตรง โดยที่ระบบยังคงสามารถติดตามทางเดินได้เป็นอย่างดี

อีกปัญหาหนึ่งสำหรับวิธีการแปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับก็คือ แบบจำลองพลวัติของระบบไม่เชิงเส้นต้องมีความแม่นยำเพียงพอ ซึ่งการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematic Model) ที่มีความแม่นยำสามารถสร้างได้ยาก และถึงแม้จะสามารถสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการควบคุมขึ้นมาได้ แต่ก็ยังมีความแตกต่างของแบบจำลองกับระบบจริง เนื่องจากความเป็นพลวัติของระบบ ทำให้พารามิเตอร์หลายๆ ตัวในระบบ มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตลอดเวลา ซึ่งการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบอาจส่งผลให้ตัวควบคุมไม่สามารถรักษาสมรรถนะของระบบควบคุมไว้ได้

ปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ไขโดยออกแบบให้ตัวควบคุมสามารถปรับตัวได้ โดยใช้การหาเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) ซึ่งเป็นวิธีการจำลองระบบพลวัติขึ้นมาจากการใช้ข้อมูลอินพุตที่สอดคล้องกับค่าเอาต์พุตของระบบที่ได้จากการทดลอง วิธีการนี้ช่วยลดความยุ่งยากในการหาแบบจำลองขอบระบบที่มีความซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้นสูง อีกทั้งพารามิเตอร์ของแบบจำลองสามารถจะปรับค่าได้แบบออนไลน์ ตามการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบที่เกิดขึ้น วิธีการควบคุมที่ออกแบบโดยใช้การหาเอกลักษณ์ของระบบนั่นคือ ตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้ (Self-tuning Controller) ซึ่งเป็นตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Controller) มีจุดเด่นคือ ตัวควบคุมสามารถปรับเกนของตัวควบคุมได้แบบออนไลน์ เพื่อคงไว้ซึ่งสมรรถนะของระบบควบคุมเมื่อมีความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์หรือมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบเกิดขึ้นโดยไม่ต้องออกแบบตัวควบคุมใหม่

ดังเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอแนวคิดของตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้สำหรับระบบไม่เชิงเส้น โดยใช้พื้นฐานของวิธีการแปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับ หรือตัวควบคุมที่แปลงระบบควบคุมเป็นระบบเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับชนิดปรับค่าเองได้ (Self-tuning Feedback Linearization Controller) ซึ่งจะรวมเอาข้อดีของวิธีการทั้งสองเข้าด้วยกัน โดยตัวควบคุมที่นำเสนอเป็นการออกแบบเพื่อควบคุมทางเดินของระบบจานหมุนทางกล (Mechanical Disk Plant)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1) นำเสนอแนวคิดและพัฒนาตัวควบคุมติดตามทางเดิน (Trajectory Controller) สำหรับใช้ในการควบคุมระบบจานหมุนทางกล (Mechanical Disk Plant) โดยประยุกต์ใช้วิธีการแปลงระบบควบคุมเป็นระบบเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับ (Feedback Linearization) ร่วมกับตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้ (Self-tuning Controller)

2) ศึกษาข้อดีข้อเสียและสมรรถภาพของตัวควบคุมที่แปลงระบบควบคุมเป็นระบบเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับชนิดปรับค่าเองได้ (Self-tuning Feedback Linearization Controller) สำหรับระบบจากหมุนทางกล

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1) พัฒนาและออกแบบตัวควบคุมติดตามทางเดินสำหรับระบบไม่เชิงเส้น โดยใช้วิธีการแปลงระบบควบคุมให้เป็นระบบเชิงส้น ร่วมกับแบบจำลองโดยประมาณของระบบ และตัวควบคุมสามารถปรับค่าเองได้แบบออนไลน์ สำหรับใช้ในการควบคุมทางเดินของระบบจานหมุนทางกลที่มีแบบจำลองพลวัติ (Dynamic Model) ดังสมการที่ (1.1)

$$\tau = J(\theta)\ddot{\theta} + f(\theta,\dot{\theta}) \tag{1.1}$$

โดยที่ τ คือ อินพุตทอร์ก

θ คือ ตำแหน่งมุมของจานหมุน (เอาต์พุตที่สนใจ)

$J(\theta) = J$ คือ โมเมนต์ความเฉื่อยซึ่งมีค่าคงที่

$f(\theta,\dot{\theta})$ คือ ฟังก์ชันความไม่เป็นเชิงเส้นเช่น แรงเสียดทานแห้ง แรงโน้มถ่วง

2) ทำการจำลองระบบควบคุมด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method)

3) ทดลองควบคุมระบบจริง ศึกษาผลการควบคุม ข้อดีข้อเสียและสมรรถภาพของตัวควบคุมที่แปลงระบบควบคุมเป็นระบบเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับชนิดปรับค่าเองได้สำหรับระบบจานหมุนเชิงกล

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1) ศึกษาและค้นคว้าผลงานวิจัยในช่วงเวลาที่ผ่านมา ที่เกี่ยวข้องกับตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้ การหาเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) และวิธีการแปลงระบบควบคุมเป็นระบบเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับ ศึกษาแนวคิด และทฤษฎี รวมไปถึงข้อดีข้อเสียและประสิทธิภาพของวิธีการต่างๆ เพื่อนำมาปรับใช้กับตัวควบคุมที่แปลงระบบควบคุมเป็นระบบเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับชนิดปรับค่าเองได้

2) ออกแบบโครงสร้างของตัวควบคุมที่แปลงระบบควบคุมเป็นระบบเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับชนิดปรับค่าเองได้ สำหรับควบคุมทางเดินของระบบจานหมุนทางกล

3) จำลองการควบคุม ของตัวควบคุมกับระบบที่สร้างขึ้น โดยใช้โปรแกรมแม็ทแลบ/ซิมูลิงค์ (Matlab/Simulink)

4) ทำการทดลองควบคุมระบบจริงและเก็บข้อมูลจากการทดลอง

5) วิเคราะห์ผลการทดลอง ศึกษาข้อดีข้อเสียและศักยภาพของตัวควบคุม

6) สรุปผลการวิจัย และจัดทำวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1) ตัวควบคุมที่แปลงระบบควบคุมเป็นระบบเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับชนิดปรับค่าเองได้ ที่มีสมรรถภาพในการควบคุมติดตามทางเดินของระบบจานหมุนทางกล

2) แนวคิดในการพัฒนาตัวควบคุมติดตามทางเดินสำหรับระบบทางกลอื่นๆ เช่น หุ่นยนต์อุตสาหกรรม (Industrial Robots) หุ่นยนต์ทางการแพทย์ (Medical Robots) เป็นต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ภายในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ โดยหัวข้อแรกจะกล่าวถึงเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับ (Feedabak Linearization) หัวข้อที่สองเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวของกับการควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control) สุดท้ายในหัวข้อที่สามจะกล่าวถึงตัวควบคุมที่ต้องการจะนำเสนอ

2.1 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับ

ในกรณีที่ระบบที่ต้องการจะควบคุมมีพฤติกรรมเป็นเชิงเส้น เราสามารถใช้ทฤษฎีระบบควบคุมแบบเชิงเส้นในการออกแบบระบบควบคุมได้ โดยจะสามารถควบคุมหรือกำหนดผลตอบสนองในสภาวะชั่วครู่ (Transient Response) ค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัว (Steady-State Error) และเสถียรภาพของระบบควบคุมได้ โดยจะมีแผนภาพรูตโลคัส (Root Locus) และแผนภาพโบดี (Bode Plot) รวมไปถึงทฤษฎีบทค่าสุดท้าย (Final Value Theorem) และเกณฑ์ไนควิสต์ (Nyquist Criterion) เป็นเครื่องมือสำคัญการออกแบบระบบควบคุมแบบเชิงเส้นเพื่อให้ผลลัพธ์การควบคุมมีสมรรถนะดีที่สุด [1]

ตัวควบคุมที่มีความโดดเด่นสำหรับระบบที่มีอินพุตเดียว-เอาต์พุตเดียว (Single input, Single Output; SISO) คือการควบคุมป้อนกลับแบบพีไอดีธรรมดา ซึ่งเป็นระบบควบคุมแบบดั้งเดิม (Classical Control) ที่ออกแบบและวิเคราะห์บนโดเมนความถี่ และโดเมนการแปลงลาปาซ โดยการใช้แบบจำลองในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) โดยตัวควบคุมพีไอดีมีอัลกอริธึมไม่ซับซ้อน และใช้พารามิเตอร์เพียงแค่สามตัวในการกำหนดทั้งผลตอบสนองในสภาวะชั่วครู่ และผลตอบสนองในสภาวะคงตัว (Steady-State Response) ทำให้เป็นที่นิยมและใช้กันโดยทั่วไปในระบบควบคุมอัตโนมัติต่างๆ [2]-[5]

แต่อย่างไรก็ตามตัวควบคุมพีไอดีหรือระบบควบคุมแบบดั้งเดิมยังมีข้อจำกัดอยู่มาก เช่น การรับมือกับระบบที่มีอันดับสูง (High Order System) หรือมีหลายอินพุตและหลายเอาต์พุต (Multiple-Input Multiple-Output; MIMO) รวมไปถึงการอธิบายพฤติกรรมภายในของระบบ (Internal Behavior) จึงเป็นที่มาของระบบควบคุมสมัยใหม่ (Modern Control) ที่ออกแบบโดยมีพื้นฐานจากแบบจำลองสมการอนุพันธ์ของพลวัติของระบบ เป็นการออกแบบโดยใช้แบบจำลองในรูปปริภูมิสเตต (State Space Model) ซึ่งมีความเหมาะสมกับระบบที่มีความยุ่งยาก

ซับซ้อนคือ ระบบเป็นสมการดิฟเฟอร์เรนเชียลทีมีอันดับสูง หรือมีหลายอินพุตและหลายเอาต์พุต [6]-[9]

วิธีการควบคุมเชิงเส้นขึ้นอยู่กับสมมุติฐานหลักที่ว่า มีช่วงการทำงานเล็กๆ (Small Range Operation) สำหรับแบบจำลองเชิงเส้น ดังเช่นการประมาณระบบไม่เชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้นรอบจุดทำงานหรือจุดสมดุล (Equilibrium Point) โดยใช้การกระจายอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor series expansion) [10] ดังนั้นเมื่อต้องการช่วงการทำงานที่กว้าง ตัวควบคุมแบบเชิงเส้นจะให้ผลการควบคุมที่ไม่น่าพอใจ หรืออาจจะไม่มีเสถียรภาพ เพราะความไม่เป็นเชิงเส้นในระบบไม่ได้ถูกชดเชยอย่างเหมาะสม นอกจากนี้แบบจำลองของระบบต้องสามารถประมาณให้เป็นเชิงเส้นได้ แต่ในระบบจริงนั้นมีความไม่เป็นเชิงเส้นโดยธรรมชาติที่ไม่สามารถประมาณให้เป็นเชิงเส้นได้ ซึ่งถูกเรียกว่า "hard nonlinearities" ยกตัวอย่างเช่น แรงเสียดทานคูลอมบ์ (Coulomb Friction) การอิ่มตัว (Saturation) และแบ็กแล็ช (Backlash) โดยผลกระทบจากสิ่งเหล่านี้ไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีแบบเชิงเส้นได้

สาเหตุที่สำคัญอีกประการหนึ่งของการพัฒนาระบบควบคุมแบบไม่เชิงเส้นคือความไม่แน่นอนของแบบจำลอง (Model Uncertainty) ในการออกแบบตัวควบคุมแบบเชิงเส้นนั้นจำเป็นต้องทราบพารามิเตอร์ของแบบจำลองของระบบที่มีความแม่นยำเพียงพอ แต่อย่างไรก็ตามปัญหามากมายในการควบคุมเกิดขึ้นจากความไม่แน่นอนในพารามิเตอร์ของแบบจำลอง ซึ่งอาจหมายถึงการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์อย่างช้าๆ (เช่น ความดันอากาศระหว่างการเดินทางของเครื่องบิน) หรือการแปลงพารามิเตอร์แบบทันทีทันใด (เช่น ความเฉื่อยของหุ่นยนต์เมื่อจับวัตถุชิ้นใหม่) ตัวควบคุมแบบเชิงเส้นที่ได้รับผลจากความผิดพลาดหรือค่าที่ล้าหลังของพารามิเตอร์ของแบบจำลอง อาจมีประสิทธิภาพลดลงอย่างมีนัยสำคัญหรือแม้กระทั่งขาดเสถียรภาพ แต่ความไม่เป็นเชิงเส้นนี้สามารถเพิ่มเข้าไปในส่วนของตัวควบคุม เพื่อทำให้สามารถทนต่อความไม่แน่นอนของแบบจำลองได้

ด้วยเหตุผลเหล่านี้ทำให้เกิดงานวิจัยและพัฒนาวิธีควบคุมแบบไม่เชิงเส้น เพื่อตอบสนองต่อความต้องการในการควบคุมระบบไม่เชิงเส้นให้มีผลการควบคุมเป็นที่น่าพอใจ โดยวิธีการควบคุมระบบไม่เชิงเส้นนั้นสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การแปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับ (Feedback linearization)

การรับมือกับความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบมีวิธีการที่ตรงไปตรงมาคือการชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบด้วยการป้อนกลับเพื่อให้ระบบปิดเป็นระบบเชิงเส้น การแปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นนี้มีสองวิธีการคือ การแปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับแบบฟูลสเตต (Full State Feedback Linearization) ซึ่งเป็นการแปลงตัวแปรสเตตด้วยกฎการป้อนกลับเพื่อให้ระบบปิดมีลักษณะเป็นเชิงเส้น [11]-[14] การแปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นอีกวิธีหนึ่งคือ การแปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับแบบอินพุตเอาต์พุต (Input-Output Feedback Linearization) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้กันเมื่อต้องการควบคุมเอาต์พุตให้อยู่ที่ค่าที่ต้องการ โดยใช้ความสัมพันธ์ของระหว่างเอาต์พุตที่ต้องการควบคุมกับตัวแปรอินพุตในการสร้างกฎการป้อนกลับเพื่อให้ระบบปิดเป็นเชิงเส้น [15]-[17]

สำหรับการแปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นแบบฟูลสเตตนั้นจะมีความยุ่งยากอยู่ที่เทคนิคการแปลงตัวแปรสเตตของระบบให้อยู่ในรูปของตัวแปรใหม่ที่มีลักษณะพฤติกรรมเป็นแบบเชิงเส้น และสำหรับวิธีการแปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับแบบอินพุตเอาต์พุตจะมีความยุ่งยากอยู่ที่การพิสูจน์เสถียรภาพของพลวัติภายใน (Internal Dynamics) โดย Slotine และ Li [18] ได้รวบรวมเทคนิคการทรานสฟอร์มต่างๆ อาทิเช่น กาแปลงระบบเป็นเชิงเส้นโดยอาศัยความสัมพันธ์ของตัวแปรอินพุตกับตัวแปรสเตต (Input-state linearization) การการแปลงระบบเป็นเชิงเส้นโดยอาศัยความสัมพันธ์ของตัวแปรอินพุตกับตัวแปรเอาต์พุต (Input-Output Linearization) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอื่นๆ ที่นำวิธีการแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับไปพัฒนาต่อยอด และประยุกต์ใช้งานกับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น

Chanchareon et al [19] ซึ่งได้เสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมที่อยู่บนพื้นฐานของการแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับที่เรียกว่า “Computed feedback linearization” สำหรับใช้ในการควบคุมระบบระบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น โดยได้ทำการทดลองควบคุมระดับน้ำในถัง และตำแหน่งของจานหมุน จากผลการทดลองพบว่าวิธีการควบคุมดังกล่าวสามารถให้ผลการตอบสนองที่มีประสิทธิภาพทั้งในการควบคุมตำแหน่งเป้าหมายและการควบคุมทางเดิน

ศุภวัฒ เจียมลักษณไพศาล และ รัชทิน จันทร์เจริญ [20] ได้เสนอเทคนิคการประมาณการแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับแบบฟูลสเตต และทดลองแปลงระบบถังน้ำสองถังที่มีลักษณะไม่เชิงเส้นให้เป็นระบบเชิงเส้นที่มีสมการระบบตามที่ต้องการ จากผลการ

ทดลองพบว่าระบบประมาณเชิงเส้นที่ได้ทำให้ระบบความคุมมีเสถียรภาพและมีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับที่ต้องการ

สำหรับการรับมือกับความไม่แน่นอนของแบบจำลอง มีตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้นสองกลุ่มหลักๆ คือ ตัวควบคุมแบบคงทน (Robust Controllers) หรือการควบคุมแบบสไลด์ดิงโหมด (Sliding Mode Control) และตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Controllers) โดยในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะในส่วนของตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ ซึ่งตัวควบคุมชนิดนี้เกนของตัวควบคุม (Controller Gain) จะสามารถปรับค่าเองได้โดยกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแบบปรับตัวได้

ตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive controller) ต่างจากตัวควบคุมแบบปกติ คือเกนของตัวควบคุมสามารถเปลี่ยนแปลงได้ และมีกลไกสำหรับการปรับปรุงค่าเกนของตัวควบคุมแบบออนไลน์ขึ้นกับสัญญาณในระบบ โดยวิธีการพื้นฐานบางส่วนในการสร้างตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ มีดังต่อไปนี้

ตารางค่าอัตราขยาย (Gain Scheduling) [21]

ในช่วงแรกเริ่มของวิธีการควบคุมแบบปรับตัวได้คือการใช้ตารางค่าอัตราขยาย ซึ่งถูกนำไปใช้กับระบบควบคุมการบินโดยเฉพาะในช่วงปี 1950 และ 1960 หลักการของวิธีการนี้คือการหาตัวแปรกระบวนการเสริม (Auxiliary process variables) มีที่มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงพลวัติของกระบวนการ นอกเหนือจากเอาต์พุตของระบบที่ใช้สำหรับการป้อนกลับ ทำให้สามารถชดเชยการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบโดยการเปลี่ยนพารามิเตอร์ของตัวควบคุมซึ่งสัมพันธ์กับตัวแปรเสริม

ข้อดีวิธีการใช้ตารางค่าอัตราขยายคือพารามิเตอร์สามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็วในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงพลวัติของระบบ โดยเฉพาะในกรณีที่พลวัติของระบบขึ้นกับตัวแปรที่สามารถวัดได้โดยง่าย ยกตัวอย่างเช่น ระบบควบคุมการบินที่พลวัติแปรตามการเปลี่ยนแปลงความดัน หรือผลคูณของความหนาน่นของอากาศกับความเร็วสัมพัทธ์ของเครื่องบินยกกำลังสอง

แม้ว่าการใช้ตารางค่าอัตราขยายจะเป็นที่นิยมมากในทางปฏิบัติ แต่ข้อเสียของตารางค่าอัตราขยายคือเป็นการปรับตัวแบบวงเปิด (Open-loop Adaptation scheme) ที่ไม่ได้

เกิดจากการเรียนรู้จริง นอกจากนี้ในการออกแบบอาจต้องใช้เครื่องมืออุปกรณ์และการทดลองจำนวนมาก

การควบคุมโดยใช้แบบจำลองอ้างอิงที่ปรับตัวได้ (Model Reference Adaptive Control) [22]-[26]

การควบคุมแบบปรับตัวได้นอกเหนือจากตารางค่าอัตราขยายถูกนำเสนอเพื่อชดเชยการเปลี่ยนแปลงพลวัติของระบบ คือการควบคุมโดยใช้แบบจำลองอ้างอิงที่ปรับตัวได้ ตัวควบคุมนี้จะมีด้วยกันสองวง วงด้านในหรือวงของการควบคุมเป็นวงของการควบคุมแบบปกติซึ่งประกอบด้วยระบบที่ต้องการจะควบคุมและตัวควบคุม และวงนอกหรือวงของการปรับปรุงค่าซึ่งมีหน้าที่ในการปรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุมให้ค่าความผิดพลาดของเอาต์พุตจากแบบจำลองอ้างอิงและเอาต์พุตของระบบเป็นศูนย์

ประเด็นสำคัญของวิธีการนี้คือกลไกการปรับปรุงค่าที่ทำให้ความผิดพลาดของเอาต์พุตเป็นศูนย์ ซึ่งมีด้วยกันหลายวิธีเช่น การปรับปรุงตามเกรเดียนท์ (Gradient update) การใช้กฎของเอ็มไอที (M.I.T. rule) หรือใช้ทฤษฎีของเลียปูโนฟ (Lyapunov theory)

ตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้ (Self-tuning Controller) [27]-[29]

เทคนิคของการควบคุมแบบปรับตัวได้นี้ เริ่มจากการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบที่ทราบแบบจำลอง และการออกแบบในส่วนของการปรับปรุงค่า ซึ่งจะขึ้นกับโครงสร้างของตัวควบคุมและความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ของระบบและพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ดังนั้นเมื่อไม่ทราบพารามิเตอร์ของระบบก็จะใช้อัลกอริธึมแบบวนซ้ำในการหาพารามิเตอร์ของระบบ จากนั้นนำพารามิเตอร์ของระบบที่ประมาณได้มาใช้ปรับปรุงเกนของตัวควบคุม

ตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้จะแยกส่วนของการควบคุมและการหาเอกลักษณ์ของระบบออกจากกัน แตกต่างจากวิธีการควบคุมโดยใช้แบบจำลองอ้างอิงที่ปรับตัวได้ ที่พารามิเตอร์ของตัวควบคุมจะถูกปรับปรุงโดยตรงเพื่อให้เอาต์พุตของระบบติดตามเอาต์พุตของแบบจำลองอ้างอิง ตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้นั้นมีความยืดหยุ่นในการเลือกวิธีการออกแบบตัวควบคุม รวมไปถึงการเลือกวิธีหาเอกลักษณ์ของระบบ แต่การวิเคราะห์ระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้มีความซับซ้อนมากกว่าวิธีการวิธีการควบคุมโดยใช้แบบจำลองอ้างอิงที่ปรับตัวได้

งานวิจัยอื่น ๆ ที่ใช้ตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้

Chang Chieh Hang [30] ได้เสนอตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้ที่ใช้วิธีการวางตำแหน่งโพล (Pole placement) ในการออกแบบตัวควบคุม ร่วมกับตัวประมาณค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ ซึ่งใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ (Recursive Least Square; RLS) โดยตัวควบคุมถูกออกแบบให้มีสองเวลาสุ่ม (Dual rate) ลูฟของการควบคุมจะใช้ช่วงเวลาสุ่มที่น้อยกว่า และลูฟของการประมาณค่าพารามิเตอร์จะมีช่วงเวลาสุ่มที่นานกว่า ซึ่งการทำเช่นนี้จะช่วยลดภาระการคำนวณของตัวควบคุม และเพิ่มความคงทนให้กับการประมาณค่า โดยผลลัพธ์จากการจำลองระบบควบคุม และการทดลองกับไพลอทแพลนต์ (Pilot plant) แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมที่ใช้สองเวลาสุ่มนั้นศักยภาพสูงกว่าตัวควบคุมที่ใช้เวลาสุ่มเดียว (Single rate)

ธเนศ ธีรศักดานนท์ [31] เสนอการควบคุมแบบไม่เชิงเส้นแบบปรับตัวได้สำหรับแขนหุ่นยนต์ข้อต่อเดียวแบบอ่อนตัว โดยได้นำกฎการควบคุมแบบตามรอยโดยประมาณ (Approximate tracking) สำหรับระบบไม่เชิงเส้นเฟสไม่ต่ำสุด (Non minimum phase nonlinear system) ที่มีความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ มาดัดแปลงให้เป็นตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive control) โดยการเพิ่มตัวประมาณพารามิเตอร์ที่ใช้ทฤษฎีบทของเลียปูนอฟ (Lyapunov-based parameter estimator) และตัวประมาณค่าพารามิเตอร์แบบกำลังสองน้อยสุด (Least square parameter estimator) ในการจำลองระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์พบว่าการใช้ตัวประมาณพารามิเตอร์แบบกำลังสองน้อยสุดสามารถใช้งานได้ง่ายและมีสมรรถนะดีกว่า ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวประมาณพารามิเตอร์แบบกำลังสองน้อยสุดในการทดลองจริง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมที่นำเสนอสามารถควบคุมแขนหุ่นยนต์แบบอ่อนตัวเพื่อให้ตำแหน่งปลายแขนตามรอยสัญญาณอ้างอิงได้เป็นอย่างดี และสามารถปรับตัวให้เข้ากับพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าแน่นอนได้อย่างรวดเร็ว

Michiyo et al. [32] ได้นำเสนอตัวควบคุมพีไอดีชนิดปรับค่าเองได้ ที่มีการรวมเทคนิคของโครงข่ายประสาทเข้าไว้ในตัวควบคุม เพื่อให้สามารถปรับค่าเกนของตัวควบคุมได้อย่างรวดเร็วทันการตอบสนองของกระบวนการที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น โดยได้มีการแบ่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นการคำนวณมาจากโครงสร้างของระบบปรับค่าเองได้ที่ใช้วิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุด และอีกส่วนหนึ่งเป็นส่วนที่คำนวณมาจากเทคนิคของโครงข่ายประสาท ที่มีชั้นของโครงข่าย 3 ชั้นและใช้วิธีถ่วงน้ำหนักคือ วิธีโพรพากันดาย้อนกลับ (back propaganda method) จากการทดสอบตัวควบคุมบนกระบวนการที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น

พบว่า พารามิเตอร์ของตัวควบคุมมีการปรับค่าได้ตามความเปลี่ยนแปลงของกระบวนการอย่างเหมาะสม ในงานวิจัยนี้ไม่ได้เสนอการเปรียบเทียบผลการควบคุมกับตัวควบคุมอื่นๆ เลย

อนุชา ทิพยวัลย์ [33] ได้เสนอตัวควบคุมพีไอดีชนิดปรับค่าเองได้ โดยได้นำเจเนติกอัลกอริธึม (Genetic Algorithms) มาใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี และได้ทำการทดลองควบคุมกระบวนการปรับค่าพีเอชให้เป็นกลาง พร้อมทั้งทดสอบเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอดีธรรมดา ซึ่งผลการควบคุมปรากฏว่าการใช้เจเนติกอัลกอริธึมสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีได้อย่างเหมาะสม โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกแบบจำลองเชิงเส้นอันดับหนึ่ง (First Order Linear Model) ร่วมกับกระบวนการทำซ้ำกำลังสองน้อยที่สุดในการหาเอกลักษณ์ของระบบ แล้วนำพารามิเตอร์ของแบบจำลองไปใช้ในการปรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีด้วยเจเนติกอัลกอริธึม

Nguyen Duc Hoang และ Bui Thanh Huyen [34] ได้เสนอตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้ โดยใช้วิธีการระบุตำแหน่งโพลในการควบคุมเตาอบไฟฟ้า งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองพหุนาม และใช้วิธีทำซ้ำกำลังสองน้อยสุดแบบขยาย (Recursive Extended Least Squares) ในการหาเอกลักษณ์ของระบบ จากนั้นนำพารามิเตอร์ที่ได้ไปใช้ในการควบคุมด้วยวิธีการระบุตำแหน่งโพล เมื่อพารามิเตอร์ของระบบเปลี่ยนก็จะทำให้พารามิเตอร์ของการควบคุมเปลี่ยนตามไปด้วยทำให้ผลการควบคุมมีประสิทธิภาพตามที่ต้องการได้

D.L.Yu, T.K. Chang และ D.W. Yu [35] ได้เสนอตัวควบคุมพีไอดีชนิดปรับค่าเองได้ สำหรับระบบควบคุมหลายตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยการควบคุมใช้แบบจำลองข่ายงานนิวรัล (Neural Network Model) ของระบบเป็นพื้นฐาน และแบบจำลองข่ายงานนิวรัลนั้นใช้ตัวกรองคาลมานแบบขยายในการเรียนรู้การเปลี่ยนแปลงพลวัติของระบบ ขณะที่พารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีถูกปรับเปลี่ยนโดยใช้วิธีการเลียปูโนฟ (Lyapunov method) เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนของการติดตามให้น้อยที่สุด งานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการควบคุมของตัวควบคุมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง (CSTR) และเปรียบเทียบผลการควบคุมกับตัวควบคุมพีไอดีแบบพารามิเตอร์คงที่ ซึ่งผลปรากฏว่า ตัวควบคุมพีไอดีชนิดปรับค่าได้ให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอดีแบบพารามิเตอร์คงที่อย่างเห็นได้ชัด

จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้นั้น ส่วนใหญ่จะใช้การหาแบบจำลองเพื่อนำมาใช้ปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม และเมื่อนำตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้มาใช้กับระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น จะสามารถให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าตัวควบคุมที่ไม่

สามารถปรับค่าได้ โดยตัวควบคุมชนิดปรับค่าได้แต่ละแบบมีการเลือกใช้วิธีการควบคุมแบบจำลอง วิธีการหาเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) รวมไปถึงตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับแนวความคิดของผู้วิจัย

2.3 ตัวควบคุมที่นำเสนอ

วิธีการควบคุมส่วนใหญ่ได้รับการออกแบบให้สามารถควบคุมค่าให้คงได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากต้องการควบคุมให้เอาต์พุตของระบบทางกลที่ไม่เป็นเชิงเส้นติดตามทางเดิน (Trajectory Tracking Control) การแปลงระบบควบคุมให้เป็นระบบเชิงเส้นตามที่ต้องการนั้นไม่เพียงพอ แต่จำเป็นต้องควบคุมให้ค่าความผิดพลาดของการติดตามทางเดิน (Tracking Error) ลู่เข้าสู่ศูนย์ด้วย สำหรับระบบเชิงเส้นพลวัติผกผัน (Inverse dynamics) ของระบบจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณสัญญาณควบคุม ในส่วนของระบบไม่เชิงเส้นจะต้องใช้ทั้งการป้อนกลับสเตตเพื่อชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ และใช้การคำนวณบนพื้นฐานของวิธีการพลวัติผกผันของระบบเชิงเส้น [18] [36] [37]

ปัญหาสำคัญของการควบคุมติดตามทางเดินด้วยวิธีการแปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับโดยทั่วไปคือ การคำนวณสัญญาณควบคุมบนพื้นฐานของวิธีการพลวัติผกผันจำเป็นต้องใช้อนุพันธ์อันดับหนึ่งและอันดับสองของสัญญาณอ้างอิงในการคำนวณสัญญาณควบคุม ซึ่งจะมีปัญหาอย่างมากในกรณีที่สัญญาณอ้างอิงถูกสร้างขึ้นจากอุปกรณ์อินพุตที่ควบคุมโดยมนุษย์ อีกทั้งการแปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นต้องทราบแบบจำลองของระบบไม่เชิงเส้นที่มีความแม่นยำ

ปัญหาเหล่านี้เป็นที่มาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งต้องการจะนำเสนอแนวคิดวิธีการควบคุมติดตามทางเดินระบบทางกลที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยไม่จำเป็นต้องใช้อนุพันธ์ของสัญญาณอ้างอิง ด้วยการออกแบบบนพื้นฐานของการแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับให้สามารถชดเชยพลวัติของระบบได้ พร้อมทั้งออกแบบให้ตัวควบคุมสามารถปรับค่าตัวเองได้เพื่อให้สามารถรับมือกับกรณีที่ไม่ทราบพารามิเตอร์ของแบบจำลองของระบบบางส่วนได้ (Model with Unknown Parameters)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับ

3.1 **พื้นฐานการแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับ** [18]

การแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับ (Feedback Linearization) มีหลักการคือใช้วิธีการทางพีชคณิตในการเปลี่ยนพลวัติของระบบไม่เชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้น ทำให้สามารถใช้วิธีการควบคุมแบบเชิงเส้นได้ การควบคุมโดยการแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับนั้นถูกนำไปใช้ในการควบคุมเฮลิคอปเตอร์ เครื่องบิน หุ่นยนต์ อุตสาหกรรม และอุปกรณ์ชีวการแพทย์ แต่อย่างไรก็ตามการแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับนั้นมีจุดอ่อนและข้อจำกัดอย่างมาก

รูปแบบที่ง่ายที่สุดของการแปลงระบบเป็นเชิงเส้นโดยการป้อนกลับ คือการชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบไม่เชิงเส้น ทำให้ระบบปิดของระบบไม่เชิงเส้นนั้นอยู่ในรูปแบบเชิงเส้น (Linear Form) ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของการแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับ โดยการใช้ตัวอย่างการควบคุมระดับของของเหลวในถัง

พิจารณาการควบคุมระดับเหลว h ในถังดังรูปที่ 3.1 เพื่อให้ได้ระดับของของเหลวที่ต้องการ h_d โดยอินพุตที่ใช้ในการควบคุมคืออัตราการไหลของของเหลว u ที่เข้าสู่ถัง และมีระดับของเหลวเริ่มต้นเท่ากับ h_0

รูปที่ 3.1 การควบคุมระดับของเหลวในถัง [18]

แบบจำลองพลวัติของถังน้ำคือ

$$\frac{d}{dt}\left[\int_0^h A(h)\,dh\right] = u(t) - a\sqrt{2gh} \tag{2.1}$$

โดยที่ $A(h)$ คือพื้นที่หน้าตัดขวางของถัง และ a คือพื้นที่หน้าตัดขวางของท่อน้ำขาออก ถ้าระดับของเหลวเริ่มต้น h_0 กับระดับของเหลวที่ต้องการ h_d ต่างกันมาก การควบคุมระดับของเหลว h จะเป็นปัญหาแบบไม่เชิงเส้น

แบบจำลองพลวัติในสมการที่ (2.1) สามารถเขียนได้เป็น

$$A(h)\dot{h} = u - a\sqrt{2gh}$$

ถ้าให้ $u(t)$ เป็นดังต่อไปนี้

$$u(t) = a\sqrt{2gh} + Av \tag{2.2}$$

โดยที่ v เป็นอินพุตสมมูล (Equivalent Input) ที่สามารถกำหนดได้ พิจารณาผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นเชิงเส้นดังนี้

$$\dot{h} = v \tag{2.3}$$

ถ้าให้ v เป็น

$$v = -\alpha\tilde{h} \tag{2.4}$$

โดยที่ $\tilde{h} = h(t) - h_d$ เป็นค่าความคลาดเคลื่อนของระดับของเหลว และ α เป็นค่าคงที่บวก จะทำให้ได้ระบบปิดดังต่อไปนี้

$$\dot{h} + \alpha\tilde{h} = 0 \tag{2.5}$$

ซึ่งหมายความว่า $\tilde{h} \to 0$ ขณะที่ $t \to \infty$ พิจารณาสมการที่ (2.2) และ (2.3) จะได้อินพุตที่ถูกกำหนดโดยกฎการควบคุมแบบไม่เชิงเส้น คือ

$$u(t) = a\sqrt{2gh} - A\alpha\tilde{h} \tag{2.6}$$

ส่วนแรกของกฎการควบคุมในสมการที่ (2.6) ทางด้านขวามือ ใช้จัดการกับของเหลวที่ไหลออก $a\sqrt{2gh}$ ในขณะที่ส่วนที่สองใช้ในการเพิ่มระดับของของเหลวให้เป็นไปตามระบบเชิงเส้นที่ต้องการ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แนวคิดของการแปลงระบบเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับ นั่นคือ การหักล้างความไม่เป็นเชิงเส้น และทำให้เกิดระบบเชิงเส้นที่ต้องการ ซึ่งสามารถนำมาใช้งานได้โดยง่ายกับกลุ่มของระบบไม่เชิงเส้นที่อยู่ในรูปคอมพาเนี่ยนฟอร์ม (Companion Form) ระบบไม่เชิงเส้นจะอยู่ในรูปคอมพาเนี่ยนฟอร์มเมื่อสามารถอธิบายพลวัติของระบบได้ดังสมการ

$$x^{(n)} = f(\mathbf{x}) + b(\mathbf{x})u \tag{2.7}$$

โดยในที่นี้ u เป็นอินพุตของการควบคุม, x เป็นเอาต์พุตที่สนใจ, $\mathbf{x} = \left[x, \dot{x}, \ldots, x^{(n-1)}\right]^T$ เป็นเวกเตอร์สถานะ (State Vector), $f(\mathbf{x})$ และ $b(\mathbf{x})$ เป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้นของสถานะ สมการที่ (2.7) นั้นมีลักษณะเฉพาะที่พบได้ยาก ซึ่งในความเป็นจริงนั้น แม้ว่าอนุพันธ์ของ x จะปรากฏในสมการ แต่ไม่มีอนุพันธ์ของอินพุต u ปรากฏอยู่ด้วย ดังนั้นสมการที่ (2.7) จะถูกแทนด้วยแบบจำลองปริภูมิสถานะดังสมการ (2.8)

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} x_1 \\ \cdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \cdots \\ x_n \\ f(\mathbf{x}) + b(\mathbf{x})u \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

สำหรับระบบที่สามารถอธิบายด้วยคอมพาเนี่ยนฟอร์ม จะให้อินพุตของการควบคุมเป็น (สมมุติให้ b ไม่เป็นศูนย์)

$$u = \frac{1}{b}\left[v - f\right] \tag{2.9}$$

เราจะสามารถหักล้างความไม่เป็นเชิงเส้น และสามารถหาความสัมพันธ์ของอินพุตและเอาต์พุตอย่างง่ายได้ ดังนี้

$$x^{(n)} = v \tag{2.10}$$

ถ้าให้กฎของการควบคุมคือ

$$v = -k_1 x - k_2 \dot{x} - \ldots - k_{n-1} x^{(n-1)} \tag{2.11}$$

และเลือก k_i ให้ $p^{(n)} + k_{n-1}p^{(n-1)} + \ldots + k_1$ เป็นพหุนามที่มีเสถียรภาพ (Stable Polynomial) จะส่งผลให้พลวัติของระบบปิดมีเสถียรภาพแบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponentially Stable Dynamics) นั่นคือ

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$x^{(n)} + k_{n-1}x^{(n-1)} + \ldots + k_1 x = 0 \quad (2.12)$$

ซึ่งหมายความว่า $x(t) \rightarrow 0$ และสำหรับการควบคุมให้ระบบควบคุมติดตามทางเดินที่ต้องการ x_d จะให้กฎการควบคุมเป็น

$$v = x_d^{(n)} - k_1 e - k_2 \dot{e} - \ldots - k_{n-1} e^{(n-1)} \quad (2.13)$$

โดยที่ $e = x(t) - x_d(t)$ เป็นค่าความคลาดเคลื่อนของการติดตาม จะทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนของการติดตามทางเดินลู่เข้าสู่ศูนย์แบบเอกซ์โพเนนเชียล นั่นคือ

$$e^{(n)} + k_{n-1}e^{(n-1)} + \ldots + k_1 e = 0 \quad (2.14)$$

หมายเหตุ วิธีการนี้สามารถนำมาใช้ได้ในกรณีที่ x เป็นเวกเตอร์ และ b เป็นเมทริกซ์จตุรัสที่สามารถหาอินเวิอร์ทได้ (Invertible Square Matrix) ด้วยเช่นกัน

3.2 การแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับสำหรับระบบจานหมุนทางกล

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการนำวิธีการแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมทางเดินของระบบจานหมุนทางกล โดยในส่วนแรกจะกล่าวถึงลักษณะของระบบจานหมุนทางกลที่ต้องการจะควบคุม ในส่วนที่สองเป็นการออกแบบตัวควบคุมให้มีความเหมาะสมกับระบบที่ต้องการจะควบคุม และส่วนสุดท้ายเป็นการจำลองการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาถึงศักยภาพ และลักษณะเฉพาะของตัวควบคุม

3.2.1 ระบบจานหมุนทางกล

พิจารณาแบบจำลองพลวัติของระบบจานหมุนทางกลในสมการที่ (1.1) จะพบว่าเป็นระบบไม่เชิงเส้นอันดับสองแบบอินพุตเดียวเอาต์พุตเดียวที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (SISO Second-Order Nonlinear Time-Invariant System) โดยระบบสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบรูปคอมพาเนี่ยนฟอร์มได้ ดังนี้

$$\tau = J\ddot{\theta} + \mathrm{f}(\theta, \dot{\theta})$$

$$\ddot{\theta} = -\frac{\mathrm{f}(\theta, \dot{\theta})}{J} + \frac{1}{J}\tau \quad (2.15)$$

$$\ddot{\theta} = f(\theta, \dot{\theta}) + b\tau \quad (2.16)$$

โดยที่

$$\left.\begin{aligned} f\left(\theta,\dot{\theta}\right) &= -\frac{\mathfrak{f}\left(\theta,\dot{\theta}\right)}{J} \\ b &= \frac{1}{J} \end{aligned}\right\} \tag{2.17}$$

ระบบ (2.16)-(2.17) สามารถเขียนในรูปปริภูมิสเตต (State Space) โดยกำหนดตัวแปรสเตต (State Variable) ดังนี้

$$\left.\begin{aligned} x_1 &= \theta \\ x_2 &= \dot{\theta} \end{aligned}\right\} \tag{2.18}$$

แบบจำลองปริภูมิสเตต คือ

$$\begin{gathered} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ f\left(x_1, x_2\right) + b\tau \end{bmatrix} \\ y = x_1 \end{gathered} \tag{2.19}$$

พิจารณาระบบ (2.19) จะพบว่าระบบมีดีกรีสัมพัทธ์ (Relative Degree) เท่ากับสอง ซึ่งเท่ากับอันดับของระบบ (System's Order) ดังนั้นระบบไม่มีพลวัติภายใน (Internal Dynamics) [18]

3.2.2 ตัวควบคุมที่ใช้การแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับสำหรับระบบจานหมุนทางกล

จากที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 3.2.1 แบบจำลองของระบบจานหมุนทางกลนั้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปคอมพาเนี่ยนฟอร์มได้ดังสมการ (2.16)-(2.17) ดังนั้นการแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับสามารถทำได้โดยใช้กฎการควบคุมในสมการที่ (2.9) และใช้กกฎการควบคุมดังสมการ (2.13) สำหรับการควบคุมทางเดินของระบบ โดยที่ θ_d เป็นทางเดินที่ต้องการหรือตำแหน่งทางเดินอ้างอิง และ $e = \theta(t) - \theta_d(t)$ เป็นค่าความผิดพลาดของการติดตามทางเดิน ได้ดังนี้

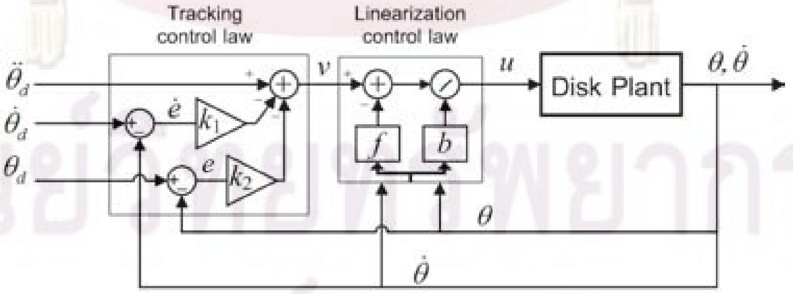
$$\left.\begin{aligned} \tau &= \frac{1}{b}\left[v - f\left(\theta,\dot{\theta}\right)\right] \\ v &= \ddot{\theta}_d - k_1 e - k_2 \dot{e} \end{aligned}\right\} \tag{2.20}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จะได้ระบบควบคุมแบบปิดที่ทำให้ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนของการติดตามทางเดินลู่เข้าสู่ศูนย์แบบเอกซ์โพเนนเชียล

$$\ddot{e} + k_2\dot{e} + k_1 e = 0 \qquad (2.21)$$

เมื่อพิจารณากฎการควบคุมในสมการที่ (2.20) จะพบว่าข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณสัญญาณควบคุม คือ เอาต์พุต อนุพันธ์อันดับหนึ่งของเอาต์พุต ตำแหน่งทางเดินอ้างอิง รวมไปถึงอนุพันธ์อันดับหนึ่งและอันดับสองของตำแหน่งทางเดินอ้างอิง โดยมีแผนผังของระบบควบคุมดังรูปที่ 3.2 ดังนั้นในกรณีที่ระบบที่ต้องการควบคุมเป็นอุปกรณ์มาสเตอร์/สเลฟ (Master/Slave Device) อุปกรณ์บายไวร์ (By Wire Device) หรือมีอุปกรณ์อินพุต (Input Device) เป็นเครื่องกำเนิดสัญญาณตำแหน่งอ้างอิง ไม่เพียงแต่อนุพันธ์อันดับหนึ่งของเอาต์พุตเท่านั้นที่ต้องถูกคำนวณในเวลาจริง (Real time) อนุพันธ์อันดับหนึ่งและอนุพันธ์อันดับสองของตำแหน่งอ้างอิงจะต้องถูกคำนวณในเวลาจริงด้วยเช่นกัน ซึ่งการหาอนุพันธ์ในเวลาจริงนั้นมีความยุ่งยาก วิธีการที่สามารถนำไปใช้งานได้ง่ายวิธีหนึ่งคือ การหาอนุพันธ์โดยใช้วิธีการเชิงตัวเลข (Numerical Differentiation) แต่การหาค่าอนุพันธ์เชิงตัวเลขโดยตรงนั้นจะเป็นการขยายขนาดของสัญญาณรบกวนให้สูงขึ้นด้วยเช่นกัน จึงอาจส่งผลให้ผลการควบคุมไม่เป็นที่น่าพอใจ และระบบควบคุมขาดเสถียรภาพได้ วิธีการแก้ปัญหาอีกวิธีการหนึ่งคือ การเพิ่มอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดความเร็วรอบ (Tachometer) และอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง (Accelerometer) ในระบบควบคุม แต่การเพิ่มอุปกรณ์ตรวจวัดเหล่านี้หมายถึงต้นทุนของระบบควบคุมจะสูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 3.2 แผนภาพการควบคุมทางเดินโดยการแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีที่กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นการออกแบบตัวควบคุมบนระบบเวลาต่อเนื่อง (Continuous time domain) แต่ในความเป็นจริงแล้วตัวควบคุมถูกสร้างขึ้นบนดิจิตอลคอมพิวเตอร์ซึ่งทำงานบนระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง (Discrete time domain) ดังนั้นแนวทางหนึ่งในการออกแบบตัวควบคุมคือการออกแบบตัวควบคุมบนระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง โดยการแปลงแบบจำลองของระบบจานหมุนทางกลในสมการ (2.16)-(2.17) ให้อยู่ในรูปแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง (Discretizatoin method) โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite difference method) [38] ดังนี้

กำหนดให้

T คือ เวลาสุ่ม (Sampling time)

θ_k คือ เอาต์พุตที่เวลา k

ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งจากการแบ่งย่อยย้อนหลัง (Backward difference method)

$$\dot{\theta} = \frac{\theta_k - \theta_{k-1}}{T} + \Theta(T) \tag{2.22}$$

$$\dot{\theta} \approx \frac{\theta_k - \theta_{k-1}}{T} \tag{2.23}$$

ค่าอนุพันธ์อันดับสองจากการแบ่งย่อยตรงกลาง (Central difference method)

$$\ddot{\theta} = \frac{\theta_{k+1} - 2\theta_k + \theta_{k-1}}{T^2} + \Theta(T^2) \tag{2.24}$$

$$\ddot{\theta} \approx \frac{\theta_{k+1} - 2\theta_k + \theta_{k-1}}{T^2} \tag{2.25}$$

แทน (2.23) และ (2.25) ลงในสมการ (2.16)-(2.17) จะได้สมการดิฟเฟอเรนซ์

$$\frac{\theta_{k+1} - 2\theta_k + \theta_{k-1}}{T^2} = f\left(\theta_k, \frac{\theta_k - \theta_{k-1}}{T}\right) + b\tau_k \tag{2.26}$$

$$\theta_{k+1} = T^2 f\left(\theta_k, \frac{\theta_k - \theta_{k-1}}{T}\right) + 2\theta_k - \theta_{k-1} + T^2 b\tau_k \tag{2.27}$$

$$\theta_{k+1} = F\left(\theta_k, \theta_{k-1}\right) + B\tau_k \tag{2.28}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยที่

$$\left.\begin{aligned} F\left(\theta_k,\theta_{k-1}\right) &= T^2 f\left(\theta_k,\frac{\theta_k-\theta_{k-1}}{T}\right)+2\theta_k-\theta_{k-1} \\ &= -\frac{T^2\text{£}\left(\theta_k,\dfrac{\theta_k-\theta_{k-1}}{T}\right)}{J}+2\theta_k-\theta_{k-1} \\ B &= T^2 b \\ &= \frac{T^2}{J} \end{aligned}\right\} \tag{2.29}$$

จากนั้นทำการแปลงระบบ ให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับ โดยให้กฎของการควบคุมคือ

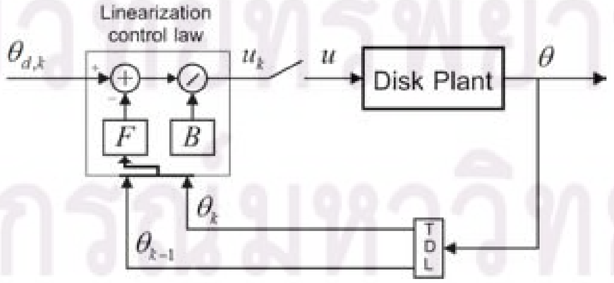
$$\tau_k=\frac{1}{B}\left[v_k-F\left(\theta_k,\theta_{k-1}\right)\right] \tag{2.30}$$

จะได้ระบบควบคุมแบบปิดอยู่ในรูปสมการพีชคณิต

$$\theta_{k+1}=v_k \tag{2.31}$$

จากระบบปิด (2.31) พบว่าการให้สัญญาณควบคุมดังสมการ (2.30) เป็นการชดเชยพลวัติของระบบ ทำให้เราสามารถควบคุมให้ระบบควบคุมติดตามทางเดินที่ต้องการได้โดยให้ v_k เป็นตำแหน่งทางเดินอ้างอิงที่ต้องการ $\theta_{d,k}$ ซึ่งจะให้เอาต์พุตที่มีเวลาหน่วงคงที่เท่ากับเวลาสุ่ม นั่นคือค่าความผิดพลาดในการติดตามทางเดินจะไม่ลู่เข้าสู่ศูนย์แต่จะมีค่าเท่ากับผลต่างของสัญญาณทางเดินอ้างอิงที่เวลา k กับที่เวลา $k-1$ ดังในสมการ (2.32) โดยแผนผังของระบบควบคุมจะเป็นดังรูปที่ 3.3

$$e_k=\theta_{d,k}-\theta_k=\theta_{d,k}-\theta_{d,k-1} \tag{2.32}$$



รูปที่ 3.3 แผนภาพการควบคุมทางเดินโดยการแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับในรูปแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิจารณากฎการควบคุมในสมการ จะพบว่า ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณสัญญาณควบคุมมีเพียงเอาต์พุตที่เวลา k เอาต์พุตที่เวลา $k-1$ และสัญญาณทางเดินอ้างอิงที่เวลา k เท่านั้น เปรียบเทียบกับกฎการควบคุม (2.20) ที่ได้จากการออกแบบตัวควบคุมบนระบบเวลาต่อเนื่อง ซึ่งจำเป็นต้องใช้ข้อมูลอนุพันธ์อันดับหนึ่งและอันดับสองของสัญญาณทางเดินอ้างอิงด้วย แสดงให้เห็นว่าการจัดการสัญญาณบนระบบเวลาไม่ต่อเนื่องสามารถลดความผิดพลาดของขั้นตอนการคำนวณค่าอนุพันธ์ในเวลาจริงได้ โดยที่เอาต์พุตที่ได้จะมีเวลาหน่วงเท่ากับเวลาสุ่ม แต่เราสามารถลดค่าความผิดพลาดจากเวลาหน่วงที่เกิดขึ้นได้โดยการใช้เวลาสุ่มที่มีค่าน้อย ด้วยเหตุผลที่กล่าวมานั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ตัวควบคุมที่ออกแบบบนระบบเวลาไม่ต่อเนื่องมาใช้ในการควบคุมระบบจานหมุนทางกล

3.3 การจำลองการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

ในหัวข้อนี้จะเป็นการจำลองระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ (Simulation) เพื่อศึกษาถึงศักยภาพ และลักษณะเฉพาะของตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อ 3.2.2 ในการควบคุมทางเดินของระบบจานหมุนทางกล

3.3.1 แบบจำลองระบบจานหมุนทางกล

ระบบจานหมุนเชิงกลที่ใช้ในการจำลองเป็นดังรูปที่ 3.4 โดยกำหนดให้จานหมุนมีมวล 0.5 กิโลกรัม รัศมี 20 เซนติเมตร และมีมวล 0.5 กิโลกรัม อยู่บนจานหมุนห่างจากจุดศูนย์กลางของจานหมุน 15 เซนติเมตร โมเมนต์ความเฉื่อยของระบบจะมีเท่ากับ 0.02125 กิโลกรัม.เมตร^2 มีแรงเสียดทางแห้ง (Dry friction) ขนาด 0.05 นิวตัน.เมตร และแรงเสียดทานหนืด (Viscous friction) ที่มีค่าความหนืด 0.1 นิวตัน.เมตร.วินาที/เรเดียน แบบจำลองพลวัติของระบบจานหมุนทางกลเป็นดังสมการ

$$J\ddot{\theta} + \operatorname{sgn}\left(\dot{\theta}\right)\left(C\left|\dot{\theta}\right| + F_0\right) + mgl\sin\left(\theta\right) = \tau$$

$$\ddot{\theta} = -\frac{1}{J}\operatorname{sgn}\left(\dot{\theta}\right)\left(C\left|\dot{\theta}\right| + F_0\right) - \frac{mgl}{J}\sin\left(\theta\right) + \frac{1}{J}\tau \qquad (2.33)$$

โดยที่

J คือ โมเมนต์ความเฉื่อย

θ คือ ตำแหน่งมุมของจานหมุน

m คือ มวลที่ติดอยู่บนจานหมุน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

l คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางของจานหมุน

F_0 คือ แรงเสียดทานแห้ง

C คือ ค่าความหนืด

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (9.8134 เมตร/วินาที^{2})

แปลงระบบให้อยู่ในรูปแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง แทน (2.23) และ (2.25) ลงในสมการ (2.33)

$$\begin{aligned}\frac{\theta_{k+1}-2\theta_k+\theta_{k-1}}{T^2} &= -\frac{1}{J}\operatorname{sgn}\left(\theta_k-\theta_{k-1}\right)\left(C\left|\frac{\theta_k-\theta_{k-1}}{T}\right|+F_0\right) \\ &\quad -\frac{mgl}{J}\sin\left(\theta_k\right)+\frac{1}{J}\tau_k\end{aligned} \tag{2.34}$$

$$\begin{aligned}\theta_{k+1} &= -\frac{T^2}{J}\operatorname{sgn}\left(\theta_k-\theta_{k-1}\right)\left(C\left|\frac{\theta_k-\theta_{k-1}}{T}\right|+F_0\right)-\frac{mglT^2}{J}\sin\left(\theta_k\right) \\ &\quad +2\theta_k-\theta_{k-1}+\frac{T^2}{J}\tau_k\end{aligned} \tag{2.35}$$

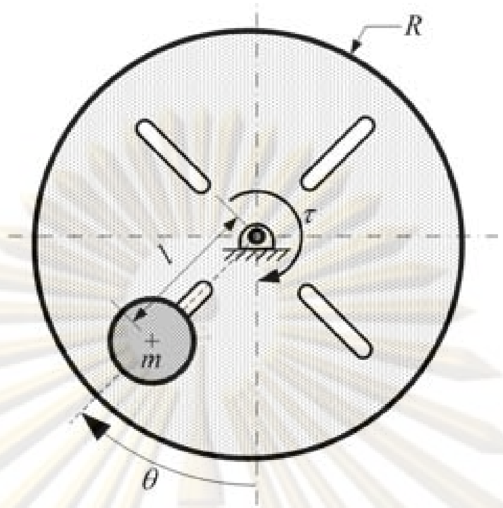
แบบจำลองในรูปสมการดิฟเฟอเรนซ์

$$\theta_{k+1}=F\left(\theta_k,\theta_{k-1}\right)+B\tau_k \tag{2.36}$$

โดยที่

$$\left.\begin{aligned}F\left(\theta_k,\theta_{k-1}\right) &= -\frac{T^2}{J}\operatorname{sgn}\left(\theta_k-\theta_{k-1}\right)\left(C\left|\frac{\theta_k-\theta_{k-1}}{T}\right|+F_0\right) \\ &\quad -\frac{mglT^2}{J}\sin\left(\theta_k\right)+2\theta_k-\theta_{k-1} \\ B &= \frac{T^2}{J}\end{aligned}\right\} \tag{2.37}$$

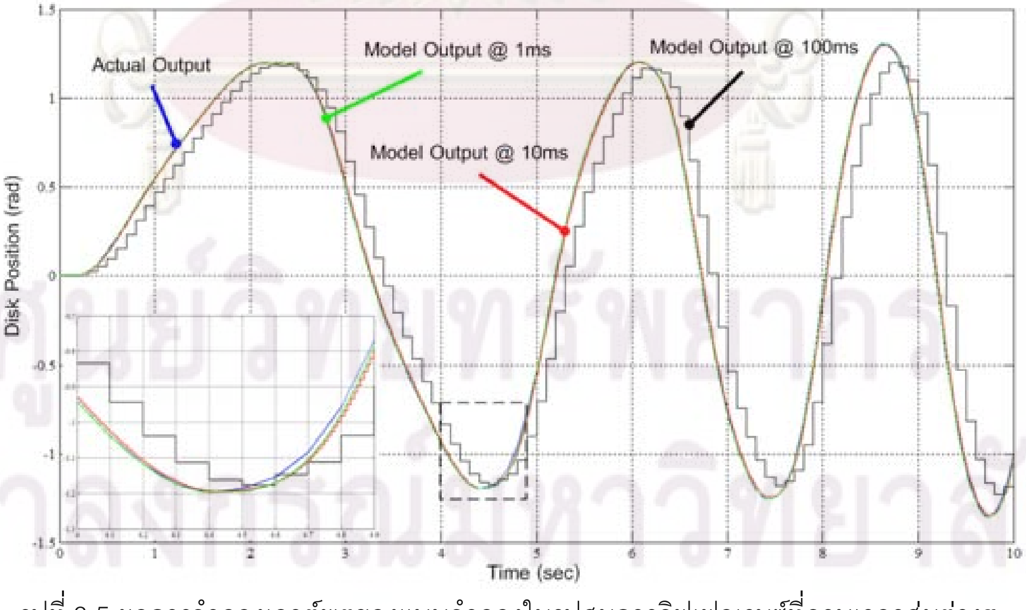
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.4 ระบบจานหมุนทางกลที่ใช้ในการจำลอง

3.3.2 ผลการจำลองเอาต์พุตของแบบจำลองระบบจานหมุนทางกล

ทำการจำลองเอาต์พุตของแบบจำลองในรูปสมการดิฟเฟอเรนซ์ (2.36)-(2.37) โดยให้เวลาสุ่มมีค่าเท่ากับ 100 มิลลิวินาที 10 มิลลิวินาที และ 1 มิลลิวินาที เปรียบเทียบกับเอาต์พุตของระบบที่ได้จากแบบจำลองพลวัติในรูปสมการดิฟเฟอเรนเชียล (2.33) โดยให้อินพุตทอร์กเป็นฟังก์ชันซายน์ (Sine) ที่ความถี่ 0.1 เฮิรตซ์ เฟสเริ่มต้น 0 เรเดียน แอมพลิจูล 0.75 นิวตัน.เมตร และให้เอาต์พุตของระบบเริ่มต้นที่ 0 เรเดียน

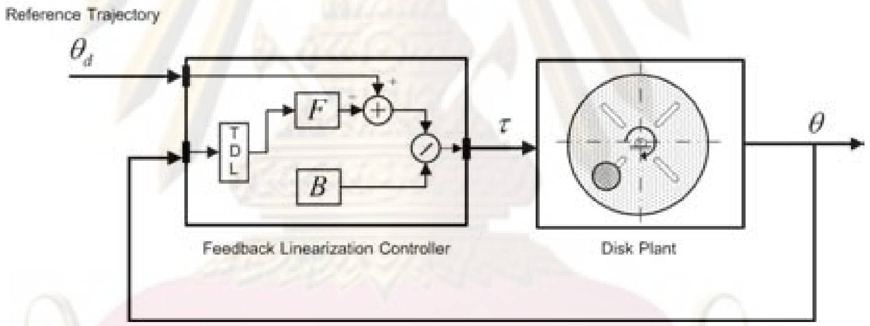


รูปที่ 3.5 ผลการจำลองเอาต์พุตของแบบจำลองในรูปสมการดิฟเฟอเรนซ์ที่คาบเวลาสุ่มต่างๆ เปรียบเทียบกับเอาต์พุตของระบบ

ผลการจำลองในรูปที่ 3.5 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองในรูปสมการดิฟเฟอเรนซ์มีเอาต์พุตใกล้เคียงกับเอาต์พุตของระบบ โดยเอาต์พุตของแบบจำลองจะมีค่าเข้าใกล้เอาต์พุตของระบบเมื่อคาบเวลาสุ่มมีค่าน้อยลง เนื่องจากความผิดพลาดในการประมาณอนุพันธ์เชิงตัวเลขมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสมการดิฟเฟอร์เรนซ์สามารถนำมาใช้แทนแบบจำลองสมการดิฟเฟอเรนเชียลของระบบในการออกแบบตัวควบคุมได้

3.3.3 ผลการจำลองการควบคุมระบบจานหมุนทางกล

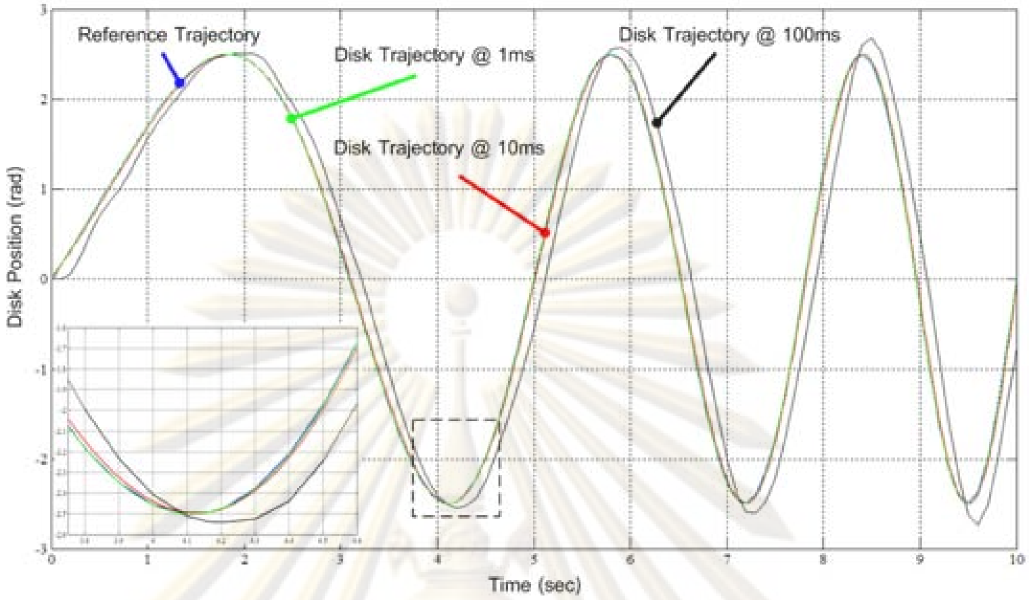
ในการจำลองควบคุมตำแหน่งจานหมุนของระบบจานหมุนทางกล จะกำหนดขีดจำกัดของฮาร์ดแวร์ หรือค่าสูงสุดของสัญญาณควบคุมที่สามารถสร้างได้ โดยให้ค่าอินพุตทอร์กสูงสุดเท่ากับ 3 นิวตัน.เมตร และจำลองควบคุมให้เอาต์พุตของระบบติดตามทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง โดยใช้อินพุตของการควบคุมตามสมการ (2.30) ระบบควบคุมจะเป็นดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผนภาพการจำลองควบคุมทางเดินของระบบจานหมุนทางกล

3.3.3.1 ผลการจำลองควบคุมให้เอาต์พุตของระบบติดตามทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่อง

ทำการจำลองควบคุม โดยกำหนดเวลาสุ่มมีค่าเท่ากับ 100 มิลลิวินาที 10 มิลลิวินาที และ 1 มิลลิวินาที เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการควบคุม และศักยภาพของตัวควบคุมที่เวลาสุ่มต่างๆ และให้สัญญาณทางเดินอ้างอิงที่ต้องการเป็นซายน์สวีป (Sine sweep) ความถี่ 0.1-0.5 เฮิรตซ์ ภายในเวลา 10 วินาที มีแอมพลิจูด 2.5 เรเดียน เฟสเริ่มต้นที่ 0 เรเดียน และให้เอาต์พุตของระบบเริ่มต้นที่ 0 เรเดียน



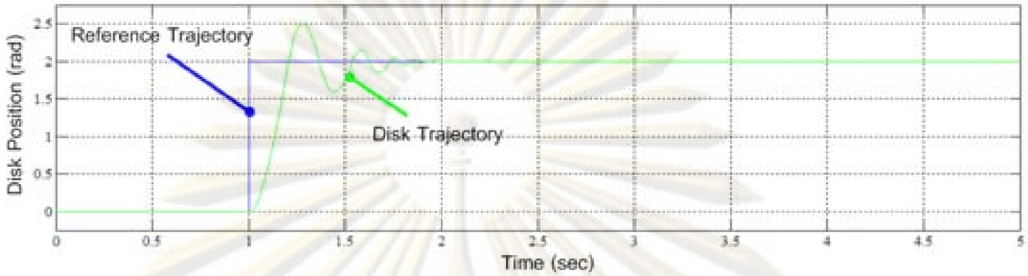
รูปที่ 3.7 ผลการจำลองควบคุมระบบจานหมุนทางกลให้ติดตามทางเดินแบบต่อเนื่องที่คาบเวลาสุ่มต่างๆ

จากผลการจำลองควบคุมควบคุมระบบจานหมุนทางกลให้ติดตามทางเดินแบบต่อเนื่องโดยใช้เวลาสุ่มที่แตกต่างกันในรูปที่ 3.7 จะพบว่าเอาต์พุตของระบบสามารถติดตามทางเดินอ้างอิงได้ โดยเอาต์พุตของระบบจะเข้าใกล้ทางเดินอ้างอิงมากขึ้นเมื่อคาบเวลาสุ่มมีค่าน้อยลง นั่นคือตัวควบคุมจะให้ผลลัพธ์การควบคุมทางเดินที่มีความแม่นยำมากขึ้นเมื่อคาบเวลาสุ่มมีค่าน้อยลง แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมมีศักยภาพในการควบคุมทางเดินของระบบให้ติดตามทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่องได้เป็นอย่างดี

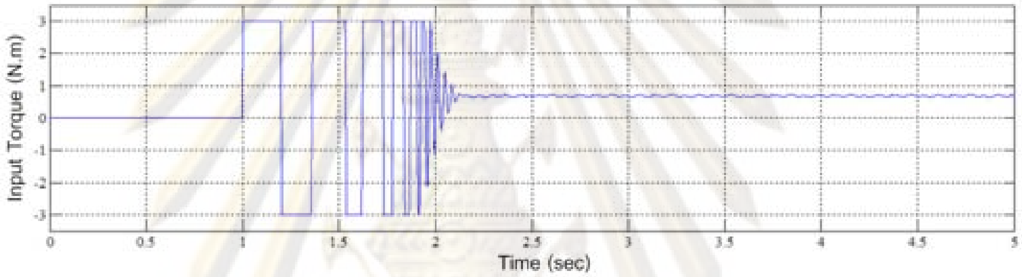
3.3.3.2 ผลการจำลองควบคุมให้เอาต์พุตของระบบติดตามทางเดินอ้างอิงแบบไม่ต่อเนื่อง

ทำการจำลองควบคุมให้เอาต์พุตของระบบจานหมุนทางกลติดตามทางเดินอ้างอิงที่มีลักษณะไม่ต่อเนื่องมีลักษณะเป็นขั้นบันได (Step trajectory) ผลการจำลองควบคุมให้เอาต์พุตของระบบติดตามทางเดินอ้างอิงแบบไม่ต่อเนื่องเป็นฟังก์ชันขั้นขนาด 2 เรเดียน ที่เวลาสุ่ม 5 มิลลิวินาที และเอาต์พุตของระบบเริ่มต้นที่ 0 เรเดียน รูปที่ 3.8 จากผลการจำลองควบคุมทั้งสองกรณีพบว่าเอาต์พุตเกิดการสั่นก่อนที่จะลู่เข้าสู่สัญญาณเส้นทางเดินอ้างอิง เนื่องจากสัญญาณควบคุมที่จะนำระบบเข้าสู่ทางเดินมีค่าสูงจนเกินขีดจำกัดของฮาร์ดแวร์ ทำให้สัญญาณควบคุมอิ่มตัวที่ค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ อย่างไรก็ตามสัญญาณควบคุมจะมีค่าลดลงเมื่อระบบเข้าใกล้เส้นทาง

เดินอ้างอิง การสั่นจะลดลงเมื่อสัญญาณควบคุมที่คำนวณได้มีค่าไม่เกินขีดจำกัดของฮาร์แวร์ เนื่องจากระบบควบคุมไม่ได้ถูกออกแบบมาให้รับมือกับสัญญาณอ้างอิงที่มีลักษณะไม่ต่อเนื่อง



(ก) เอาต์พุตของระบบควบคุม



(ข) สัญญาณควบคุม

รูปที่ 3.8 ผลการจำลองควบคุมระบบจานหมุนทางกลให้ติดตามทางเดินแบบขั้นบันได

วิธีการเพิ่มศักยภาพของตัวควบคุมให้สามารถรับมือกับสัญญาณทางเดินอ้างอิงที่เป็นฟังก์ชันขั้น สามารถทำได้โดยการปรับสัญญาณทางเดินอ้างอิงให้มีลักษณะเป็นสัญญาณแบบต่อเนื่องที่มีพลวัติตามที่กำหนด โดยให้สัญญาณอ้างอิงผ่านสมการฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีพลวัติเท่ากับที่กำหนด $G(s)$ ดังรูปที่ 3.9 และสามารถกำหนดสมการฟังก์ชันถ่ายโอนให้ที่มีพลวัติเท่ากับที่ต้องการเพื่อให้ระบบควบคุมมีการตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงที่เป็นฟังก์ชันขั้นเช่นเดียวกับระบบที่มีอันดับสอง (Second-Order Systems) ได้ดังนี้

สมการฟังก์ชันถ่ายโอนรูปแบบมาตรฐานของระบบที่มีอันดับสอง [39]

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n + \omega_n^2} \tag{2.38}$$

ค่าโพลของสมการฟังก์ชันถ่ายโอนข้างต้นจะมีค่า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

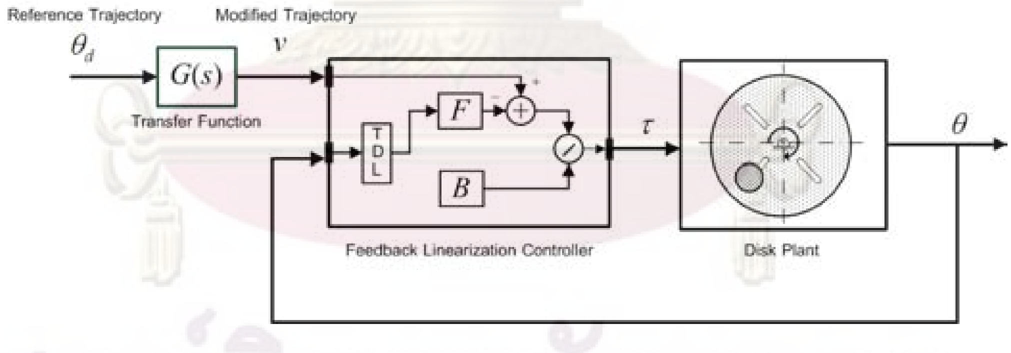
$$\left.\begin{aligned} s_1 &= -\xi\omega_n - \omega_n\sqrt{1-\xi^2} \\ s_2 &= -\xi\omega_n + \omega_n\sqrt{1-\xi^2} \end{aligned}\right\} \tag{2.39}$$

โดยที่ตัวพารามิเตอร์อัตราส่วนการหน่วง (Damping ratio) ξ และค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ω_n เป็นตัวบ่งบอกลักษณะของการตอบสนองของระบบอันดับที่สอง ดังนั้นจึงสามารถกำหนดทางเดินแบบต่อเนื่องที่มีพลวัติเท่ากับที่ต้องการได้โดยการกำหนดค่าอัตราส่วนการหน่วง ξ และค่าเวลาคงที่ (Time constant) t_c ของระบบอันดับสอง โดยที่

$$t_c = \frac{1}{\xi\omega_n} \tag{2.40}$$

สมการฟังก์ชันถ่ายโอน (2.38) จะสามารถเขียนได้เป็น

$$G(s) = \frac{\left(\frac{1}{\xi t_c}\right)^2}{s^2 + \frac{2}{t_c}s + \left(\frac{1}{\xi t_c}\right)^2} \tag{2.41}$$

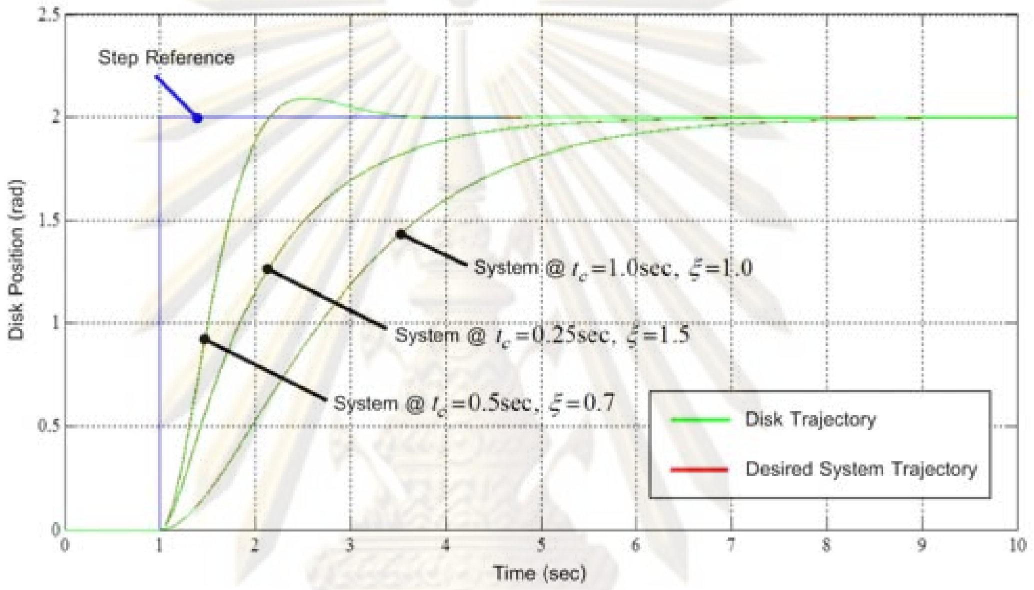


รูปที่ 3.9 แผนภาพการจำลองควบคุมทางเดินของระบบจานหมุนทางกลสำหรับทางเดินอ้างอิงที่มีลักษณะเป็นขั้นบันได

รูปที่ 3.10 แสดงผลการจำลองควบคุมโดยกำหนดพลวัติของฟังก์ชันถ่ายโอนให้มีค่าเวลาคงที่และอัตราส่วนการหน่วงต่างกัน เป็น (1) t_c = 0.5 วินาที ξ = 0.7 (2) t_c = 0.25 วินาที ξ = 1.5 และ (3) t_c = 1 วินาที ξ = 1 ตามลำดับ ผลลัพธ์การควบคุมแสดงให้เห็นว่าวิธีการนี้สามารถรับมือกับสัญญาณอ้างอิงที่มีลักษณะเป็นขั้นบันไดได้อย่างน่าพอใจ นั่นคือเอาต์พุตมีการตอบสนองเช่นเดียวกับระบบที่มีพลวัติเท่ากับที่กำหนด หรือเอาต์พุตสามารถติดตามทางเดิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อ้างอิงแบบต่อเนื่องที่มีพลวัติเท่ากับที่กำหนดได้นั่นเอง แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับขนาดสัญญาณควบคุมสูงสุดที่เป็นไปได้ หากกำหนดผลตอบสนองของระบบมีความเร็วสูง ก็จำเป็นที่จะต้องใช้สัญญาณควบคุมที่มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งอาจจะเกินขีดจำกัดของสัญญาณควบคุมที่สามารถสร้างได้ ทำให้ระบบไม่สามารถตอบสนองตามที่ต้องการ นอกจากนี้วิธีการดังกล่าวจะเป็นผลทำให้ระบบควบคุมกลับมามีพลวัติเท่ากับที่กำหนดแทน



รูปที่ 3.10 ผลการจำลองควบคุมระบบจานหมุนทางกลให้ติดตามทางเดินแบบขั้นบันไดโดยกำหนดพลวัติของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบต่างๆ

3.3.4 **สรุปผลการจำลองควบคุมระบบจานหมุน**

จากผลการจำลองควบคุม แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมที่ใช้การแปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นที่ออกแบบบนระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง สามารถจำลองควบคุมให้เอาต์พุตของระบบติดตามสัญญาณทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่องเป็นซายน์สวีปที่ต้องการได้อย่างน่าพอใจ โดยจะให้ผลลัพธ์การจำลองควบคุมที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อเวลาสุ่มมีค่าลดลงเนื่องจากระบบควบคุมถูกออกแบบให้มีเวลาหน่วงคงที่เท่ากับเวลาสุ่ม นอกจากนี้ตัวควบคุมยังสามารถรับมือกับสัญญาณอ้างอิงแบบไม่ต่อเนื่องมีลักษณะเป็นขั้นบันไดได้ โดยให้สัญญาณอ้างอิงผ่านฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีพลวัติเท่ากับที่กำหนด เพื่อปรับสัญญาณอ้างอิงให้มีลักษณะเป็นสัญญาณแบบต่อเนื่อง ทำให้มีผลตอบสนองเช่นเดียวกับระบบที่มีอันดับสองตามที่มีพลวัติตามที่ต้องการได้อีกด้วย

บทที่ 4

ตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้

4.1 บทนำ

เมื่อต้องการศึกษาถึงปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในระบบ จะพบว่ามีตัวแปรที่สามารถบอกถึงสภาวะของระบบ เข้ามาเกี่ยวข้องกับระบบที่พิจารณาด้วยเสมอ ตัวแปรที่สำคัญสามารถแยกออกได้เป็นสองประเภทคือ (1) อินพุต (2) เอาต์พุต ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะมีการเปลี่ยนแปลงได้ตามเวลา

อินพุต (Input) คือตัวแปรภายนอกที่สามารถส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมระบบ โดยที่ระบบหนึ่งๆ สามารถมีอินพุตได้มากกว่าหนึ่งตัว อินพุตที่เราสามารถควบคุมได้ จะเรียกว่า ตัวแปรปรับ (Manipulated Variables) ส่วนอินพุตที่ไม่สามารถควบคุมได้ เรียกว่าตัวแปรรบกวน (Disturbance Variables)

เอาต์พุต (Output) คือตัวแปรที่แสดงการตอบสนองของระบบที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของอินพุต ซึ่งในส่วนของเอาต์พุตที่เราต้องการควบคุมจะเรียกว่าเป็น ตัวแปรควบคุม (Controlled Variables) และจะต้องสามารถวัดค่าได้

การควบคุมระบบเป็นความต้องการที่จะควบคุม “ตัวแปรควบคุม” ที่เราสนใจด้วยการปรับ “ตัวแปรปรับ” ที่สำคัญบางตัว โดยที่ตัวแปรทั้งสองชุดนี้จะมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกันหรือมีความควบคุมได้ (Controllability) ซึ่งรูปแบบการควบคุมที่เป็นที่นิยมใช้กันแพร่หลายในระบบควบคุมอัตโนมัติคือ การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control)

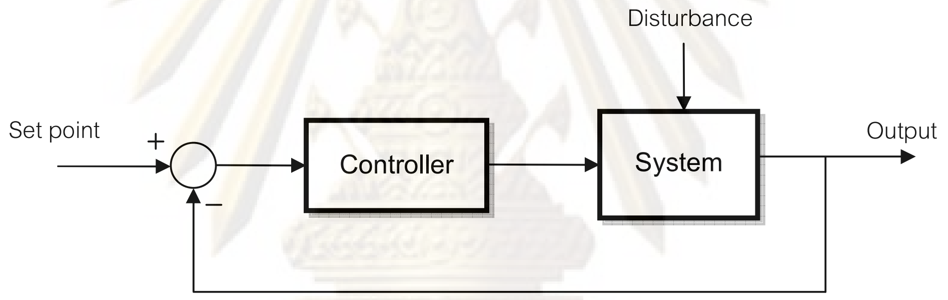
หลักของกระบวนการควบคุมแบบป้อนกลับทั่วๆ ไป คือมีการใช้ค่าความผิดพลาด (Error) ซึ่งเป็นผลต่างของค่าเป้าหมายที่ต้องการ (Setpoint) กับค่าตัวแปรควบคุมในกระบวนการที่ได้จากการวัด มาผ่านขั้นตอนวิธีทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำการคำนวณหาเอาต์พุตของตัวควบคุม (Controller Output) ซึ่งขั้นตอนวิธีทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ จะมีความซับซ้อน แตกต่างกันไปตามรูปแบบและชนิดของตัวควบคุมนั้นๆ

ถึงแม้ว่าตัวควบคุมแบบป้อนกลับทั่วๆ ไป เช่น ตัวควบคุมพีไอดี จะเป็นที่นิยมกันอย่างกว้างขวาง เพราะมีความทนทาน (Robustness) สูง และสามารถทำความเข้าใจได้ง่าย แต่เนื่องจากข้อจำกัดในหลายด้านของตัวควบคุมแบบป้อนกลับเหล่านั้น จึงได้มีการพัฒนาตัวควบคุม

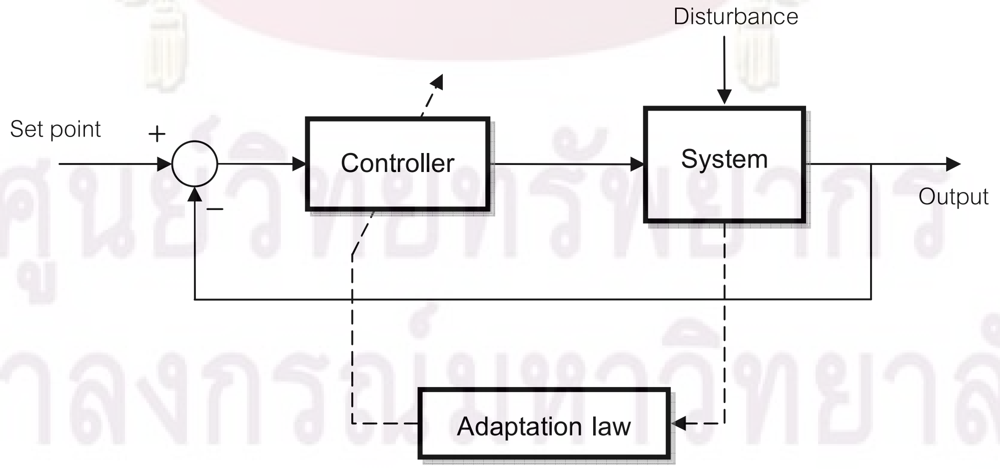
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ที่มีความซับซ้อนเพิ่มขึ้น เพื่อให้สามารถรองรับความต้องการ ที่มีต่อประสิทธิภาพในการควบคุมระบบที่สูงขึ้นได้

การควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control) [18] [27] เป็นหนึ่งในการพัฒนาตัวควบคุมให้มีประสิทธิ์ภาพสูงขึ้น เป็นการควบคุมที่สามารถปรับการตอบสนอง ให้เข้ากับความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับลักษณะของตัวแปรรบกวน หรือความเปลี่ยนแปลงเนื่องจากกระบวนการที่เป็นพลวัติได้ ข้อแตกต่างที่เห็นได้ชัดระหว่างตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ กับตัวควบคุมแบบป้อนกลับธรรมดานั่นคือตัวควบคุมแบบปรับตัวได้จะมีการปรับค่าพารามิเตอร์ในตัวเอง และมีกลไกในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมนั้น ซึ่งตัวควบคุมแบบป้อนกลับทั่วๆ ไป จะมีค่าพารามิเตอร์คงที่ สังเกตความแตกต่างระหว่างการควบคุมแบบป้อนกลับธรรมดา (รูปที่ 4.1) กับการควบคุมแบบปรับตัวได้ (รูปที่ 4.2)



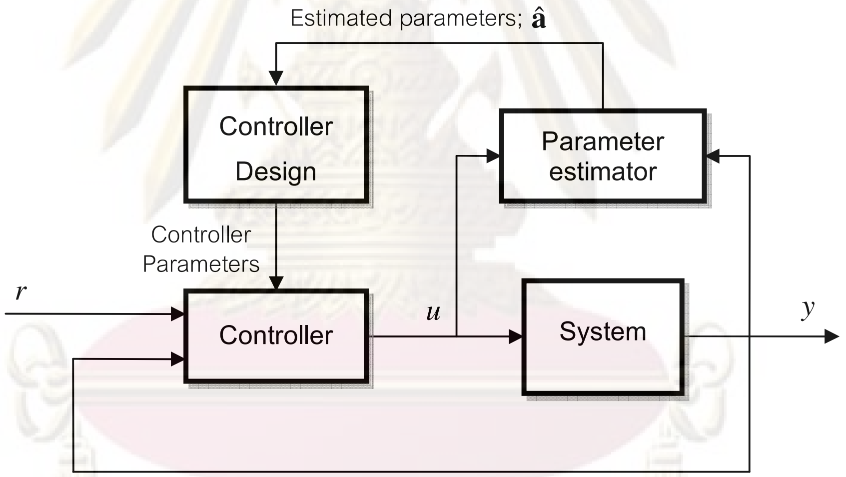
รูปที่ 4.1 การควบคุมแบบป้อนกลับทั่วไป (Typical Feedback Control)



รูปที่ 4.2 การควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control)

จะเห็นว่าระบบการควบคุมแบบปรับตัวได้ประกอบด้วยสองวง โดยวงแรกมีลักษณะเช่นเดียวกับวงป้อนกลับ ส่วนอีกวงหนึ่งที่เพิ่มเติมขึ้นมาจากระบบธรรมดา จะเป็นวงของการปรับค่าพารามิเตอร์ โดยทั่วไปวงของการปรับค่าจะดำเนินไปช้ากว่าวงของการป้อนกลับ

ในการออกแบบการควบคุมแบบไม่สามารถปรับตัวได้ (Non-adaptive Control) นั้นจะสามารถคำนวณพารามิเตอร์ของตัวควบคุมได้จากระบบที่ต้องการจะควบคุม แต่หากไม่ทราบพารามิเตอร์ของระบบที่ต้องการจะควบคุม วิธีการที่สมเหตุสมผลที่สุดก็คือการประมาณค่าพารามิเตอร์เหล่านั้น โดยใช้ตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ (Parameter Estimator) ตัวควบคุมที่ได้มาจากการทำงานร่วมกันของตัวควบคุมกับตัวประมาณค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ (On-line Parameter Estimator) จะถูกเรียกว่า “Self-tuning Controller” หรือตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้ รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างของตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้ ซึ่งเป็นตัวควบคุมที่ทำงานไปพร้อมๆ กับการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบ



รูปที่ 4.3 ตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้

การทำงานของตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้จะเป็นไปตามขั้นตอนดังนี้คือ ในแต่ละช่วงเวลา ตัวประมาณค่าจะส่งค่าประมาณของพารามิเตอร์ของระบบ ($\hat{\mathbf{a}}$ ในรูปที่ 4.3) ไปยังตัวควบคุม ซึ่งค่าประมาณนั้นถูกคำนวณโดยใช้อินพุต u และเอาต์พุต y ในอดีตของระบบที่ต้องการจะควบคุม จากนั้นคอมพิวเตอร์จะทำการคำนวณพารามิเตอร์ของตัวควบคุม และใช้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมกับค่าจากการวัดมาใช้คำนวณออกมาเป็นสัญญาณควบคุม สำหรับนำไปควบคุมระบบ และวนซ้ำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมในลักษณะนี้ถือเป็นการปรับตัวแบบทางอ้อม (Indirect Adaptive Control) ผ่านทางพารามิเตอร์ของระบบที่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประมาณได้ แต่อย่างไรก็ตามเราสามารถกำจัดการคำนวณในส่วนนี้ได้ โดยการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของระบบใหม่ให้อยู่ในรูปพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ทำให้ตัวควบคุมมีการปรับตัวแบบทางตรง (Direct Adaptive Control) จากพารามิเตอร์ที่ประมาณได้

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาตัวควบคุมที่แปลงระบบควบคุมให้เป็นระบบเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับชนิดปรับค่าเองได้ (Self-tuning Feedback Linearization Controller) เป็นตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้ ซึ่งอยู่ในกลุ่มของการควบคุมแบบปรับตัวได้ ลักษณะของตัวควบคุมรูปแบบนี้จะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักคือ

- การออกแบบตัวควบคุม (Controller Design) เพื่อให้ได้ระบบควบคุมที่เหมาะสมกับระบบที่ต้องการจะควบคุม ภาพใต้เงื่อนไขการออกแบบที่ได้กำหนดไว้

- การหาเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) เป็นการสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในรูปของแบบจำลองขึ้นมา เพื่อนำไปใช้ในการปรับปรุงตัวควบคุม

- การนำไปใช้ (Implementation) คือขั้นตอนวิธีการนำตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบมาใช้ในการควบคุม เพื่อให้ได้การตอบสนองที่เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

โดยตัวควบคุมจะใช้วิธีการแปลงระบบควบคุมให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับ และตัวควบคุมสามารถปรับค่าเองได้ คือ ตัวควบคุมสามารถปรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุมได้แบบออนไลน์ เพื่อคงไว้ซึ่งศักยภาพของระบบควบคุมเมื่อมีความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์หรือมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบเกิดขึ้น โดยไม่ต้องออกแบบตัวควบคุมใหม่ อีกทั้งยังสามารถลดความยุ่งยากในการใช้งานลงได้เนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้แบบจำลองของระบบล่วงหน้า แต่อาศัยการหาเอกลักษณ์ของระบบแบบออนไลน์โดยใช้แบบจำลองตารางค้นหา (Look-up Table Model) ร่วมกับวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ (Recursive least square; RLS) ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง ทำให้แบบจำลองโดยประมาณสามารถปรับค่าแบบออนไลน์ได้ (Online tuning)

4.2 การออกแบบตัวควบคุม (Controller Design)

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมทางเดิน (Trajectory) ของระบบจานหมุนโดยใช้วิธีการแปลงให้ระบบควบคุมเป็นระบบเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับ ดังที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อ 3.2.2 ซึ่งข้อมูลที่นำมาใช้ในการคำนวณสัญญาณควบคุม (2.30) คือ

สัญญาณทางเดินอ้างอิงที่ต้องการ $\theta_{d,k}$ ค่าของฟังก์ชันไม่เชิงเส้น $\hat{F}(\theta_k, \theta_{k-1})$ และฟังก์ชันคงที่ $\hat{B}$ ดังนี้

$$\tau_k = \frac{1}{\hat{B}}\left[\theta_{d,k} - \hat{F}(\theta_k, \theta_{k-1})\right] \tag{3.1}$$

เมื่อให้สัญญาณควบคุม (3.1) กับระบบ (2.28)-(2.29) ในสมการด้านล่าง

$$\theta_{k+1} = F(\theta_k, \theta_{k-1}) + B\tau_k$$

จะได้ระบบควบคุมแบบปิดคือ

$$\theta_{k+1} = F(\theta_k, \theta_{k-1}) + \frac{B}{\hat{B}}\left[\theta_{d,k} - \hat{F}(\theta_k, \theta_{k-1})\right] \tag{3.2}$$

$$\theta_{k+1} = \left[F(\theta_k, \theta_{k-1}) - \frac{B}{\hat{B}}\hat{F}(\theta_k, \theta_{k-1})\right] + \frac{B}{\hat{B}}\theta_{d,k} \tag{3.3}$$

$$\theta_{k+1} = e_F(\theta_k, \theta_{k-1}, e_B) + e_B\theta_{d,k} \tag{3.4}$$

โดยที่

$$\left.\begin{aligned} e_F(\theta_k, \theta_{k-1}, e_B) &= F(\theta_k, \theta_{k-1}) - \frac{B}{\hat{B}}\hat{F}(\theta_k, \theta_{k-1}) \\ e_B &= \frac{B}{\hat{B}} \end{aligned}\right\} \tag{3.5}$$

4.3 **การหาเอกลักษณ์ของระบบแบบออนไลน์** (Online System Identification)

การหาเอกลักษณ์ของระบบ เป็นกรรมวิธีในการจำลองระบบพลวัติขึ้นมาจากการใช้ข้อมูลอินพุต และเอาต์พุตของระบบที่ได้จากการทดลอง ระบบที่ได้จากการหาเอกลักษณ์ จะแสดงได้โดยการเขียนในรูปของแบบจำลอง (Model) เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตที่ได้มานั้น แบบจำลองของระบบมักจะอยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งอาศัยพื้นฐานมาจากการหาสมดุลมวล และสมดุลพลังงานทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นั้น อยู่ในรูปของสมการผลต่าง หรือสมการอนุพันธ์ (Difference or Differential Equation) เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบนี้ มีความเหมาะสมต่อการวิเคราะห์ ทำนาย และออกแบบระบบทางพลวัติ

แต่สำหรับระบบที่มีระบบซับซ้อน เช่นระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear System) การที่จะหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกต้องเป็นไปได้ยาก ดังนั้นอาจจำเป็นต้องประมาณระบบด้วยแบบจำลองที่มีความซับซ้อนน้อยลง ถึงแม้ว่าการประมาณระบบเช่นนี้จะค่าการประมาณที่มีความผิดพลาดจากระบบจริงอยู่บ้าง แต่ก็ทำให้ระบบมีความซับซ้อนและยุ่งยากน้อยลง และทำให้การประมาณค่าเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว และง่ายมากขึ้น

พิจารณาตัวควบคุมในหัวข้อ 4.2 จะเห็นว่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมนั้นถูกคำนวณจากพารามิเตอร์ของระบบโดยตรง ดังนั้นเราจึงสามารถนำพารามิเตอร์ของระบบควบคุมแบบปิด (3.4)-(3.5) มาปรับแก้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมได้ด้วยการหาเอกลักษณ์ของระบบปิดดังกล่าว

ในงานวิจัยนี้จะออกแบบตัวควบคุมชนิดค่าเองได้ สำหรับกรณีที่ทราบค่าของฟังก์ชันคงที่ B ซึ่งหาได้จากค่า J ในสมการ (1.1) แต่ไม่ทราบพารามิเตอร์ของฟังก์ชันไม่เชิงเส้น $f\left(\theta,\dot{\theta}\right)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของแรงเสียดทานและแรงโน้มถ่วง โดยจะส่งผลให้ระบบควบคุมในสมการ (3.4)-(3.5) มีเฉพาะค่าความผิดพลาดที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนของฟังก์ชัน $\hat{F}$ ดังสมการด้านล่าง

$$\theta_{k+1} = e_F\left(\theta_k, \theta_{k-1}, e_B\right) + e_B \theta_{d,k} \tag{3.6}$$

โดยที่

$$\left.\begin{aligned} & e_B = 1 \\ & e_F\left(\theta_k, \theta_{k-1}, e_B\right) = e_F\left(\theta_k, \theta_{k-1}\right) \end{aligned}\right\} \tag{3.7}$$

อย่างไรก็ตามการหาเอกลักษณ์ของฟังก์ชัน e_F ซึ่งเป็นฟังก์ชันสองตัวแปรนั้นจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจำนวนมากจึงไม่มีความเหมาะสมต่อการหาเอกลักษณ์แบบออนไลน์ ดังนั้นจึงกำหนดเงื่อนไขให้ทางเดินอ้างอิงที่ต้องการมีลักษณะเป็นฟังก์ชันเป็นคาบ (Periodic Function) เพื่อให้ฟังก์ชัน F และฟังก์ชัน e_F จะเป็นฟังก์ชันของตัวแปรเวลาเพียงตัวแปรเดียว จะได้

$$e_F\left(\theta_k, \theta_{k-1}\right) = e_{F,k} \tag{3.8}$$

ระบบปิด (3.6)-(3.7) จะสามารถเขียนได้เป็น

$$\theta_{k+1} = e_{F,k} + \theta_{d,k} \tag{3.9}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

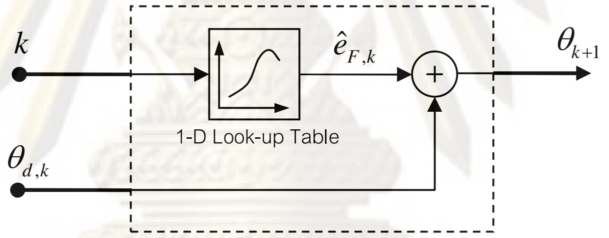
โดยที่

$$e_{F,k} = F_k - \hat{F}_k \tag{3.10}$$

จาก (3.9)-(3.10) แสดงให้เห็นว่าเราสามารถปรับปรุงฟังก์ชัน $\hat{F}_k$ ให้ถูกต้องได้ โดยใช้ $e_{F,k}$ ซึ่งจะได้จากการหาเอกลักษณ์ของระบบปิด (3.9)

4.3.1 **แบบจำลองโดยประมาณของระบบปิด** (Approximate model)

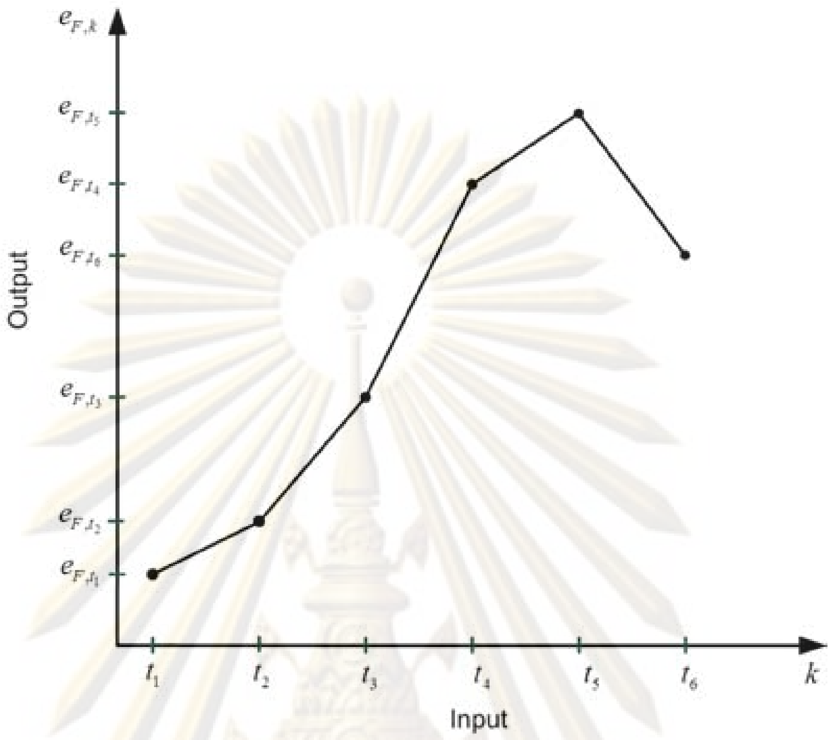
แบบจำลองโดยประมาณของระบบปิด (3.9)-(3.10) จะใช้แบบจำลองตารางค้นหา ซึ่งมีความเหมาะสมกับระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง และมีวิธีการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน [40] โดยแบบจำลองจะประกอบด้วยตารางค้นหา 1 มิติ (One-Dimensional Look-up Table) ที่มีอินพุตเป็นเวลา k และเอาต์พุตเป็นค่าของฟังก์ชัน $e_{F,k}$ ณ เวลานั้น แผนผังแบบจำลองของระบบปิดจะเป็นดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แผนผังแบบจำลองโดยประมาณของระบบปิด

รูปที่ 4.5 แสดงตารางค้นหาหนึ่งมิติของแบบจำลอง ที่ประกอบด้วยจุดข้อมูล 6 จุด คือ $\left(t_1, e_{F,t_1}\right)$ ถึง $\left(t_6, e_{F,t_6}\right)$ ซึ่งค่าอินพุต 6 ค่า t_1 ถึง t_6 ที่มีความสัมพันธ์กับค่าเอาต์พุต e_{F,t_1} ถึง e_{F,t_6} ถูกจัดเก็บไว้ตารางค้นหานี้ เอาต์พุตของแบบจำลองตารางค้นหาจะถูกคำนวณโดยใช้จุดในตารางค้นหาที่อยู่ใกล้ที่สุดทางด้านซ้ายและด้านขวาของอินพุตของแบบจำลอง และทำการคำนวณโดยใช้การประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้น (Linear Interpolation) กับค่าทั้งสอง ทำให้ได้เอาต์พุตของตารางค้นหาหนึ่งมิติเป็นดังนี้

$$\hat{e}_{F,k} = \frac{e_{F,t_{\text{left}}}\left(t_{\text{right}} - k\right) + e_{F,t_{\text{right}}}\left(k - t_{\text{left}}\right)}{t_{\text{right}} - t_{\text{left}}} \tag{3.11}$$



รูปที่ 4.5 ตารางค้นหาหนึ่งมิติที่มีข้อมูล m จุด

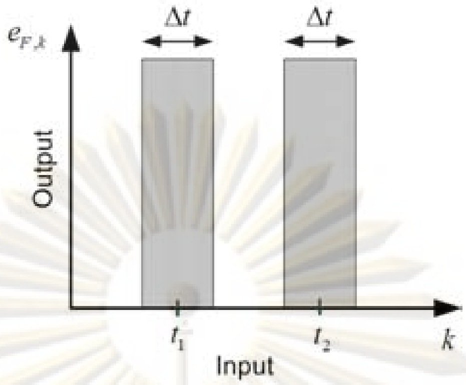
4.3.2 **การประมาณค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์** (Online Parameter Estimation)

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบแบบออนไลน์ จะใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ [40] ในการประมาณฟังก์ชัน $\hat{e}_{F,k}$ ซึ่งจะถูกจัดเก็บในตารางค้นหา เพื่อนำไปปรับแก้พารามิเตอร์ของตัวควบคุม

จากระบบปิด (3.9) เราสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังสมการ (3.12) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าของฟังก์ชัน $e_{F,k}$ สามารถหาได้จากการวัดค่าอินพุตและเอาต์พุตของระบบควบคุม

$$e_{F,k} = \theta_{k+1} - \theta_{d,k} \tag{3.12}$$

ขั้นตอนการจัดเก็บข้อมูลลงในตารางค้นหา (Measurement of Look-up Table) ข้อมูลที่วัดได้ไม่จำเป็นต้องตรงกับจุดข้อมูลในตารางค้นหา t_j อย่างแม่นยำ แต่จะยอมให้มีความคลาดเคลื่อน (tolerance) Δt ได้ (รูปที่ 4.6) โดยจะนำข้อมูลที่ได้จากบริเวณโดยรอบมาเฉลี่ยด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดคำนวณหาค่าของฟังก์ชัน $\hat{e}_{F,t_j}$ โดยใช้ แล้วจึงจัดเก็บเอาต์พุตที่คำนวณได้ลงในตารางค้นหา ซึ่งการทำเช่นนี้จะช่วยลดสัญญาณรบกวนได้



รูปที่ 4.6 ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลยอมรับได้รอบจุดข้อมูลในตารางค้นหา

พิจารณาข้อมูลที่วัดได้รอบจุดข้อมูลใดๆ ในตารางค้นหา

$$t_j - \frac{\Delta t}{2} \le k \le t_j + \frac{\Delta t}{2} \tag{3.13}$$

วิธีกำลังสองน้อยสุดมีจุดประสงค์คือ ต้องการประมาณค่า $\hat{e}_{F,t_j}$ ที่ทำให้ฟังก์ชันผลรวมค่าผิดพลาดกำลังสอง (Sum Square Error; SSE) มีค่าน้อยสุด

$$\mathrm{SSE} = \sum_{i=1}^{n} \left\| \hat{e}_{F,t_j} - e_{F,k}(i) \right\|^2 \tag{3.14}$$

เมื่อ n เป็นจำนวนข้อมูลของค่าการวัด โดยระเบียบวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ (Recursive Least Square Algorithm) จะมีขั้นตอนดังสมการด้านล่าง

$$\begin{aligned} &\hat{e}_{F,t_j}(n+1) = \hat{e}_{F,t_j}(n) + \frac{1}{n+1}\left[e_{F,k}(n+1) - \hat{e}_{F,t_j}(n) \right] \\ &n = 0,1,2,\ldots \end{aligned} \tag{3.15}$$

โดยจะต้องมีการกำหนดค่าเริ่มต้นของ $\hat{e}_{F,t_j}(0)$

4.3.3 การนำไปใช้ในการควบคุม

ในการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมชนิดปรับค่าได้ที่ได้นำเสนอไปนั้น มีขั้นตอนวิธีในการนำตัวควบคุมไปใช้งาน และการปรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ดังนี้

ก. กำหนดขนาดของตารางค้นหาในแบบจำลองระบบควบคุม จำนวนจุดข้อมูล รวมไปถึงความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ Δt และกำหนดตารางค้นหาของตัวควบคุมให้มีขนาดเท่ากับตารางค้นหาในแบบจำลอง

ข. กำหนดค่าเริ่มต้นของวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ $\hat{e}_{F,t_j}(0)$ และ $n(0)$ สำหรับทุกจุดข้อมูลในตารางค้นหา

ค. กำหนดค่าเริ่มต้นของฟังก์ชัน $\hat{F}$ สำหรับตัวควบคุม เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณสัญญาณควบคุม (3.1) ให้มีความเหมาะสมกับระบบที่ต้องการจะควบคุม

ง. เก็บข้อมูลอินพุต-เอาต์พุตของระบบควบคุม โดยข้อมูลที่เก็บคือ สัญญาณทางเดินอ้างอิง $\theta_{d,k}$ เอาต์พุตของระบบ θ_k และเวลา k

จ. นำข้อมูลที่ได้จาก ง. ทั้งในอดีตและปัจจุบัน ไปใช้ในการคำนวณหาค่า $\hat{e}_{F,k}$ ของแบบจำลองของระบบแบบออนไลน์ด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ แล้วจัดเก็บลงในตารางค้นหา

ฉ. เมื่อครบรอบเวลาของการปรับปรุงค่า ให้เปรียบเทียบผลการตอบสนองที่ได้ว่าเอาต์พุตลู่เข้าสู่ค่าเป้าหมายหรือไม่ โดยพิจารณาจากผลรวมค่าผิดพลาดในการติดตามทางเดินกำลังสองเมื่อชดเชยเวลาหน่วง (Sum Square Error) $\sum_{k=1}^{n}\left\|\theta_{d,k-1}-\theta_k\right\|^2$ ทั้งนี้เพื่อพิจารณาเฉพาะความผิดพลาดที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนของฟังก์ชัน $\hat{F}$ เท่านั้น

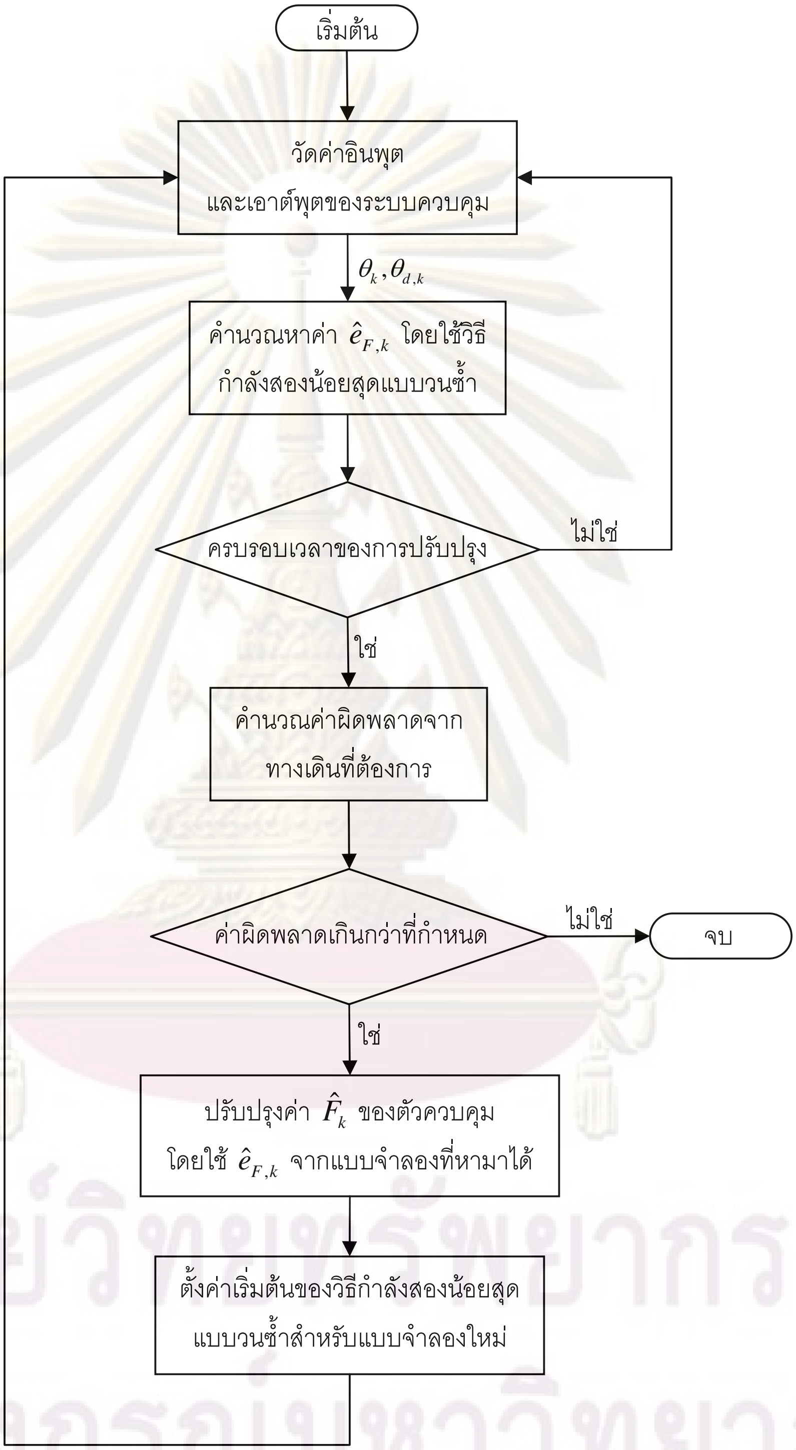
ช. เมื่อค่าที่ได้ใน ฉ. เบี่ยงเบนเกินจากค่าที่กำหนดไว้ ε จะนำค่า $\hat{e}_{F,k}$ ที่ประมาณได้ไปปรับปรุงพารามิเตอร์ของตัวควบคุม $\hat{F}_k$ โดยการปรับปรุงตารางค้นหาของตัวควบคุมดังนี้

$$\hat{e}_{F,\text{control(new)}} = \hat{e}_{F,\text{control(old)}} + \hat{e}_{F,\text{tuning}} \tag{3.16}$$

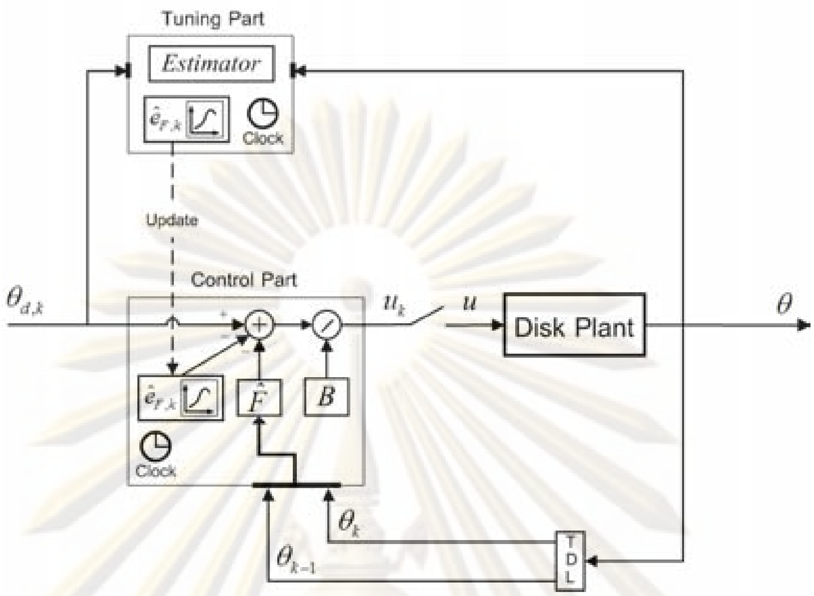
ซ. ตั้งค่าเริ่มต้นของวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำสำหรับแบบจำลอง $\hat{e}_{F,t_j}(0)$ และ $n(0)$ ใหม่ จากนั้นเริ่มคำนวณซ้ำในขั้นตอน ง. ต่อไป แต่หากค่าที่ได้ใน ฉ. เบี่ยงเบนน้อยกว่าค่าที่กำหนดก็จะให้หยุดลูพของการปรับปรุงค่า

พิจารณาแผนผังการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม $\hat{F}_k$ ได้ในรูปที่ 4.7 และแผนภาพระบบควบคุมจานหมุนทางกลด้วยตัวควบคุชนิดปรับค่าเองได้ในรูปที่ 4.8

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 แผนผังแสดงการปรับปรุงพารามิเตอร์ของตัวควบคุม



รูปที่ 4.8 แผนภาพระบบควบคุมจานหมุนทางกลด้วยตัวควบคุมที่ชนิดปรับค่าเองได้

4.4 การจำลองควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

ในหัวข้อนี้จะเป็นการจำลองระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ (Simulation) เพื่อศึกษาถึงศักยภาพของตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้ที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อ 4.2 และ 4.3 ในการควบคุมทางเดินของระบบจานหมุนทางกล โดยใช้แบบจำลองของระบบจานหมุนทางกลในหัวข้อ 3.3.1 และกำหนดให้พารามิเตอร์ C F_0 และ m ในสมการ (2.33) เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า ซึ่งจะสามารถแปลงแบบจำลองให้อยู่ในรูปสมการดิฟเฟอเรนซ์ได้ดังสมการด้านล่าง

$$\theta_{k+1} = \hat{F}\left(\theta_k, \theta_{k-1}\right) + B\tau_k \tag{3.17}$$

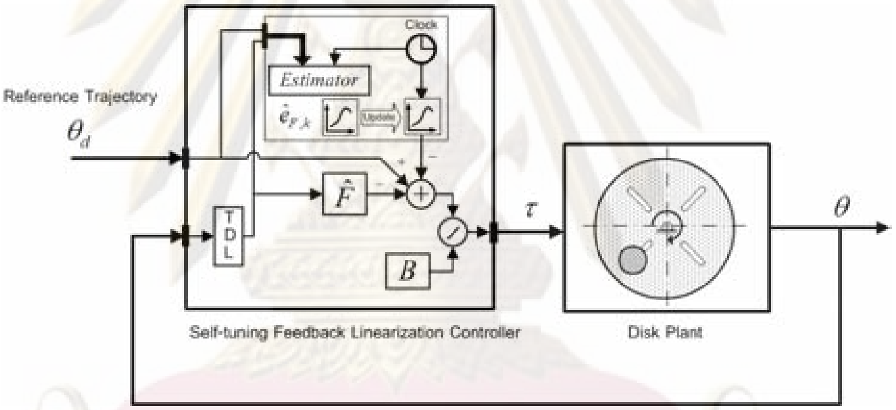
โดยที่

$$\left.\begin{aligned} \hat{F}\left(\theta_k, \theta_{k-1}\right) &= -\frac{T^2}{J}\operatorname{sgn}\left(\theta_k - \theta_{k-1}\right)\left(\hat{C}\left(\frac{\theta_k - \theta_{k-1}}{T}\right) + \hat{F}_0\right) \\ &\quad -\frac{\hat{m}glT^2}{J}\sin\left(\theta_k\right) + 2\theta_k - \theta_{k-1} \\ B &= \frac{T^2}{J} \end{aligned}\right\} \tag{3.18}$$

โดยที่การจำลองควบคุมนี้เป็นการจำลองควบคุม ในกรณีที่ทราบค่าของฟังก์ชันคงที่ B หรือทราบค่าโมเมนต์ความเฉื่อย J และสัญญาณทางเดินอ้างอิงเป็นฟังก์ชันเป็นคาบ

4.4.1 ผลการจำลองควบคุมระบบจานหมุนทางกล

ในการจำลองควบคุมตำแหน่งจานหมุนของระบบจานหมุนทางกล จะกำหนดขีดจำกัดของฮาร์ดแวร์ หรือค่าสูงสุดของสัญญาณควบคุมที่สามารถสร้างได้ โดยให้ค่าอินพุตทอร์กสูงสุดเท่ากับ 3 นิวตัน.เมตร และจำลองควบคุมให้เอาต์พุตของระบบติดตามทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่องเป็นซายน์สวีป และทางเดินอ้างอิงแบบไม่ต่อเนื่องเป็นขั้นบันได โดยใช้อินพุตของการควบคุมตามสมการ (3.1) ระบบควบคุมจะเป็นดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แผนภาพการจำลองควบคุมทางเดินของระบบจานหมุนทางกลด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้

4.4.1.1 ผลการจำลองควบคุมให้เอาต์พุตของระบบติดตามทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่อง

ทำการจำลองควบคุม โดยกำหนดเวลาสุ่มที่ 5 มิลลิวินาที และให้สัญญาณทางเดินอ้างอิงที่ต้องการเป็นฟังก์ชันเป็นคาบซายน์สวีป มีคาบเวลา 10 วินาที ความถี่ 0.1-0.5 เฮิรตซ์ ภายในเวลา 10 วินาที เฟสเริ่มต้นที่ 0 เรเดียน มีแอมพลิจูดเป็นฟังก์ชันซายน์แบบเต็มคลื่น (Full Wave Sine Function) ขนาด 2.5 เรเดียน ความถี่ 0.1π เฮิรตซ์ และให้เอาต์พุตของระบบเริ่มต้นที่ 0 เรเดียน

โดยกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวควบคุมดังต่อไปนี้

- กำหนดให้ตารางค้นหามีขนาด 201 จุดข้อมูล เริ่มตั้งแต่ 0 ถึง 10 วินาที ซึ่งจะมีช่องว่าง (Gab) ระหว่างจุดข้อมูลเป็น 0.05 วินาที และกำหนดความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ Δt เท่ากับ 0.05 วินาที

- กำหนดค่าเริ่มต้นของฟังก์ชัน $\hat{e}_{F,t_j}(0) = 0$ ในตารางค้นหาของแบบจำลอง

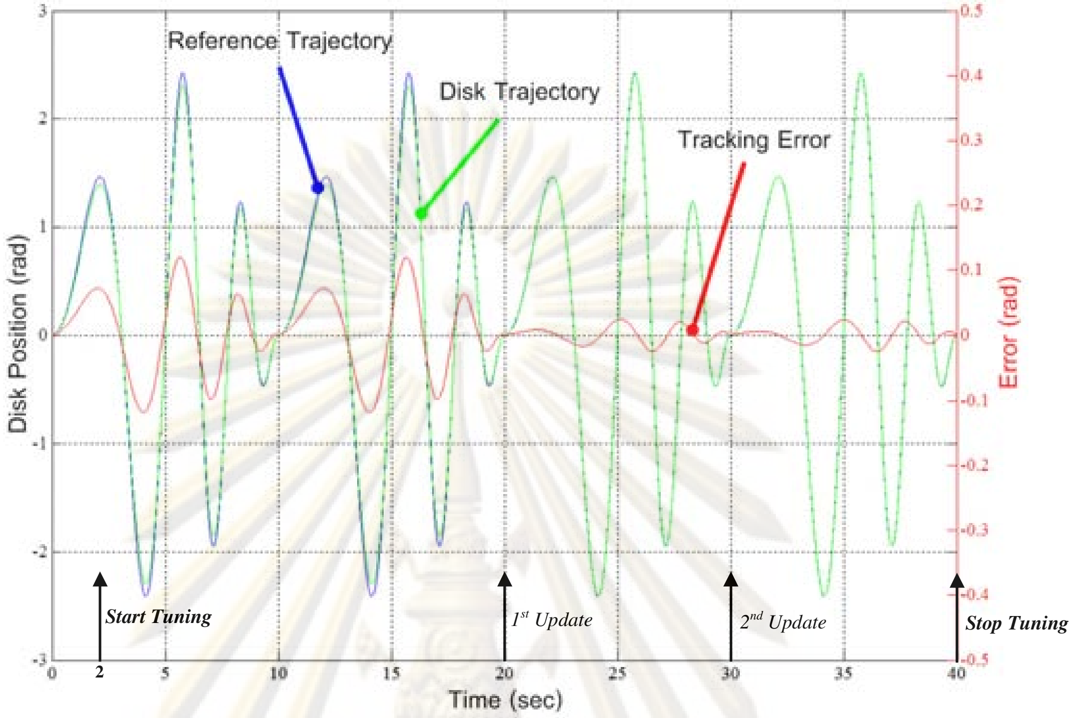
- กำหนดให้พารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า $C = F_0 = m = 0$ ดังนั้นจะได้ค่าเริ่มต้นของฟังก์ชัน $\hat{F}(\theta_k, \theta_{k-1}) = 2\theta_k - \theta_{k-1}$ สำหรับตัวควบคุม

- กำหนดรอบเวลาของการปรับปรุงค่าในรอบแรก เป็นสองเท่าของคาบเวลาของสัญญาณอ้างอิง นั่นคือที่เวลา 20 วินาที และเท่ากับคาบเวลาของสัญญาณอ้างอิงหรือทุก 10 วินาที สำหรับรอบต่อไป

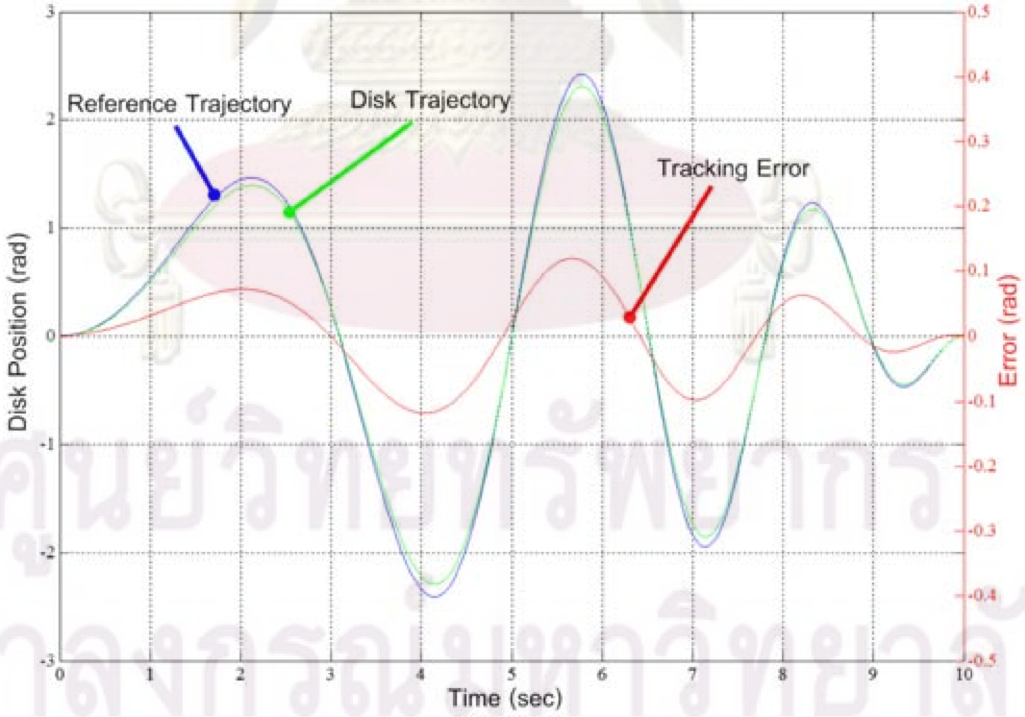
- กำหนดให้ผลรวมค่าผิดพลาดในการติดตามทางเดินกำลังสองเมื่อชดเชยเวลาหน่วงที่ยอมรับได้เพื่อหยุดการปรับปรุงค่า ε เท่ากับ ค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ยกกำลังสองคูณกับจำนวนข้อมูลในหนึ่งรอบการปรับปรุงค่า ถ้ากำหนดให้ค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 0.001 เรเดียน ผลรวมค่าผิดพลาดในการติดตามทางเดินกำลังสองที่ยอมรับได้จะเท่ากับ 0.002

ผลการจำลองควบคุมรูปที่ 4.10 และผลลัพธ์เมื่อชดเชยเวลาหน่วงรูปที่ 4.11 ชี้ให้เห็นว่าเอาต์พุตของระบบจะลู่เข้าสู่ทางเดินอ้างอิง ทำให้ค่าความผิดพลาดของการติดตามทางเดินลดลงจนกระทั่งมีเพียงค่าความผิดพลาดที่เกิดจากเวลาหน่วงเท่านั้น ทั้งนี้การลู่เข้าของฟังก์ชัน $\hat{F}$ ในรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมสามารถปรับปรุงค่า $\hat{F}$ ให้ลู่เข้าสู่ค่าจริงได้ ส่งผลให้สามารถลดค่าความผิดพลาดของการติดตามทางเดินเมื่อชดเชยเวลาหน่วงลงได้จนกระทั่งต่ำกว่าค่าที่กำหนดในรอบที่ 3 ของการปรับปรุงค่า และทำให้เอาต์พุตของระบบติดตามทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่องเป็นซายน์สวีปได้เป็นอย่างดีโดยมีเวลาหน่วงคงที่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

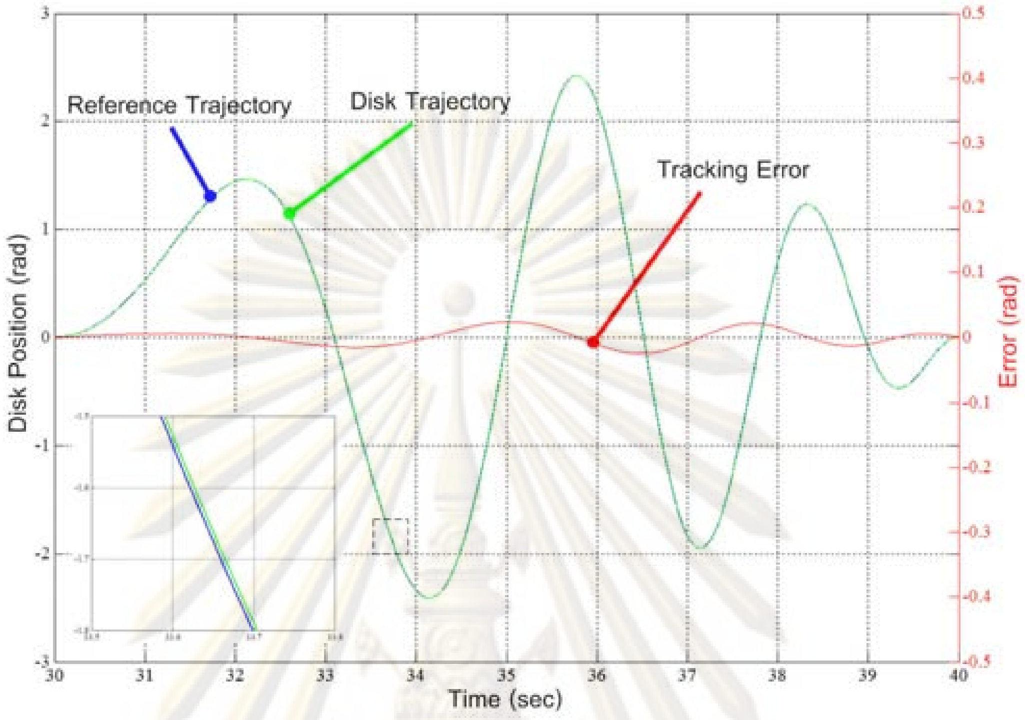


(ก) ผลลัพธ์ที่เวลา 0 ถึง 40 วินาที



(ข) ผลลัพธ์ที่เวลา 0 ถึง 10 วินาที

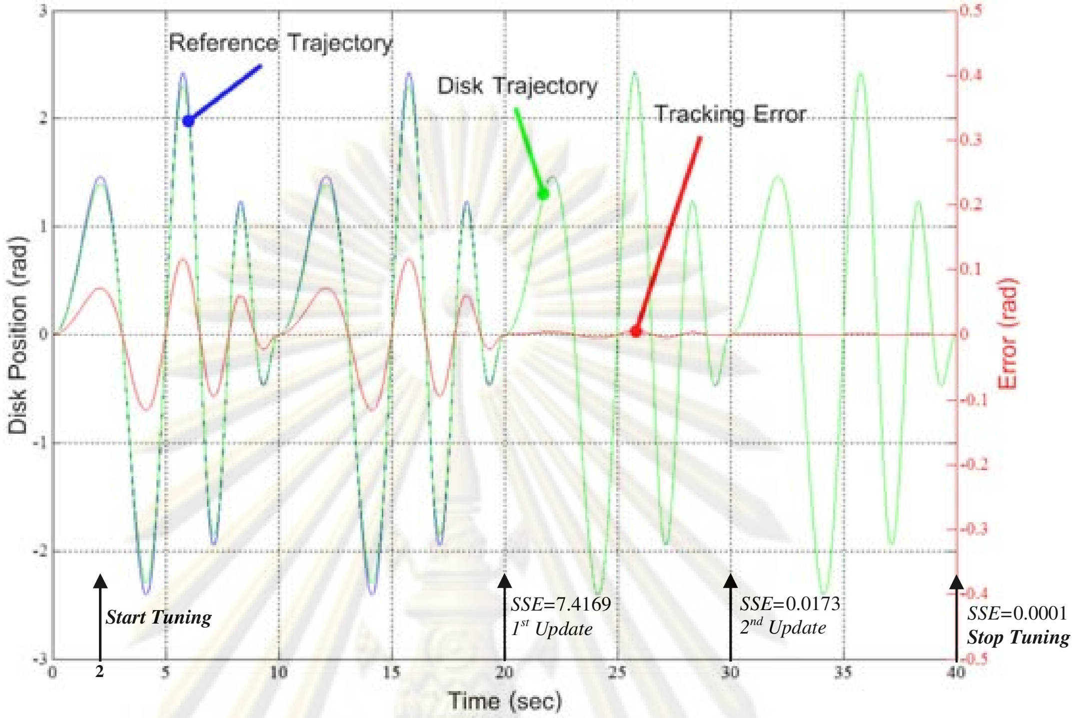
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



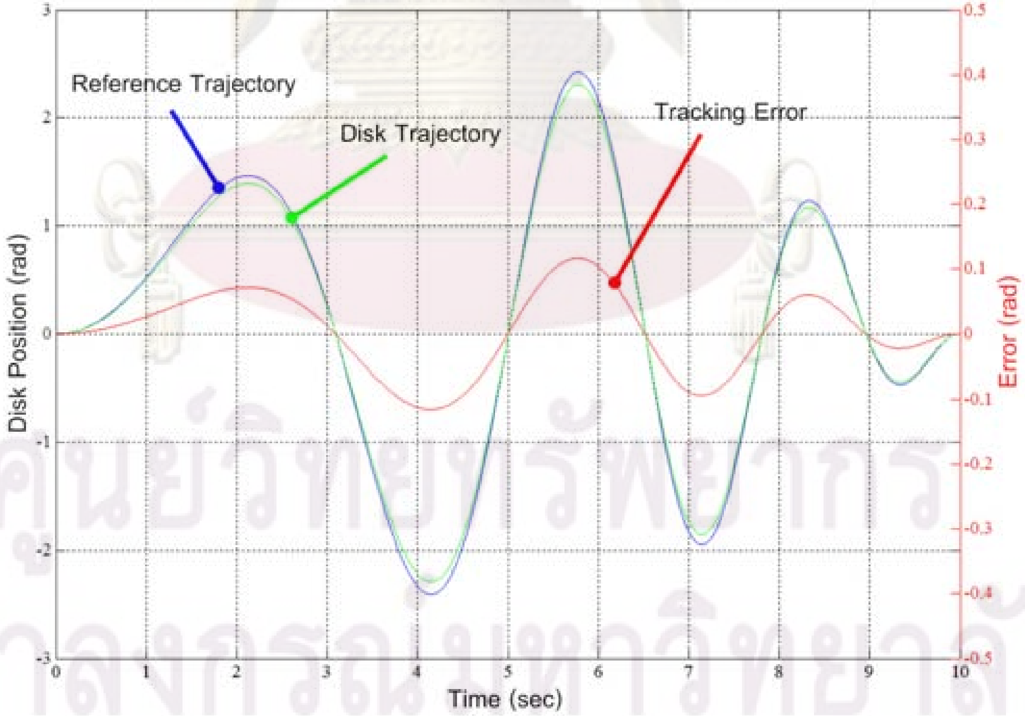
(ค) ผลลัพธ์ที่เวลา 30 ถึง 40 วินาที

รูปที่ 4.10 ผลการจำลองควบคุมระบบจานหมุนให้ติดตามทางเดินแบบต่อเนื่องด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

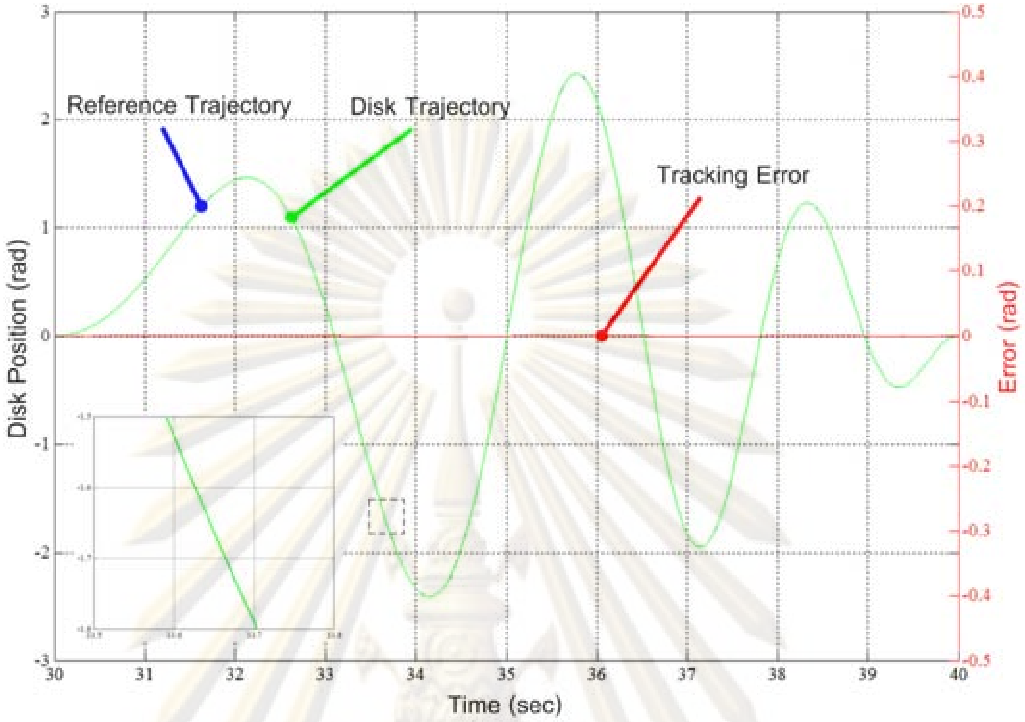


(ก) ผลลัพธ์ที่เวลา 0 ถึง 40 วินาที



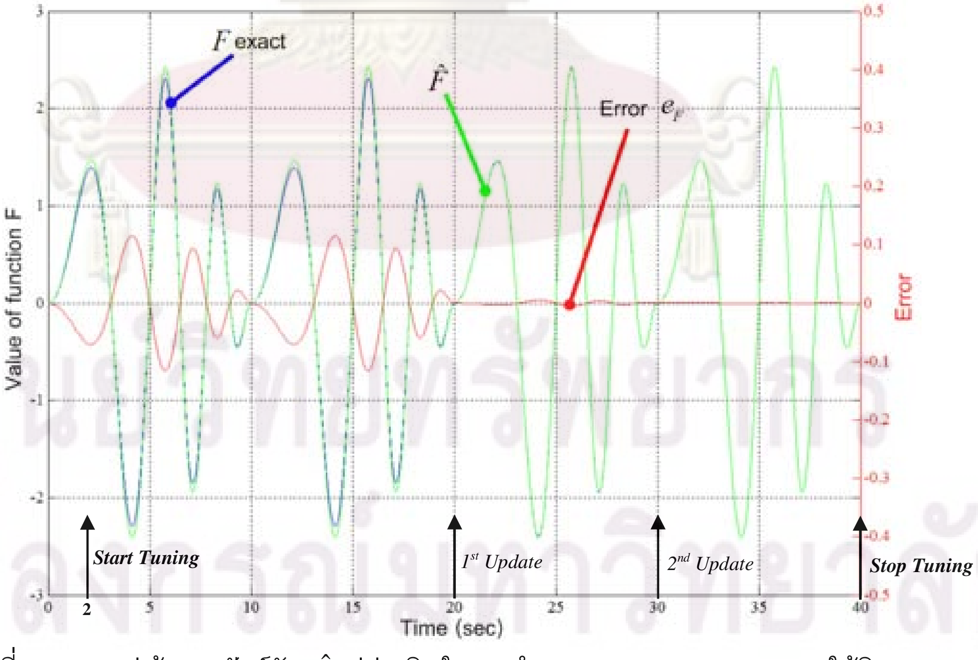
(ข) ผลลัพธ์ที่เวลา 0 ถึง 10 วินาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ค) ผลลัพธ์ที่เวลา 30 ถึง 40 วินาที

รูปที่ 4.11 ผลลัพธ์เมื่อชดเชยเวลาหน่วงของการจำลองควบคุมระบบจานหมุนให้ติดตามทางเดินแบบต่อเนื่องด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้

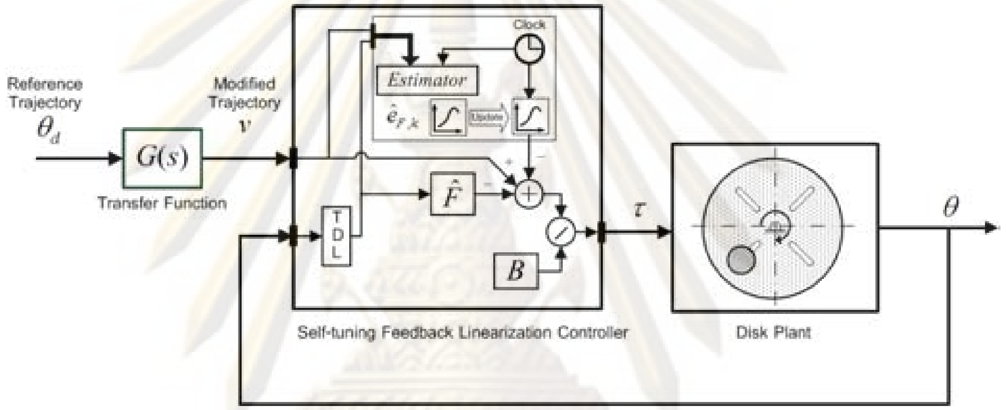


รูปที่ 4.12 การลู่เข้าของฟังก์ชัน $\hat{F}$ สู่ค่าจริง ในการจำลองควบคุมระบบจานหมุนให้ติดตามทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่อง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4.1.2 ผลการจำลองควบคุมให้เอาต์พุตของระบบติดตามทางเดินอ้างอิงแบบไม่ต่อเนื่อง

การควบคุมให้เอาต์พุตของระบบติดตามทางเดินอ้างอิงแบบไมต่อเนื่องมีลักษณะเป็นขั้นบันได จะต้องปรับสัญญาณทางเดินอ้างอิงให้มีลักษณะเป็นสัญญาณแบบต่อเนื่อง โดยให้สัญญาณอ้างอิงผ่านฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีพลวัติเท่ากับที่กำหนดเพื่อปรับให้เป็นสัญญาณแบบต่อเนื่องตามที่มีพลวัติตามที่ต้องการ ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3.3.2 ซึ่งระบบควบคุมจะเป็นดังรูปที่ 4.13

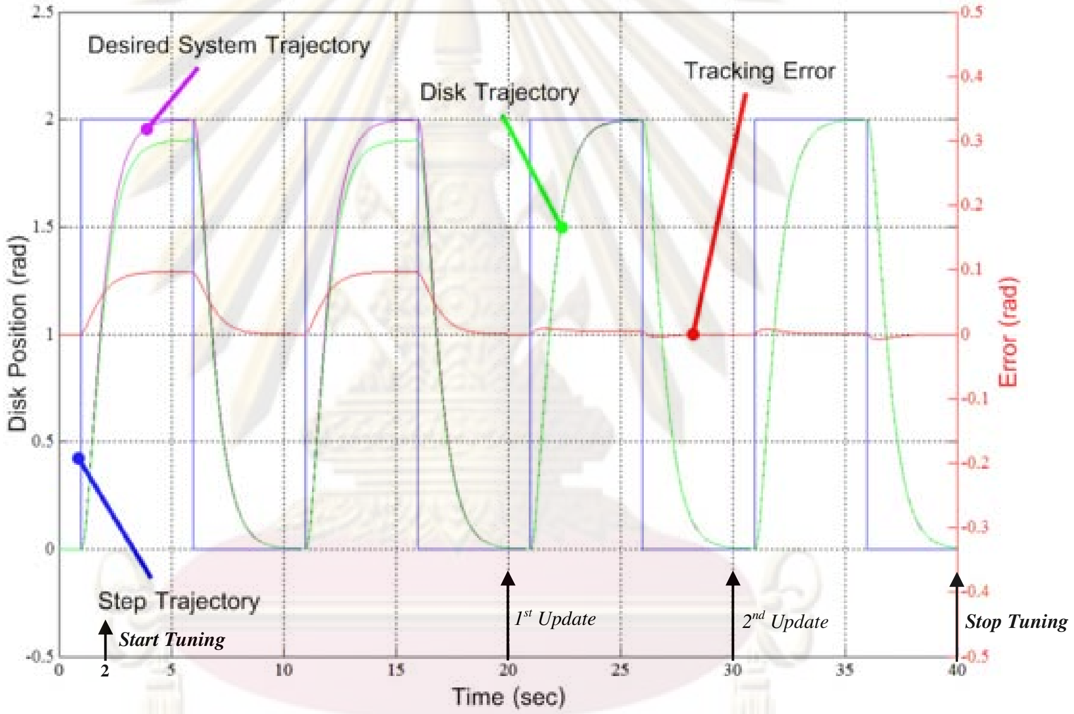


รูปที่ 4.13 แผนภาพการจำลองควบคุมทางเดินของระบบจานหมุนทางกลสำหรับทางเดินอ้างอิงที่มีลักษณะเป็นขั้นบันไดด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้

ทำการจำลองควบคุมที่เวลาสุ่ม 5 มิลลิวินาที ให้เอาต์พุตของระบบติดตามทางเดินอ้างอิงเป็นคลื่นพัลส์รูปสี่เหลี่ยม (Square wave pulse) แอมพลิจูด 2 เรเดียน มีคาบเวลา 10 วินาที ความกว้างพัลส์ (Pulse Width) 5 วินาที มีการหน่วงเฟส (Phase Delay) 1 วินาที และให้เอาต์พุตของระบบเริ่มต้นที่ 0 เรเดียน โดยกำหนดพลวัติของฟังก์ชันถ่ายโอนให้มีค่าเวลาคงที่ $t_c =$ 0.5 วินาที และอัตราส่วนการหน่วง $\xi = 1$ พร้อมทั้งกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวควบคุมเช่นเดียวกับในหัวข้อ 4.4.1.1

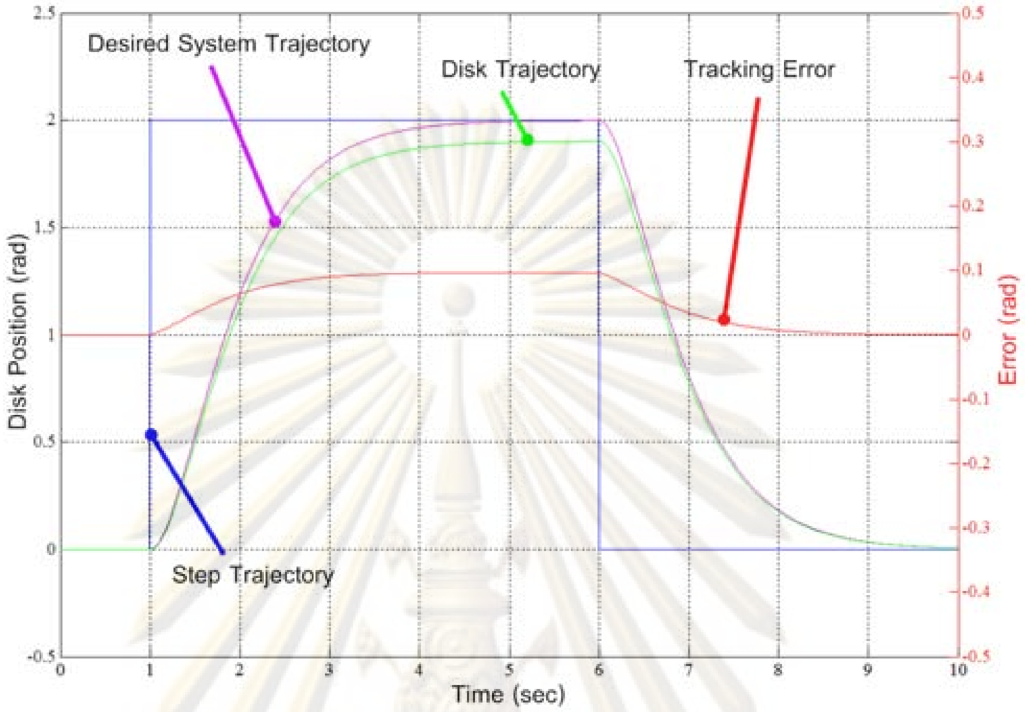
ผลลัพธ์การควบคุมในรูปที่ 4.14 และผลลัพธ์เมื่อชดเชยเวลาหน่วงรูปที่ 4.15 พร้อมทั้งการลู่เข้าของค่า $\hat{F}$ ในรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นถึงความสามารถของตัวควบคุมเช่นเดียวกับการจำลองควบคุมในหัวข้อที่ 4.4.1.1 นั่นคือ ตัวควบคุมสามารถปรับปรุงค่า $\hat{F}$ ให้ลู่

เข้าสู่ค่าจริงได้ ส่งผลให้เอาต์พุตของระบบลู่เข้าสู่ทางเดินอ้างอิง ทำให้ค่าความผิดพลาดของการติดตามทางเดินลดลงจนกระทั่งมีเพียงค่าความผิดพลาดที่เกิดจากเวลาหน่วงเท่านั้น โดยตัวควบคุมสามารถลดค่าความผิดพลาดของการติดตามทางเดินเมื่อชดเชยเวลาหน่วงจะลดลงได้จนกระทั่งต่ำกว่าค่าที่กำหนดในรอบที่ 3 ของการปรับปรุงค่า และทำให้เอาต์พุตของระบบมีการตอบสนองต่อสัญญาณทางเดินอ้างอิงที่มีลักษณะเป็นขั้นบันไดเช่นเดียวกับระบบที่มีพลวัติเท่ากับที่กำหนด



(ก) ผลลัพธ์ที่เวลา 0 ถึง 40 วินาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

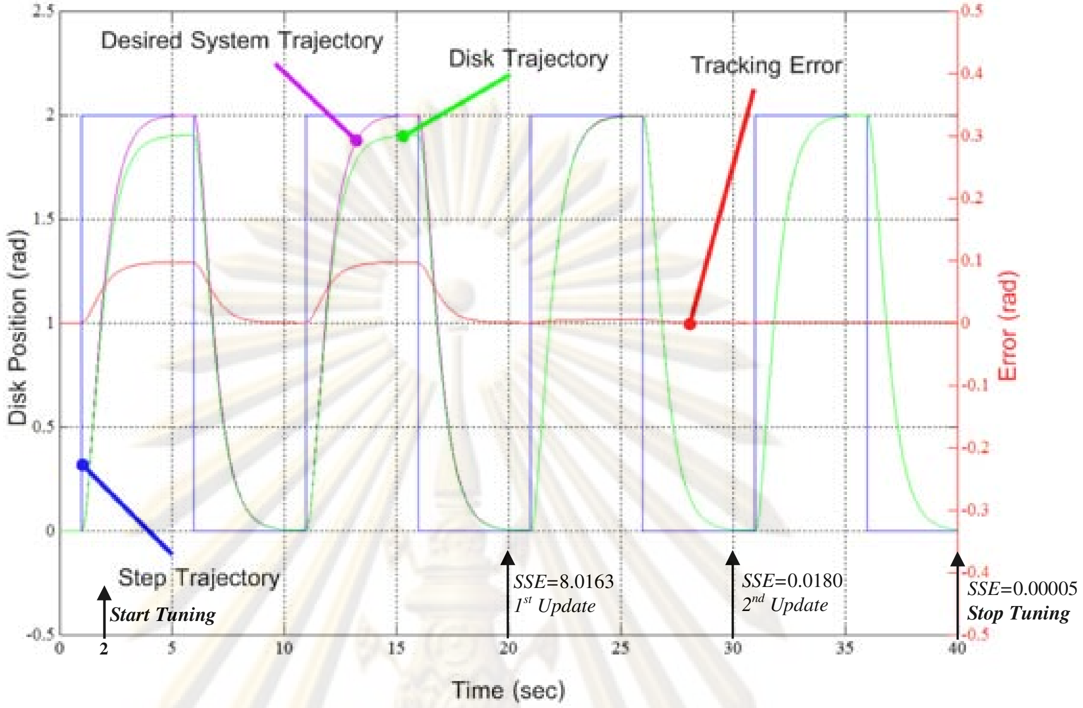


(ข) ผลลัพธ์ที่เวลา 0 ถึง 10 วินาที

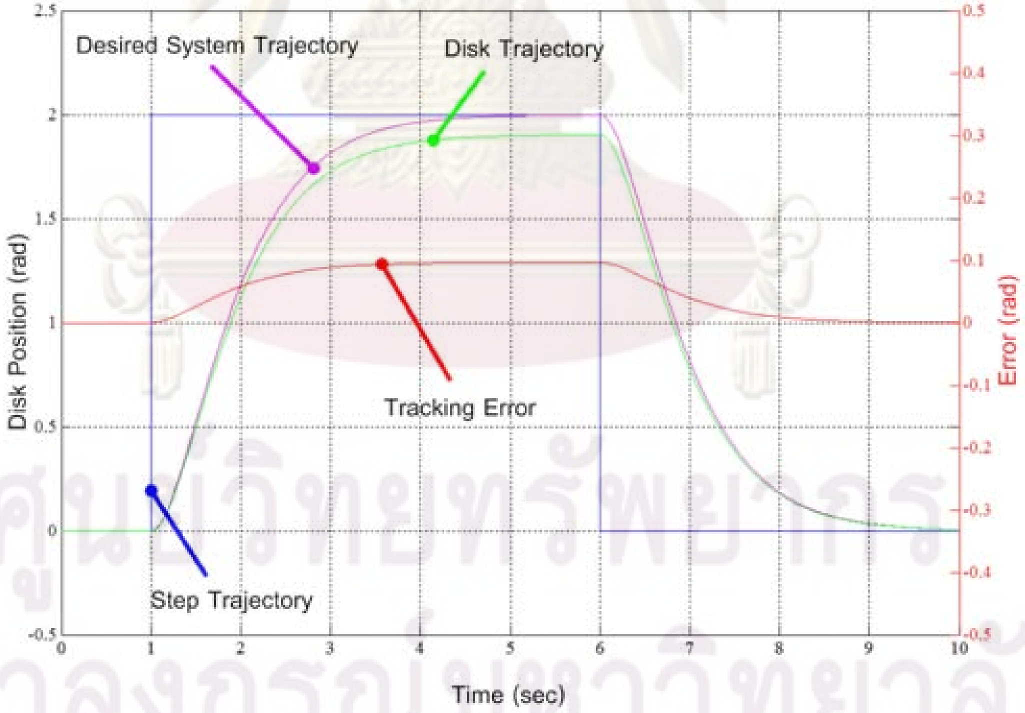
(ค) ผลลัพธ์ที่เวลา 30 ถึง 40 วินาที

รูปที่ 4.14 ผลการจำลองควบคุมระบบจานหมุนให้ติดตามทางเดินรูปคลื่นพัลส์ด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

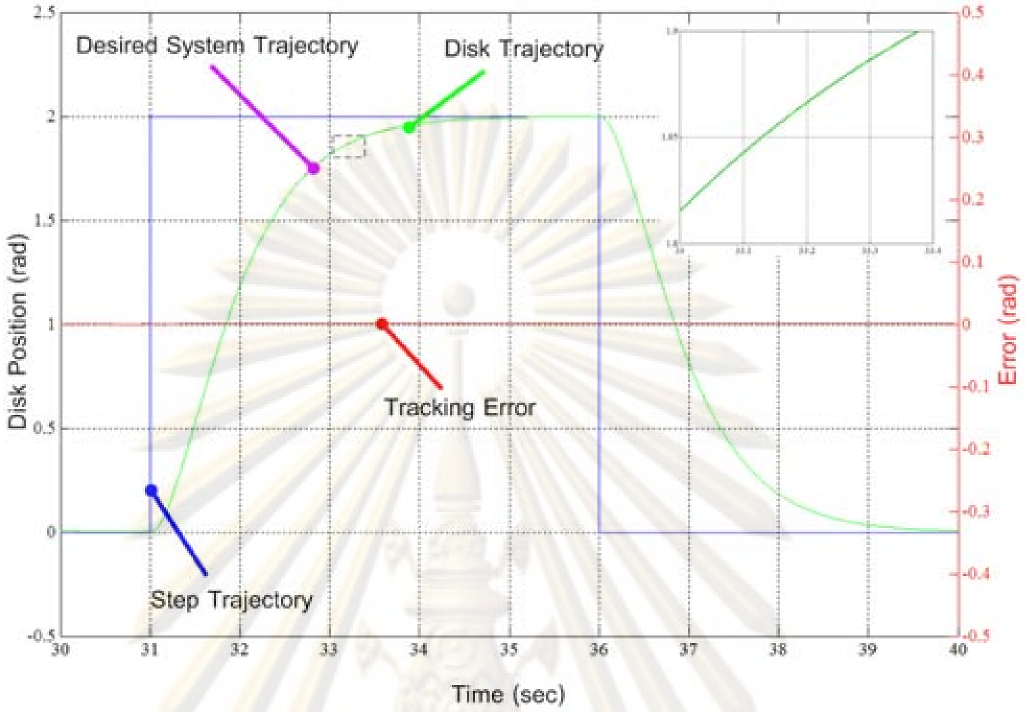


(ก) ผลลัพธ์ที่เวลา 0 ถึง 40 วินาที



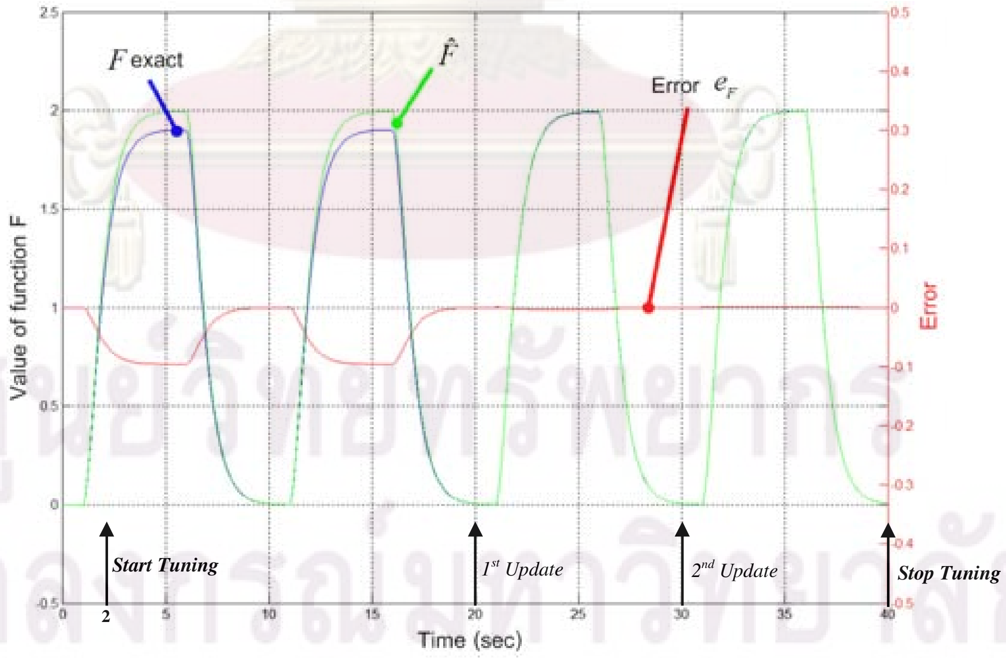
(ข) ผลลัพธ์ที่เวลา 0 ถึง 10 วินาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ค) ผลลัพธ์ที่เวลา 30 ถึง 40 วินาที

รูปที่ 4.15 ผลลัพธ์เมื่อชดเชยเวลาหน่วงของการจำลองควบคุมระบบจานหมุนให้ติดตามทางเดินรูปคลื่นพัลส์ด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้



รูปที่ 4.16 การลู่เข้าของฟังก์ชัน $\hat{F}$ สู่ค่าจริง ในการจำลองควบคุมระบบจานหมุนให้ติดตามทางเดินอ้างอิงรูปคลื่นพัลส์

4.4.2 สรุปผลการจำลองควบคุมด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้

ในกรณีที่ไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ C F_0 และ m ของแบบจำลองของระบบจานหมุน และสัญญาณทางเดินอ้างอิงเป็นฟังก์ชันเป็นคาบ การจำลองทดสอบตัวควบคุมในหัวข้อ 4.4.1.1 และ 4.4.1.2 แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมมีศักยภาพในการปรับปรุงค่า $\hat{F}$ ของแบบจำลองให้ลู่เข้าสู่ค่าจริงได้ ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความผิดพลาดของการติดตามทางเดินลดลง และเอาต์พุตของระบบลู่เข้าสู่ทางเดินอ้างอิงได้ จนกระทั่งความผิดพลาดของการติดตามทางเดินเมื่อชดเชยเวลาหน่วงต่ำกว่าค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ คงเหลือไว้เพียงแต่ความผิดพลาดที่เกิดจากเวลาหน่วง ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองควบคุมในหัวข้อ 4.4.1.1 คือ เอาต์พุตของระบบสามารถติดตามทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่องเป็นซายน์สวีปได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยมีเวลาหน่วงคงที่ และในหัวข้อ 4.4.2.2 เอาต์พุตของระบบมีการตอบสนองกับสัญญาณอ้างอิงแบบไม่ต่อเนื่องมีลักษณะเป็นขั้นบันไดเช่นเดียวกับระบบที่มีพลวัติเท่ากับที่กำหนด นั่นคือตัวควบคุมสามารถปรับค่าเองได้ ทำให้สามารถควบคุมเอาต์พุตของระบบให้ติดตามทางเดินได้อย่างน่าพอใจ โดยไม่จำเป็นต้องทราบแบบจำลองของระบบทั้งหมดล่วงหน้า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การทดลอง

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ และการทดลองควบคุมให้เอาต์พุตของระบบจานหมุนทางกลติดตามทางเดินอ้างอิงด้วยตัวควบคุมที่แปลงระบบควบคุมเป็นระบบเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับชนิดปรับค่าเองได้ โดยการทดลองจะแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นการทดลองควบคุมทางเดินของระบบจานหมุนทางกล ในกรณีที่ทราบแบบจำลองของระบบทั้งหมด นั่นคือตัวควบคุมจะมีเฉพาะส่วนของการแปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับ และส่วนที่สองเป็นการทดลองควบคุมทางเดิน ในกรณีที่ทราบแบบจำลองของระบบบางส่วนหรือมีพารามิเตอร์ของระบบที่ไม่ทราบค่า และสัญญาณทางเดินอ้างอิงเป็นฟังก์ชันเป็นคาบ โดยใช้ตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้

5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- คอมพิวเตอร์โน๊ตบุ๊ค Pentium M 1.5 GHz, 1 GB RAM ทำหน้าที่เป็น Host PC ออกแบบและสร้างตัวควบคุมที่แปลงระบบควบคุมเป็นระบบเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับชนิดปรับค่าเองได้ ด้วยโปรแกรม Matlab® Simulink

- คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล Core2Duo 1.8 GHz, 2 GB RAM ทำหน้าที่เป็น Target PC ควบคุมและรับสัญญาณจากระบบและนำมาประมวลผลหาสัญญาณควบคุมแล้วส่งจึงออกไปควบคุมระบบ โดยใช้เวลาสุ่ม 5 มิลลิวินาที

- โปรแกรม Matlab® xPC Real time Controller หรือ xPC Target ใช้เป็นโปรแกรมกลางเพื่อติดต่อกับอุปกรณ์ต่างๆ และทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม

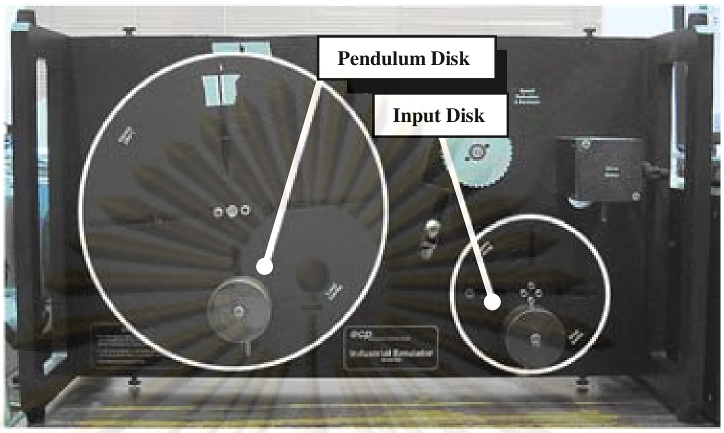
- แผงวงจร Sensoray model 626 ดังแสดงในรูปที่ 5.1 เป็นแผงวงจร Multifunciton Input/Output ติดตั้งภายใน Target PC ใช้เป็น D/A ขับแรงดันขนาด -10 ถึง 10 โวลท์ เพื่อควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ในระบบ มีความละเอียด 13 บิต และใช้สำหรับนับสัญญาณพัลส์จากเอนโค้ดเดอร์ (Encorder) มีความละเอียด 24 บิต จำนวนพัลส์ที่นับได้จะมีขนาดเป็นสี่เท่าของจำนวนพัลส์จริง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

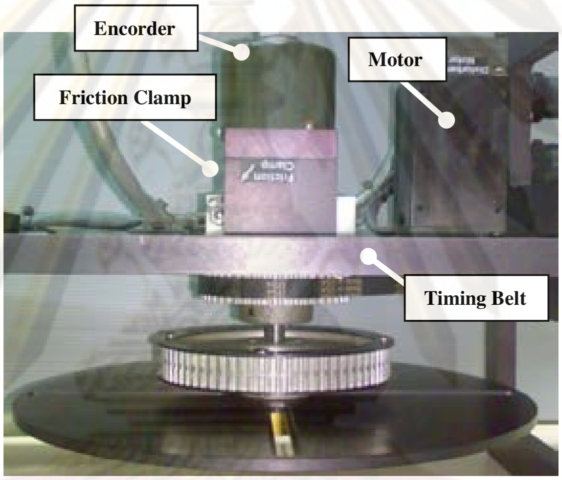
- ชุดทดลองระบบจานหมุนทางกล Educational Control Products (ECP) model 220 ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ชุดทดลองมีกลไกทำให้สามารถปรับโมเมนต์ความเฉื่อย และผลจากแรงโน้มถ่วงได้โดยการติดตุ้มถ่วง รวมไปถึงแรงเสียดทานแบบคุลอมบ์ แรงเสียดทานหนืด นอกจากนี้ยังสามารถจำลอง ความยืดหยุ่น (Drive Flexibility) และแบ็กแล็ช (Blacklash) ชุดทดลองจะประกอบด้วยจานหมุนสองจาน จานหมุนเล็ก (Input Disk) ใช้เป็นอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณตำแหน่งอ้างอิงในเวลาจริง ขณะที่จานหมุนใหญ่ (Pendulum Disk) เป็นจานหมุนที่ต้องการควบคุม โดยมอเตอร์ที่ใช้ขับจานหมุนเป็น ซึ่งใช้เซอร์โวมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปลงถ่าน (Brushless DC Servo Motor) ซึ่งใช้งานร่วมกับเอ็นโค้ดเดอร์ความละเอียด 4000 พัลส์ต่อรอบ และเอนโค้ดเดอร์สำหรับวัดตำแหน่งของจานหมุนเล็ก มีความละเอียด 2500 พัลส์ต่อรอบ ทั้งนี้ชุดทดลองมาพร้อมกับชุดควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปลงถ่าน (Brushless DC Motor Controller)

รูปที่ 5.1 แผงวงจร Sensoray model 626

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

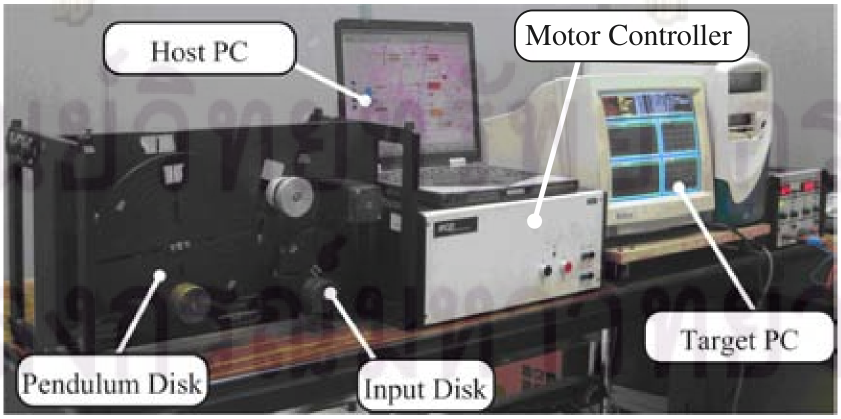


(ก) ระบบทางกล



(ข) รายละเอียดของระบบทางกล

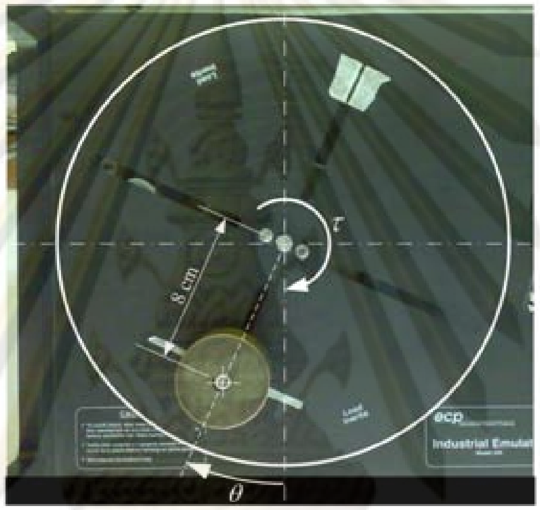
รูปที่ 5.2 ชุดทดลองระบบจานหมุนทางกล ECP model 220



รูปที่ 5.3 ชุดทดลองควบคุมระบบจานหมุนทางกล

5.2 ระบบควบคุมที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองควบคุมทางเดินของระบบจานหมุนทางกล จะใช้จานหมุนใหญ่ในชุดทดลอง ECP model 220 เป็นระบบที่ต้องการควบคุม โดยได้ติดตั้งตุ้มถ่วงทองเหลืองน้ำหนัก 500 กรัม ห่างจากจุดศูนย์กลางของจานหมุนเป็นระยะ 8 เซนติเมตร ดังรูปที่ 5.4 เพื่อสร้างความไม่เป็นเชิงเส้นจากแรงโน้มถ่วง และใช้ Friction Clamp ในการจำลองแรงเสียดทานคูลอมบ์ และแรงเสียดทานหนืด



รูปที่ 5.4 ระบบจานหมุนทางกลที่ต้องการควบคุม

เนื่องจากชุดทดลองได้ผ่านการใช้งานมานาน รวมไปถึงมีการซ่อมแซมในบางส่วน ทำให้ค่าพารามิเตอร์ที่แท้จริงอาจมีการเปลี่ยนแปลงไปจากที่ให้ไว้ในครุภัณฑ์ ดังนั้นจึงทำการหาเอกลักษณ์ของระบบ กับชุดทดลองจริง ซึ่งจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจานหมุนทางกลเป็น

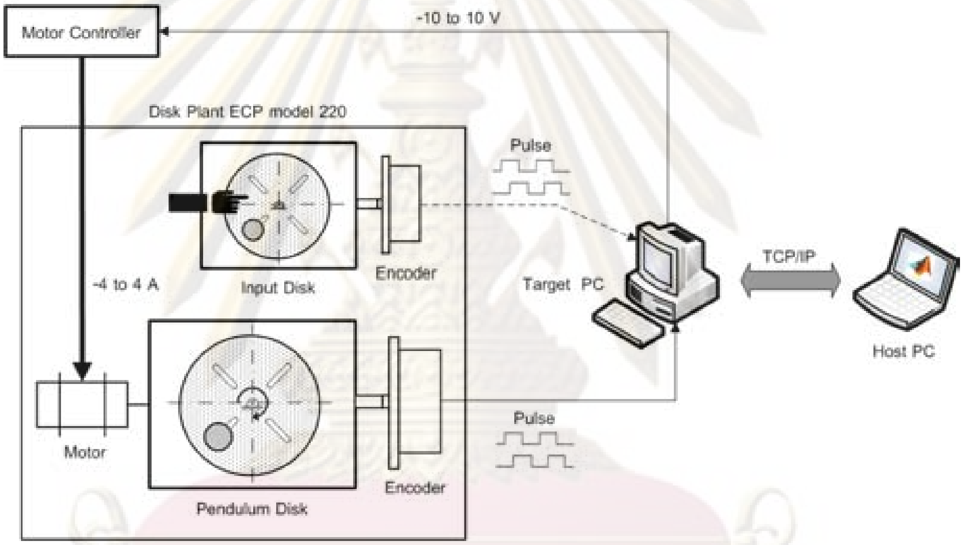
$$0.0232\ddot{\theta} + \operatorname{sgn}\left(\dot{\theta}\right)\left(0.01043\left|\dot{\theta}\right| + 0.2278\right) + 0.8769\sin\left(\theta\right) = u \qquad (4.1)$$

โดยที่ u คือ สัญญาณแรงดันควบคุมที่ให้แก่ชุดควบคุมมอเตอร์

θ คือ ตำแหน่งมุมของจานหมุน (เอาต์พุตที่สนใจ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การควบคุมทางเดินของจานหมุน อินพุตทอร์กหรือแรงบิดของมอเตอร์ถูกควบคุมด้วยชุดควบคุมการขับเคลื่อนภายในชุดทดลอง สัญญาณที่ใช้ในการควบคุมจะมีขนาดระหว่าง -10 ถึง 10 โวลท์ ส่วนตำแหน่งของจานหมุนจะถูกวัดโดยใช้เอนโค้ดเดอร์ สัญญาณที่วัดได้เป็นสัญญาณพัลส์ ซึ่งจะถูกส่งไปยังเครื่อง Target PC เพื่อนำไปคำนวณหาสัญญาณที่จะใช้ควบคุมมอเตอร์ โดยมีแผนผังดังรูปที่ 5.5 และในกรณีที่ใช้จานหมุนเล็กเป็นตัวกำเนิดสัญญาณทางเดินอ้างอิงในเวลาจริง สัญญาณพัลส์จากเอนโค้ดเดอร์ของจานหมุนเล็กจะถูกส่งไปยังเครื่อง Target PC เพื่อนำไปคำนวณหาสัญญาณที่จะใช้ควบคุมมอเตอร์ด้วยเช่นกัน



รูปที่ 5.5 ระบบควบคุมทางเดินของจานหมุนทางกล

ในการควบคุมทานเดินของระบบจานหมุนทางกล ตัวควบคุมที่แปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับจะใช้กฎการควบคุมในสมการ (2.30) ดังนั้นจึงต้องแปลงแบบจำลองของระบบจานหมุนทางกล (4.1) ให้อยู่ในรูปสมการดิฟเฟอร์เรนซ์ ซึ่งสามารถแปลงได้เป็น

$$\begin{aligned}\theta_{k+1} = &-T^2\operatorname{sgn}\left(\theta_k - \theta_{k-1}\right)\left(0.4496\left|\frac{\theta_k - \theta_{k-1}}{T}\right| + 9.8190\right) \\ &- 37.7974T^2\sin\left(\theta_k\right) + 2\theta_k - \theta_{k-1} + 43.1034T^2 u_k\end{aligned} \quad (4.2)$$

โดยที่ T เป็นเวลาสุ่ม สมการ (4.2) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบเดียวกันกับสมการ (2.28)-(2.29) ได้ดังนี้

$$\theta_{k+1} = F\left(\theta_k, \theta_{k-1}\right) + Bu_k \tag{4.3}$$

โดยที่

$$\left.\begin{aligned} F\left(\theta_k, \theta_{k-1}\right) &= -T^2 \operatorname{sgn}\left(\theta_k - \theta_{k-1}\right)\left(0.4496\left|\frac{\theta_k - \theta_{k-1}}{T}\right| + 9.8190\right) \\ &\quad - 37.7974T^2 \sin\left(\theta_k\right) + 2\theta_k - \theta_{k-1} \\ B &= 43.1034T^2 \end{aligned}\right\} \tag{4.4}$$

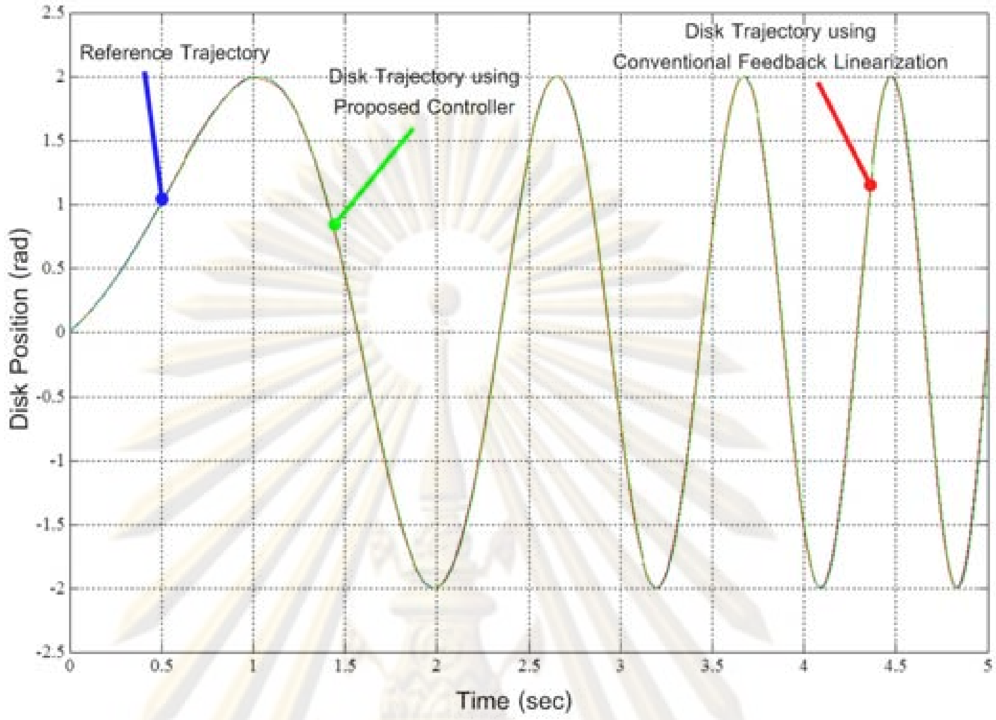
5.3 ผลการทดลองกรณีทราบแบบจำลองของระบบทั้งหมด

ในการทดลองควบคุมทางเดินของระบบจานหมุนทางกลในกรณีที่ทราบแบบจำลองของระบบทั้งหมด จะทำการทดลองสามการทดลอง คือการทดลองควบคุมให้ตำแหน่งของจานหมุนติดตามทางเดินแบบต่อเนื่องเป็นซายน์สวีป การทดลองควบคุมให้ตำแหน่งของจานหมุนติดตามทางเดินแบบต่อเนื่องที่ถูกสร้างขึ้นในเวลาจริงจากจานหมุนเล็ก และการทดลองควบคุมให้เอาต์พุตของระบบมีการตอบสนองต่อสัญญาณทางเดินอ้างอิงแบบไม่ต่อเนื่องเป็นขั้นบันไดตามพลวัติที่กำหนด โดยการทดลองทั้งหมดใช้ตัวควบคุมที่แปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับสำหรับระบบจานหมุนทางกล ซึ่งได้นำเสนอไว้ในหัวข้อ 3.2.2

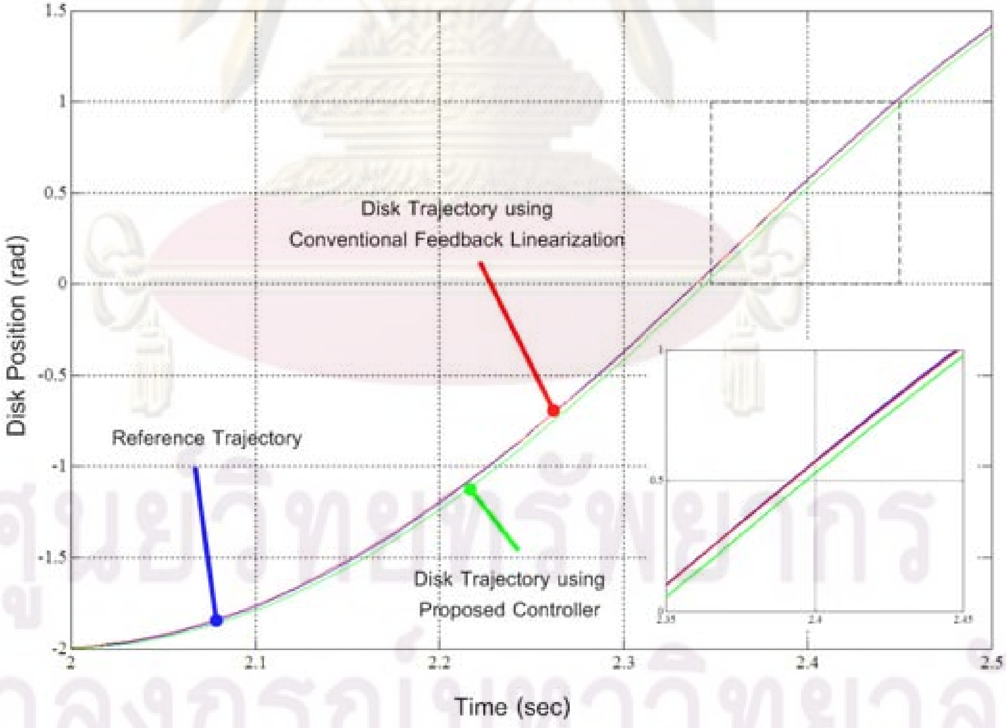
5.3.1 ผลการทดลองควบคุมให้จานหมุนติดตามสัญญาณทางเดินอ้างอิงซายน์สวีป

กำหนดให้สัญญาณทางเดินอ้างอิง เป็นสัญญาณซายน์สวีปความถี่ 0.1-1.5 เฮิรตซ์ ภายในเวลา 5 วินาที มีแอมพลิจูด 2 เรเดียน ทำการควบคุมด้วยตัวควบคุมที่แปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับสำหรับระบบจานหมุนทางกล เปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมที่ใช้การแปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับโดยทั่วไป (Conventional Feedback Linearization) [18] ที่กำหนดพลวัติของความผิดพลาดในสมการ (2.21) ให้มีเวลาคงที่ 0.05 วินาที และอัตราส่วนการหน่วงเท่ากับ 0.7 ได้ผลการควบคุมดังรูปที่ 5.6 และผลลัพธ์เมื่อชดเชยเวลาหน่วงดังรูปที่ 5.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



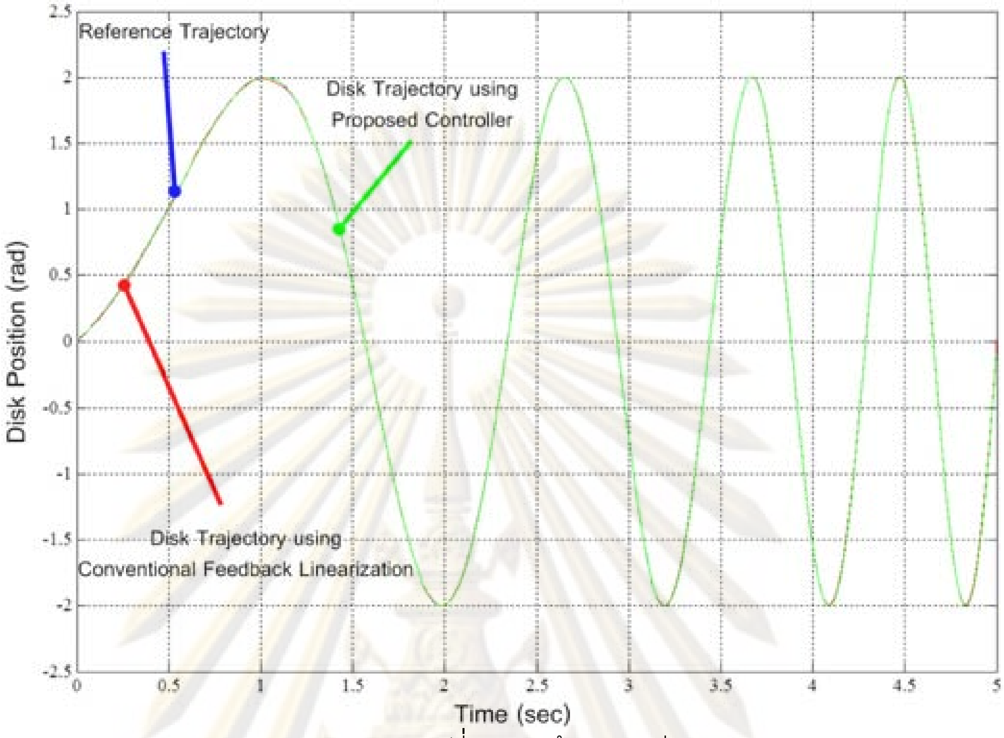
(ก) ผลลัพธ์ที่เวลา 0 ถึง 5 วินาที



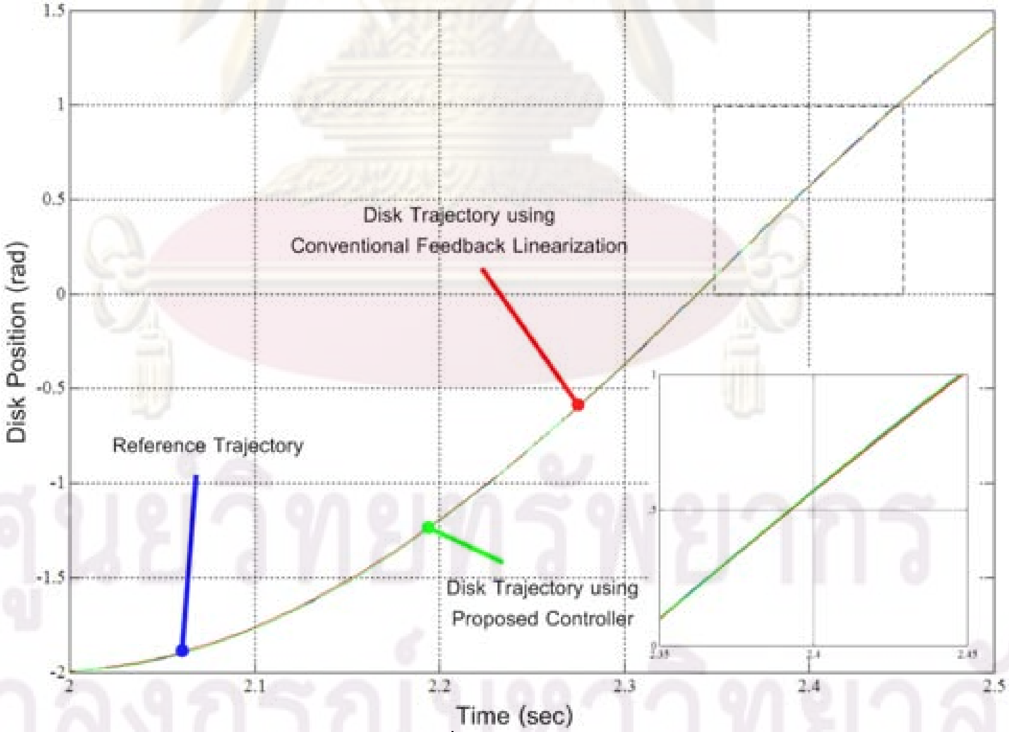
(ข) ผลลัพธ์ที่เวลา 2 ถึง 2.5 วินาที

รูปที่ 5.6 ผลการควบคุมระบบจานหมุนด้วยตัวควบคุมที่นำเสนอ เปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมแบบทั่วไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) ผลลัพธ์ที่เวลา 0 ถึง 5 วินาที



(ข) ผลลัพธ์ที่เวลา 2 ถึง 2.5 วินาที

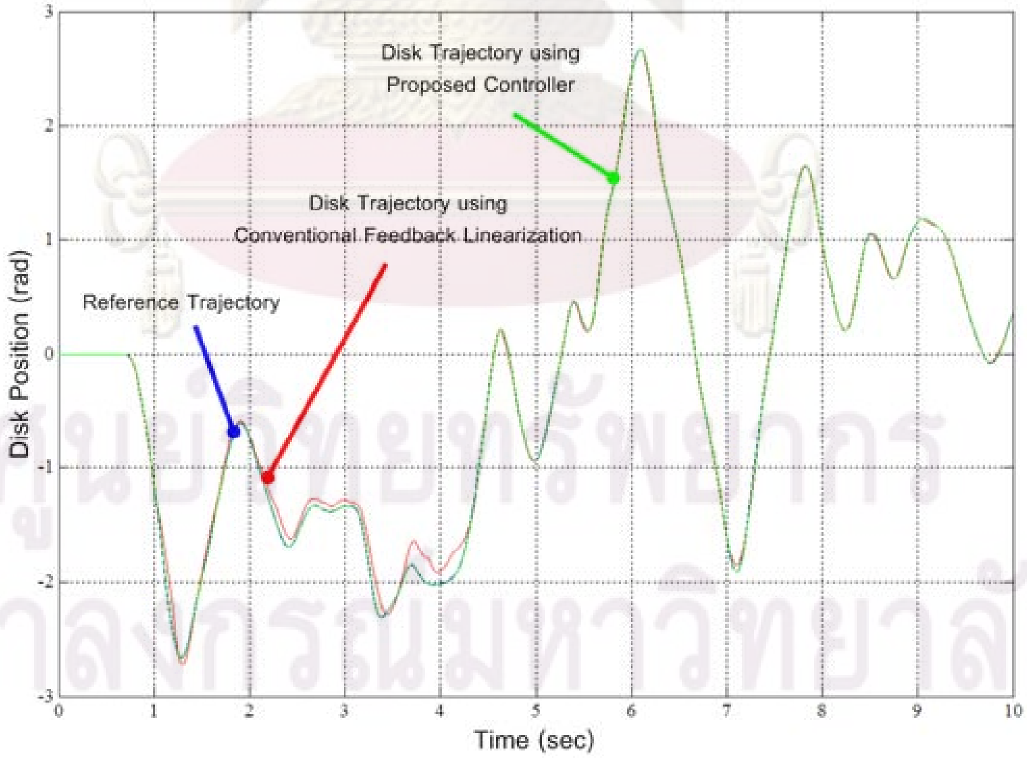
รูปที่ 5.7 ผลลัพธ์เมื่อชดเชยเวลาหน่วงของการควบคุมระบบจานหมุนด้วยตัวควบคุมที่นำเสนอเปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมแบบทั่วไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

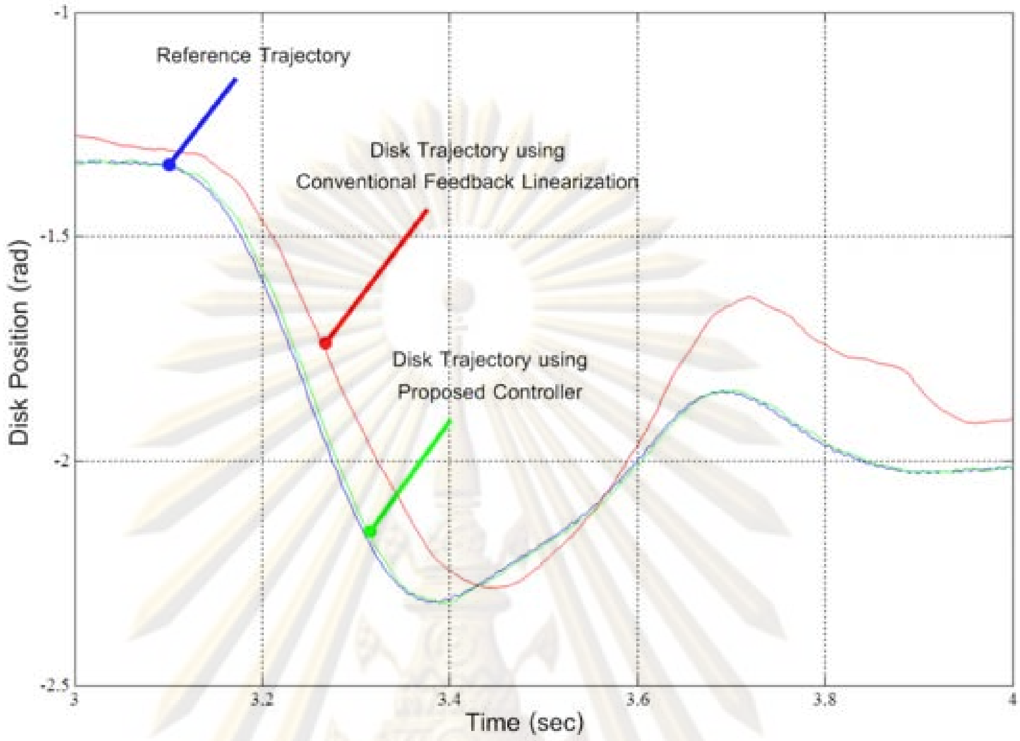
จากผลการทดลองในรูปที่ 5.6 พบว่าตัวควบคุมที่แปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับสำหรับระบบจานหมุนทางกล และวิธีการควบคุมแบบทั่วไปนั้นสามารถควบคุมทางเดินของจานหมุนได้อย่างมีประสิทธิภาพ นั่นคือเอาต์พุตของระบบที่ได้จากตัวควบคุมทั้งสองสามารถติดตามทางเดินอ้างอิงซายน์สวีปได้เป็นอย่างดี โดยในส่วนของเอาพุตต์ที่ได้จากตัวควบคุมที่นำเสนอจะมีเวลาหน่วงคงที่เท่ากับเวลาสุ่มตามที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อ 3.2.2 ซึ่งผลลัพธ์เมื่อชดเชยเวลาหน่วงในรูปที่ 5.7 แสดงให้เห็นว่าเอาต์พุตของระบบสามารถติดตามทางเดินอ้างอิงได้อย่างแม่นยำ

5.3.2 ผลการทดลองควบคุมให้จานหมุนติดตามสัญญาณทางเดินอ้างอิงจากจานหมุนเล็ก

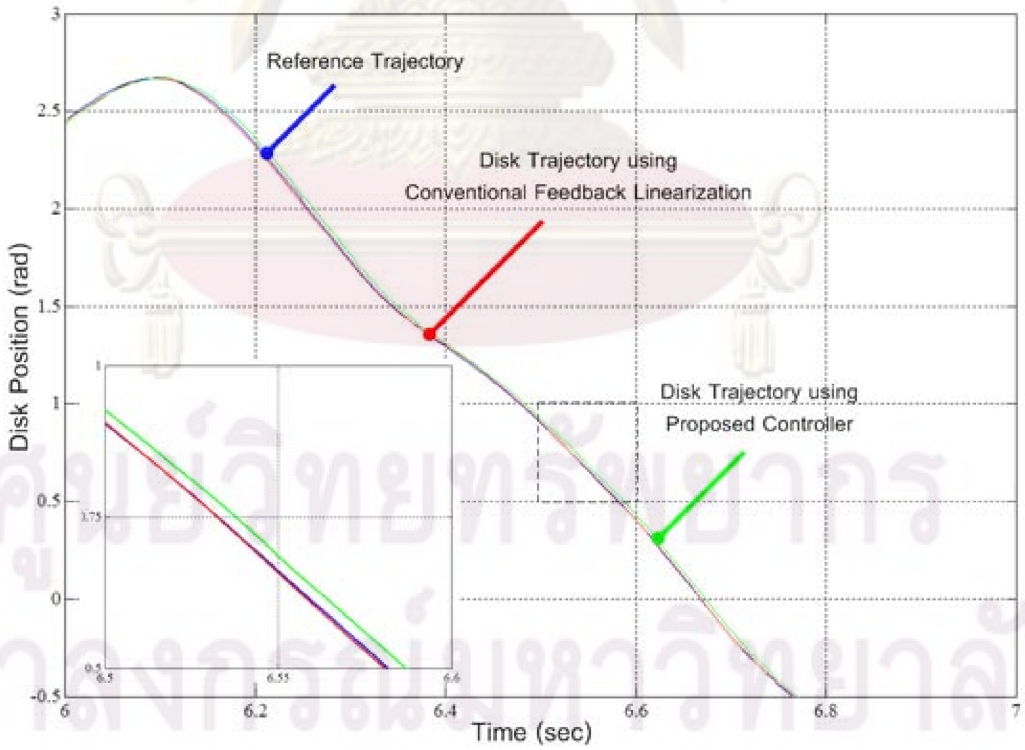
ทำการควบคุมระบบด้วยตัวตัวควบคุมที่แปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับสำหรับระบบจานหมุนทางกล ให้ติดตามสัญญาณทางเดินอ้างอิงที่ได้จากจานหมุนเล็ก ซึ่งเป็นการควบคุมในลักษณะ มาสเตอร์-สเลฟ (Master-Slave Control) โดยทำการควบคุมจานหมุนไปตามการหมุนของจานหมุนเล็กที่ถูกหมุนด้วยมือ เปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมแบบทั่วไปเช่นเดียวกับในหัวข้อ 5.3.1 ได้ผลการควบคุมดังรูปที่ 5.8 และผลลัพธ์เมื่อชดเชยเวลาหน่วงดังรูปที่ 5.9



(ก) ผลลัพธ์ที่เวลา 0 ถึง 10 วินาที

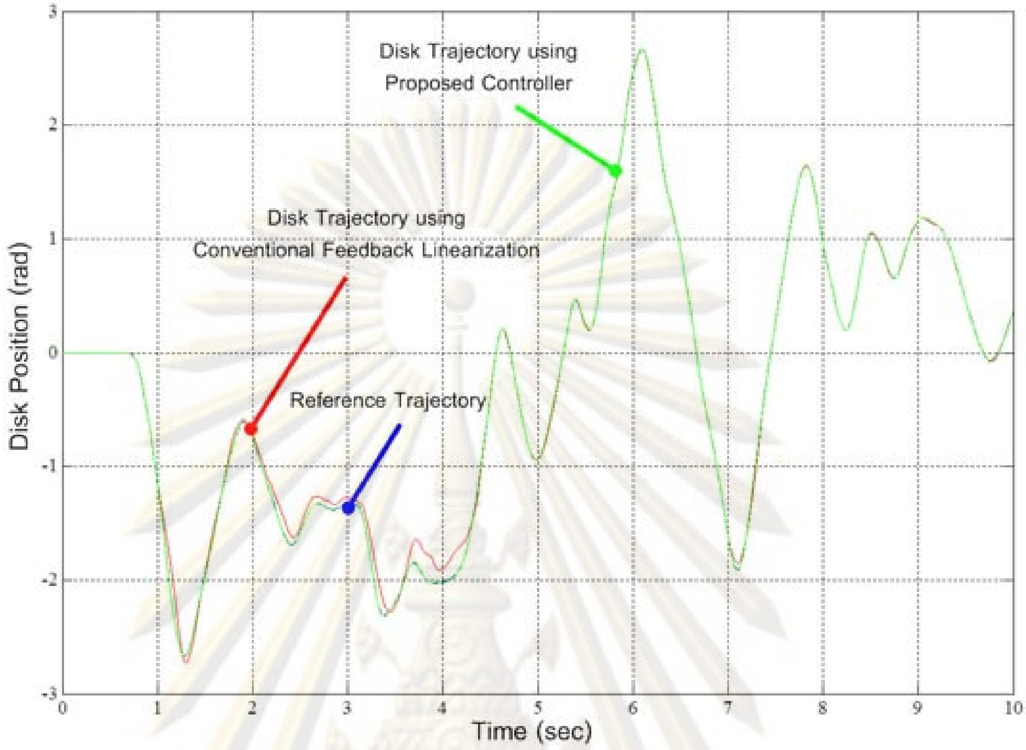


(ข) ผลลัพธ์ที่เวลา 3 ถึง 4 วินาที

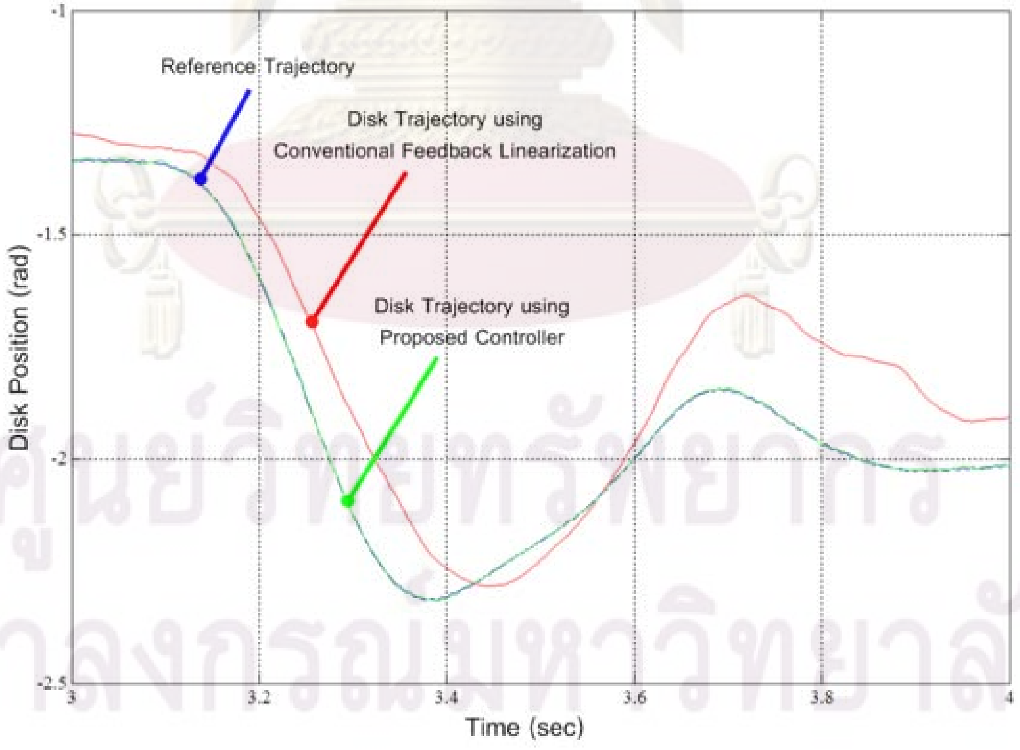


(ค) ผลลัพธ์ที่เวลา 6 ถึง 7 วินาที

รูปที่ 5.8 ผลการควบคุมให้จานหมุนติดตามสัญญาณอ้างอิงจากจานหมุนเล็ก

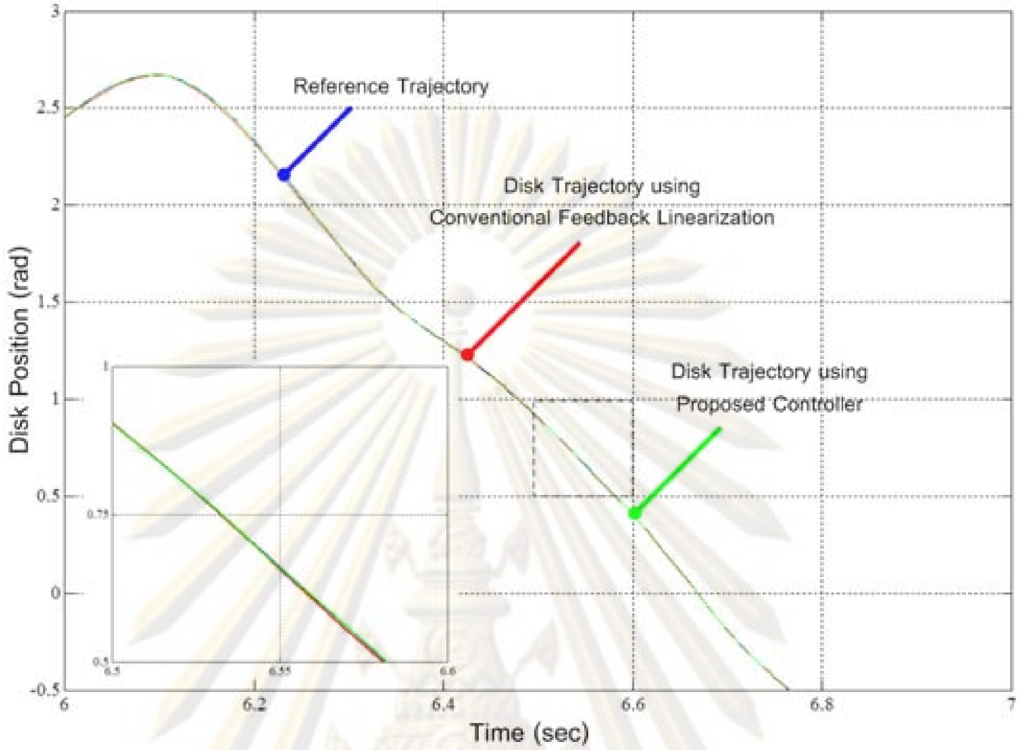


(ก) ผลลัพธ์ที่เวลา 0 ถึง 10 วินาที



(ข) ผลลัพธ์ที่เวลา 3 ถึง 4 วินาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



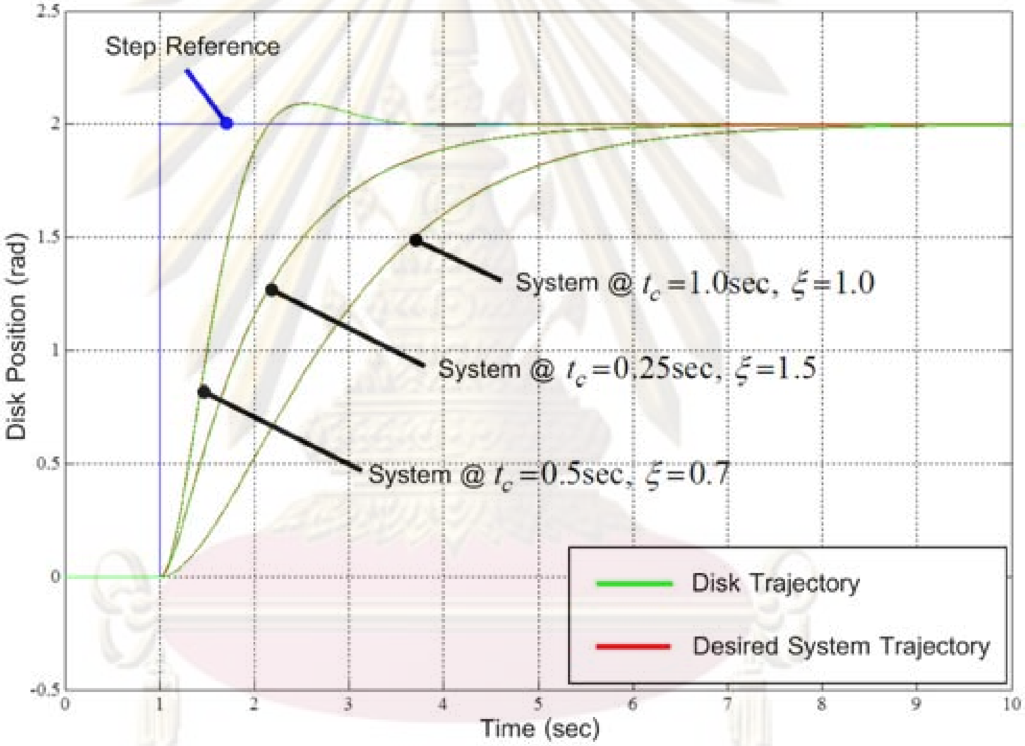
(ค) ผลลัพธ์ที่เวลา 6 ถึง 7 วินาที

รูปที่ 5.9 ผลลัพธ์เมื่อชดเชยเวลาหน่วงของการควบคุมให้จานหมุนติดตามสัญญาณอ้างอิงจากจานหมุนเล็ก

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.8 และ 5.9 พบว่าตัวควบคุมที่แปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับสำหรับระบบจานหมุนทางกลสามารถควบคุมเอาต์พุตของระบบให้ติดตามสัญญาณอ้างอิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่เอาต์พุตที่ได้จากวิธีการควบคุมที่แปลงระบบควบคุมให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับแบบทั่วไปมีความคลาดเคลื่อนจากสัญญาณอ้างอิงเกิดขึ้นในช่วงที่สัญญาณอ้างอิงมีการสั่นหรือมีสัญญาณรบกวน (รูปที่ 5.8ข และ 5.9ข) เนื่องจากวิธีการควบคุมแบบทั่วไปนั้นจำเป็นต้องนำอนุพันธ์อันดับหนึ่งและอันดับสองของสัญญาณอ้างอิงมาใช้คำนวณสัญญาณควบคุม แต่สำหรับตัวควบคุมที่นำเสนอนั้นไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลดังกล่าว และในกรณีที่สัญญาณอ้างอิงเรียบหรือไม่มีสัญญาณรบกวน วิธีการควบคุมแบบทั่วไปยังคงสามารถควบคุมทางเดินของจานหมุนได้เป็นอย่างดี (รูปที่ 5.8ค และ 5.9ค) นอกจากนี้ผลการทดลองที่ได้ยังแสดงถึงศักยภาพของตัวควบคุมที่นำเสนอเช่นเดียวกับผลการทดลองในหัวข้อ 5.3.1 นั่นคือเอาต์พุตที่ได้จากตัวควบคุมที่นำเสนอสามารถติดตามทางเดินอ้างอิงได้อย่างแม่นยำโดยมีเวลาหน่วงคงที่เท่ากับเวลาสุ่ม

5.3.3 ผลการทดลองควบคุมให้จานหมุนมีการตอบสนองตามพลวัติที่กำหนด

ทดลองควบคุมให้เอาต์พุตของระบบจานหมุนทางกลติดตามทางเดินอ้างอิงที่มีลักษณะไม่ต่อเนื่องมีลักษณะเป็นขั้นบันได (Step trajectory) ขนาด 2 เรเดียน พร้อมทั้งปรับสัญญาณทางเดินอ้างอิงให้มีลักษณะเป็นสัญญาณแบบต่อเนื่องที่มีพลวัติตามที่ต้องการ โดยกำหนดพลวัติของฟังก์ชันถ่ายโอนให้มีค่าเวลาคงที่และอัตราส่วนการหน่วงต่างกัน เป็น (1) t_c = 0.5 วินาที ξ = 0.7 (2) t_c = 0.25 วินาที ξ = 1.5 และ (3) t_c = 1 วินาที ξ = 1 ตามลำดับ ได้ผลการควบคุมดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 ผลการควบคุมให้ระบบจานหมุนทางกลติดตามทางเดินแบบขั้นบันไดโดยกำหนดพลวัติของฟังก์ชันถ่ายโอนแบบต่างๆ

จากผลการควบคุมรูปที่ 5.10 แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมสามารถรับมือกับสัญญาณอ้างอิงที่มีลักษณะเป็นขั้นบันไดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว (Steady State Error) เท่ากับ 0.002 เรเดียน 0.005 เรเดียน และ 0.007 เรเดียน ตามลำดับ นั่นคือเอาต์พุตมีการตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันไดเช่นเดียวกับระบบที่มีพลวัติเท่ากับที่กำหนด หรือเอาต์พุตสามารถติดตามทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่องที่มีพลวัติเท่ากับที่กำหนดได้นั่นเอง

5.3.4 สรุปการทดลองควบคุมระบบจานหมุนในกรณีที่ทราบแบบจำลองของระบบทั้งหมด

ในกรณีที่ทราบแบบจำลองของระบบจานหมุนทางกลทั้งหมด ผลการทดลองในหัวข้อ 5.3.3 และ 5.3.4 แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของตัวควบคุมที่นำเสนอ นั่นคือตัวควบคุมสามารถชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้น และพลวัติของระบบจานหมุนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้สามารถควบคุมเอาต์พุตของระบบให้ติดตามทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่องได้อย่างแม่นยำโดยมีเวลาหน่วงคงที่เท่ากับเวลาสุ่ม

อีกทั้งตัวควบคุมที่นำเสนอนั้นมีความเหมาะสมกับการควบคุมในลักษณะมาสเตอร์-สเลฟ ซึ่งสัญญาณอ้างอิงจะถูกสร้างขึ้นในเวลาจริง และสัญญาณอ้างอิงอาจมีการสั่นหรือมีสัญญาณรบกวน ทำให้วิธีการควบคุมที่แปลงระบบควบคุมให้เป็นเชิงเส้นโดยทั่วไปให้ผลการควบคุมไม่เป็นที่น่าพอใจ ในขณะที่ตัวควบคุมที่นำเสนอยังคงสามารถควบคุมทางเดินของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้อนุพันธ์อันดับหนึ่งแลอันดับสองของสัญญาณอ้างอิงในการคำนวณสัญญาณควบคุม

นอกจากนี้ตัวควบคุมที่แปลงระบบควบคุมให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับสำหรับระบบจานหมุนทางกล ยังสามารถรับมือกับสัญญาณทางเดินอ้างอิงแบบไม่ต่อเนื่องมีลักษณะเป็นขั้นบันได โดยให้สัญญาณอ้างอิงผ่านฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีพลวัติเท่ากับที่กำหนด เพื่อปรับสัญญาณอ้างอิงให้มีลักษณะเป็นสัญญาณแบบต่อเนื่อง ทำให้ผลตอบสนองมีพลวัติตามที่ต้องการได้ ซึ่งวิธีการนี้จะส่งผลให้ระบบควบคุมมีพลวัติเท่ากับที่กำหนดแทน

5.4 ผลการทดลองที่สองกรณีทราบแบบจำลองของระบบบางส่วน

การทดลองควบคุมทางเดินของระบบจานหมุนทางกลเมื่อทราบแบบจำลองของระบบบางส่วน ในกรณีที่ทราบเฉพาะสัมประสิทธิ์ของเทอม $\ddot{\theta}$ ในสมการ (4.1) และไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ a^* b^* และ c^* ของแบบจำลองของระบบจานหมุน ดังสมการ (4.5)

$$0.0232\ddot{\theta} + \operatorname{sgn}\left(\dot{\theta}\right)\left(a^*\left|\dot{\theta}\right| + b^*\right) + c^*\sin\left(\theta\right) = u \tag{4.5}$$

สมการ (4.5) จะสามารถแปลงให้อยู่ในรูปสมการดิฟเฟอร์เรนซ์ได้เป็น

$$\theta_{k+1} = \hat{F}\left(\theta_k, \theta_{k-1}\right) + Bu_k \tag{4.6}$$

โดยที่

$$\left.\begin{aligned}\hat{F}\left(\theta_k,\theta_{k-1}\right) &= -\frac{T^2}{0.0232}\operatorname{sgn}\left(\theta_k-\theta_{k-1}\right)\left(a^*\left|\frac{\theta_k-\theta_{k-1}}{T}\right|+b^*\right)\\ &\qquad -\frac{T^2}{0.0232}c^*\sin\left(\theta_k\right)+2\theta_k-\theta_{k-1}\\ B &= 43.1034T^2\end{aligned}\right\} \qquad (4.7)$$

ซึ่งหมายถึงเราทราบฟังก์ชันคงที่ B และกำหนดให้ทางเดินอ้างอิงที่ต้องการมีลักษณะเป็นฟังก์ชันเป็นคาบ จะใช้ตัวควบคุมชนิดค่าเองได้ที่นำเสนอไว้ในบทที่ 4 โดยทำการทดลองสามการทดลอง คือการทดลองควบคุมให้ตำแหน่งของจานหมุนติดตามทางเดินแบบต่อเนื่องเป็นซายน์สวีป การทดลองควบคุมให้ตำแหน่งของจานหมุนติดตามทางเดินแบบต่อเนื่องใดๆ ซึ่งถูกสร้างจากจานหมุนเล็ก และการทดลองควบคุมให้เอาต์พุตของระบบมีการตอบสนองต่อสัญญาณทางเดินอ้างอิงแบบไม่ต่อเนื่องเป็นคลื่นพัลส์รูปสี่เหลี่ยมตามพลวัติที่กำหนด

5.4.1 ผลการทดลองควบคุมให้จานหมุนติดตามสัญญาณทางเดินอ้างอิงซายน์สวีป

กำหนดให้สัญญาณทางเดินอ้างอิงที่ต้องการเป็นฟังก์ชันเป็นคาบซายน์สวีป มีคาบเวลา 10 วินาที ความถี่ 0.1-0.5 เฮิรตซ์ ภายในเวลา 10 วินาที เฟสเริ่มต้นที่ 0 เรเดียน มีแอมพลิจูดเป็นฟังก์ชันซายน์แบบเต็มคลื่นขนาด 2.5 เรเดียน ความถี่ 0.1π เฮิรตซ์ และให้เอาต์พุตของระบบเริ่มต้นที่ 0 เรเดียน

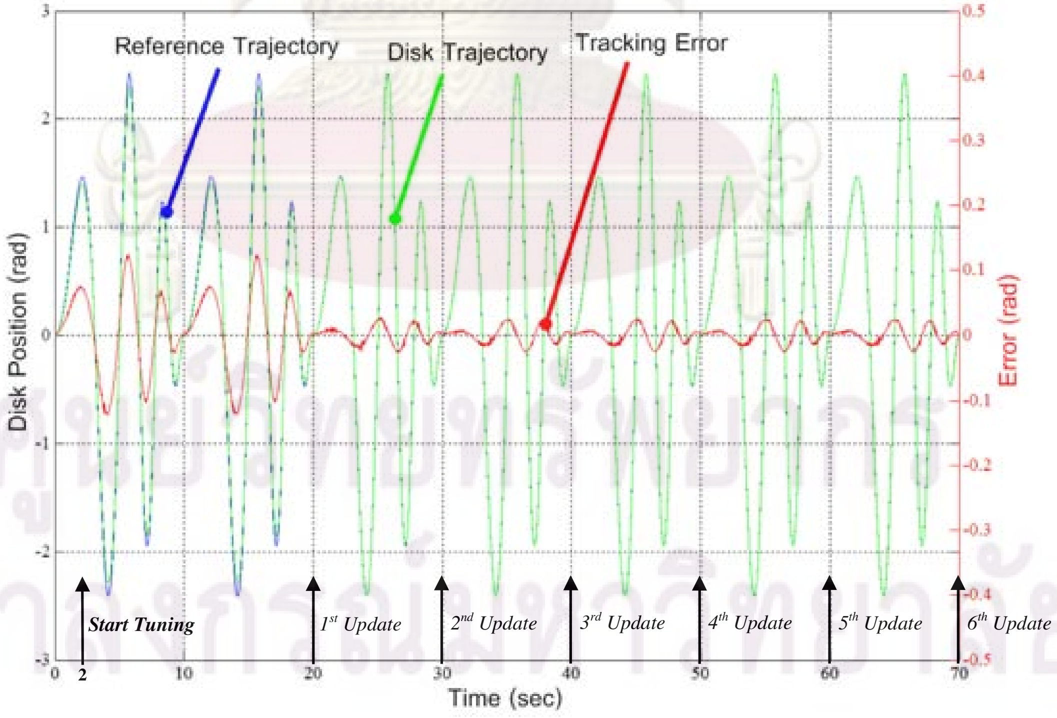
โดยกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้ดังต่อไปนี้

- กำหนดให้ตารางค้นหามีขนาด 201 จุดข้อมูล เริ่มตั้งแต่ 0 ถึง 10 วินาที ซึ่งจะมีช่องว่าง (Gab) ระหว่างจุดข้อมูลเป็น 0.05 วินาที และกำหนดความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ Δt เท่ากับ 0.05 วินาที เช่นกัน
- กำหนดค่าเริ่มต้นของฟังก์ชัน $\hat{e}_{F,t_j}\left(0\right)=0$ ในตารางค้นหาของแบบจำลอง และค่าเริ่มต้นสำหรับของวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำในทุกจุดข้อมูลคือ $n\left(0\right)=0$
- กำหนดให้พารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า $a^*=b^*=c^*=0$ จะได้ค่าเริ่มต้นของฟังก์ชัน $\hat{F}\left(\theta_k,\theta_{k-1}\right)=2\theta_k-\theta_{k-1}$ สำหรับตัวควบคุม

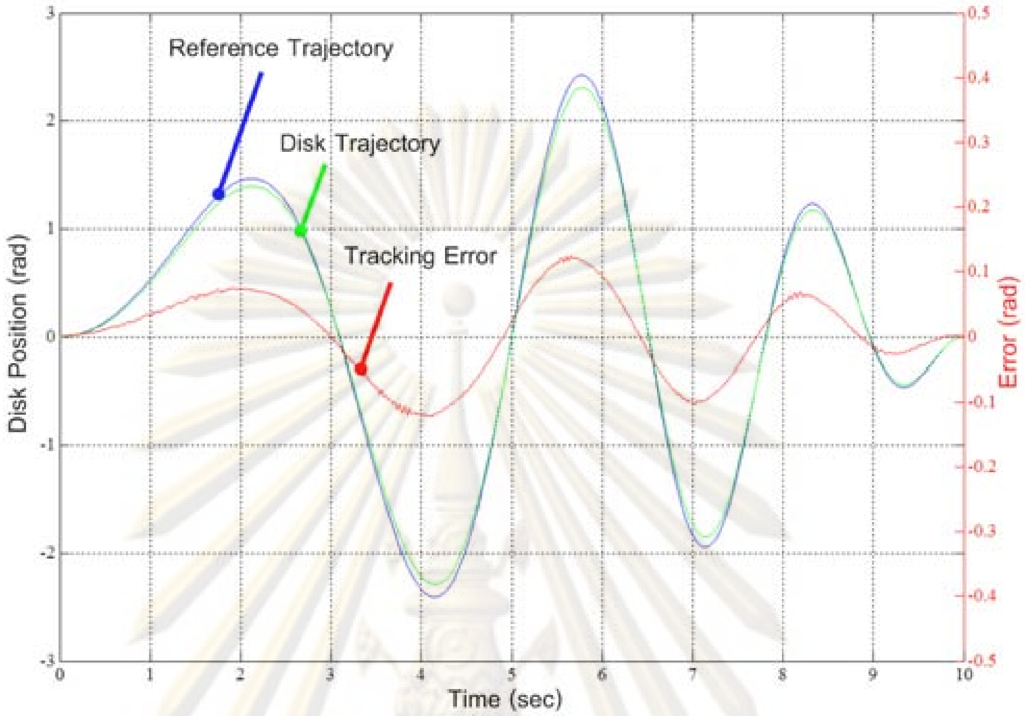
- กำหนดรอบเวลาของการปรับปรุงค่าในรอบแรกที่เวลา 20 วินาที และทุก 10 วินาที สำหรับรอบต่อไป

- กำหนดให้ผลรวมค่าผิดพลาดในการติดตามทางเดินกำลังสองเมื่อชดเชยเวลาหน่วงที่ยอมรับได้เพื่อหยุดการปรับปรุงค่า ε เท่ากับ 0.002 (ค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 0.001 เรเดียน)

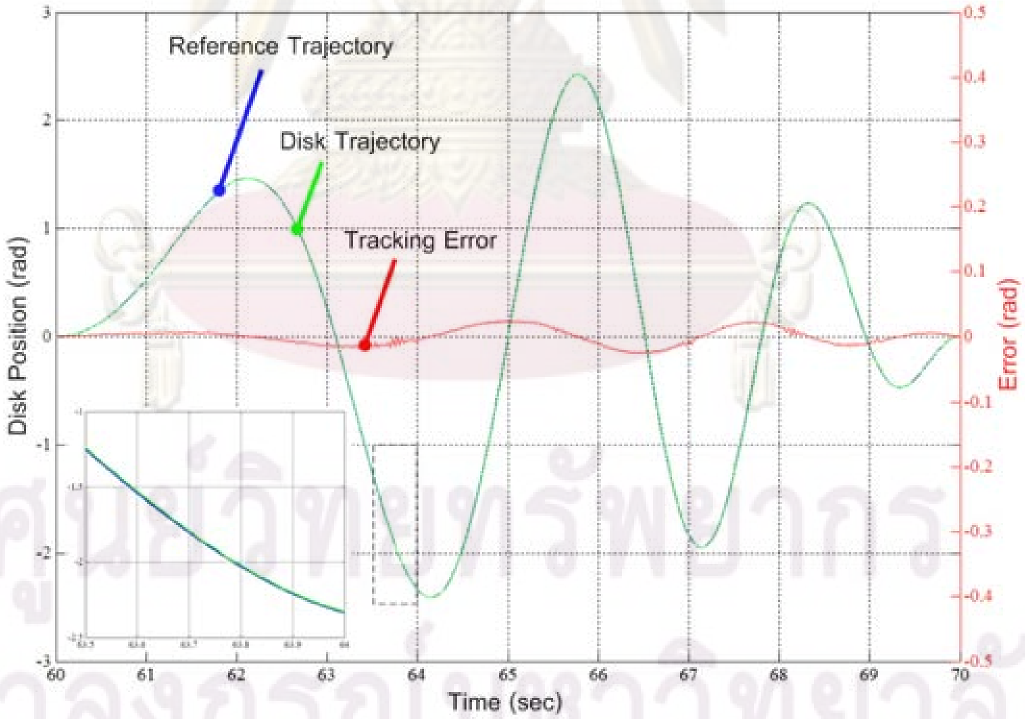
ผลการควบคุมรูปที่ 5.11 และผลลัพธ์เมื่อชดเชยเวลาหน่วงรูปที่ 5.12 ชี้ให้เห็นว่าเอาต์พุตของระบบจะลู่เข้าสู่ทางเดินอ้างอิง ทำให้ค่าความผิดพลาดของการติดตามทางเดินลดลงจนกระทั่งมีเพียงค่าความผิดพลาดที่เกิดจากเวลาหน่วงเท่านั้น ทั้งนี้การลู่เข้าของฟังก์ชัน $\hat{F}$ ในรูปที่ 5.13 แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมสามารถปรับปรุงค่า $\hat{F}$ ให้ลู่เข้าสู่ค่าจริงได้ ส่งผลให้ค่าความผิดพลาดของการติดตามทางเดินลดลง อย่างไรก็ตามตัวควบคุมไม่สามารถลดค่าความผิดพลาดของการติดตามทางเดินเมื่อชดเชยเวลาหน่วงลงต่ำกว่าค่าที่กำหนดได้ แต่จะลดลงมาต่ำสุดที่ประมาณ 0.0029 ซึ่งก็เพียงพอต่อการควบคุมทางเดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ นั่นคือสามารถควบคุมให้เอาต์พุตของระบบติดตามทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่องเป็นซายน์สวีปเป็นอย่างดีโดยมีเวลาหน่วงคงที่



(ก) ผลลัพธ์ที่เวลา 0 ถึง 70 วินาที



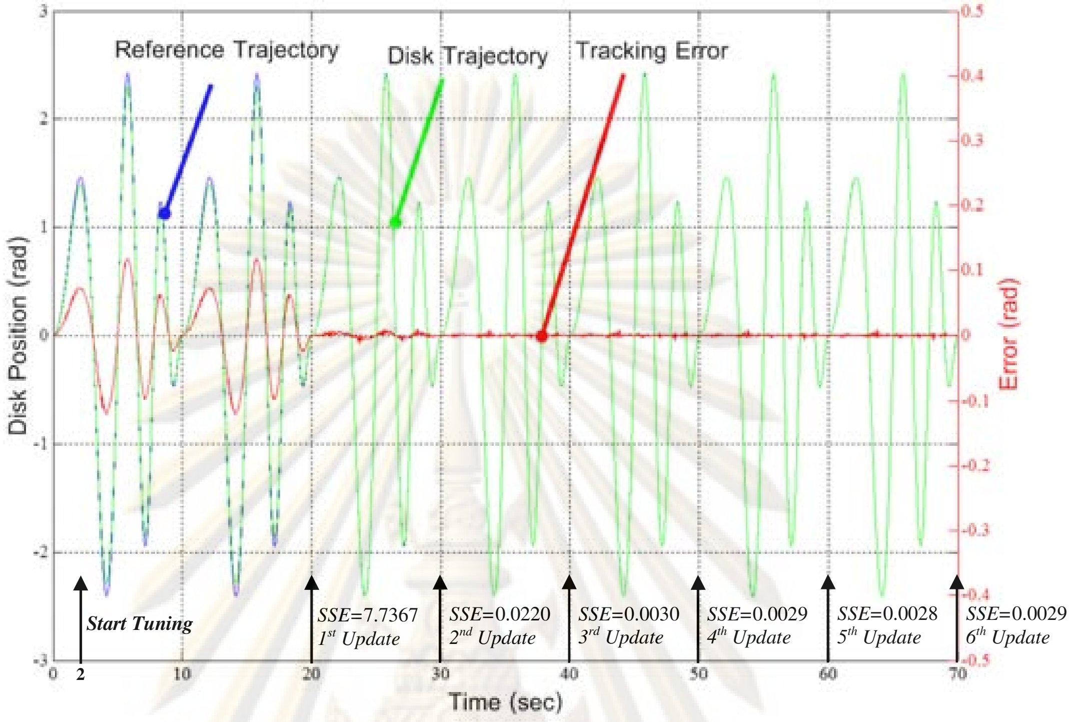
(ข) ผลลัพธ์ที่เวลา 0 ถึง 10 วินาที



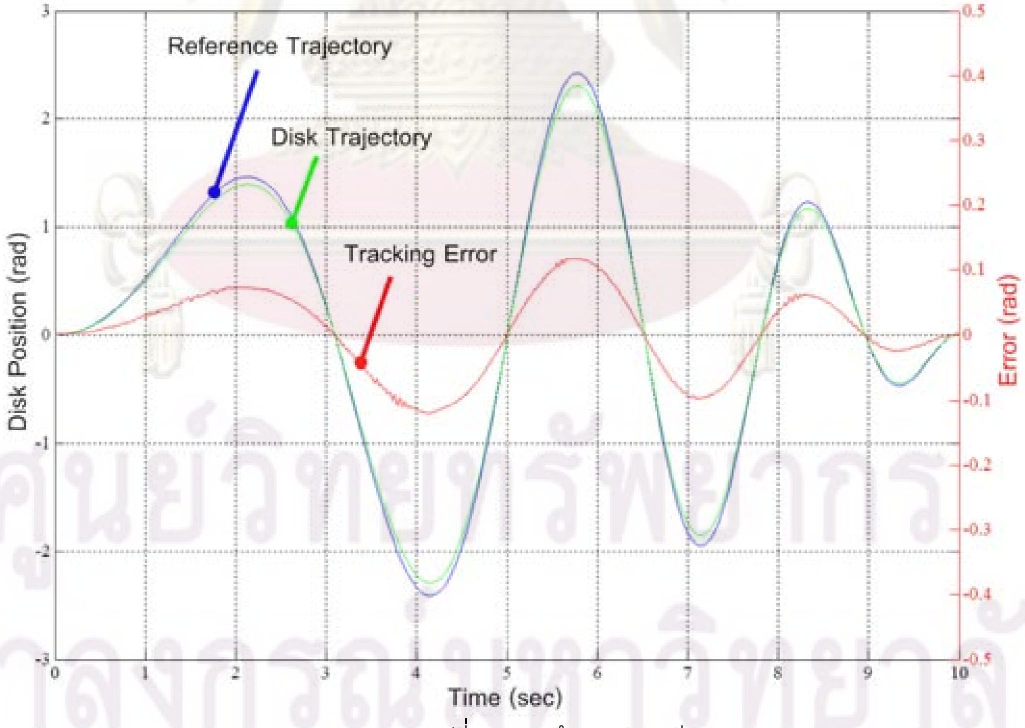
(ค) ผลลัพธ์ที่เวลา 60 ถึง 70 วินาที

รูปที่ 5.11 ผลการควบคุมให้ระบบจานหมุนติดตามทางเดินอ้างอิงซายน์สวีปด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

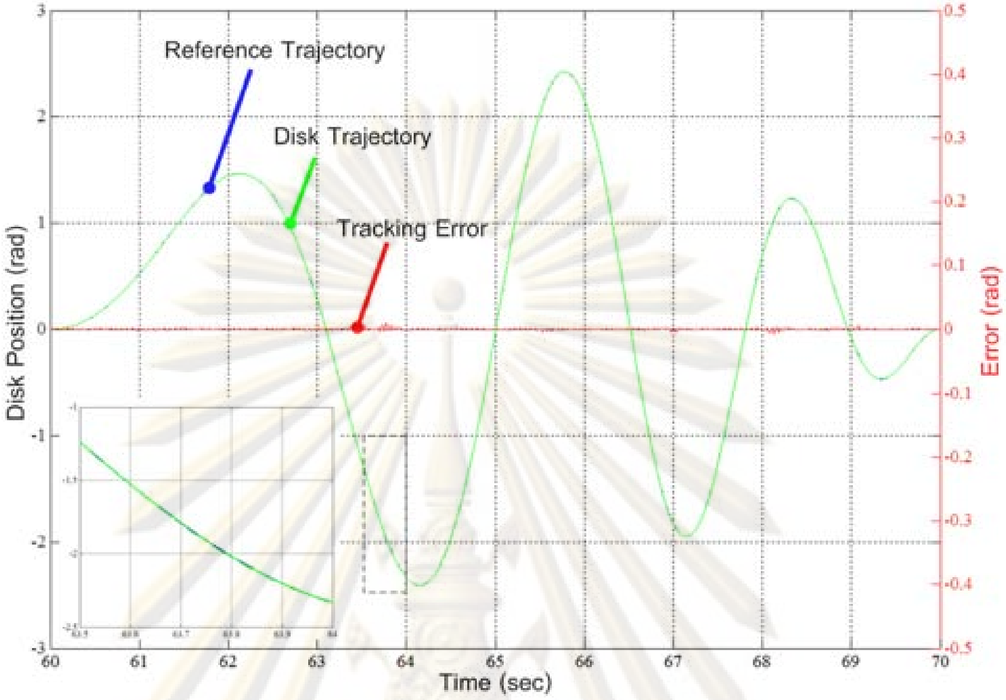


(ก) ผลลัพธ์ที่เวลา 0 ถึง 70 วินาที



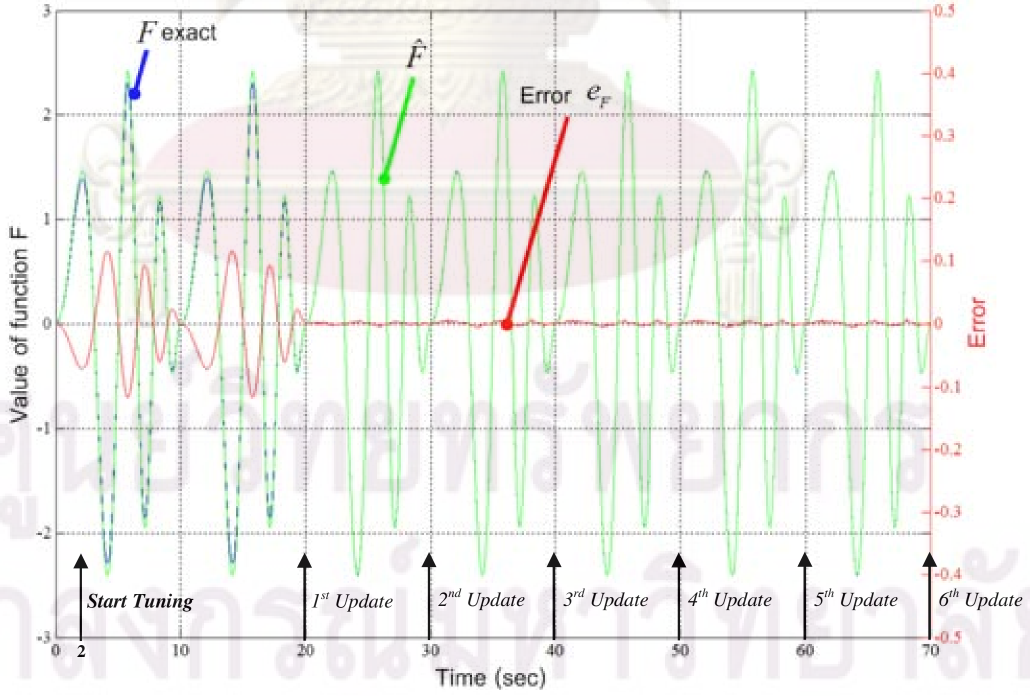
(ข) ผลลัพธ์ที่เวลา 0 ถึง 10 วินาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ค) ผลลัพธ์ที่เวลา 60 ถึง 70 วินาที

รูปที่ 5.12 ผลลัพธ์เมื่อชดเชยเวลาหน่วงของการควบคุมให้ระบบจานหมุนติดตามทางเดินอ้างอิงซายน์สวีปด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้



รูปที่ 5.13 การลู่เข้าของฟังก์ชัน $\hat{F}$ สู่ค่าจริง ในการจำลองควบคุมระบบจานหมุนให้ติดตามทางเดินอ้างอิงซายน์สวีป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.4.2 การทดลองควบคุมให้จานหมุนติดตามสัญญาณทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่องใดๆ

กำหนดให้สัญญาณทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่องใดๆ ที่มีคาบเวลา 12 วินาที โดยสัญญาณอ้างอิงถูกสร้างขึ้นจากจานหมุนเล็ก และบันทึกเก็บไว้ จากนั้นจึงส่งสัญญาณอ้างอิงให้แก่ระบบควบคุมในลักษณะของฟังก์ชันเป็นคาบ

โดยกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้ดังต่อไปนี้

- กำหนดให้ตารางค้นหามีขนาด 301 จุดข้อมูล เริ่มตั้งแต่ 0 ถึง 12 วินาที ซึ่งจะมีช่องว่าง (Gab) ระหว่างจุดข้อมูลเป็น 0.04 วินาที และกำหนดความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ Δt เท่ากับ 0.04 วินาที เช่นกัน

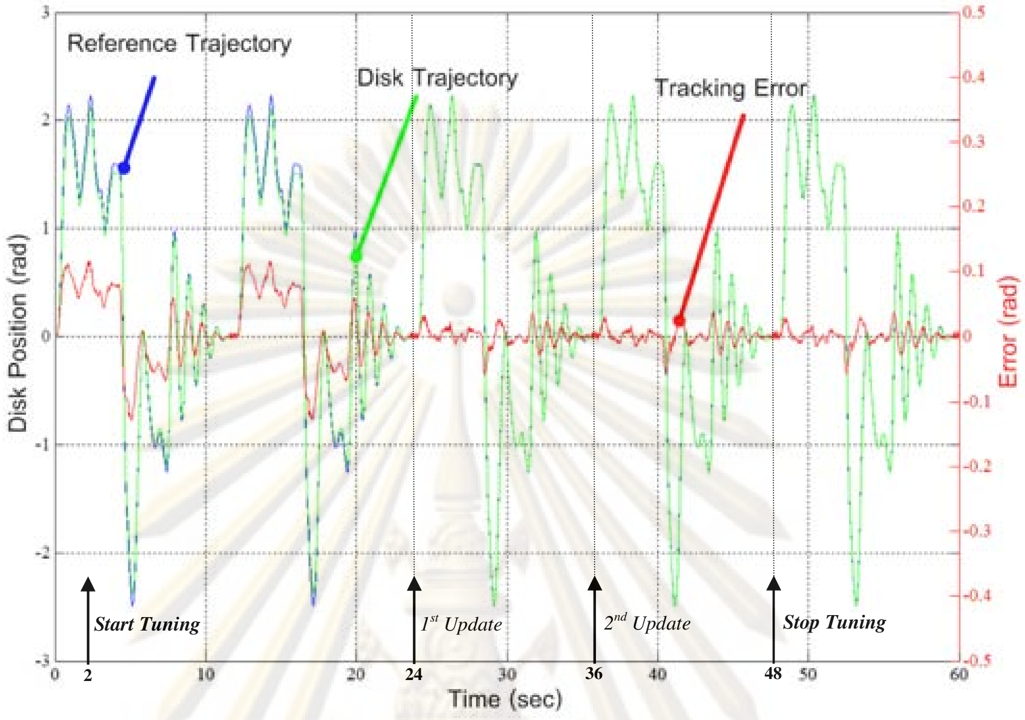
- กำหนดรอบเวลาของการปรับปรุงค่าในรอบแรกที่เวลา 24 วินาที และทุก 12 วินาที สำหรับรอบต่อไป

- กำหนดให้ผลรวมค่าผิดพลาดในการติดตามทางเดินกำลังสองเมื่อชดเชยเวลาหน่วงที่ยอมรับได้เพื่อหยุดการปรับปรุงค่า ε เท่ากับ 0.0096 (ค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้เท่ากับ 0.002 เรเดียน)

- ค่าเริ่มต้นอื่นๆ กำหนดให้เป็นเช่นเดียวกันกับหัวข้อ 5.4.1

ผลการควบคุมรูปที่ 5.14 และผลลัพธ์เมื่อชดเชยเวลาหน่วงรูปที่ 5.15 แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของตัวควบคุมในการควบคุมให้เอาต์พุตของระบบลู่เข้าสู่ทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่อง โดยการปรับปรุงค่าของฟังก์ชัน $\hat{F}$ ให้ลู่เข้าสู่ค่าจริงดังในรูปที่ 5.16 ส่งผลให้ค่าความผิดพลาดของการติดตามทางเดินลดลงเหลือเพียงค่าความผิดพลาดที่เกิดจากเวลาหน่วง ทั้งนี้ตัวควบคุมสามารถลดค่าความผิดพลาดของการติดตามทางเดินเมื่อชดเชยเวลาหน่วงลงได้จนกระทั่งต่ำกว่าค่าที่กำหนดในรอบที่ 3 ของการปรับปรุงค่า และทำให้เอาต์พุตของระบบติดตามทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่องใดๆ ได้เป็นอย่างดีโดยมีเวลาหน่วงคงที่

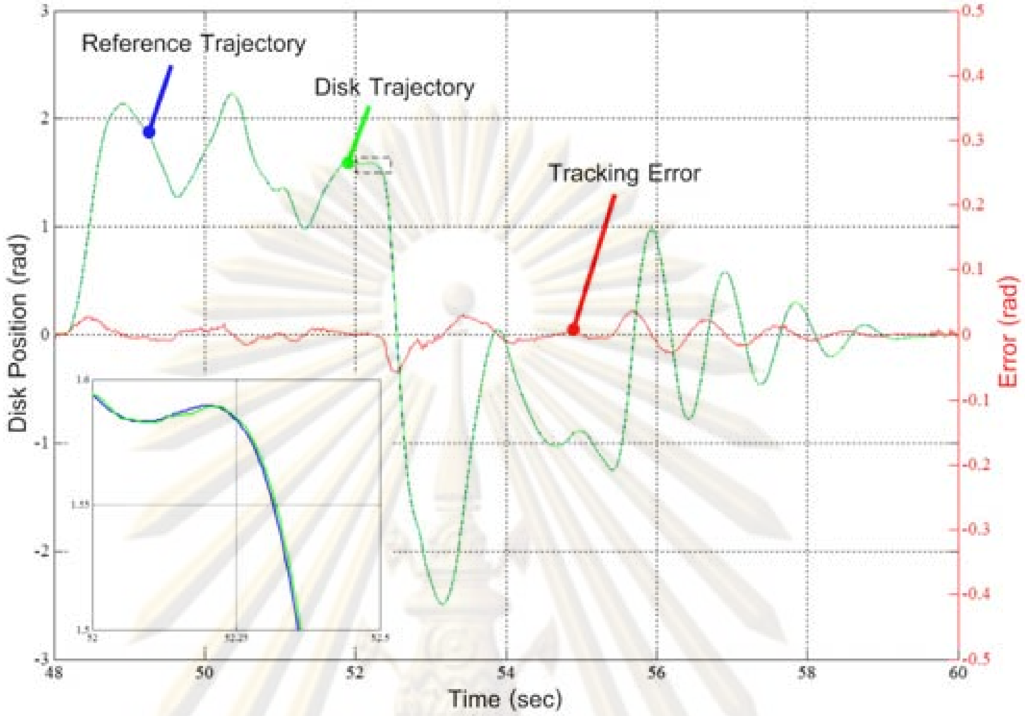
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) ผลลัพธ์ที่เวลา 0 ถึง 50 วินาที

(ข) ผลลัพธ์ที่เวลา 0 ถึง 10 วินาที

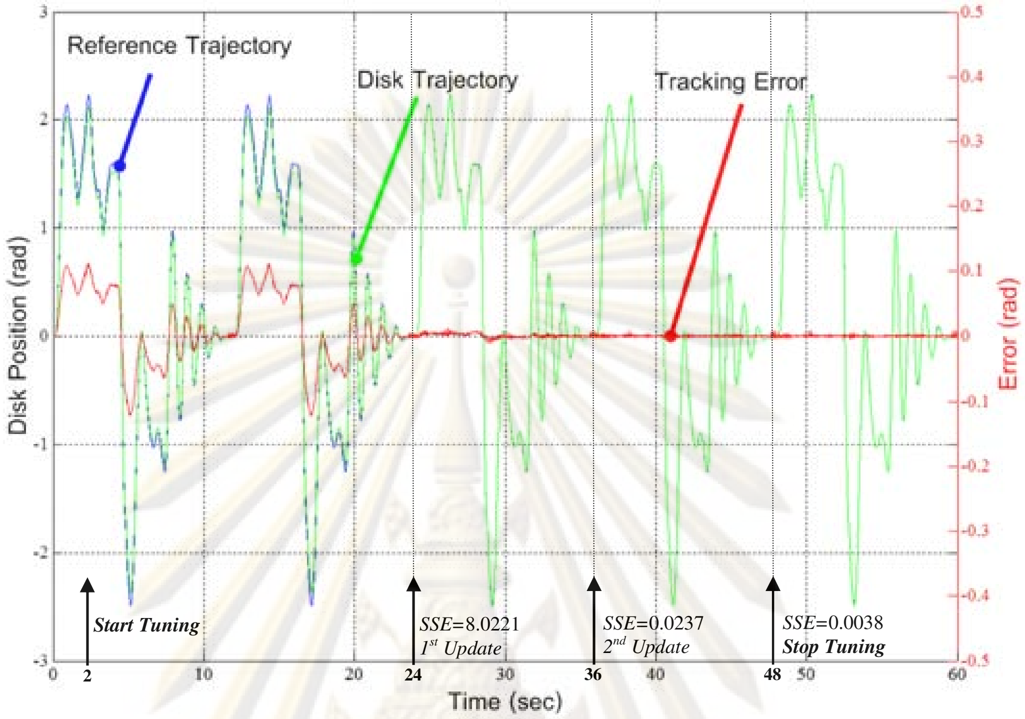
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ค) ผลลัพธ์ที่เวลา 40 ถึง 50 วินาที

รูปที่ 5.14 ผลการควบคุมให้ระบบจานหมุนติดตามทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่องใดๆ ด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้

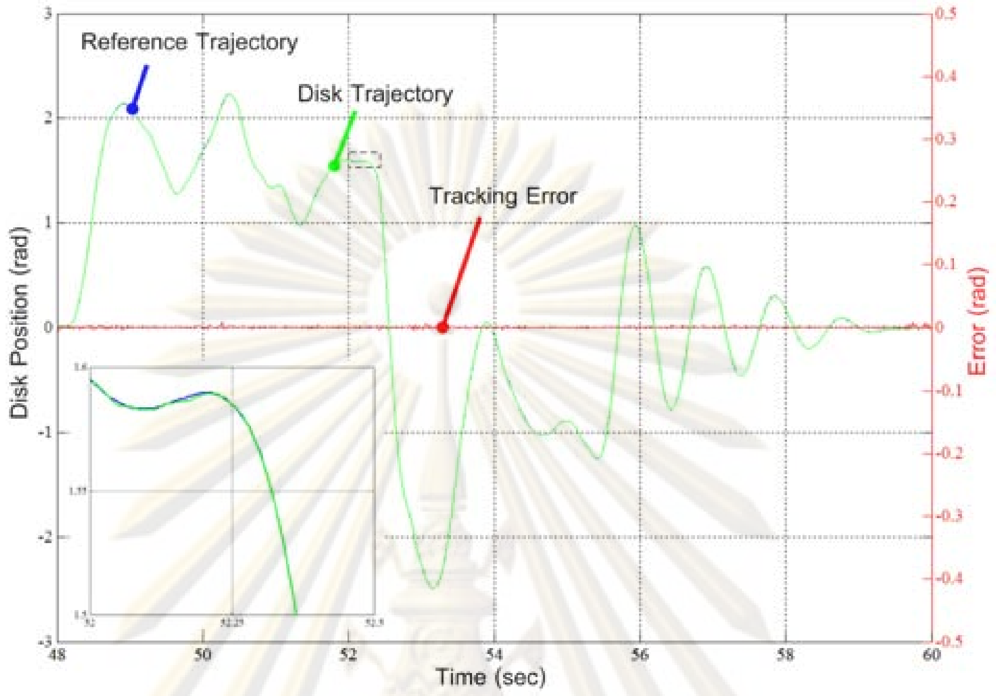
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) ผลลัพธ์ที่เวลา 0 ถึง 50 วินาที

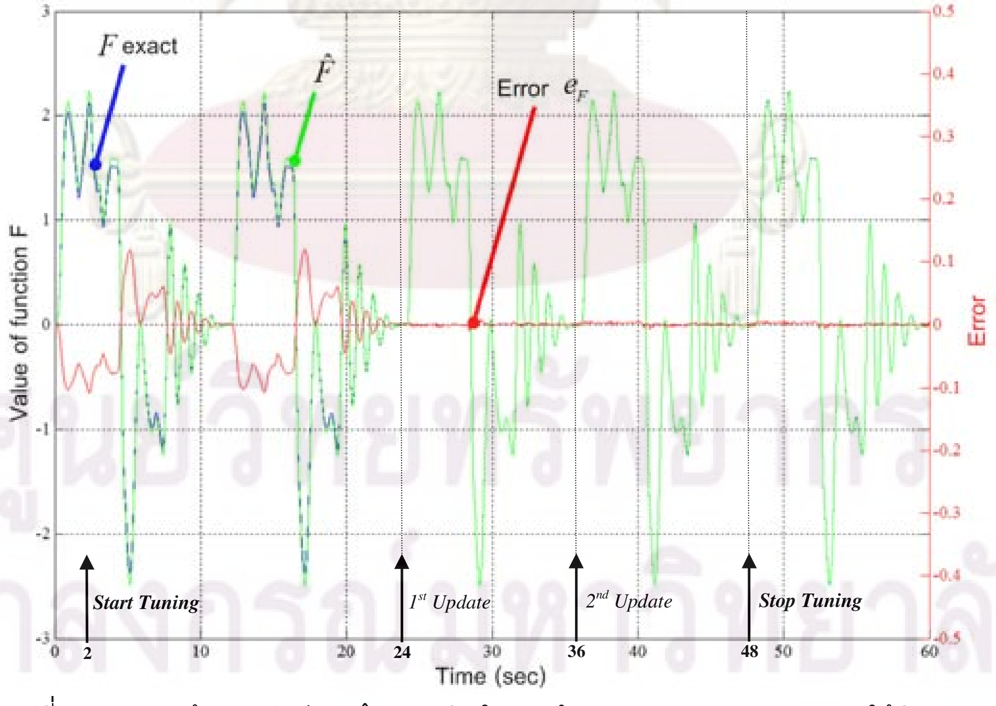
(ข) ผลลัพธ์ที่เวลา 0 ถึง 10 วินาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ค) ผลลัพธ์ที่เวลา 40 ถึง 50 วินาที

รูปที่ 5.15 ผลลัพธ์เมื่อชดเชยเวลาหน่วงของการควบคุมให้ระบบจานหมุนติดตามทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่องใดๆ ด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้

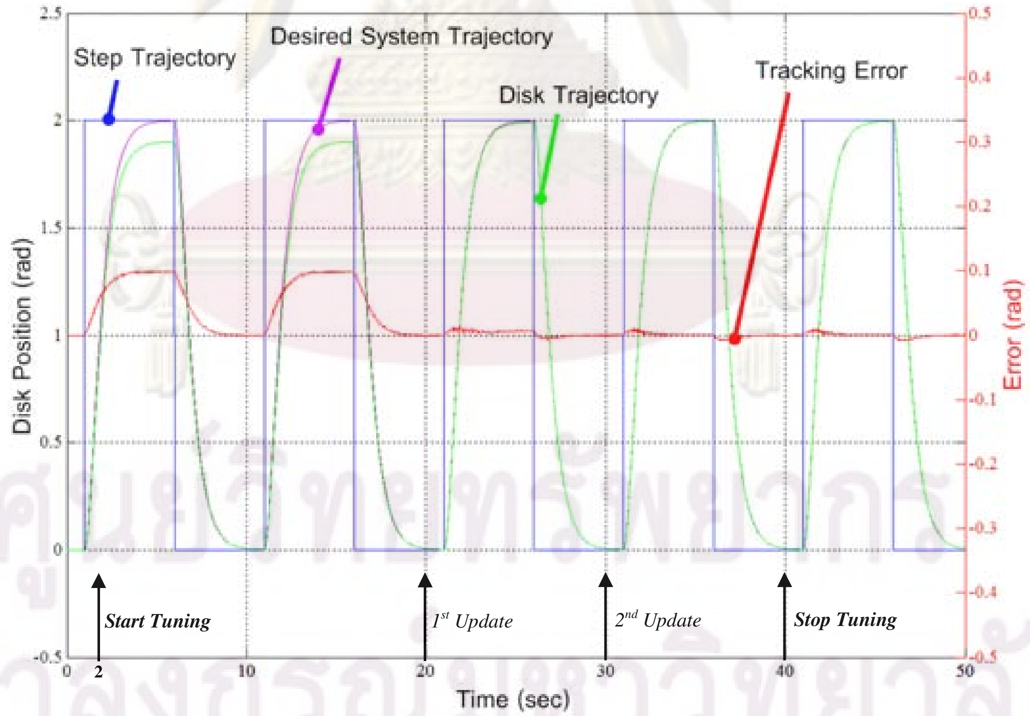


รูปที่ 5.16 การลู่เข้าของฟังก์ชัน $\hat{F}$ สู่ค่าจริง ในการจำลองควบคุมระบบจานหมุนให้ติดตามทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่องใดๆ

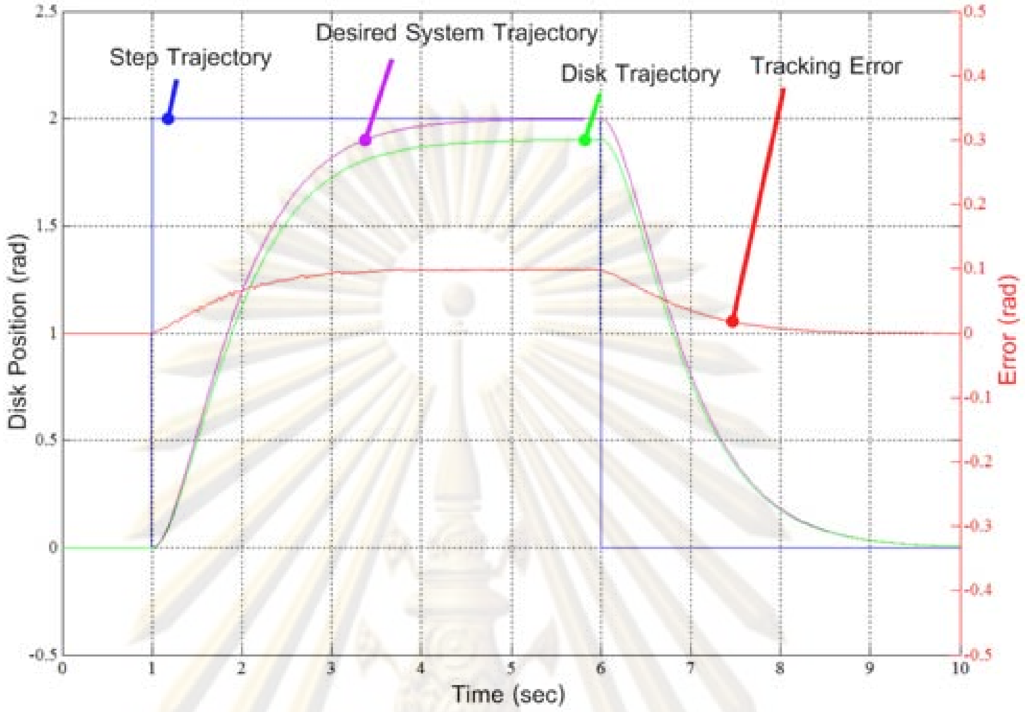
5.4.3 การทดลองควบคุมให้จานหมุนติดตามสัญญาณทางเดินอ้างอิงรูปคลื่นพัลส์

กำหนดให้สัญญาณทางเดินอ้างอิงเป็นคลื่นพัลส์รูปสี่เหลี่ยม แอมพลิจูด 2 เรเดียน มีคาบเวลา 10 วินาที ความกว้างพัลส์ 5 วินาที มีการหน่วงเฟส 1 วินาที และให้เอาต์พุตของระบบเริ่มต้นที่ 0 เรเดียน ทำการปรับสัญญาณอ้างอิงให้มีลักษณะเป็นสัญญาณต่อเนื่อง โดยให้สัญญาณอ้างอิงผ่านฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีพลวัติ คือ ค่าเวลาคงที่ $t_c = 0.5$ วินาที และอัตราส่วนการหน่วง $\xi = 1$ พร้อมทั้งกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวควบคุมเช่นเดียวกับในหัวข้อ 5.4.1

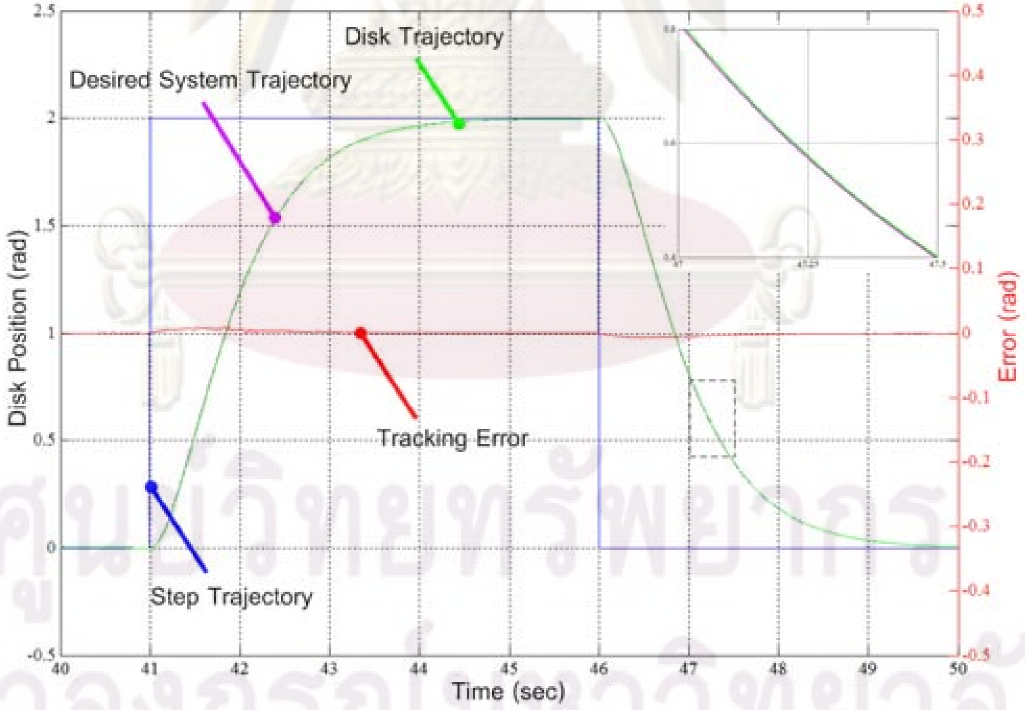
ผลลัพธ์การควบคุมในรูปที่ 5.17 และผลลัพธ์เมื่อชดเชยเวลาหน่วงรูปที่ 5.18 พร้อมทั้งการลู่เข้าของค่า $\hat{F}$ ในรูปที่ 5.19 แสดงให้เห็นถึงความสามารถของตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้เช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา นั่นคือ ตัวควบคุมสามารถปรับปรุงค่า $\hat{F}$ ให้ลู่เข้าสู่ค่าจริงได้ ส่งผลให้เอาต์พุตของระบบลู่เข้าสู่ทางเดินอ้างอิงที่มีพลวัติเท่ากับที่ต้องการได้ โดยตัวควบคุมสามารถลดค่าความผิดพลาดของการติดตามทางเดินเมื่อชดเชยเวลาหน่วงจะลดลงได้จนกระทั่งต่ำกว่าค่าที่กำหนดในรอบที่ 3 ของการปรับปรุงค่า ส่งผลให้เอาต์พุตของระบบมีการตอบสนองต่อสัญญาณทางเดินอ้างอิงรูปคลื่นพัลส์เช่นเดียวกับระบบที่มีพลวัติเท่ากับที่กำหนด



(ก) ผลลัพธ์ที่เวลา 0 ถึง 50 วินาที



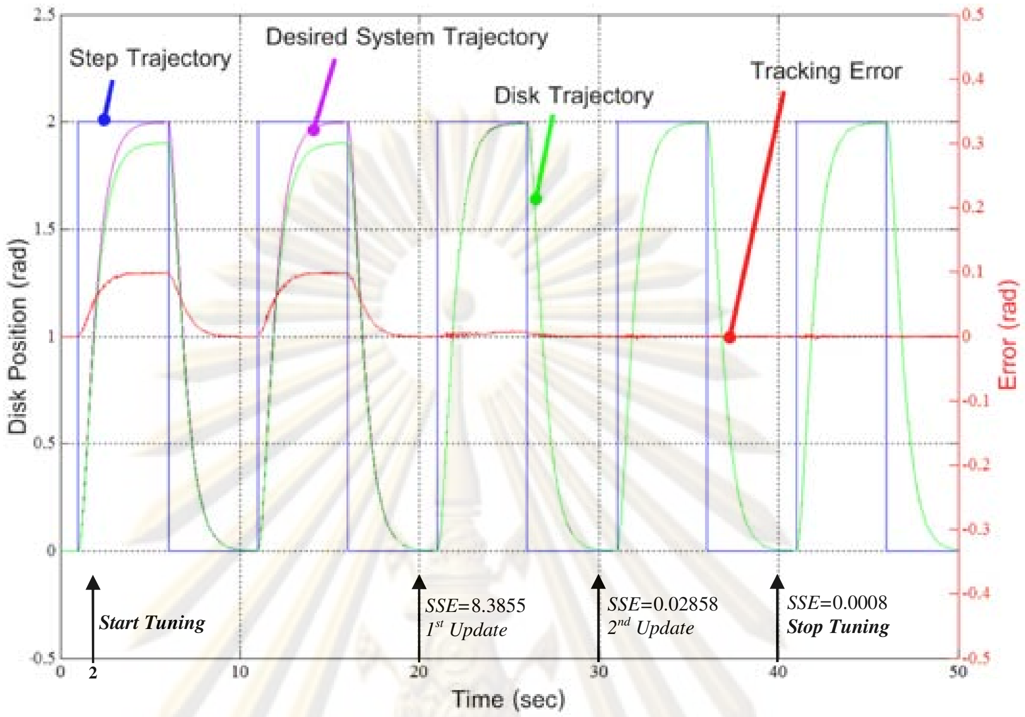
(ข) ผลลัพธ์ที่เวลา 0 ถึง 10 วินาที



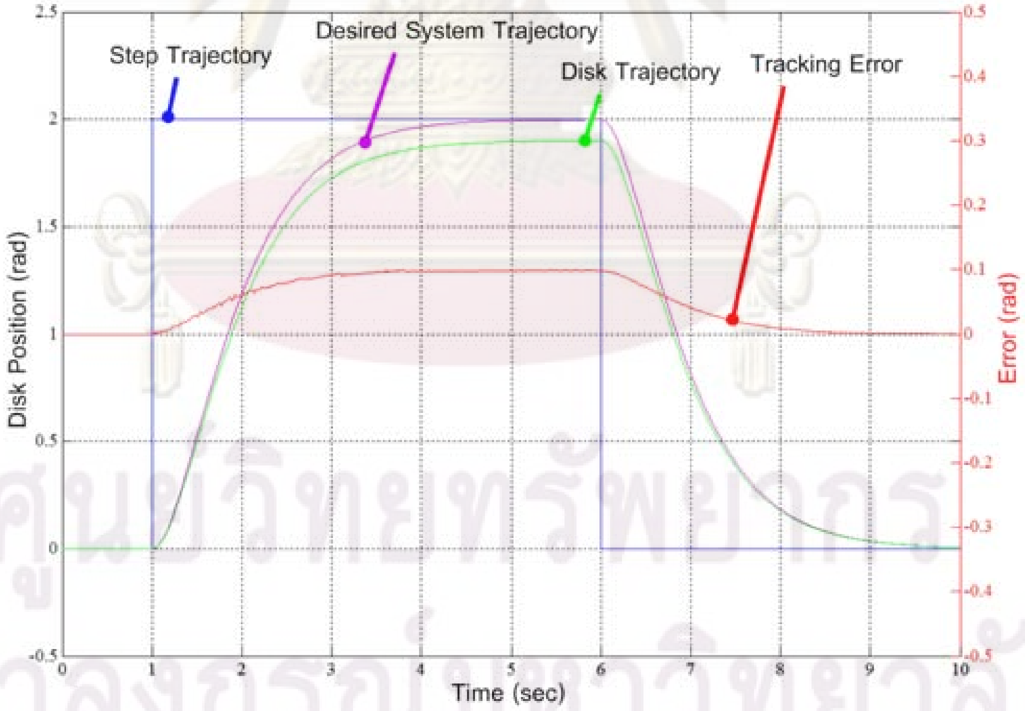
(ค) ผลลัพธ์ที่เวลา 40 ถึง 50 วินาที

รูปที่ 5.17 ผลการควบคุมให้ระบบจานหมุนติดตามทางเดินรูปคลื่นพัลส์ด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

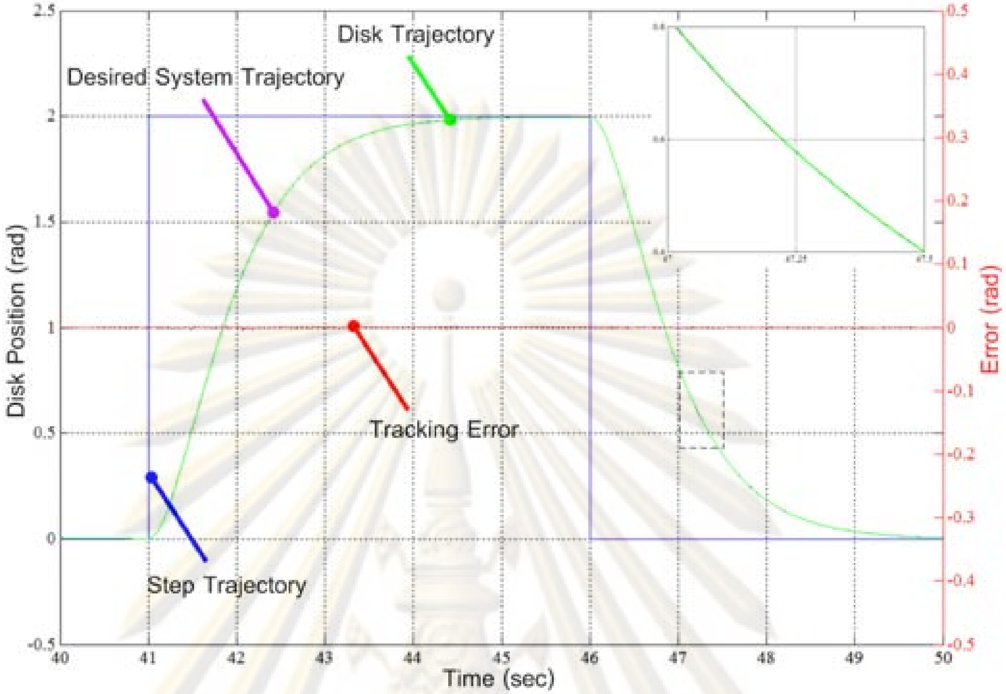


(ก) ผลลัพธ์ที่เวลา 0 ถึง 50 วินาที



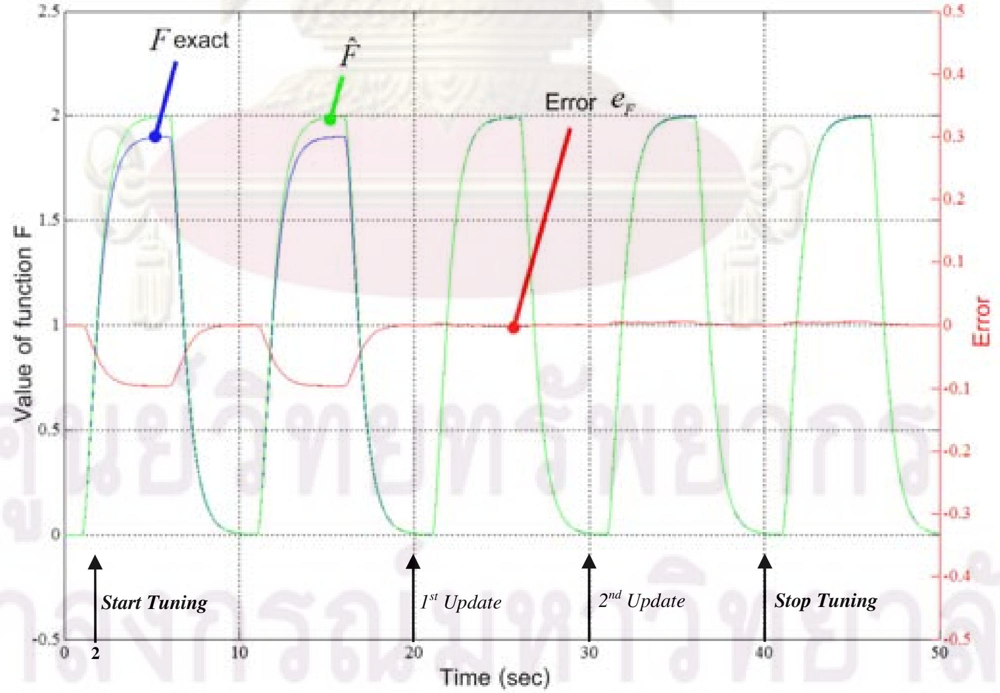
(ข) ผลลัพธ์ที่เวลา 0 ถึง 10 วินาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ค) ผลลัพธ์ที่เวลา 40 ถึง 50 วินาที

รูปที่ 5.18 ผลลัพธ์เมื่อชดเชยเวลาหน่วงของการควบคุมให้ระบบจานหมุนให้ติดตามทางเดินรูปคลื่นพัลส์ด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้



รูปที่ 5.19 การลู่เข้าของฟังก์ชัน $\hat{F}$ สู่ค่าจริง ในการจำลองควบคุมระบบจานหมุนให้ติดตามทางเดินอ้างอิงรูปคลื่นพัลส์

5.4.4 สรุปผลการด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้

ในกรณีที่ทราบเฉพาะสัมประสิทธิ์ของเทอม $\ddot{\theta}$ ในแบบจำลองของระบบจานหมุนทางกล และสัญญาณทางเดินอ้างอิงเป็นฟังก์ชันเป็นคาบ ผลการทดลองในหัวข้อ 5.4.1 และ 5.4.2 แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมที่แปลงระบบควบคุมให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับชนิดปรับค่าเองได้ที่นำเสนอไปนั้นสามารถควบคุมให้เอาต์พุตของระบบติดตามทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการปรับปรุงค่า $\hat{F}$ ของแบบจำลองให้ลู่เข้าสู่ค่าจริงได้ จนกระทั่งความผิดพลาดของการติดตามทางเดินชดเชยเวลาหน่วงต่ำกว่าค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ คงเหลือไว้เพียงเวลาหน่วงที่เกิดจากลักษณะเฉพาะของตัวควบคุม

เช่นเดียวกับผลการทดลองในหัวข้อ 5.4.3 ตัวควบคุมสามารถควบคุมให้เอาต์พุตของระบบลู่เข้าสู่ทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่องที่มีพลวัติเท่ากับที่กำหนดซึ่งสร้างขึ้นจากการให้สัญญาณอ้างอิงที่มีลักษณะเป็นขั้นบันไดผ่านฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีพลวัติตามที่ต้องการ จนกระทั่งเอาต์พุตของระบบสามารถติดตามทางเดินอ้างอิงดังกล่าวได้เป็นอย่างดี แสดงให้เห็นว่าวิธีการนี้ทำให้ตัวควบคุมสามารถรับมือกับสัญญาณอ้างอิงแบบไม่ต่อเนื่องที่มีลักษณะเป็นขั้นบันไดได้ โดยระบบควบคุมจะมีการตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงตามพลวัติกำหนด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

ตัวควบคุมติดตามทางเดินสำหรับระบบจานหมุนทางกลที่นำเสนอ เป็นตัวควบคุมที่ออกแบบในระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง โดยใช้พื้นฐานของการแปลงระบบควบคุมให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับ ทำให้สามารถชดเชยพลวัติของระบบได้ แบบจำลองของระบบปิดจะมีลักษณะเป็นสมการทางพีชคณิตที่มีความสัมพันธ์คือ เอาต์พุตของระบบที่เวลา k+1 เท่ากับสัญญาณอ้างอิงที่เวลา k เป็นผลทำให้สามารถสามารถควบคุมเอาต์พุตได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว ซึ่งเอื้อต่อการนำไปใช้ในการควบคุมเส้นทางเดินของตำแหน่งของจานหมุน และมีข้อดีคือการสร้างสัญญาณควบคุมไม่จำเป็นต้องนำข้อมูลอนุพันธ์อันดับหนึ่งและอันดับสองของสัญญาณอ้างอิงมาใช้ในการคำนวณ

ในกรณีที่ทราบแบบจำลองของระบบจานหมุนทางกลเพียงบางส่วน หรือแบบจำลองของระบบมีพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า และสัญญาณทางเดินอ้างอิงเป็นฟังก์ชันเป็นคาบ ตัวควบคุมถูกออกแบบให้สามารถปรับค่าเองได้ ซึ่งใช้การหาเอกลักษณ์ของระบบปิดแบบออนไลน์เพื่อนำข้อมูลมาปรับปรุงพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โดยใช้แบบจำลองตารางค้นหาร่วมกับวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบวนซ้ำ

เมื่อทราบแบบจำลองของระบบจานหมุนที่มีความแม่นยำ ผลการจำลองการควบคุมด้วยตัวตัวควบคุมที่ใช้การแปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นที่ออกแบบบนระบบเวลาไม่ต่อเนื่องสามารถจำลองควบคุมระบบจานหมุนทางกลให้มีเสถียรภาพ และควบคุมให้เอาต์พุตของระบบติดตามสัญญาณทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่องได้เป็นอย่างดีโดยมีเวลาหน่วงคงที่

ในกรณีเส้นทางเดินอ้างอิงเป็นแบบไม่ต่อเนื่องมีลักษณะเป็นขั้นบันได ระบบควบคุมในลักษณะนี้อาจไม่สามารถรับประกันสมรรถภาพในช่วงรอยต่อของสัญญาณขั้นบันไดได้ อาจทำให้เอาต์พุตเกิดการสั่นก่อนลู่เข้าสู่เส้นทางเดินที่ต้องการ ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการปรับสัญญาณอ้างอิงให้มีลักษณะเป็นสัญญาณแบบต่อเนื่องที่มีพลวัติตามที่ก้านหด โดยให้สัญญาณอ้างอิงผ่านฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีพลวัติตามที่ต้องการก่อนเข้าสู่ระบบควบคุม ผลการจำลองควบคุมแสดงให้เห็นว่าวิธีการนี้ทำให้ระบบควบคุมมีการตอบสนองเช่นเดียวกับระบบที่มีพลวัติเท่ากับที่กำหนด

การจำลองการควบคุมด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้ ผลการจำลองควบคุมแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมที่นำเสนอสามารถปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองให้ลู่เข้าสู่ค่าจริงได้ ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความผิดพลาดของการติดตามทางเดินลดลง และเอาต์พุตของระบบลู่เข้าสู่ทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่อง จนกระทั่งเอาต์พุตของระบบสามารถติดตามทางเดินอ้างอิงได้อย่างถูกต้องโดยเวลาหน่วงคงที่

ผลการทดลองควบคุมจริงกับระบบจานหมุนทางกล ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับการจำลองการควบคุม ซึ่งแสดงถึงศักยภาพของตัวควบคุมในการควบคุมให้เอาต์พุตของระบบติดตามทางเดินแบบต่อเนื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยมีเวลาหน่วงคงที่ โดยเฉพาะการควบคุมในลักษณะ มาสเตอร์-สเลฟ ซึ่งสัญญาณอ้างอิงมีการสั่น ตัวควบคุมที่นำเสนอให้ผลการควบคุมที่ดีกว่าวิธีแปลงระบบให้เป็นเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับโดยทั่วไปอย่างชัดเป็น ทั้งนี้เป็นผลมาจากที่สัญญาณควบคุมไม่ได้ถูกคำนวณโดยใช้อนุพันธ์อันดับหนึ่งและอันดับสองของสัญญาณอ้างอิง

เช่นเดียวกับผลการทดลองควบคุมกับระบบจริงด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้ ผลลัพธ์จากการทดลอง แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมที่แปลงระบบควบคุมให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับชนิดปรับค่าเองได้ที่นำเสนอไปนั้นสามารถปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองให้ลู่เข้าสู่ค่าจริงได้ จนกระทั่งความผิดพลาดของการติดตามทางเดินชดเชยเวลาหน่วงต่ำกว่าค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ คงเหลือไว้เพียงเวลาหน่วงที่เกิดจากลักษณะเฉพาะของตัวควบคุม ส่งผลให้เอาต์พุตของระบบติดตามสัญญาณทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ

รวมไปถึงผลการทดลองควบคุมเมื่อสัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องมีลักษณะเป็นขั้นบันได ซึ่งบ่งชี้ว่าวิธีการรับมือกับสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องที่ได้นำเสนอไปนั้นทำให้ตัวควบคุมสามารถรับมือกับสัญญาณอ้างอิงที่มีลักษณะเป็นขั้นบันไดได้อย่างน่าพอใจ โดยระบบควบคุมจะมีการตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงตามพลวัติกำหนด

6.2 ข้อเสนอแนะ

ตัวควบคุมที่แปลงระบบควบคุมเป็นระบบเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับชนิดปรับค่าเองได้สำหรับระบบจานหมุนทางกลที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์มีผลการควบคุมที่น่าพอใจ แต่ยังคงมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานกับระบบจานหมุนทางกลที่โมเมนต์ความเฉื่อยของจานหมุนมีค่าไม่คงที่ ดังนั้นยังจำเป็นต้องพัฒนาตัวควบคุมให้สามารถนำไปใช้ได้กับระบบจานหมุนทางกลที่หลากหลาย รวมไปถึงการพัฒนาต่อยอดเพื่อนำไปใช้ในการควบคุมแขนกล (Robot Arm) ให้

สามารถติดตามทางเดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะการควบคุมในลักษณะของมาสเตอร์/สเลฟ อีกทั้งการปรับปรุงตัวควบคุมยังคงต้องได้รับการพัฒนาให้มีศักยภาพมากขึ้น เพื่อให้สามารถปรับค่าให้เหมาะสมกับระบบจานหมุนทางกลที่ต้องการควบคุมในกรณีไม่ทราบแบบจำลองของระบบทั้งหมดได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

[1] Dorf, R. C., and Bishop, R. H. Modern Control System. New Jersey: Prentice-Hall, 2001.

[2] Ziegler, J. G., and Nichols, N. B. Optimum Settings for Automatic Controller. ASME Transactions Journals 64, 8 (1942) : 759-768

[3] Levine, W. S. The Control Handbook. New Jersey: CRC Press, 1996.

[4] Wang, L., Barnes, T. J. D., and Cluett, W. R. New Frequency-domain Design Method for PID Controlllers. IEEE Proceedings Control Theory and Applications 142, 4 (July 1995) : 265-271

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

[6] Callier, F. M., and Desoer, C. A. Linear System Theory. London: Springer-Verlag, 1991.

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

[8] Rugh, W. J. Linear System Theory. 2st edition. New Jersey: Prentice Hall, 1995.

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

[10] Frankin, G. A., Powell, J. D., and Emami-Naeini, A. Feedback Control of Dynamic Systems. Massachusetts: Addison-Wesley, 1991.

[11] Brockett, R. W. Feedback Invariants for Nonlinear Systems. Proceedings of 7th IFAC World Congress. Helsinki. 1978

[12] Hunt, L. R., Su, R., and Meyer, G. Global transformations of nonlinear system. IEEE Transactions on Automation Control 28, 1 (1983) : 24-31

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[13] Ogunnaike, B. K. Controller Design for nonlinear process systems via variable transformations. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development 25 (1986) : 241-248

[14] Xu, Z., Hauser, J., and Hunt, L. R. Higher Order Approximate Input-Output Linearization. IEEE Transactions on Automation Control (1992) : 1976-1981

[15] Kravaris, C. Input/output linearization: A nonlinear analog of placing poles at process zeros. American Institute of Chemical Engineering Journals 34, 11 (1988) : 1803-1812

[16] Henson, M. A., and Seborg, D. E. Input/output linearization of general nonlinear processes. American Institute of Chemical Engineering Journals 36, 11 (1990) : 1753-1757

[17] Xu, Z., Hauser, J., and Hunt, L. R. Higher Order Approximate Input-Output Linearization. IEEE Transactions on Automation Control (1992) : 1976-1981

[18] Slotine, J. E., and Li, W. Applied nonlinear control. New Jersey: Prentice-Hall, 1991.

[19] Chanchareon, R., Pongsin, N., Reeseewat, P., and Jiamluksanapaisal, S. Controller design based on computed feedback linearization. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics, Automation and Mechatronics. Bangkok, Thailand. June 2006

[20] ศุภวัฒ เจียมลักษณไพศาล, และ รัชทิน จันทร์เจริญ. การประมาณการแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับของระบบถังน้ำสองถัง. ในบทความการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20. มหาวิทยาลัยสุรนารี, นครราชสีมา. ตุลาคม 2549

[21] Sastry, S., and Bodson, M. Adaptive Control: Stability, Convergence, and Robustness. New Jersey: Prentice-Hall, 1989.

[22] Osburn, P. V., Whitaker, H. P., and Kezer, A. New Developments in the Design of Model Reference Adaptive Control Systems. Institute of the Aerospace Sciences 61-39 (1967)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[23] Mareels, I. M. Y., Anderson, B. D. O., Bitmead, R. R., Bodson, M. and Sastry, S. Revisiting the MIT Rule for Adaptive Control. Proceedings of 2nd IFAC Workshop on Adaptive Systems in Control and Signal Processing. Lund, Sweden. 1986

[24] James, D. J. Stability of a Model Reference Control System. AIAA Journal 9, 5 (1970)

[25] Parks, P. C. Lyapunov Redesign of Model Reference Adaptive Control Systems. IEEE Transactions on Automatic Control AC-11, 3 (1966) : 362-367

[26] Vos, E. W., and Valavain, L. Input/Output Linearization Using Model Reference Adaptive Control Techiques. Proceedings of 30th Conference on Decision and Control. Brighton, England. 1991

[27] Astrom, K. J., and Wittenmark, B. Adaptive Control. 1st edition. Addison-Wesley, 1989.

[28] Kalman, R. E. Design of Self-Optimizing Control Systems. ASME Transactions Journals 80 (1958) : 468-478

[29] Astrom, K. J., and Wittenmark, B. On Self Tuning Regulators. Automatica 9 (1973) : 185-199

[30] Hang, C. C., Cai, Y. S., and Lim, K. W. A Dual-Rate Self-Tuning Pole-Placement Controller. IEEE Transactions on Industrial Electronics 40, 1 (February 1993) : 106-129

[31] ธเนศ ธีรศักดานนท์. การควบคุมไม่เชิงเส้นแบบปรับตัวสำหรับแขนหุ่นยนต์ข้อต่อเดียวแบบอ่อนตัว. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

[32] Suzuki, M., Yamamoto, T., and Mitsukura, Y. A design of evolutionary tuning PID controllers. IFAC Adaptation and Learning in Control and Signal Processing (October 2001) : 219-224.

[33] อนุชา ทิพยวัลย์. การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีชนิดปรับค่าเองได้โดยใช้เจเนติกอัลกอริธึมประยุกต์ในการบวนการปรับค่าพีเอชให้เป็นกลาง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

[34] Hoang, N. D., and Huyen, B. T. Application of self-tuning controller using pole assignment method in controlling electric oven. International Symposium on Electrical & Electronics Engineering. HCM City, Vietnam, October 2007

[35] Yu, D. L., Chang, T. K., and Yu, D. W. A stable self-learning PID control for multivariable time varying systems. Control Engineering Practice 15 (2007) : 1577-1587.

[36] Craig, J. J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. 3rd edition. New Jersey: Prentice-Hall, 2005.

[37] Chanchareon, R., Sangveraphunsiri, V., and Chatranuwathanal, S. Tracking Control of an Inverted Pendulum Using Computed Feedback Linearization Technique. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics, Automation and Mechatronics. Bangkok, Thailand. December 2006

[38] Kulakowski, B. T., Gardner, J. F. and Shearer, J. L. Dynamic Modelling and Control of Engineering System. 3rd edition. New York: Cambridge University Press, 2007.

[39] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. การควบคุมระบบพลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

[40] Nelles, O. Nonlinear system identification: From classical approaches to neural network and fuzzy model. Berlin: Springer-Verlag, 2001.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

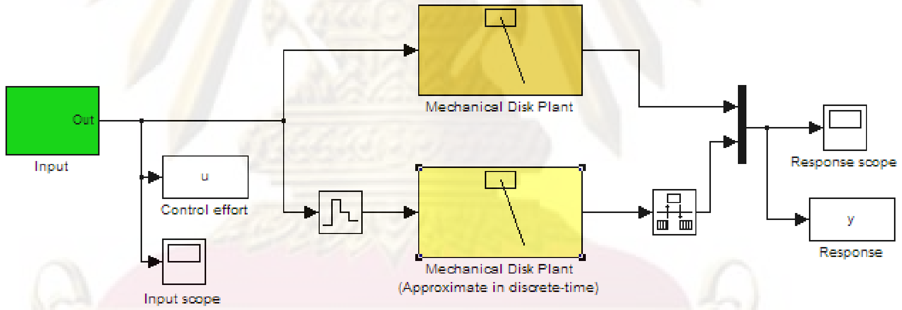
ภาคผนวก ก

โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองและควบคุมระบบจานหมุน

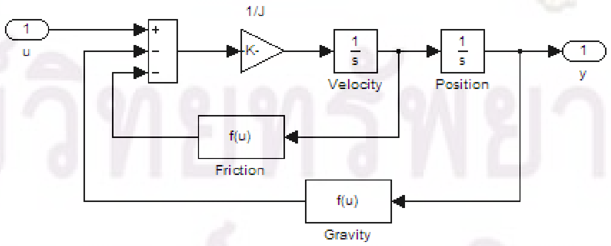
โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองการควบคุมและโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมระบบจริง เขียนขึ้นโดยใช้บล็อกของซิมูลิงค์ ในโปรแกรมแม็ทแล็บ/ซิมูลิงค์ (MatLab/Simulink) เวอร์ชัน 7.8.0 ดังต่อไปนี้

ก.1 โปรแกรมจำลองเอาต์พุตของแบบจำลอง

โปรแกรมจำลองเอาต์พุตของแบบจำลองระบบจานหมุนทางกล ใช้เปรียบเทียบเอาต์พุตที่ได้จากแบบจำลองพลวัติของระบบในรูปสมการดิฟเฟอเรนเชียล กับเอาต์พุตที่ได้จากแบบจำลองในรูปสมการดิฟเฟอเรนซ์ ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในตอนที่ 3.3.2 แสดงดังรูปที่ ก.1

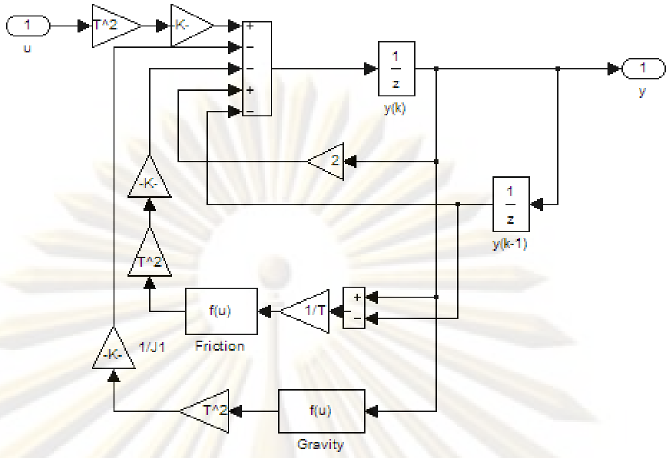


(ก) บล็อกไดอะแกรมของโปรแกรมโดยรวม



(ข) บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองในรูปสมการดิฟเฟอเรนเชียล

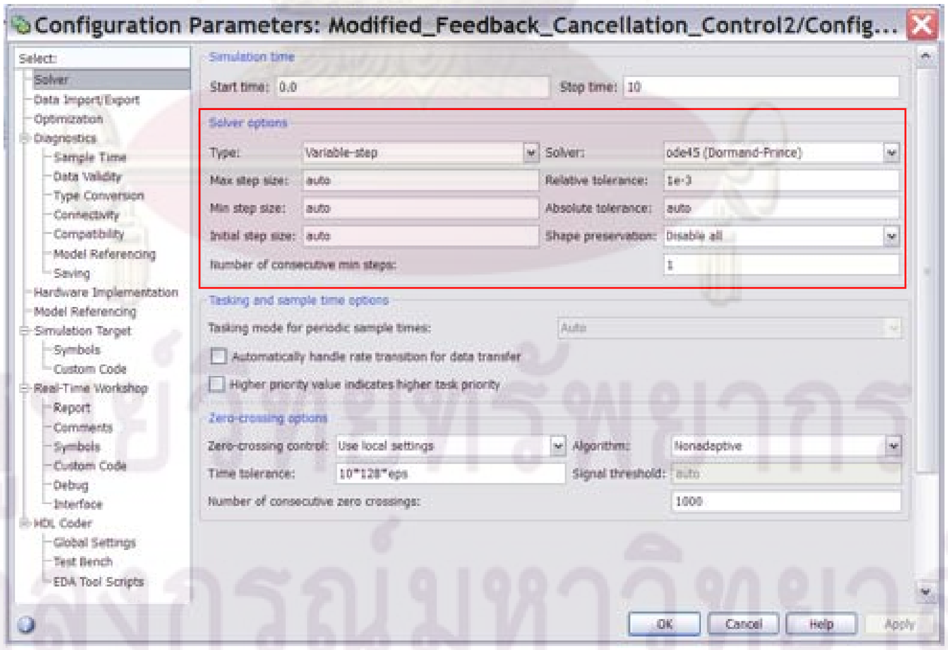
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ค) บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองในรูปสมการดิฟเฟอเรนซ์

รูปที่ ก.1 โปรแกรมจำลองเอาต์พุตของแบบจำลองระบบจานหมุนทางกล

ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้แก้สมการดิฟเฟอเรนเชียลเชิงสามัญ (Ordinary Differntial Equation) ในโปรแกรมจำลองคือ ระเบียบวิธี Dorman-Prince ซึ่งอยู่ในกลุ่มของระบเยบวิธีรุงเง-กุตตา (Runge-Kutta) โดยมีรายละเอียดดังรูปที่ ก.2



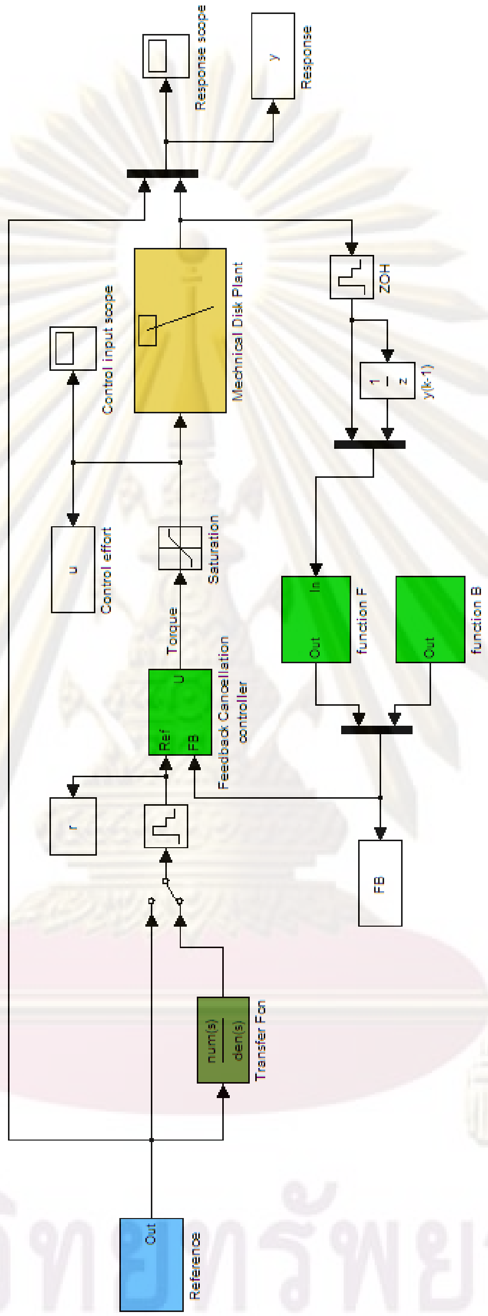
รูปที่ ก.2 หน้าต่างการกำหนดระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ในโปรแกรมจำลองของโปรแกรมแม็ทแล็บ/ซิมูลิงค์

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.2 โปรแกรมจำลองควบคุมระบบจานหมุนทางกล

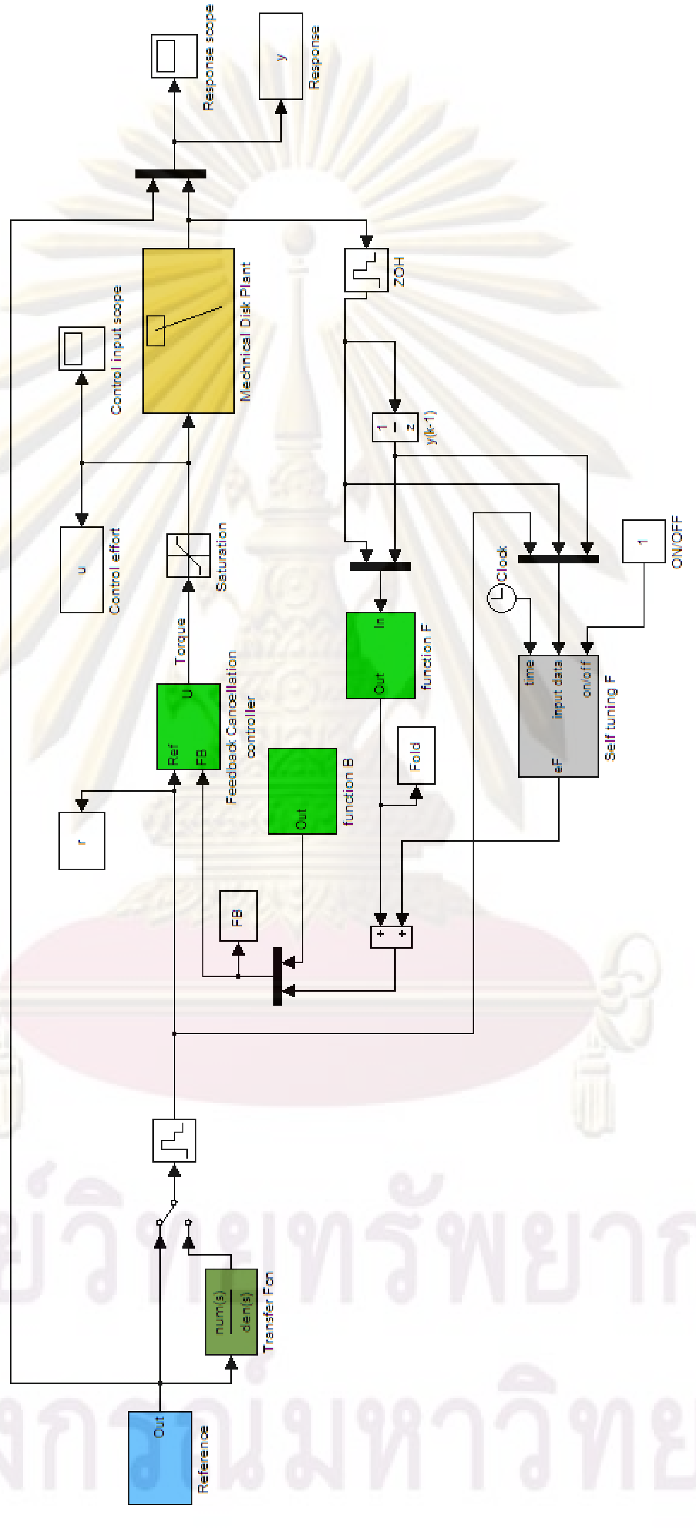
โปรแกรมจำลองควบคุมระบบจานหมุนทางกลที่ใช้ในตอนที่ 3.3.3 สามารถเลือกสัญญาณทางเดินอ้างอิงแบบต่างๆ ได้ รวมไปถึงการกำหนดพลวัติของฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้ในการปรับสัญญาณแบบขั้นบันไดให้เป็นเส้นทางเดินแบบต่อเนื่องตามต้องการ ดังแสดงในรูปที่ ก.3 และโปรแกรมจำลองควบคุมระบบจานหมุนทางกลด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้ที่ใช้ในตอนที่ 4.4 ได้มีการเพิ่มส่วนของการปรับปรุงตัวควบคุมดังแสดงรูปที่ ก.4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก.3 โปรแกรมจำลองควบคุมระบบจานหมุนทางกลด้วยวิธีแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับที่นำเสนอ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



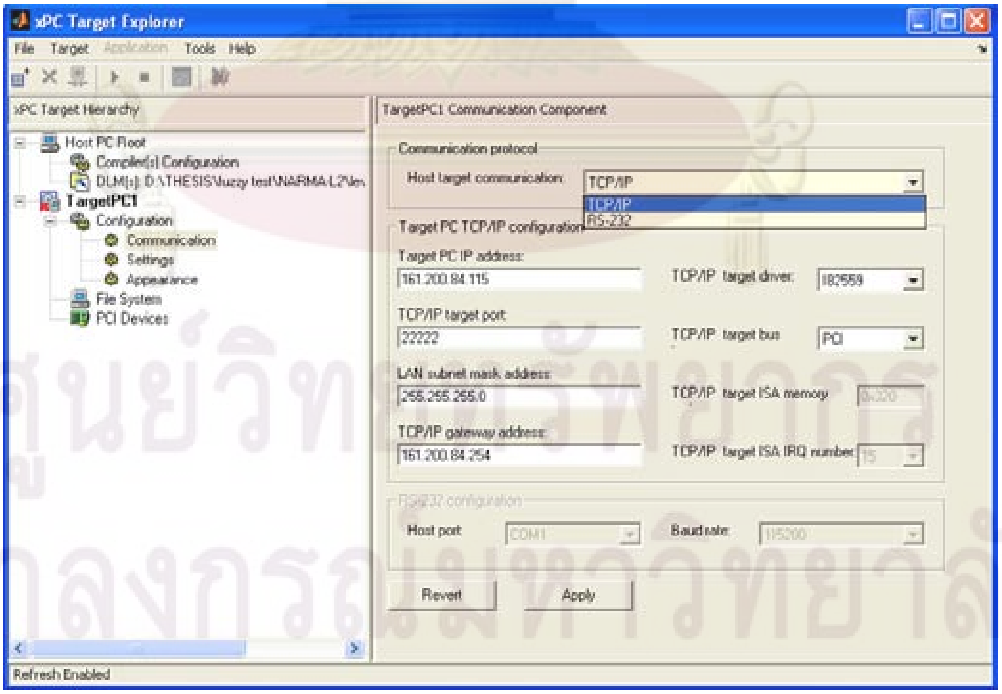
รูปที่ ก.4 โปรแกรมจำลองควบคุมระบบจานหมุนทางกลด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.3 โปรแกรม xPC Target

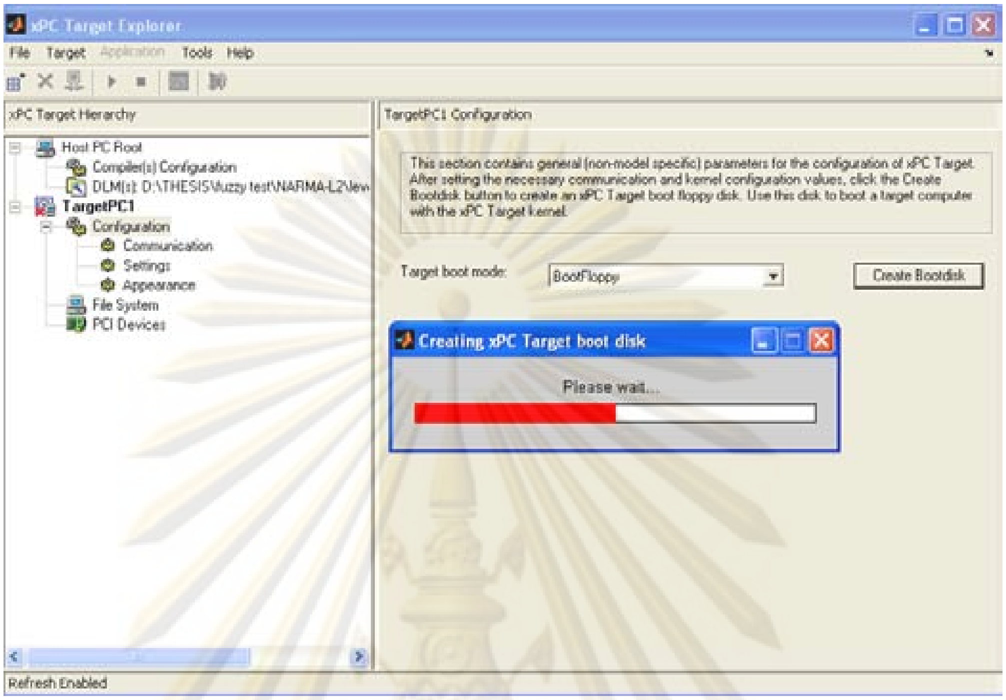
xPC Target เป็นกล่องเครื่องมือ (Toolbox) ที่อยู่ในโปรแกรมแม็ทแล็บ มีความสามารถควบคุมระบบในเวลาจริง ในการใช้งาน xPC Target นั้นจะมี Target PC และ Host PC ที่สื่อสารระหว่างกันด้วยระบบ RS232 หรือ TCP/IP Protocol โดยโปรแกรมที่ใช้ควบคุมระบบจานหมุนทางกลถูกเขียนในเครื่อง Host PC จากนั้นจะทำการแปลงโปรแกรมด้วย Real-Time Workshop ให้โปรแกรมที่สร้างจาก แม็ทแล็บ/ซิมูลิงค์ อยูในรูปของภาษาซี แล้วจากนั้นจะใช้ C/C++ คอมไพเลอร์ แปลงภาษาซีให้เป็นโค้คที่ Target PC สามารถเข้าใจได้ และโค้ดจะถูกส่งจาก Host PC ไปยัง Target PC ด้วย xPC Target เพื่อใช้ในการควบคุมระบบจานหมุนทางกลในเวลาจริง นอกจากนั้น xPC Target ยังทำหน้าที่รับส่งข้อมูลระหว่าง Target PC กับ Host PC สามารถกำหนดพารามิเตอร์หรือค่าต่างๆ เพื่อควบคุมระบบผ่าน Host PC ในเวลาจริงได้ และเนื่องจาก Target PC ไม่ได้ทำงานภายใต้ระบบปฏิบัติการวินโดส์ ทำให้สามารถกำหนดคาบเวลาสุ่มที่ใช้ในการควบคุมได้ต่ำถึงระดับไมโครวินาที

การใช้งาน xPC Target จะต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการสื่อสารระหว่าง Host PC กับ Target PC ตามรูปที่ ก.5 จากนั้นจึงสร้างบูทดิสก์สำหรับ Target PC เพื่อใช้ในการบูทเครื่อง ตามรูป ก.6



รูปที่ ก.5 หน้าต่างกำหนดพารามิเตอร์การสื่อสารของ xPC Target

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



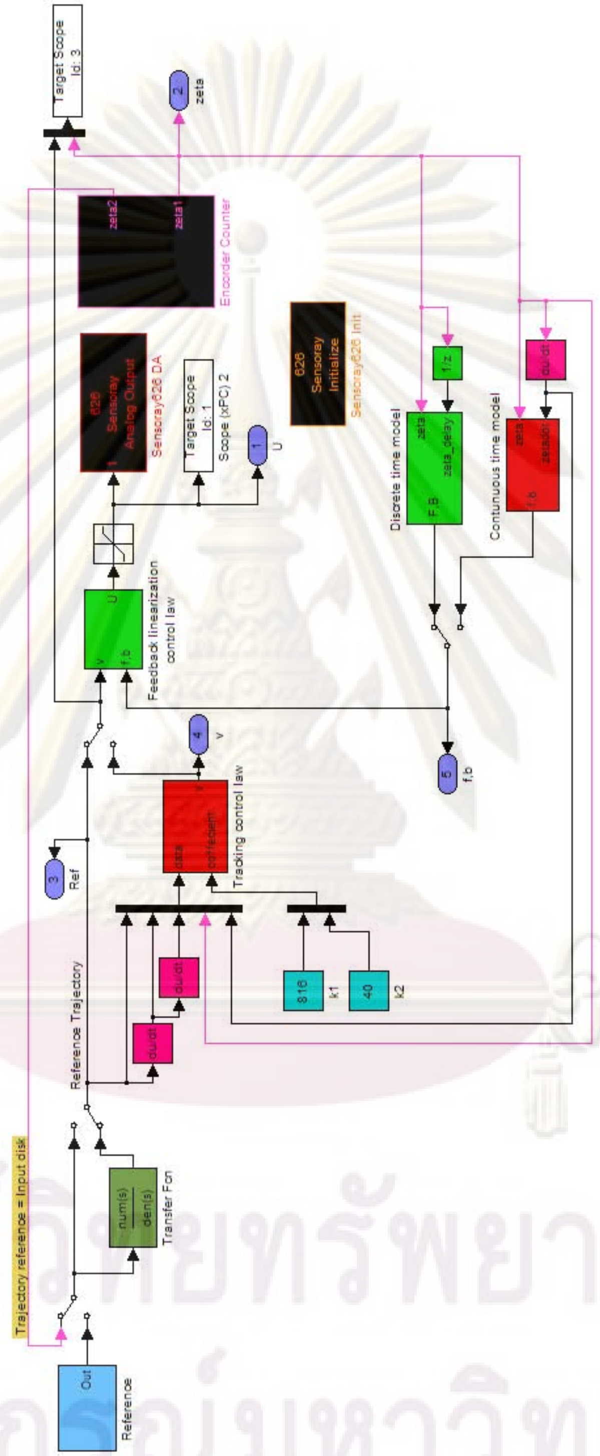
รูปที่ ก.6 หน้าต่างสร้างบูทดิสก์สำหรับ Target PC ของ xPC Target

ก.4 โปรแกรมควบคุมระบบจานหมุนทางกลในเวลาจริง

ในการควบคุมระบบจานหมุนในเวลาจริงจะใช้โปรแกรมที่เขียนขึ้นในเครื่อง Host PC ด้วยบล็อกของซิมูลิงค์ในโปรแกรมแม็ทแล็บ/ซิมูลิงค์ จากนั้นจึงทำการแปลงโปรแกรมที่เขียนไปยังเครื่อง Target PC ที่ใช้ในการควบคุมระบบจานหมุน

โปรแกรมควบคุมเส้นทางเดินของระบบจานหมุนทางกลที่ใช้ในตอนที่ 5.3 สามารถเลือกวิธีการควบคุมได้ว่าจะจำลองการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมที่นำเสนอ หรือใช้วิธีการควบคุมที่แปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับโดยทั่วไป และสามารถเลือกสัญญาณทางเดินอ้างอิงแบบต่างๆ ได้ รวมไปถึงการกำหนดพลวัติของฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้ในการปรับสัญญาณแบบขั้นบันไดให้เป็นเส้นทางเดินแบบต่อเนื่องตามต้องการ สัญญาณควบคุมที่คำนวณได้ถูกส่งไปยังส่วน D/A ของแผงวงจร Sensoray model 626 เพื่อจ่ายสัญญาณแรงดันไปควบคุมมอเตอร์ และรับสัญญาณพัลส์จากเอนโค้ดเดอร์ของจานหมุนด้วยตัวนับสัญญาณเอนโค้ดเดอร์ของแผงวงจร Sensoray model 626 เช่นกัน ดังรูปที่ ก.7

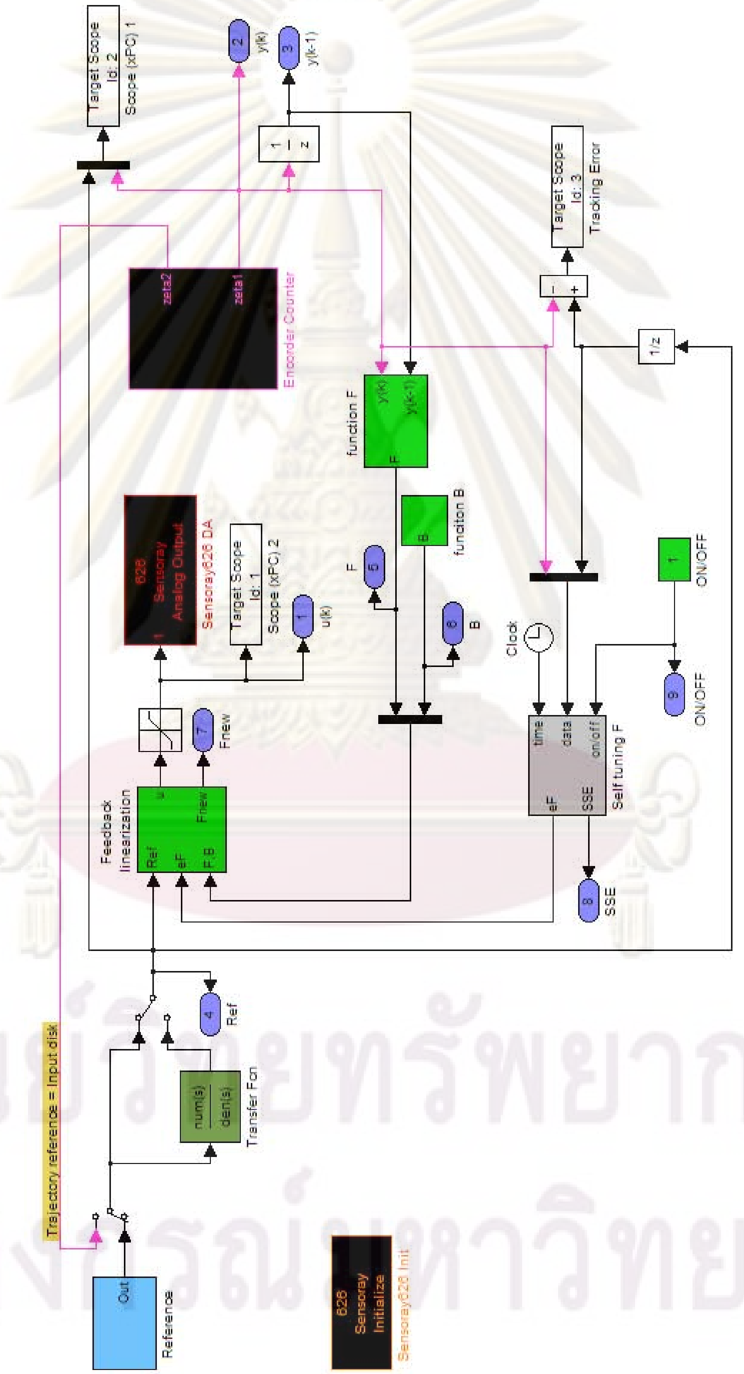
ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก.7 โปรแกรมควบคุมระบบจานหมุนทางกด้วยวิธีแปลงระบบเป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับที่นำเสนอ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โปรแกรมที่ใช้ในตอนที่ 5.4 ซึ่งเป็นโปรแกรมควบคุมเส้นทางเดินของระบบจานหมุนทางกลด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้ มีลักษณะคล้างคลึงกับโปรแกรมที่ใช้ในตอนที่ 5.3 แต่ได้มีการเพิ่มส่วนของการปรับปรุงตัวควบคุมเข้าไป และตัดวิธีการควบคุมที่แปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับโดยทั่วไปออก ดังรูปที่ ก.8



รูปที่ ก.8 โปรแกรมควบคุมระบบจานหมุนทางกลด้วยตัวควบคุมชนิดปรับค่าเองได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23
4 – 7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่

การควบคุมทางเดินของระบบไม่เชิงเส้นด้วยการป้อนกลับเพื่อหักล้างพลวัติของระบบ

Tracking Control of a Nonlinear Systems using a Feedback Cancellation of Plant Dynamics

ธนะชัย วิภาวรศิลป์, รัชทิน จันทร์เจริญ* และ ศุภวุฒิ จันทรานุวัฒน์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

*ติดต่อ: Ratchatin.C@eng.chula.ac.th, (662) 2186643, (662) 2522889

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการควบคุมระบบไม่เชิงเส้นที่สามารถเขียนอยู่ในรูป companion form ได้ โดยใช้การหักล้างพลวัติของระบบ วิธีการนี้เริ่มจากการหาแบบจำลองไม่เชิงเส้นของระบบโดยใช้คู่สัญญาณอินพุตเอาต์พุตจากข้อมูลการเคลื่อนที่จริง จากนั้นสร้างสัญญาณควบคุมโดยคำนวณบนพื้นฐานของเอาต์พุตของระบบที่เวลาปัจจุบันและอดีตเพื่อกำจัดพลวัติของระบบ ทำให้แบบจำลองของระบบปิดมีลักษณะเป็นสมการทางพีชคณิตที่มีความสัมพันธ์คือ เอาต์พุตในอนาคตเท่ากับอินพุตที่เวลาปัจจุบันโดยมีเวลาหน่วงคงที่ เป็นผลทำให้เราสามารถควบคุมเอาต์พุตได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว เอื้อต่อการนำไปใช้ในการควบคุมเส้นทางเดินของอินพุต บทความนี้ได้ทดลองควบคุมระบบจานหมุน ซึ่งผลการทดลองแสดงว่าการควบคุมเส้นทางเดินแบบต่อเนื่องนั้นสามารถทำได้อย่างสมบูรณ์ ในกรณีเส้นทางเดินอ้างอิงเป็นแบบไม่ต่อเนื่องมีลักษณะเป็นขั้นบันได ระบบควบคุมในลักษณะนี้อาจไม่สามารถรับประกันสมรรถภาพในช่วงรอยต่อของสัญญาณขั้นบันไดได้ อาจทำให้เอาต์พุตเกิดการสั่นก่อนที่จะลู่เข้าสู่สัญญาณเส้นทางเดินที่ต้องการ ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการปรับสัญญาณอ้างอิงให้มีลักษณะเป็นสัญญาณต่อเนื่องที่มีพลวัติตามที่กำหนด โดยให้สัญญาณอ้างอิงผ่านสมการฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีพลวัติตามที่ต้องการก่อนเข้าสู่ระบบควบคุม วิธีการนี้จะเป็นผลทำให้ระบบควบคุมแบบปิดกลับมามีพลวัติเท่ากับที่กำหนด จากผลการควบคุมระบบจานหมุนพบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถรับมือกับสัญญาณอ้างอิงที่มีลักษณะเป็นขั้นบันไดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำหลัก*:* ควบคุมระบบไม่เชิงเส้น, การหักล้างพลวัติของระบบ, การควบคุมทางเดิน, การป้อนกลับสเตต

Abstract

This paper proposes a technique to control nonlinear system that can be written in companion form by cancellation of its dynamics. First, the model of a nonlinear system is determined from

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

the input-output data pairs. Then, the control effort is computed based on the current output and its past values in order to suppress the dynamics of the system, and thus, the resulting closed loop system behavior is in algebraic form. The resulting behavior is that the output in the future equals the current input with a constant delay. In this way, the output is accurately and rapidly controlled and the control of the output trajectory is easy. The experimentation on the disk plant demonstrates that the technique is able to control the plant to perfectly track a desired smooth trajectory. In case that the trajectory contains a step or discontinuity, the technique cannot guarantee the stability during the discontinuity and the output may fluctuate before it converts to the trajectory. To solve this problem, the reference discontinuous trajectory should be modified such that it becomes smooth trajectory with specified dynamics. The transfer function that contains a desired dynamics is inserted and used to modify the reference. The modified technique gives a desired dynamics to the closed loop system. The experimentation demonstrates that the modified technique can effectively control the system to follow a step trajectory.

***Keywords**:* Nonlinear System Control, Plant Dynamics Cancellation, Tracking Control, State Feedback
.

1. บทนำ

การออกแบบตัวควบคุมที่ทำให้เอาต์พุตของระบบไม่เชิงเส้นติดตามทางเดินเป็นงานที่ท้าทาย เนื่องจากเอาต์พุตและสัญญาณควบคุมมีความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น ส่งผลให้ตัวควบคุมที่ออกแบบบนพื้นฐานของการประมาณระบบให้เป็นเชิงเส้นรอบจุดสมดุลหรือจุดทำงานนั้นให้ผลการควบคุมไม่เป็นที่น่าพอใจสำหรับระบบซึ่งทำงานบนพื้นที่ทำงานที่กว้าง วัตถุประสงค์หลักของบทความนี้คือการออกแบบตัวควบคุมทางเดินที่ความแม่นยำและนำไปใช้ได้จริงกับระบบไม่เชิงเส้นในการติดตามสัญญาณอ้างอิงที่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อหลายปีที่ผ่านมาปัญหานี้ได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นในภาคอุตสาหกรรม ชุดส่งกำลังทางกลถูกแทนที่ด้วยเทคโนโลยีทางอิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่า “By-wire” [1] ยกตัวอย่างเช่น คันเร่งของยานยนต์รุ่นใหม่ซึ่งใช้เทคโนโลยีนี้ โดยตำแหน่งของคันเร่งจะถูกตรวจจับโดยเอ็นโค้ดเดอร์และส่งผ่านมาทางสายสัญญาณเพื่อนำมาใช้ในการเปิดลิ้นปีกผีเสื้อ เช่นเดียวกันกับเทคโนโลยี “Steer by wire” ที่ถูกนำมาใช้กับยานยนต์รุ่นใหม่ในขณะนี้ นอกจากนี้ยังมีงานด้านอื่นที่ต้องการตัวควบคุมทางเดินที่มีความแม่นยำอีกเช่น อุปกรณ์มาสเตอร์/สเลฟ [2,3] หุ่นยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยความเร็วสูง [4] และ เครื่องจักรซีเอ็นซีความเร็วสูง [5]

ในความเป็นจริงแล้วระบบทางกลล้วนแล้วแต่เป็นระบบไม่เชิงเส้น ระบบโดยทั่วไปจะประกอบด้วยแรงเสียดทานซึ่งจะมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงเมื่อมีแรงเสียดทานแห้ง (dry friction) รวมอยู่ด้วย ความไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากแรงโน้มถ่วง และการเปลี่ยนแปลงของความเฉื่อยหรือภาระ ทำให้ตัวควบคุมพีไอดีให้ผลการควบคุมไม่เป็นที่น่าพอใจ โดยเฉพาะการควบคุมทางเดิน ตัวควบคุมนี้ไม่สามารถควบคุมทำให้ค่าความผิดพลาดของการติดตามทางเดิน (tracking error) ลู่เข้าสู่ศูนย์ได้ (asymptotically decrease)

วิธีการที่ถูกนำมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมทางเดินอย่างได้ผลคือวิธีการที่เรียกว่า “computed torque” [6] วิธีการนี้สัญญาณควบคุมจะประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนป้อนกลับเพื่อแปลงระบบให้เป็นเชิงเส้น (feedback linearization part) และส่วนขับเคลื่อนระบบ (servo part) สำหรับส่วนป้อนกลับเพื่อแปลงระบบให้เป็นเชิงเส้นจะคำนวณสัญญาณควบคุมบนพื้นฐานของการป้อนกลับสเตตเพื่อทำให้ระบบปิดเป็นเชิงเส้น จากนั้นสัญญาณควบคุมของส่วนขับเคลื่อนระบบจะถูกคำนวณจาก

ระบบปิดเชิงเส้นเพื่อควบคุมให้ค่าความผิดพลาดของการติดตามทางเดินลู่เข้าสู่ศูนย์ โดยทั้งสองส่วนจะทำงานพร้อมกันในรูปแบบของตัวควบคุมทางเดินซึ่งให้ผลการควบคุมทางเดินที่สมบูรณ์

ในกรณีที่เราทราบพลวัติของระบบเชิงเส้นที่มีความแม่นยำ จะสามารถนำสัญญาณอ้างอิง อนุพันธ์อันดับหนึ่งและอันดับสองของสัญญาณอ้างอิงมาใช้คำนวณหาสัญญาณควบคุมโดยใช้วิธีการ inverse dynamic ของระบบเชิงเส้น วิธีการนี้สัญญาณทางเดินอ้างอิงเป็นสัญญาณแบบเดี่ยว (single signal) ซึ่งเมื่อนำไปใช้ควบคุมพลวัติของระบบเชิงเส้นจะให้ผลลัพธ์ของทางเดินที่สมบูรณ์ และเนื่องจากระบบปิดเป็นเชิงเส้น การพิสูจน์เสถียรภาพของระบบสามารถจึงทำได้โดยใช้ทฤษฎีของระบบเชิงเส้น [7]

ความยุ่งยากในการใช้วิธีการ computed torque คือต้องทราบแบบจำลองพลวัติของระบบปิดที่มีความแม่นยำ อีกทั้งยังต้องใช้อนุพันธ์อันดับหนึ่งและอันดับสองของตำแหน่งอ้างอิงและตำแหน่งจริงในการคำนวณสัญญาณควบคุม ในกรณีที่อุปกรณ์อินพุต (input device) เป็นเครื่องกำเนิดสัญญาณตำแหน่งอ้างอิง อนุพันธ์อันดับหนึ่งและอนุพันธ์อันดับสองของตำแหน่งอ้างอิงจะต้องถูกคำนวณในเวลาจริง (real time) ซึ่งจำเป็นต้องใช้ความสามารถในการคำนวณของฮาร์ดแวร์ที่สูงจึงเป็นการเพิ่มต้นทุน นอกจากนี้ในการคำนวณสัญญาณควบคุมต้องใช้ทั้งการป้อนกลับสเตตเพื่อกำจัดความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ และใช้การคำนวณบนพื้นฐานของวิธีการ inverse dynamic ของระบบเชิงเส้น เพื่อนำไปใช้ในการควบคุมพลวัติของระบบให้สามารถติดตามทางเดินแบบต่อเนื่องได้อย่างสมบูรณ์ อีกปัญหาหนึ่งสำหรับวิธีการนี้ก็คือแบบจำลองของระบบไม่เชิงเส้นต้องมีความแม่นยำเพียงพอซึ่งการหาแบบจำลองที่มีความแม่นยำนั้นจำเป็นต้องใช้วิธีการที่มีความยุ่งยาก

วิธีจัดการกับปัญหาเหล่านี้คือ สัญญาณควบคุมต้องไม่เพียงแต่กำจัดความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ แต่ต้องถูกออกแบบให้กำจัดพลวัติของระบบ ทำให้ระบบปิดอยู่ในรูปสมการทางพีชคณิตของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต สัญญาณตำแหน่งอ้างอิงจึงสามารถนำมาใช้อ้างอิงได้โดยตรง โดยที่ระบบยังคงสามารถติดตามทางเดินได้อย่างสมบูรณ์

ในบทความนี้จะนำเสนอวิธีการควบคุมที่ใช้การหักล้างพลวัติของระบบสำหรับระบบไม่เชิงเส้นที่สามารถเขียนอยู่ในรูป companion form ได้ วิธีการดังกล่าวถูกออกแบบบนระบบเวลาไม่ต่อเนื่องบนพื้นฐานของการแปลงระบบควบคุมให้ระบบควบคุมเป็นระบบเชิงเส้นด้วยการป้อนกลับ (feedback linearization) โดยใช้แบบจำลองไม่เชิงเส้นของระบบที่หาได้จากคู่สัญญาณอินพุตเอาต์พุตของข้อมูลการเคลื่อนที่จริง และเพื่อแสดงถึงศักยภาพของวิธีการควบคุม จึงได้ออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมทางเดินของระบบจานหมุนทางกลที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น และทำการทดลองควบคุมทางเดินในเวลาจริงเพื่อแสดงให้เห็นว่าวิธีการดังกล่าวสามารถนำมาใช้งานได้จริง ซึ่งจะเป็นรากฐานที่สำคัญในการออกแบบตัวควบคุมเอนกประสงค์สำหรับระบบไม่เชิงเส้นต่อไป

2. การป้อนกลับเพื่อหักล้างพลวัติของระบบ

ระบบที่สนใจคือระบบไม่เชิงเส้นแบบอินพุตเดียวเอาต์พุตเดียวที่สามารถเขียนอยู่ในรูป companion form ได้

$$y^{(n)} = \mathrm{a}(\mathbf{y}) + \mathrm{b}(\mathbf{y})u \qquad (1)$$

โดยที่ a และ b เป็นฟังก์ชันของสเตต $\mathbf{y} = \left[y, \dot{y}, \ldots, y^{(n-1)} \right]^T$ และ b ไม่เข้าใกล้ศูนย์, y เป็นเอาต์พุต และ u เป็นอินพุต ระบบมีเสถียรภาพแบบ BIBO (bounded input bounded output) และระบบ (1) มี relative degree $= n$ ไม่มี internal dynamics และมีความสามารถในการควบคุมได้ [7]

ระบบ (1) สามารถเขียนในรูปแบบเวลาไม่ต่อเนื่องโดยอาศัยคำจำกัดความตามสมการออยเลอร์ (Euler Equation) หรือวิธี finite difference method

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[13,14] จะได้สมการดิฟเฟอร์เรนซ์ (difference equation) ดังนี้

$$y_{k+1} = f_0\left(\mathbf{y}_k\right) + g_0\left(\mathbf{y}_k\right) u_{k-d+1} \qquad (2)$$

โดยที่ y_k เป็นเอาต์พุตที่เวลา k , d เป็น relative degree, $\mathbf{y}_k = \left[y_{k-n+1}, \cdots, y_k\right]^T$ จากระบบ (2) จะพบว่าเราไม่สามารถหักล้างพลวัติของระบบได้โดยการให้กฎการควบคุมคือ

$$u_{k-d+1} = \frac{r_k - f_0\left(\mathbf{y}_k\right)}{g_0\left(\mathbf{y}_k\right)} \qquad (3)$$

โดยที่ r_k เป็นสัญญาณอ้างอิง เนื่องจากในกรณีที่ $d > 1$ สัญญาณอินพุตที่เวลาปัจจุบันขึ้นกับสัญญาณเอาต์พุตในอนาคต ซึ่งประเด็นนี้เป็นที่ทราบกันดีสำหรับระบบเชิงเส้นในรูปแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง (linear discrete-time system) [8,9] โดยเป้าหมายของส่วนนี้คือการแก้ปัญหาดังกล่าวสำหรับระบบไม่เชิงเส้น (2)

ในการแก้ปัญหาดังกล่าวจะพิจารณาระบบ (2) ในรูปปริภูมิสเตต (state space) โดยการเลือกเอาต์พุตในปัจจุบันและอดีตเป็นตัวแปรสเตต นั่นคือ

$$x_i\left(k\right) = y\left(k-n+i\right) \text{ สำหรับ } i = 1, 2, \cdots, n \qquad (4)$$

กำหนดให้ $\mathbf{x}\left(k\right) = \left[x_1\left(k\right), \cdots, x_n\left(k\right)\right]^T$ เป็นเวกเตอร์สเตต และ $y\left(k\right)$ เป็นเอาต์พุตที่สนใจ จะได้สมการที่อยู่ในรูปปริภูมิสเตตคือ

$$\begin{aligned} x_1\left(k+1\right) &= x_2\left(k\right) \\ x_2\left(k+1\right) &= x_3\left(k\right) \\ &\vdots \\ x_n\left(k+1\right) &= f_0\left(\mathbf{x}\left(k\right)\right) + g_0\left(\mathbf{x}\left(k\right)\right) u_{k-d+1} \\ y\left(k\right) &= x_n\left(k\right) \end{aligned} \qquad (5)$$

ในการแก้ปัญหาดังกล่าวเราจำเป็นต้องหักล้างพลวัติของระบบโดยการป้อนกลับที่สมเหตุสมผล [12] นั่นคือ แทนค่าเอาต์พุตในอนาคตด้วยเทอมที่ประกอบด้วย $\mathbf{x}\left(k\right)$ หรือให้ $x_n\left(k+1\right) = y\left(k+1\right)$ ดังนี้

$$\begin{aligned} x_n\left(k+2\right) &= f_0\left(\mathbf{x}\left(k+1\right)\right) \\ &\quad + g_0\left(\mathbf{x}\left(k+1\right)\right) u_{k-d+2} \end{aligned} \qquad (6)$$

แทน $\mathbf{x}\left(k+1\right)$ ในสมการที่ (6) ด้วยเทอมด้านขาวมือของสมการที่ (5) จะได้

$$\begin{aligned} x_n\left(k+2\right) &= f_1\left(\mathbf{x}\left(k\right), u_{k-d+1}\right) \\ &\quad + g_1\left(\mathbf{x}\left(k\right), u_{k-d+1}\right) u_{k-d+2} \end{aligned} \qquad (7)$$

ใช้วิธีการเดียวกันนี้วนซ้ำเรื่อยๆ โดยกำหนดให้ $\mathbf{u}_{k-d+i} = \left[u_{k-d+1}, u_{k-d+2}, \cdots, u_{k-d+i}\right]^T$ จะได้

$$\begin{aligned} x_n\left(k+3\right) &= f_2\left(\mathbf{x}\left(k\right), \mathbf{u}_{k-d+2}\right) \\ &\quad + g_2\left(\mathbf{x}\left(k\right), \mathbf{u}_{k-d+2}\right) u_{k-d+3} \\ &\vdots \\ x_n\left(k+d-1\right) &= f_{n-2}\left(\mathbf{x}\left(k\right), \mathbf{u}_{k-2}\right) \\ &\quad + g_{n-2}\left(\mathbf{x}\left(k\right), \mathbf{u}_{k-2}\right) u_{k-1} \end{aligned} \qquad (8)$$

จากนั้นเปลี่ยนตัวแปรสเตต ดังนี้

$$z_i\left(k\right) = x_i\left(k\right) \text{ สำหรับ } i = 1, 2, \cdots, n$$

$$z_{n+i}\left(k\right) = x_n\left(k+i\right) \text{ สำหรับ } i = 1, 2, \cdots, d-1$$

และกำหนดให้

$$\mathbf{z}\left(k\right) = \left[z_1\left(k\right), \cdots, z_n\left(k\right), z_{n+1}\left(k\right), \cdots, z_{n+d-1}\left(k\right)\right]^T$$

เป็นเวกเตอร์สเตต

สมการปริภูมิสเตตจะกลายเป็น

$$\begin{aligned} z_1\left(k+1\right) &= z_2\left(k\right) \\ z_2\left(k+1\right) &= z_3\left(k\right) \\ &\vdots \\ z_{n+d-1}\left(k+1\right) &= f_{n-1}\left(\mathbf{x}\left(k\right), \mathbf{u}_{k-1}\right) \\ &\quad + g_{n-1}\left(\mathbf{x}\left(k\right), \mathbf{u}_{k-1}\right) u_k \\ &= \varphi\left(\mathbf{z}\left(k\right)\right) + \Gamma\left(\mathbf{z}\left(k\right)\right) u_k \\ y\left(k\right) &= z_n\left(k\right) \end{aligned} \qquad (9)$$

ระบบสมการ (9) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของสมการดิฟเฟอร์เรนซ์ได้ดังนี้

$$y_{k+d} = F\left(\boldsymbol{\theta}_k\right) + G\left(\boldsymbol{\theta}_k\right) u_k \qquad (10)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\theta}_k &= \left[\mathbf{x}\left(k\right), \mathbf{u}_{k-1}\right]^T \\ &= \left[x_1, \cdots, x_n, u_{k-d+1}, \cdots, u_{k-1}\right]^T \\ &= \left[y_{k-n+1}, \cdots, y_k, u_{k-d+1}, \cdots, u_{k-1}\right]^T \end{aligned}$$

พิจารณาสมการ (10) ถ้าให้กฎการควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback control law) หรืออินพุต u_k คือ

$$u_k = \frac{r_k - F\left(\boldsymbol{\theta}_k\right)}{G\left(\boldsymbol{\theta}_k\right)} \qquad (11)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความไม่เป็นเชิงเส้นและพลวัติของระบบจะถูกกำจัด และจะได้แบบจำลองของระบบปิดเป็นสมการทางพีชคณิตที่มีความสัมพันธ์คือ เอาต์พุตที่เวลา $k+d$ เท่ากับสัญญาณอ้างอิงที่เวลา k

$$y_{k+d} = r_k \tag{12}$$

จากระบบปิด (12) เราสามารถควบคุมทางเดินได้โดยให้ r_k เป็นสัญญาณทางเดินอ้างอิงซึ่งจะให้เอาต์พุตที่มีเวลาหน่วงเท่ากับ d

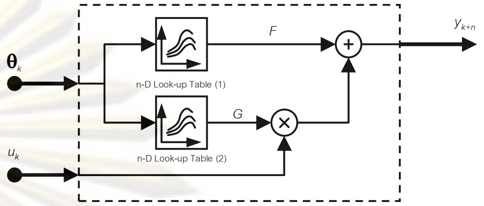
พิจารณา zero dynamics ของระบบ (9) เมื่อให้สัญญาณควบคุม (11) โดยกำหนดให้สัญญาณอ้างอิง r_k เป็นศูนย์ จะได้ระบบ (13) ซึ่งจะเห็นว่าพลวัติของ z_i สำหรับ i = 1, …, $n-1$ มีเสถียรภาพ ดังนั้นระบบเป็น minimum phase

$$\begin{aligned} z_1(k+1) &= z_2(k) \\ z_2(k+1) &= z_3(k) \\ &\vdots \\ z_{n-1}(k+1) &= 0 \end{aligned} \tag{13}$$

3. ระบบจำลองของระบบ

การหาแบบจำลองของระบบพลวัติเพื่อนำมาใช้คำนวณสัญญาณควบคุมแบบป้อนกลับ ในบทความนี้ได้ใช้การจำลองระบบจากอินพุตเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง โดยจะประมาณให้อยู่ในรูปของแบบจำลองตารางค้นหา (look-up table model) ซึ่งมีความเหมาะสมกับระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง สามารถใช้งานได้ง่ายและมีวิธีการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน [10,11] ร่วมกับการประมาณค่าพารามิเตอร์โดยใช้ตัวกรองคาลมานซึ่งเป็นเทคนิคการประมาณค่าที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจากวิธีความแปรปรวนน้อยที่สุดในรูปปริภูมิสเตต ให้มีขั้นตอนการคำนวณแบบวิธีเรียกซ้ำ [15,16] ในการหาเอกลักษณ์ของระบบ ดังนี้

พิจารณาระบบ (10) เมื่อ $\boldsymbol{\theta}_k$ คงที่ ณ จุดใดๆ จะพบว่าฟังก์ชัน $F(\boldsymbol{\theta}_k)$ และ $G(\boldsymbol{\theta}_k)$ จะมีค่าคงที่ด้วย เนื่องจากระบบไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นแบบจำลองตารางค้นหาของระบบ (10) จึงถูกออกแบบให้ประกอบด้วยตารางค้นหาสองตารางโดยแต่ละตารางมีมิติเท่ากับจำนวนตัวแปรในฟังก์ชัน $F(\boldsymbol{\theta}_k)$ และ $G(\boldsymbol{\theta}_k)$ หรือเท่ากับขนาดของ $\boldsymbol{\theta}_k$ แบบจำลองจะเป็นดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แบบจำลองตารางค้นหาสำหรับระบบ (10)

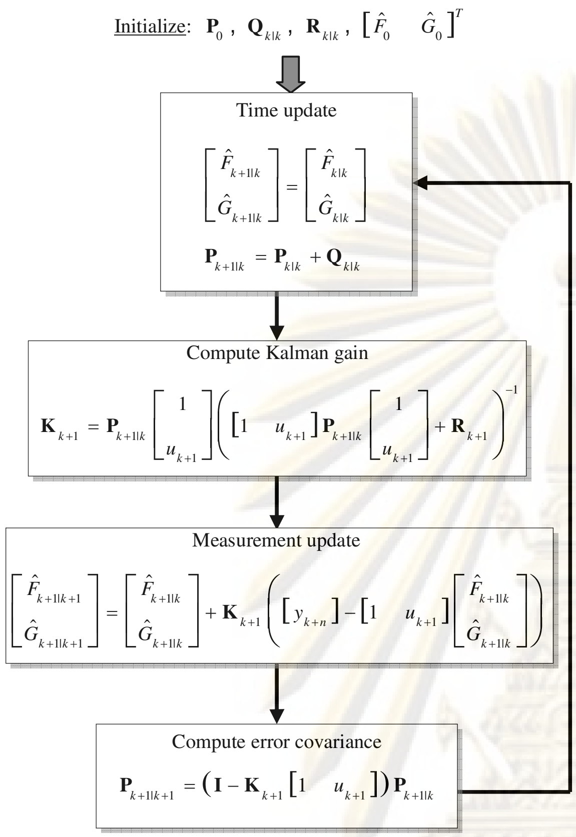
ในส่วนของวิธีการประมาณค่า $F(\boldsymbol{\theta}_k)$ และ $G(\boldsymbol{\theta}_k)$ ของแบบจำลอง จะใช้ตัวกรองคาลมานเป็นตัวประมาณค่า โดยจะประมาณค่า F และ G เป็นจุดๆ รอบจุด $\boldsymbol{\theta}_k$ คงที่ใดๆ ซึ่ง F และ G มีค่าคงที่และแบบจำลองของระบบจะอยู่ในรูปแบบเชิงเส้น

พิจารณาระบบ (10) ในรูปสเตตเสปซ ณ จุด $\boldsymbol{\theta}_k$ คงที่ สำหรับตัวกรองคาลมาน

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} F_{k+1} \\ G_{k+1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} F_k \\ G_k \end{bmatrix} + \mathbf{w}_k \\ y_{k+n} &= \begin{bmatrix} 1 & u_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_k \\ G_k \end{bmatrix} + \mathbf{v}_k \end{aligned} \tag{14}$$

โดยที่ สัญญาณรบกวนของกระบวนการ $\mathbf{w}$ และสัญญาณรบกวนของค่าการวัด $\mathbf{v}$ เป็น zero-mean Gaussian white noise process ที่มีเมตริกซ์ความแปรปรวนร่วมกึ่งบวกแน่นอน (positive semi-definite covariance matrix) $\mathbf{Q}$ และ $\mathbf{R}$ ตามลำดับ

ขั้นตอนการคำนวณของตัวกรองคาลมานจะเป็นแบบวิธีเรียกซ้ำดังรูปที่ 2 โดยที่ $\mathbf{P}$ เป็นเมตริกซ์ความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อน (covariance matrix of error) และ $\mathbf{K}$ เป็นเมตริกซ์เกนคาลมาน (Kalman gain matrix) ซึ่งเมื่อได้แบบจำลองของระบบที่มีความแม่นยำเพียงพอแล้ว ก็สามารถนำค่า $F(\boldsymbol{\theta}_k)$ และ $G(\boldsymbol{\theta}_k)$ ไปใช้ในการควบคุมได้

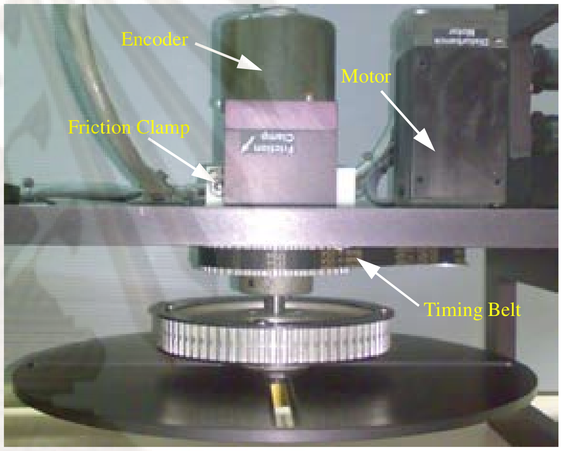


รูปที่ 2 ขั้นตอนการคำนวณในการประมาณค่า F และ G โดยใช้ตัวกรองคาลมาน

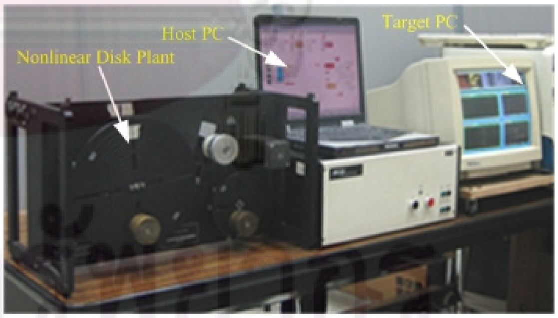
4. ระบบจานหมุนไม่เชิงเส้น

ส่วนระบบไม่เชิงเส้นที่ใช้ทดลองเพื่อแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของตัวควบคุม คือระบบจานหมุน Educational Control Products (ECP) model 220 ดังแสดงในรูปที่ 3ก โดยระบบมีกลไกที่ทำให้สามารถปรับโมเมนต์ความเฉื่อย และอัตราทดได้ นอกจากนี้ยังสามารถจำลอง แรงเสียดทาน ความยืดหยุ่น (Drive flexibility) และแบ็กแล็ช (backlash) ชุดทดลองจะประกอบด้วยจานหมุนสองจาน จานหมุนเล็ก (input disk) ใช้เป็นอุปกรณ์สร้างสัญญาณตำแหน่งอ้างอิงในเวลาจริง ขณะที่จานหมุนใหญ่ (pendulum disk) เป็นระบบไม่เชิงเส้นที่ต้องการควบคุม โดยมอเตอร์ที่ใช้ขับจานหมุนเป็น brushless DC servo motor ซึ่งใช้งานร่วมกับเอ็นโค้ดเดอร์ความละเอียด 4000 PPR และใช้ตัวควบคุมคือ Matlab® xPC Real time Controller ในการทดลองควบคุมทางเดินในเวลาจริง ดังรูป 3ข

(ก) ระบบทางกล



(ข) รายละเอียดของระบบทางกล



(ค) Matlab® xPC Real time Controller

รูปที่ 3 ระบบจานหมุน ECP model 220

จานหมุนใหญ่ซึ่งเป็นระบบไม่เชิงเส้นที่ต้องการควบคุม จะถูกติดตั้งยางที่แกนของจานหมุนเพื่อสร้างแรงเสียดทานแห้ง และติดมวลทองเหลืองบนจานหมุนเพื่อสร้างผลกระทบจากแรงโน้มถ่วงซึ่งไม่เป็นเชิงเส้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 โดยใช้เวลาสุ่ม (sampling time) ที่ 0.001 วินาที

5. การนำมาใช้ในการควบคุม

แบบจำลองของระบบจานหมุนสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\ddot{y}(t)+f\left(y(t),\dot{y}(t)\right)-mgl\sin\left(y(t)\right)=u(t) \quad (15)$$

โดยที่ y คือตำแหน่งของจานหมุนหรือเอาต์พุต

m คือมวลของตุ้มถ่วง

f คือแรงเสียดทาน3

u คืออินพุต

ระบบ (15) เป็นระบบไม่เชิงเส้นอันดับสอง ซึ่งสามารถเขียนในรูปแบบเวลาไม่ต่อเนื่องได้เป็น

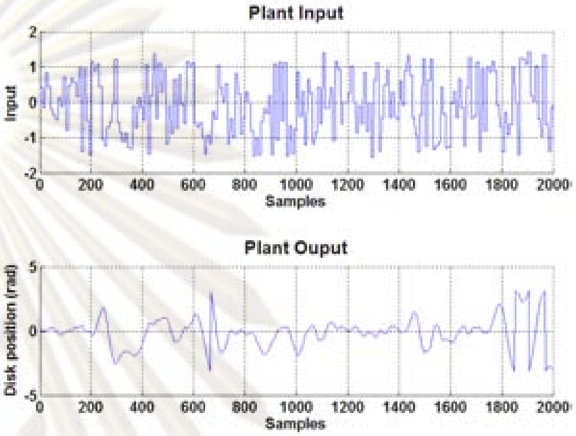
$$y_{k+1}=F\left(y_k,y_{k-1}\right)-G\left(y_k,y_{k-1}\right)u_k \quad (16)$$

ดังนั้นสัญญาณควบคุมของระบบจะอยู่ในรูป

$$u_k=\frac{r_k-F\left(y_k,y_{k-1}\right)}{G\left(y_k,y_{k-1}\right)} \quad (17)$$

จากระบบ (16) การหาเอกลักษณ์ของระบบ จะใช้แบบจำลองที่ประกอบด้วยตารางค้นหา 2 มิติ (two-dimensional look-up table) สำหรับฟังก์ชัน $F\left(y_k,y_{k-1}\right)$ และ $G\left(y_k,y_{k-1}\right)$ โดยกำหนดให้อินพุตทั้งสองของตารางค้นหาอยู่ในช่วง $-\pi$ เรเดียน ถึง π เรเดียน และกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างจุดข้อมูลเท่ากับ $\pi \times 10^{-2}$ เรเดียน ทั้งสองตาราง ดังนั้นตารางค้นหาแต่ละตารางจะมีขนาด 201 x 201 จุดข้อมูล

การประมาณค่าฟังก์ชัน F และ G จะใช้คู่สัญญาณอินพุตเอาต์พุตจากการเคลื่อนที่จริงจำนวน 120000 คู่สัญญาณ ดังในรูปที่ 4 โดยให้อินพุตของคู่สัญญาณเป็นแบบสุ่มที่ความถี่เท่ากับ 5 – 20 เฮิรตซ์ เวลาสุ่มเท่ากับ 0.001 วินาที จากนั้นใช้ตัวกรองคาลมานในการประมาณค่า F และ G ของแบบจำลองแบบออฟไลน์ โดยกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวกรองคาลมานในแต่ละจุดข้อมูลเป็นดังนี้ $\mathbf{P}_0=100\mathbf{I}_2$, $\mathbf{Q}_0=0_{2,2}$, $\mathbf{R}_0=0.01$ และ $\left[\hat{F}_0 \quad \hat{G}_0\right]^T$ ได้จากการสุ่ม



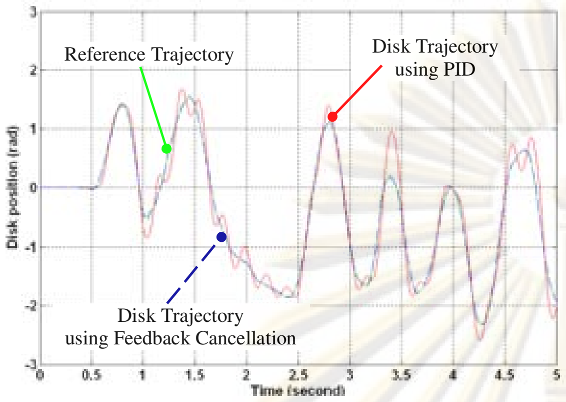
รูปที่ 4 คู่สัญญาณอินพุตเอาต์พุต (บางส่วน)

6. ผลการทดลองควบคุม

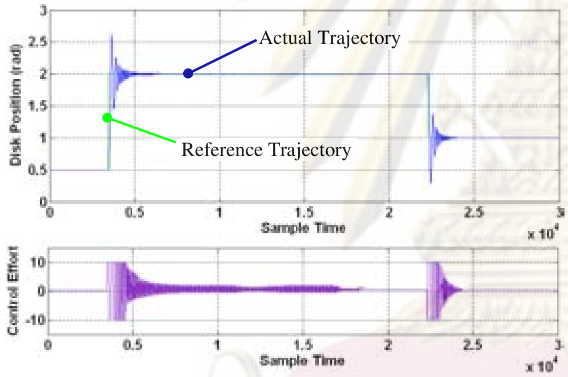
การทดลองจะแบ่งออกเป็นสองส่วน การทดลองแรกให้สัญญาณทางเดินอ้างอิงแบบต่อเนื่อง (smooth arbitrary trajectory) ที่ถูกสร้างขึ้นในเวลาจริงด้วยจานหมุนเล็ก ผลลัพธ์การควบคุม (รูปที่ 5) แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมมีความสามารถในการควบคุมทางเดินของระบบให้มีผลตอบสอนงตรงกับสัญญาณทางเดินอ้างอิงที่ต้องการทั้งแอมพลิจูดและเฟส ในขณะที่ตัวควบคุมพีไอดีไม่มีศักยภาพเพียงพอในการควบคุมทางเดินของระบบ นั่นคือผลลัพธ์ที่ได้มีความคลาดเคลื่อนจากสัญญาณอ้างอิงและมีเฟสล้าหลัง

การทดลองที่สองให้สัญญาณเส้นทางเดินอ้างอิงมีลักษณะเป็นขั้นบันไดซึ่งเป็นเส้นทางเดินแบบไม่ต่อเนื่อง ผลลัพธ์ของการควบคุม (รูปที่ 6) ปรากฏว่าเอาต์พุตเกิดการสั่นก่อนที่จะลู่เข้าสู่สัญญาณเส้นทางเดินอ้างอิง เนื่องจากสัญญาณควบคุมที่จะนำระบบเข้าสู่ทางเดินมีค่าสูงจนเกินขีดจำกัดของฮาร์ดแวร์ ทำให้สัญญาณควบคุมอิ่มตัวที่ค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ อย่างไรก็ตามสัญญาณควบคุมจะมีค่าลดลงเมื่อเมื่อระบบเข้าใกล้เส้นทางเดินอ้างอิง การสั่นจะ

ลดลงเมื่อสัญญาณควบคุมที่คำนวณได้มีค่าไม่เกินขีดจำกัดของฮาร์ดแวร์

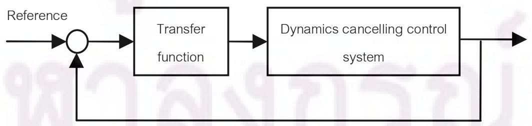


รูปที่ 5 ผลการควบคุมทางเดินแบบต่อเนื่องเปรียบเทียบการใช้ตัวควบคุมพีไอดี



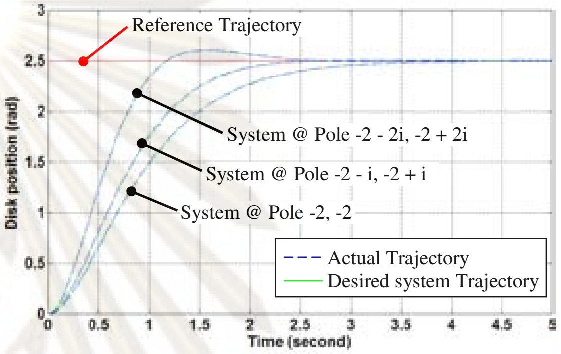
รูปที่ 6 ผลการควบคุมเมื่อสัญญาณอ้างอิงมีลักษณะเป็นขั้นบันได

วิธีการรับมือกับเส้นทางเดินอ้างอิงแบบไม่ต่อเนื่องสามารถทำได้โดยการปรับสัญญาณอ้างอิงให้มีลักษณะเป็นสัญญาณต่อเนื่องที่มีพลวัติตามที่กำหนด โดยให้สัญญาณอ้างอิงผ่านสมการฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีพลวัติเท่ากับที่กำหนด ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ระบบควบคุมเมื่อสัญญาณอ้างอิงไม่ต่อเนื่อง

ทดลองควบคุมโดยกำหนดให้พลวัติของระบบปิดมีโพลของระบบปิดที่ตำแหน่งต่างๆ เป็น -2, -2 ± i และ -2 ± 2i ตามลำดับ ผลลัพธ์การควบคุม (รูปที่ 8) แสดงให้เห็นว่าวิธีการนี้สามารถรับมือกับสัญญาณอ้างอิงที่มีลักษณะเป็นขั้นบันไดได้อย่างมีประสิทธิภาพ นั่นคือเอาต์พุตมีการตอบสนองเช่นเดียวกับระบบที่มีพลวัติเท่ากับที่กำหนด ดังนั้นวิธีการนี้จะเป็นผลทำให้ระบบควบคุมแบบปิดกลับมามีพลวัติเท่ากับที่กำหนดแทน



รูปที่ 8 ผลการควบคุมเมื่อสัญญาณอ้างอิงมีลักษณะเป็นขั้นบันไดโดยการกำหนดโพลของระบบปิดที่ตำแหน่งต่างๆ

7. สรุป

บทความนี้ประสบความสำเร็จในการนำวิธีการควบคุมทางเดินด้วยการป้อนกลับเพื่อหักล้างพลวัติของระบบมาใช้ในการควบคุมระบบจริง จากผลการทดลองกับระบบจานหมุนแสดงเห็นว่า วิธีการควบคุมทางเดินด้วยการป้อนกลับเพื่อหักล้างพลวัติของระบบ สามารถควบคุมระบบไม่เชิงเส้นให้มีทางเดินแบบต่อเนื่องที่สร้างขึ้นในเวลาจริงตามที่ต้องการได้อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ยังสามารถรับมือกับสัญญาณอ้างอิงที่มีลักษณะเป็นขั้นบันได ทำให้ผลตอบสนองมีพลวัติตามที่กำหนดได้อีกด้วย

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการวิจัยหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์เครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้การสนับสนุนเครื่องมืออุปกรณ์และเงินทุนแก่งานวิจัยในครั้งนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

9. เอกสารอ้างอิง

[1] 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.

[2] Rossi, C., Tilli, A. and Tonielli, A. (2000). Robust Control of a Throttle Body for Drive by Wire Operation of Automotive Engines, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 8, no. 6, November 2000, pp. 993 – 1002.

[3] Yokokohji, Y. and Yoshikawa, T. (1994). Bilateral Control of Master-Slave Manipulators for Ideal Kinesthetic Coupling-Formulation and Experiment, *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, vol. 10, no. 5, October 1994, pp. 605 – 620 DC.

[4] Kamalzadeh, A. and Erkorkmaz, K. (2006). Accurate tracking controller design for high-speed drives, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 47, December 2006, pp. 1393 – 1400.

[5] Erkorkmaz, K. and Altintas, Y. (2001). High speed CNC system design Part III: high speedtracking and contouring control of feed drives, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 41, 2001, pp.1637-1658

[6] Middleton, R.H. and Goodwin, G.C. (1988). Adaptive computed torque control for rigid link manipulations, *Systems and Control Letters*, vol. 10, 1988, pp. 9 – 16.

[7] Slotine, J.E. and Weiping, L. (1991). *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.

[8] Goodwin, G.S. and Sin, K.S. (1984). *Adaptive Filtering: Prediction and Control*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.

[9] Astrom, K.J. and Wittenmark, B. (1989). *Adaptive Control*, Addison-Wesley, Reading, MA.

[10] Stamm, K. (1996). Description, Identification and Compensation of Nonlinearities by Means of Look-up-Tables, paper presented in *the proceeding of the 1996 IEEE International Syposium on computer-Aided Control System Design*, Dearborn, Michigan, USA

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

[12] Chen, F.C. and Khalil, H.K. (1995). Adaptive Control of a Class of Nonlinear Discrete-Time Systems Using Neural Networks, *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 40, no. 5, may 1995, pp. 791 – 801.

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

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

[15] Aidala, V. (1977). Parameter estimation via the kalman filter, IEEE Transactions on automatic control, vol. 22, June 1977, pp. 471 – 472.

[16] Ljung, L. (1999). *System identification theory for the user*, 2nd edition, Prentice-Hall, New Jersey.

[17] Monaco, S. and Normand-Cyrot, D. (1987). Minimum-phase nonlinear discrete-time system and feedback stabilization, paper presented in *the proceeding of the 26th IEEE conference on decision and control*, Los Angeles, California, USA.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธนะชัย วิภาวรศิลป์ เกิดเมื่อวันที่ 8 ตุลาคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดเชียงราย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย