ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล — **สาขา**

วิศวกรรมเครื่องกล — **ภาควิชา**

เรื่อง การปรับโดยอัตโนมัติของตัวควบคุมแบบพีไอดีด้วยการแสวงหาค่าสุดขีดประยุกต์ใช้กับลิ้นปีกผีเสื้อของเครื่องยนต์

Automatic Tuning of PID Controller Using Extremum Seeking Applied to Engine Throttle

นามผู้วิจัย นายเสริมศักดิ์ โชตนา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

(รองศาสตราจารย์วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา .....

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... **เดือน** ..... **พ.ศ.** .....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การปรับโดยอัตโนมัติของตัวควบคุมแบบพีไอดีด้วยการแสวงหาค่าสุดขีดประยุกต์ใช้กับลิ้นปีกผีเสื้อของเครื่องยนต์

Automatic Tuning of PID Controller Using Extremum Seeking Applied to Engine Throttle

โดย

นายเสริมศักดิ์ โชตนา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เสริมศักดิ์ โชตนา 2557: การปรับโดยอัตโนมัติของตัวควบคุมแบบพีไอดีด้วยการแสวงหาค่าสุดขีดประยุกต์ใช้กับลิ้นปีกผีเสื้อของเครื่องยนต์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย, Ph.D. 73 หน้า

ลิ้นปีกผีเสื้อเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่กำหนดปริมาณอากาศบริเวณท่อร่วมไอดีก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ จึงเป็นอุปกรณ์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของรถยนต์ เช่น รอบเดินเบา อัตราเร่ง กำลังของเครื่องยนต์ เป็นต้น เนื่องจากรถยนต์มีสภาวะการทำงานที่หลากหลายจึงทำให้ยากต่อการควบคุมลิ้นปีกผีเสื้อให้เป็นไปตามต้องการ รวมทั้งผลจากแรงดันไฟฟ้าที่เข้าสู่ลิ้นปีกผีเสื้อที่มาจากแบตเตอรี่มีความไม่แน่นอนซึ่งส่งผลให้การควบคุมตำแหน่งของลิ้นปีกผีเสื้อให้เป็นไปตามต้องการทำได้ยากขึ้น

การแสวงหาค่าสุดขีดเป็นระบบควบคุมที่ไม่ต้องการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงเหมาะแก่การนำมาใช้กับระบบที่มีความซับซ้อน งานวิจัยนี้จึงได้เสนอการควบคุมลิ้นปีกผีเสื้อโดยใช้การแสวงหาค่าสุดขีดมาปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอ ซึ่งการปรับค่าอัตราขยายเป็นแบบเรียลไทม์ทำให้รองรับต่อการเปลี่ยนแปลงของความไม่แน่นอนของแรงดันไฟฟ้าที่เข้าสู่ลิ้นปีกผีเสื้อ

ผลจากการทดลองโดยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่เข้าสู่ลิ้นปีกผีเสื้อให้เปลี่ยนแปลงไป ตัวควบคุมก็สามารถปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอให้มีค่าที่เหมาะสมต่อแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง รองรับต่อสิ่งรบกวนที่เกิดจากแรงดันขาเข้าได้เป็นอย่างดีตำแหน่งของลิ้นปีกผีเสื้อเคลื่อนที่ได้อย่างถูกต้องมากขึ้นส่งผลให้ค่าความผิดพลาดสะสมที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงอีกด้วย

_____ _____ __ / __ / __

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Sermsak Chotana 2014: Automatic Tuning of PID Controller Using Extremum Seeking Applied to Engine Throttle. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Withit Chatlatanagulchai, Ph.D. 73 pages.

Throttle is a mechanism that controls the air flowing into intake manifold before into combustion chamber of engine, which affects the performance of vehicle such as idle speed, acceleration, and engine power. Automotive engine has many operating conditions that may be difficult to control throttle position as desired. Supplied voltage uncertainty from the battery results in more difficult control of the throttle position to the desired position.

Extremum seeking control is a control that does not require mathematic model, which is appropriate to be used with complex system. In this research, control of the throttle by extremum seeking to adjust gains of the PI controller in real-time is proposed. This real-time gain adjustment supports the uncertainty of the system from changing of the supplied voltage of the throttle.

The experimental results of changing supplied voltage of throttle show that the control system can adjust the PI gains when the supplied voltage is changed. The proposed technique handles the disturbance from the input voltage well. The throttle position is controlled to better accuracy causing decreasing in accumulated error.

_____ _____ __ / __ / __

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆเกี่ยวกับระบบควบคุม ช่วยในการวางแผนงานวิจัยให้คำปรึกษาต่างๆ ให้ทั้งโอกาสและประสบการณ์ อีกทั้งการปรับแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆในงานวิจัย และขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร. ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆมาโดยตลอด จนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสั่นสะเทือน(Control of Robot and Vibration Laboratory, CRVLAB) ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์การทำวิจัย ขอบพระคุณอาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่านที่มอบความรู้ตลอดการศึกษาในมหาวิทยาลัย ขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ห้องปฏิบัติการทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่ดีเสมอมา ขอบพระคุณ อาจารย์ภูมเรศ แสงราม ที่ให้คำแนะนำในการเรียนระดับปริญญาโทและคำแนะนำทางด้านสาขาระบบควบคุม ขอบคุณทุกๆความรู้ นักวิชาการนักวิจัยทุกท่านที่เขียนบทความวิชาการ วารสารวิชาการ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ทุกๆคนที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจที่ดี จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

เสริมศักดิ์ โชตนา

เมษายน 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญภาพ	(2)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	17
อุปกรณ์	17
วิธีการ	23
ผลและวิจารณ์	34
สรุปและข้อเสนอแนะ	59
สรุป	59
ข้อเสนอแนะ	61
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	62
ภาคผนวก	65
ภาคผนวก ก แผนภาพระบบควบคุมด้วยการแสวงหาค่าสุดขีดที่ออกแบบด้วยโปรแกรม LABVIEW	66
ภาคผนวก ข การเคลื่อนที่ของลิ้นปีกผีเสื้อโดยอ้างอิงกับสัญญาณจากคันเร่งของรถ Toyota Vigo ภายใต้สภาวะการขับขี่จริงบนท้องถนน	71
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	73

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ตำแหน่งของลิ้นปีกผีเสื้อและลิ้นเบี่ยง (Bypass valve)	3
2	ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของลิ้นปีกผีเสื้อกับสัญญาณอินพุต	4
3	เวลาประวิงระหว่างสัญญาณอินพุตกับการตอบสนองของทอร์ก	6
4	การเคลื่อนที่ของลิ้นปีกผีเสื้อที่เป็นทั้งไม่เป็นเชิงเส้นและเป็นแบบ Hysteretic	8
5	แผนภาพการแสวงหาค่าสุดขีดที่นำมาใช้ในการพิสูจน์เสถียรภาพ	10
6	แผนภาพการแสวงหาค่าสุดขีดร่วมกับฟังก์ชันการลดแอมพลิจูดของ Limit cycle	11
7	แผนภาพการปรับอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดีด้วยการแสวงหาค่าสุดขีด	12
8	แผนภาพแสดงการควบคุมเวลาในการจุดระเบิดด้วยการแสวงหาค่าสุดขีด	13
9	แผนภาพการทำงานของการแสวงหาค่าสุดขีดในระบบ Chilled-Water	14
10	แผนภาพแสดงการควบคุมเวลาการจุดระเบิดและการควบคุมลิ้นปีกผีเสื้อ	15
11	อุปกรณ์และแผนภาพการเชื่อมต่อที่ใช้ในการทดลอง	17
12	แสดงอุปกรณ์และการจัดวางในการทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ	18
13	ลิ้นปีกผีเสื้ออิเลกทรอนิกส์(Electronic Throttle) ของรถโตโยต้า วีโก้	19
14	การ์ดรับส่งข้องมูล(Data Acquisition) NI PCI 6221	19
15	ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรม LABVIEW	20
16	ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรม MATLAB	21
17	Power Supply GW INSTEK รุ่น GPS-3030D	22
18	ตัวอย่างระบบที่ต้องการควบคุมเพื่อให้ได้ระดับน้ำตามที่ต้องการ	23
19	แผนภาพแสดงการทำงานของระบบควบคุมเชิงสัดส่วน	24
20	แผนภาพแสดงการทำงานของระบบควบคุมแบบอินทิกรัล	25
21	ปริพันธ์ของสัญญาณความคลาดเคลื่อนกับเวลา	25
22	แผนภาพการทำงานของระบบควบคุมแบบพีไอ	26
23	แผนภาพแสดงการแสวงหาค่าสุดขีด	27
24	กราฟแสดงปัญหาค่าสูงสุดและปัญหาค่าต่ำสุด	30
25	ระบบควบคุมแบบปิดของระบบควบคุมแบบพีไอ	31
26	การแสวงหาค่าสุดขีดมาใช้กับระบบควบคุมแบบพีไอ	32

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
27	พฤติกรรมความเป็น hysteresis ที่ไม่เป็นเชิงเส้นของการเคลื่อนที่ของลิ้นปีกผีเสื้อ	34
28	สัญญาณอ้างอิงรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ใช้ในการทดลอง	35
29	ค่าความผิดพลาดสะสมของตัวควบคุมแบบพีไอเมื่อ $k_p = 2.5$ และ $k_I = 12$ ก่อนใช้วิธีการแสวงหาค่าสุดขีด	36
30	ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอต่อสัญญาณอ้างอิงเมื่อ $k_p = 2.5$ และ $k_I = 12$	37
31	ค่าความผิดพลาดสะสมของการแสวงหาค่าสุดขีดที่ $k_{P0} = 2.5$ และ $k_{I0} = 12$ หลังจากใช้วิธีการแสวงหาค่าสุดขีด	38
32	อัตราขยาย k_p ที่เปลี่ยนแปลงจาก $k_{p0} = 2.5$ เนื่องจากการแสวงหาค่าสุดขีด	38
33	อัตราขยาย k_i ที่เปลี่ยนแปลงจาก $k_{i0} = 12$ เนื่องจากการแสวงหาค่าสุดขีด	39
34	การเคลื่อนที่ของลิ้นปีกผีเสื้อตามสัญญาณอ้างอิงในแต่ละช่วงเวลา บน: ผลตอบสนองในช่วงเวลา 14 ถึง 26 วินาที, กลาง: ผลตอบสนองในช่วงเวลา 114 ถึง 126 วินาที, ล่าง: ผลตอบสนองในช่วงเวลา 314 ถึง 326 วินาที	40
35	สัญญาณอินพุต PWM ที่ให้ลิ้นปีกผีเสื้อในแต่ละช่วงเวลา บน: สัญญาณอินพุตในช่วงเวลา 14 ถึง 26 วินาที, กลาง: สัญญาณอินพุต ในช่วงเวลา 114 ถึง 126 วินาที, ล่าง: สัญญาณอินพุต ในช่วงเวลา 314 ถึง 326 วินาที	41
36	ค่าความผิดพลาดสะสมของตัวควบคุมแบบพีไอเมื่อ $k_P = 2.5$ และ $k_I = 8.2$ ก่อนใช้วิธีการแสวงหาค่าสุดขีด	42
37	ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอต่อสัญญาณอ้างอิงเมื่อ $k_P = 2.5$ และ $k_I = 8.2$	43
38	ค่าความผิดพลาดสะสมของการแสวงหาค่าสุดขีดที่ $k_{P0} = 2.5$ และ $k_{I0} = 8.2$ หลังจากใช้วิธีการแสวงหาค่าสุดขีด	44
39	อัตราขยาย k_p ที่เปลี่ยนแปลงจาก $k_{P0} = 2.5$ เนื่องจากการแสวงหาค่าสุดขีด	45
40	อัตราขยาย k_i ที่เปลี่ยนแปลงจาก $k_{I0} = 8.2$ เนื่องจากการแสวงหาค่าสุดขีด	45

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
41	การเคลื่อนที่ของลิ้นปีกผีเสื้อตามสัญญาณอ้างอิงในแต่ละช่วงเวลาเมื่อ $k_{P0} = 2.5$ และ $k_{I0} = 8.2$ บน: ผลตอบสนอง ในช่วงเวลา 14 ถึง 26 วินาที, กลาง: ผลตอบสนองในช่วงเวลา 114 ถึง 126 วินาที, ล่าง: ผลตอบสนองในช่วงเวลา 314 ถึง 326 วินาที	46
42	สัญญาณอินพุต PWM ที่ให้ลิ้นปีกผีเสื้อในแต่ละช่วงเวลา $k_{P0} = 2.5$ และ $k_{I0} = 8.2$ บน: สัญญาณอินพุตในช่วงเวลา 14 ถึง 26 วินาที, กลาง: สัญญาณอินพุต ในช่วงเวลา 114 ถึง 126 วินาที, ล่าง: สัญญาณอินพุต ในช่วงเวลา 314 ถึง 326 วินาที	47
43	ค่าความผิดพลาดสะสมเมื่อแรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง หลังจากใช้วิธีการแสวงหาค่าสุดขีด	48
44	การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราขยายของระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า	49
45	อัตราขยาย k_P ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของระบบ	50
46	อัตราขยาย k_I ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของระบบ	50
47	สัญญาณอินพุต PWM ที่ให้ลิ้นปีกผีเสื้อเมื่อแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง โดยให้ $k_{P0} = 2.5$ และ $k_{I0} = 8.2$ บน: สัญญาณอินพุตเมื่อแรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์, กลาง: สัญญาณอินพุตเมื่อแรงดันไฟฟ้า 10 โวลต์, สัญญาณอินพุตเมื่อแรงดันไฟฟ้า 14 โวลต์	51
48	ค่าความผิดพลาดสะสมของการแสวงหาค่าสุดขีดที่ $k_{P0} = 2.5$ และ $k_{I0} = 8.2$ หลังจากใช้วิธีการแสวงหาค่าสุดขีดเมื่อใช้ค่าความผิดพลาดกำลังสองเป็นค่าดรรชนีสมรรถนะ	53
49	อัตราขยาย k_p ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการแสวงหาค่าสุดขีดเมื่อใช้ค่าความผิดพลาดกำลังสองเป็นค่าดรรชนีสมรรถนะ	54
50	อัตราขยาย k_I ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการแสวงหาค่าสุดขีดเมื่อใช้ค่าความผิดพลาดกำลังสองเป็นค่าดรรชนีสมรรถนะ	54
51	อัตราขยาย k_P ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากใช้การแสวงหาค่าสุดขีดเมื่อสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันได	55

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

52 ค่าอัตราขยาย k_I ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากใช้การแสวงหาค่าสุดขีดเมื่อสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันได 55

53 ค่าความผิดพลาดสะสมเมื่อ $k_{P0} = 2.5$ และค่า $k_{I0} = 8.2$ โดยกำหนดให้เส้นจุดมีค่า $\gamma_{kP} = -0.4$ และ $\gamma_{kI} = 0.2$, เส้นทึบกำหนดให้ $\gamma_{kP} = -0.7$ และ $\gamma_{kI} = 0.5$, เส้นประ กำหนดให้ $\gamma_{kP} = -1$และ $\gamma_{kI} = 0.8$ 56

54 การเปลี่ยนแปลงของอัตราการขยาย k_P เมื่อ $k_{P0} = 2.5$ โดยกำหนดให้เส้นจุดมีค่า $\gamma_{kP} = -0.4$, เส้นทึบกำหนดให้ $\gamma_{kP} = -0.7$ และเส้นประกำหนดให้ $\gamma_{kP} = -1$ 57

55 การเปลี่ยนแปลงของอัตราการขยาย k_I เมื่อ $k_{I0} = 2.5$ โดยกำหนดให้เส้นจุดมีค่า $\gamma_{kI} = 0.2$, เส้นทึบกำหนดให้ $\gamma_{kI} = 0.5$ และเส้นประกำหนดให้ $\gamma_{kI} = 0.8$ 57

ภาพผนวกที่

ก1 แผนภาพระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยโปรแกรม LABVIEW ในส่วนของการรับสัญญาณ Analog และส่งสัญญาณ PWM 67

ก2 แผนภาพระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยโปรแกรม LABVIEW ในส่วนของระบบควบคุมแบบพีไอดีและการแสวงหาค่าสุดขีด 68

ก3 แผนภาพระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยโปรแกรม LABVIEW ในส่วนของการแสวงหาค่าสุดขีดและสัญญาณอ้างอิง 69

ก4 แผนภาพระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยโปรแกรม LABVIEW ในส่วนของการหาค่าความผิดพลาดสะสม 70

ข1 ตำแหน่งของลิ้นปีกผีเสื้อเทียบกับตำแหน่งของการเหยียบคันเร่งภายใต้สภาวะการขับขี่ในเมือง 72

ข2 ตำแหน่งของลิ้นปีกผีเสื้อเทียบกับตำแหน่งของการเหยียบคันเร่งภายใต้สภาวะการขับขี่นอกเมือง 72

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์ และอักษรย่อ

คำอธิบายสัญลักษณ์

θ	=	ตัวแปรของระบบ
$\hat{\theta}$	=	ค่าประมาณค่าตัวแปรของระบบ
$\tilde{\theta}$	=	ค่าความผิดพลาดของตัวประมาณค่าของระบบ
θ_0	=	ค่าตัวแปรเริ่มต้นของระบบ
$\bar{\theta}$	=	ค่าตัวแปรหลังจากผ่านอัตราขยายของการปรับตัวได้
θ^*	=	ค่าสุดขีดของตัวแปร
$\dot{\bar{\theta}}$	=	อนุพันธ์ของค่าตัวแปรหลังจากผ่านอัตราขยายของการปรับตัวได้
$\dot{\tilde{\theta}}$	=	อนุพันธ์ของค่าความผิดพลาดของตัวประมาณ
$\dot{\hat{\theta}}$	=	อนุพันธ์ของค่าประมาณ
γ	=	อัตราการขยายของการปรับตัวได้
γ_{kI}	=	อัตราการขยายของการปรับตัวได้ของอัตราการขยายแบบอินทิกรัล
γ_{kp}	=	อัตราการขยายของการปรับตัวได้ของอัตราการขยายเชิงสัดส่วน
ω	=	ความถี่ของสัญญาณรบกวน (rad/s)
ζ	=	ค่า y_h ที่รวมกับสัญญาณรบกวน
a	=	แอมพลิจูดของสัญญาณรบกวน
a_{kI}	=	แอมพลิจูดของสัญญาณรบกวนของอัตราการขยายแบบอินทิกรัล
a_{kp}	=	แอมพลิจูดของสัญญาณรบกวนของอัตราการขยายเชิงสัดส่วน
e	=	ค่าความผิดพลาดของระบบ
h	=	ความถี่ cut-off ของ High pass filter
J	=	ดรรชนีสมรรถนะ
k_I	=	อัตราการขยายของตัวควบคุมแบบอินทิกรัล
k_{I0}	=	ค่าเริ่มต้นของอัตราการขยายของตัวควบคุมแบบอินทิกรัล
k_P	=	อัตราการขยายของตัวควบคุมเชิงสัดส่วน
k_{P0}	=	ค่าเริ่มต้นของอัตราการขยายของตัวควบคุมเชิงสัดส่วน
l	=	ความถี่ cut-off ของ Low pass filter
ms	=	หน่วยวัดเวลา (มิลลิวินาที)
r	=	สัญญาณอ้างอิง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์ และอักษรย่อ (ต่อ)

คำอธิบายสัญลักษณ์

s	=	หน่วยวัดเวลา (วินาที)
T	=	ช่วงเวลาของการเปลี่ยนตำแหน่งของสัญญาณอ้างอิง (s)
T_{peak}	=	เวลาที่ค่าโอเวอร์ชูตสูงสุด (s)
t_0	=	เวลาเริ่มต้นของดรรชนีสมรรถนะ (s)
u_I	=	สัญญาณอินพุตที่ได้จากตัวควบคุมแบบปริพันธ์
u_P	=	สัญญาณอินพุตที่ได้จากตัวควบคุมเชิงสัดส่วน
u_{PI}	=	สัญญาณควบคุมที่ได้จากตัวควบคุมแบบพีไอ
y	=	สัญญาณเอาท์พุต
y_h	=	ค่าดรรชนีสมรรถนะเมื่อผ่าน High pass filter
y_l	=	ค่าดรรชนีสมรรถนะเมื่อผ่าน Low pass filter

คำอธิบายอักษรย่อ

ECU	=	Electronic Control Unit
LH	=	Limp Home
ESC	=	Extremum Seeking Control
ABS	=	Anti-lock Braking System
PWM	=	Pulse Width Modulation
HVCM	=	High Voltage Converter Modulator
EGR	=	Exhaust Gas Recirculation
HCCI	=	Homogenous Charge Compression Ignition
NO_x	=	Nitrogen Oxide
PID	=	Proportional Integral Derivative Controller

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การปรับโดยอัตโนมัติของตัวควบคุมแบบพีไอดีด้วยการแสวงหาค่าสุดขีด ประยุกต์ใช้กับลิ้นปีกผีเสื้อของเครื่องยนต์

Automatic Tuning of PID Controller Using Extremum Seeking Applied to Engine Throttle

คำนำ

รถยนต์เป็นยานพาหนะที่เป็นส่วนหนึ่งในการใช้ชีวิตประจำวันในปัจจุบัน การที่รถยนต์มีเครื่องยนต์ที่ดีทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพย่อมเป็นสิ่งที่ผู้ขับขี่ต้องการ ด้วยเหตุนี้ระบบควบคุมที่นำมาใช้ในการควบคุมเครื่องยนต์จึงมีความสำคัญอย่างมาก ลิ้นปีกผีเสื้อเป็นอุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งซึ่งส่งผลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์โดยตรงเพราะเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการกำหนดปริมาณอากาศก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ แต่มีสิ่งรบกวนจากรอบข้างอยู่มากที่ส่งผลต่อการทำงานของลิ้นปีกผีเสื้อ จึงเป็นปัญหาทางด้านระบบควบคุมที่น่าสนใจในปัจจุบัน

ในการศึกษาได้ทำการทดลองออกแบบระบบควบคุมของการเคลื่อนที่ของลิ้นปีกผีเสื้อให้สามารถรองรับต่อสิ่งรบกวนที่เกิดขึ้น โดยกำหนดสิ่งรบกวนให้เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่เข้าสู่ลิ้นปีกผีเสื้อให้มีการเปลี่ยนแปลง อีกทั้งลิ้นปีกผีเสื้อยังมีแรงที่เกิดจากสปริงที่ตำแหน่ง Limp Home จึงทำให้การเคลื่อนที่ของลิ้นปีกผีเสื้อมีลักษณะที่เป็น Hysteresis โดยระบบควบคุมที่ใช้คือการแสวงหาค่าสุดขีด (Extremum-Seeking) ซึ่งเป็นระบบควบคุมที่ไม่ต้องการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยนำไปใช้ในการปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอเพื่อให้รองรับต่อสิ่งรบกวนที่เข้ามา การทดลองจะทำการเปรียบเทียบกับระบบควบคุมแบบพีไอแบบทั่วไป การทดลองนี้จะช่วยให้ลิ้นปีกผีเสื้อเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างถูกต้องและรองรับต่อสิ่งรบกวนที่เกิดขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาพฤติกรรมและการทำงานของลิ้นปีกผีเสื้อของ เครื่องยนต์

2. เพื่อศึกษาและเสนอการควบคุมด้วยการแสวงหาค่าสุดขีดเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการควบคุมตำแหน่งของลิ้นปีกผีเสื้อให้มีความแม่นยำมากขึ้น

ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาการควบคุมตำแหน่งของลิ้นปีกผีเสื้อให้ตามสัญญาณอ้างอิง โดยใช้เฉพาะสัญญาณอ้างอิงคลื่นสี่เหลี่ยม

3. ลิ้นปีกผีเสื้อที่ใช้เป็นของรถโตโยต้า วีโก้ เครื่องยนต์ดีเซล

2. งานวิจัยนี้สนใจสิ่งรบกวนจากภายนอกเฉพาะแรงดันไฟฟ้าที่เข้าสู่ลิ้นปีกผีเสื้อ

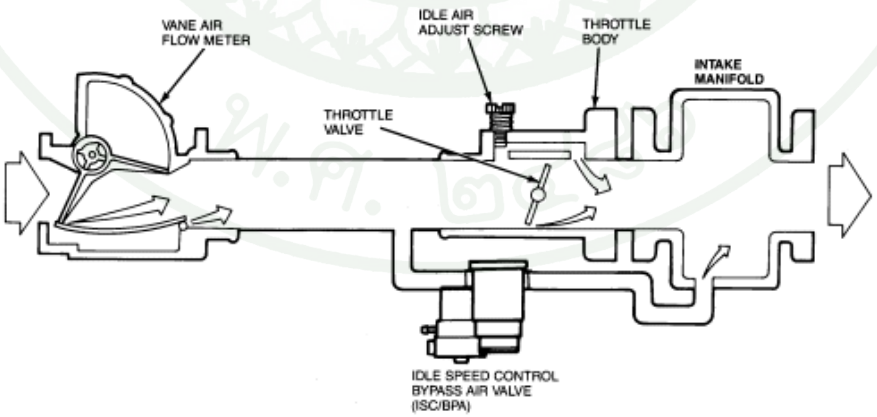
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

1. ลิ้นปีกผีเสื้อ (Throttle)

ลิ้นปีกผีเสื้อหรือเรียกในอีกชื่อหนึ่งว่าลิ้นเร่งเป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่บริเวณท่อร่วมไอดีก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ทำหน้าที่ในการควบคุมปริมาณของอากาศบริสุทธิ์โดยทำการปรับตำแหน่งของวาล์ว (Throttle Plate) เมื่อมีความต้องการแรงบิดหรืออัตราเร่งเพิ่มขึ้นตำแหน่งของลิ้นปีกผีเสื้อจะมีองศาที่เปิดมากขึ้นและเมื่อต้องการลดแรงบิดหรืออัตราเร่งที่ลดลงก็ทำการลดองศาของลิ้นปีกผีเสื้อให้อากาศเข้าน้อยเช่นกัน ลิ้นปีกผีเสื้อจึงเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญสำหรับเครื่องยนต์ในปัจจุบันเพราะส่งผลต่อประสิทธิภาพและสมรรถนะของเครื่องยนต์อย่างเช่น รอบเดินเบา กำลังของเครื่องยนต์และแรงบิด เป็นต้น

เครื่องยนต์ในอดีตลิ้นปีกผีเสื้อจะมีการเชื่อมต่อกับคันเร่งของรถยนต์โดยตรงผ่านทางสายเคเบิลที่มีการเชื่อมต่อกัน เมื่อผู้ขับขี่เหยียบคันเร่งมากลิ้นปีกผีเสื้อก็มีองศาที่เปิดตามมากเช่นกัน ลิ้นปีกผีเสื้อจะปิดเมื่อมีความต้องการในการควบคุมรอบเดินเบาของเครื่องยนต์แต่จะใช้ลิ้นเบี่ยง (Bypass valve) และทำการปรับรอบเดินเบาโดยหมุนวาล์วที่อยู่บริเวณลิ้นเบี่ยงไม่เกี่ยวกับตำแหน่งของลิ้นปีกผีเสื้อดังแสดงในภาพที่ 1

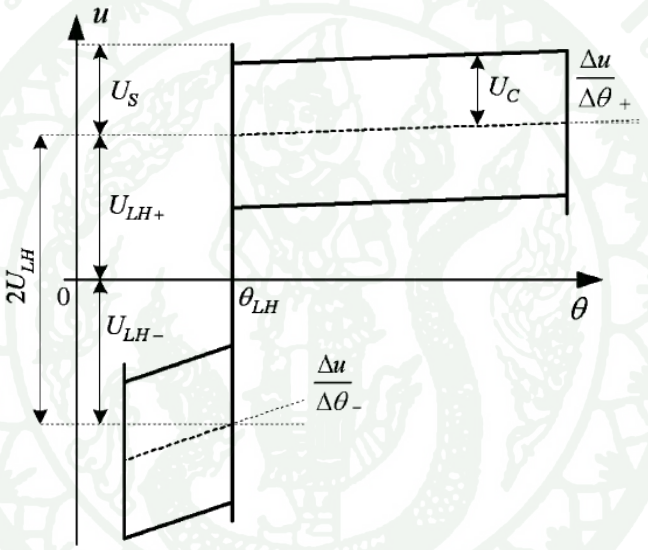


ภาพที่ 1 ตำแหน่งของลิ้นปีกผีเสื้อและลิ้นเบี่ยง(Bypass valve)

ที่มา: Pavkovic *et al.* (2005)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ในรถยนต์สมัยใหม่หรือในปัจจุบันนี้ลิ้นปีกผีเสื้อไม่ได้เชื่อมต่อกับคันเร่งโดยตรง แต่จะสั่งงานตามคำสั่งของระบบควบคุมที่ออกมาจากชุดควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Control Unit : ECU) ซึ่งชุดควบคุมนี้ก็จะรับค่าสัญญาณมาจากตัวตรวจรู้ที่ติดตั้งไว้ที่คันเร่งอีกที การสั่งงานนี้ทำให้การควบคุมลิ้นปีกผีเสื้อเป็นการควบคุมแบบวงปิด (Closed-Loop Control) ทำให้การควบคุมตำแหน่งของลิ้นปีกผีเสื้อมีความแม่นยำมากขึ้น การควบคุมรอบเดินเบาก็จะใช้คำสั่งควบคุมให้ลิ้นปีกผีเสื้อเปิดในตำแหน่งที่เหมาะสมแทนการต่อออกทางท่อต่อตรงแบบเดิม จึงเห็นได้ว่าลิ้นปีกผีเสื้อมีบทบาทมากขึ้น ระบบควบคุมก็ยิ่งมีความสำคัญมากขึ้นเช่นกัน



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของลิ้นปีกผีเสื้อกับสัญญาณอินพุต

ที่มา: Pavkovic *et al.* (2005)

ลิ้นปีกผีเสื้อมีองศาเริ่มต้นอยู่ค่าค่าหนึ่งเมื่อไม่มีการให้ไฟเลี้ยงหรือในกรณีที่เครื่องยนต์ดับ ลิ้นปีกผีเสื้อจะเคลื่อนที่กลับมาที่ตำแหน่งเริ่มต้น โดยเราเรียกตำแหน่งนี้ว่า Limp-Home ซึ่งจะมีสปริง (Return spring) อยู่สองตัวทำหน้าที่ในการดึงแผ่นวาล์วของลิ้นปีกผีเสื้อให้กลับมาที่ตำแหน่งเริ่มต้น สปริงที่ทำให้ลิ้นปีกผีเสื้อกลับมาที่ตำแหน่ง Limp-Home นี้เป็นสาเหตุที่ทำให้ลักษณะการเคลื่อนที่ของลิ้นปีกผีเสื้อมีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ซึ่งยากต่อการควบคุม และสปริงนี้ยังทำให้ลิ้นปีกผีเสื้อมีการเคลื่อนที่ในลักษณะที่เรียกว่า Hysteresis กล่าวคือเมื่อมีการให้ค่าสัญญาณขาเข้าหรืออินพุต(Input signal)ในค่าเดิมแต่กลับได้ผลลัพธ์ที่แตกต่างจากเดิมดังที่แสดงไว้ในภาพที่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2 เริ่มแรกให้ลิ้นปีกผีเสื้ออยู่ที่ตำแหน่ง Limp-Home เมื่อมีการเพิ่มสัญญาณอินพุตตำแหน่งของลิ้นปีกผีเสื้อจะยังไม่ขับเนื่องจากมีแรงจากสปริงต้านอยู่ กล่าวคือถ้าต้องการให้สปริงเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่ง Limp-Home จะต้องให้สัญญาณอินพุตให้ชนะแรงต้านของสปริงและแรงเสียดทานของระบบจากภาพ Ulh คือช่วงที่สปริงส่งผลต่อการเคลื่อนที่และ Us คือช่วงที่แรงเสียดทานมีผลต่อการเคลื่อนที่ เช่นเดียวกันในเมื่อต้องการให้ลิ้นปีกผีเสื้อเคลื่อนที่กลับก็ทำการลดสัญญาณอินพุตแต่ลิ้นปีกผีเสื้อจะยังคงอยู่ในตำแหน่งเดิมหรือมีการเคลื่อนที่ตามมาเล็กน้อย แต่กลับจะมีการเคลื่อนที่มากๆเมื่อเข้าใกล้ตำแหน่ง Limp-Home ซึ่งมีผลจากแรงสปริงมาช่วยดึงกลับเข้าสู่ตำแหน่ง Limp-Home

2. การออกแบบระบบควบคุมที่ใช้กับลิ้นปีกผีเสื้อ

ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับปัญหาการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรของลิ้นปีกผีเสื้อซึ่งทำให้มีความยากต่อการควบคุม การจัดการกับปัญหาที่เกิดขึ้นนั้นสามารถทำได้สองวิธีคือใช้ระบบควบคุมแบบปรับค่าได้หรือจะใช้ระบบควบคุมที่มีความ Robust โดย Pavkovic *et al*. (2005) สามารถแยกสาเหตุของปัญหาต่างๆออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

1). สาเหตุเนื่องมาจากการผลิต ถึงแม่ว่าลิ้นปีกผีเสื้อจะเป็นรุ่นเดียวกันผลิตออกมาพร้อมๆกันแต่กลับมีลักษณะเฉพาะของแต่ละตัวเช่นมีตำแหน่ง Limp-Home ที่ไม่เท่ากัน หรืออาจใช้สัญญาณอินพุตเข้าในการให้ลิ้นปีกผีเสื้อเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่ง Limp-Home ไม่เท่ากัน

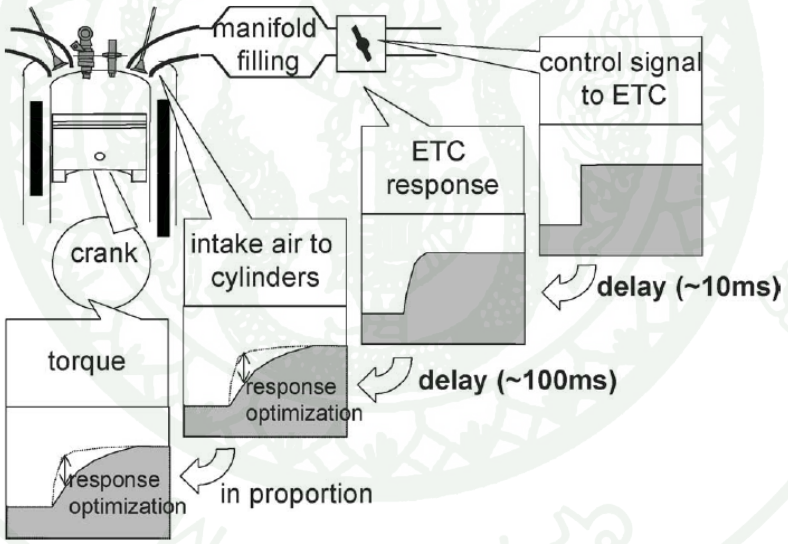
2). อายุการใช้งานเป็นปัจจัยอีกส่วนหนึ่งที่ทำให้พฤติกรรมของลิ้นปีกผีเสื้อเปลี่ยนแปลงไปโดยเมื่อมีอายุการใช้งานมากขึ้นแรงเสียดทานของระบบมีมากขึ้น แรงของสปริงที่ดึงกลับเข้าสู่ Limp-Home มีมากขึ้น แต่มอเตอร์ที่ขับการเคลื่อนที่กลับมีคุณภาพที่แย่ลง

3). สาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงของแบตเตอรี่ที่ป้อนไฟเข้าสู่ลิ้นปีกผีเสื้อและอุณหภูมิภายนอกที่มีการเปลี่ยนแปลงสองส่วนนี้ก็เป็นเหตุให้ลักษณะการเคลื่อนที่ของลิ้นปีกผีเสื้อเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเช่นกัน

Pavkovic *et al*. (2005) ได้ศึกษาปัญหาที่ส่งผลให้ลิ้นปีกผีเสื้อมีรูปแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นโดยปัญหาที่สามารถจัดการได้คือปัญหาของตำแหน่ง Limp home ค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นใน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ระบบและการเปลี่ยนแปลงสัญญาณอินพุตที่มาจากแบตเตอรี่ ระบบควบคุมที่นำมาจัดการกับปัญหาที่พบเป็นระบบควบคุมแบบปรับค่าได้(Adaptive Control) ซึ่งใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดีร่วมกับการออกแบบชุดปรับค่าอัตราขยายเองโดยอัตโนมัติและใช้สัญญาณป้อนไปข้างหน้าร่วมด้วย ซึ่งระบบควบคุมนี้จะช่วยชดเชยค่าที่ตำแหน่ง Limp home ให้มีการเคลื่อนที่ได้แม่นยำมากขึ้นรวมทั้งชดเชยค่าจากแรงเสียดทานและค่าการเปลี่ยนแปลงของแบตเตอรี่ด้วย การทดลองได้กำหนดให้ลิ้นปีกผีเสื้อเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่ง Limp home ที่องศาน้อยๆเพื่อสังเกตว่าระบบควบคุมสามารถชดเชยแรงจากสปริงได้หรือไม่ ผลที่ได้คือลิ้นปีกผีเสื้อสามารถเคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิงได้ดีไม่ติดอยู่ที่ตำแหน่ง Limp home เหมือนเดิม ในการเคลื่อนที่ที่ตำแหน่งอื่นๆเมื่อระบบควบคุมได้ทำการชดเชยค่าจากแรงเสียดทานและค่าจากแบตเตอรี่แล้ว ลิ้นปีกผีเสื้อสามารถเคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิงได้ดีเมื่อเทียบกับระบบควบคุมแบบพีไอดีแบบดั้งเดิมที่ไม่มีการชดเชยแรงที่ตำแหน่งต่างๆ



ภาพที่ 3 เวลาประวิงระหว่างสัญญาณอินพุตกับการตอบสนองของทอร์ก

ที่มา: Aono and Kowatari. (2006)

Aono and Kowatari (2006) เนื่องจากลิ้นปีกผีเสื้อทำหน้าที่ในการกำหนดปริมาณของอากาศที่เข้าสู่กระบอกสูบซึ่งเป็นตัวกำหนดแรงบิด (Torque) ในระบบ Adaptive Cruise Control ซึ่งเป็นระบบที่ให้รถคันหลังขับตามรถคันหน้าโดยอัตโนมัติมีความต้องการการเปลี่ยนแปลงทอร์กของระบบที่รวดเร็วเพื่อรักษาระยะห่างให้มีค่าคงที่ แต่ในระบบควบคุมลิ้นปีกผีเสื้อปกติจะมีเวลา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวิง (Delay time) ทำให้มีการตอบสนองของทอร์กที่ช้า ดังที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 3 เมื่อกำหนดให้สัญญาณอินพุตเป็นฟังก์ชันขั้น(Step input) การตอบสนองของลิ้นปีกผีเสื้อให้ไปสู่ตำแหน่งที่ถูกต้องใช้เวลาประมาณ 10 ms และใช้เวลาในการเปลี่ยนแปลงทอร์กประมาณ 100 ms ซึ่งการตอบสนองในลักษณะนี้ช้าเกินไปสำหรับรถยนต์ที่ใช้ระบบ Adaptive Cruise Control ในวิจัยสองท่านนี้จึงได้นำเสนอการแก้ปัญหาโดยใช้ระบบควบคุม Time-optimal Control เป้าหมายเพื่อให้มีผลการตอบสนองของทอร์กที่รวดเร็วจากระบบควบคุมที่ใช้ทำให้ได้สัญญาณอินพุตที่ไปสั่งงานลิ้นปีกผีเสื้อมีรูปร่างเปลี่ยนไปลิ้นปีกผีเสื้อมีค่าโอเวอร์ชูต (Overshoot) มากเพื่อไปลดเวลาช่วงเวลาขาขึ้น(Rise time) ของทอร์กทำให้ได้ผลตอบสนองที่เร็วและมีเวลาเข้าที่ (Settling time) ที่ลดลง

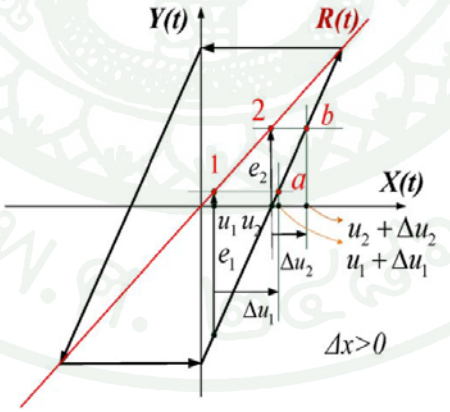
ในปี ค.ศ. 2007 Kim *et al.* ได้ศึกษาทางด้านความสัมพันธ์ของตำแหน่งของลิ้นปีกผีเสื้อกับเครื่องยนต์ที่มีระบบส่งผ่านกำลังอัตโนมัติ (Automatic transmission) โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อที่จะต้องการให้ลิ้นปีกผีเสื้อมีการเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งที่เหมาะสมเมื่อเกียร์ของรถยนต์ที่เปลี่ยนแปลงไปเพื่อที่ต้องการปรับปรุงอัตราการบริโภคเชื้อเพลิงของระบบให้ประหยัดขึ้น แต่ยังคงตอบสนองต่ออัตราเร่งและกำลังได้เหมือนเดิม จึงได้มีการใช้ระบบควบคุม Dynamic Programming มาหาช่วงในการเปลี่ยนเกียร์และตำแหน่งการเปิดของลิ้นปีกผีเสื้อที่เหมาะสมที่สุด จากการศึกษาพบว่าลิ้นปีกผีเสื้อมีการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งในช่วงเวลาการเปลี่ยนเกียร์ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบ และในบางครั้งลิ้นปีกผีเสื้อถึงจุดอิ่มตัวได้เมื่อรอบสูง จึงได้ออกแบบตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อแยกออกเป็น 4 ชุดเพื่อให้เหมาะสมกับสภาวะการทำงานของเกียร์ทั้ง 4 เกียร์ ผลที่ได้คือลิ้นปีกผีเสื้อมีการเคลื่อนที่ที่ราบเรียบขึ้นและยังคงที่กำลังตามที่ต้องการแต่สามารถลดการบริโภคเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

Reichhartinger and Horn (2009) สนใจการปรับปรุงการเคลื่อนที่ของลิ้นปีกผีเสื้อให้ตามสัญญาณอ้างอิงได้ดีมากขึ้น โดยนำเสนอการใช้ระบบควบคุมแบบแผนเลื่อน (Sliding Mode) มาประยุกต์ใช้กับลิ้นปีกผีเสื้อของเครื่องยนต์เบนซิน โดยปกติแล้วการควบคุมแบบแผนเลื่อนจะมีข้อเสียเรื่องการสั่น(Chattering) เมื่อระบบเข้าสู่ Sliding surface ในบทความจึงเสนอการแก้ไขการสั่นด้วยการใช้ Twisting algorithm ในชุดควบคุมแบบแผนเลื่อน สัญญาณอ้างอิงที่นำมาใช้ทดสอบระบบควบคุมโดยให้ลิ้นปีกผีเสื้อเคลื่อนที่ตามจะมีอยู่ 3 ช่วงคือ ช่วงแรกจะให้เคลื่อนที่ในลักษณะ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คลื่นไซน์ (sine wave) ส่วนต่อมาจะดูความนิ่งของลิ้นปีกผีเสื้อเมื่อสัญญาณอ้างอิงคงที่และดูการเคลื่อนที่เมื่อสัญญาณอ้างอิงเปลี่ยนแปลงทีละมากๆ ในส่วนสุดท้ายจะให้สัญญาณอ้างอิงในลักษณะเป็นขั้นบันได จากผลทั้งแบบจำลองและการทดลองจริงแสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบแผนเลื่อนที่นำเสนอสามารถควบคุมลิ้นปีกผีเสื้อได้เป็นอย่างดีเมื่อเทียบกับระบบควบคุมแบบพีไอ

ในปี ค.ศ. 2013 Wang and Huang ได้เสนอการควบคุมลิ้นปีกผีเสื้อโดยใช้การควบคุมแบบฟัซซี่(Fuzzy control) โดยสนใจแก้ปัญหาระบบที่เป็นแบบ Hysteretic และไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear hysteretic system) การศึกษาเริ่มจากการสังเกตพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของลิ้นปีกผีเสื้อเมื่อไม่มีตัวควบคุมจะได้การเคลื่อนที่เป็นแบบ Hysteretic ดังแสดงในภาพ 4 จึงมีการกำหนดตำแหน่งอ้างอิง(Reference) เส้นสีแดง โดยอินพุตที่สั่งงานให้เคลื่อนที่ตามเส้นสีดำกำหนดให้เป็นสัญญาณป้อนไปข้างหน้า (Feed forward) ส่วนของค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะถูกจัดการโดยระบบควบคุมแบบฟัซซี่ ผลจากการทดลองทำการเปรียบเทียบกับระบบควบคุมแบบพีไอดีทั่วไปซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าระบบควบคุมแบบฟัซซี่ที่ทำงานร่วมกับสัญญาณป้อนไปข้างหน้าสามารถจัดการกับปัญหา Nonlinear hysteretic ได้อย่างดีโดยมีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 1.951 % เท่านั้น แต่การควบคุมแบบพีไอมีค่าความผิดพลาดอยู่มากถึง 10.164 %



ภาพที่ 4 การเคลื่อนที่ของลิ้นปีกผีเสื้อที่เป็นทั้งไม่เป็นเชิงเส้นและเป็นแบบ Hysteretic

ที่มา: Wang and Huang. (2013)

ในปี ค.ศ. 2014 Montanaro *et al.* ได้เสนอการแก้ปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้นของลิ้นปีกผีเสื้อด้วยระบบควบคุม Robust Discrete Time MRAC ซึ่งนำมาใช้ร่วมกับ Minimal Control

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Synthesis ซึ่งเป็นวิธีใหม่ที่ยังไม่เคยมีผู้นำเสนอมาก่อน วิธีการคือทำการออกแบบแบบจำลองอ้างอิงเพื่อให้ระบบเรียนรู้และทำให้ได้ตามแบบจำลองที่กำหนด โดยสิ่งที่พิจารณาเพิ่มเข้ามาในงานนี้คือสัญญาณควบคุมที่ได้มาจากอินทริกรัลค่าความผิดพลาดและเพิ่มฟังก์ชันซิกนัมที่ได้มาจากค่าความผิดพลาดของการติดตามสัญญาณอ้างอิง สัญญาณอ้างอิงที่นำมาใช้มีทั้งหมด 33 รูปแบบเพื่อครอบคลุมทุกช่วงการทำงานของลิ้นปีกผีเสื้อ ในการทดลองจะทำการเปรียบเทียบกับระบบควบคุมแบบ MRAC ชนิดต่างๆอีก 3 ชนิด โดยผลที่ออกมาเมื่อเวลาผ่านไประบบควบคุมแบบ RDMRAC ที่นำเสนอสามารถปรับค่าให้เป็นไปตามแบบจำลองอ้างอิงและทำให้ลิ้นปีกผีเสื้อสามารถเคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิงที่กำหนดได้เป็นอย่างดี

3. การแสวงหาค่าสุดขีด(Extremum-Seeking)

การแสวงหาค่าสุดขีดเป็นระบบควบคุมแบบปรับค่าได้ (Adaptive control) โดยมีการทำงานแบบเรียลไทม์เพื่อให้ระบบได้ผลตอบสนองที่มีค่าที่ดีที่สุด โดยคำว่าค่าสุดขีดจะหมายถึงค่ามากสุด (Maximum) หรือค่าน้อยสุด (Minimum) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับว่านำไปใช้กับงานควบคุมประเภทไหน เช่นการควบคุมให้ได้ตามสัญญาณอ้างอิง ก็จะมีความต้องการให้มีค่าความผิดพลาดน้อย ค่า Cost Function น้อย หรือการควบคุมให้ระบบมีผลตอบสนองได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

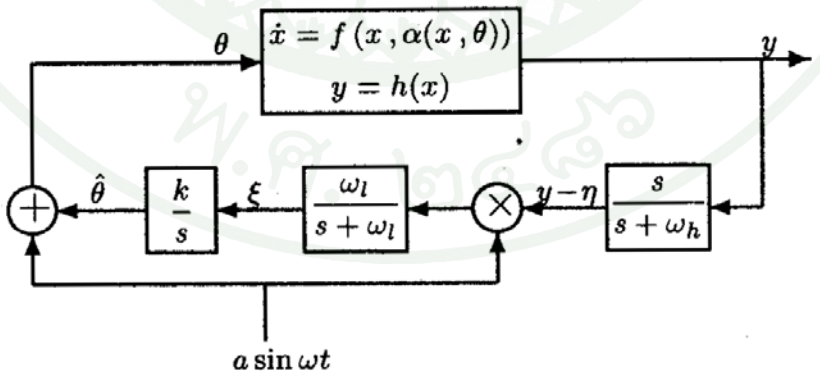
ในช่วงปี ค.ศ.1950 – ค.ศ.1960 ระบบควบคุมแบบปรับค่าได้เป็นที่นิยมมาก ในงานวิจัยต่างๆได้นำระบบควบคุมแบบปรับค่าได้นี้ไปใช้สำหรับรองรับกับค่าความไม่แน่นอน(Uncertainty) อย่างเช่นสิ่งรบกวน(Disturbance) สัญญาณรบกวน(Noise) หรือโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ไม่แม่นยำ (Model Uncertainty) เพื่อให้ระบบมีค่าความถูกต้องดียิ่งขึ้น ถ้าจะกล่าวให้ถูกต้องแท้จริงแล้วการแสวงหาค่าสุดขีดเริ่มมีมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1922 ซึ่ง Lablance ได้เป็นผู้ริเริ่มเกี่ยวกับการใช้ระบบควบคุมแบบปรับค่าได้และมีการตีพิมพ์ตั้งแต่ตอนนั้น

การแสวงหาค่าสุดขีดมีผู้คนให้ความสนใจมากในช่วง 10 ปีมานี้เนื่องจาก M. Krstic ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับระบบปรับค่าได้ที่ทำงานเรียลไทม์โดยมีการเขียนบทความออกมาอย่างต่อเนื่อง และได้เขียนหนังสือ Extremum-Seeking Control and Application ซึ่งมีเนื้อหาทั้งในส่วนของทฤษฎีและเนื้อหาทางด้านการทดลองใช้ระบบควบคุมจริงๆให้ด้วย การแสวงหาค่าสุดขีดที่นำเสนอมีความน่าสนใจเพราะเป็นระบบที่ไม่ต้องการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงสามารถ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นำไปประยุกต์ใช้กับงานที่มีความซับซ้อนมากๆ เช่นระบบเครื่องยนต์ การหาเวลาเปิด-ปิด วาล์วไอดีไอเสียที่เหมาะสมที่สุด หรือเกี่ยวกับระบบเบรกเอบีเอส (Anti-lock Braking System) ลักษณะการทำงานของการแสวงหาค่าสุดขีดเป็นการให้สัญญาณรบกวน(Perturbation signal) แก่ระบบเพื่อให้ระบบมีทิศทางที่วิ่งเข้าหาค่าที่ดีที่สุดได้ มีการนำระบบควบคุมไปประยุกต์ใช้ทั้งในงานควบคุมเกี่ยวกับรถยนต์เช่น การหาเวลาเปิดปิดวาล์วไอดีไอเสีย

ในปี ค.ศ. 1997 Krstic and Wang อยู่ในช่วงที่ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้เป็นที่นิยมและได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทั้งสองท่านนี้ได้นำเสนอระบบควบคุมที่เรียกว่าการแสวงหาค่าสุดขีดหรือเรียกได้ว่าเป็นระบบ Self-optimizing control และได้เสนอการพิสูจน์โดยใช้สองทฤษฎีทางด้านระบบควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้นการแสวงหาค่าสุดขีดที่ต้องการพิสูจน์เป็นไปตามภาพที่ 5 ทฤษฎีแรกคือ Averaging analysis เนื่องจากการแสวงหาค่าสุดขีดมีการเพิ่มสัญญาณรบกวนเข้าสู่ระบบที่เป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์จึงนำทฤษฎีนี้มาพิสูจน์เสถียรภาพได้เพราะเป็นทฤษฎีที่ใช้ประมาณค่าของสัญญาณที่มีลักษณะเป็นคาบ ทฤษฎีที่สองคือ Singular perturbation analysis เป็นวิธีที่ใช้วิเคราะห์ในระบบที่มีความเร็วของตัวแปรขึ้นกับเวลาที่ไม่เท่ากันโดยการแสวงหาค่าสุดขีดแบ่งได้เป็น 3 ช่วงคือ เร็ว คือระบบที่เราต้องการควบคุม ปานกลาง คือ คาบของสัญญาณรบกวน ช้า คือตัวกรองความถี่ต่ำและความถี่สูง โดยในบทความพิสูจน์ให้เห็นว่าการแสวงหาค่าสุดขีดสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพ

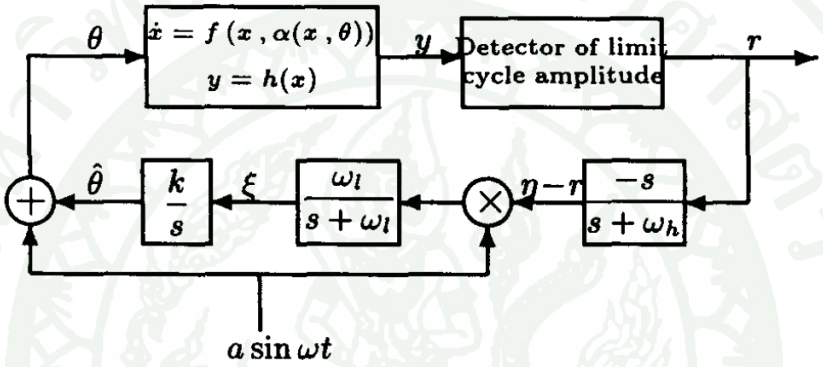


ภาพที่ 5 แผนภาพการแสวงหาค่าสุดขีดที่นำมาใช้ในการพิสูจน์เสถียรภาพ

ที่มา: Krstic and Wang. (1997)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Wang and Krstic (1998) ได้ศึกษางานวิจัยต่อเนื่องมาจากบทความในปี ค.ศ. 1997 ซึ่งได้พบปัญหาว่าการแสวงหาค่าสุดขีดไม่ได้ทำให้ระบบวิ่งเข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่งแต่จะวิ่งอยู่รอบๆค่านั้นซึ่งเรียกว่า Limit cycle อันเกิดเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนที่ใส่เข้าไปในระบบของการแสวงหาค่าสุดขีด ในงานนี้จึงได้ศึกษาการลดขนาดของ Limit cycle โดยใช้สมการซึ่งรับค่ามาจากเอาท์พุตมาคำนวณค่าแอมพลิจูดของ Limit cycle ดังแสดงในภาพที่ 6 โดยยกตัวอย่างจากสมการ Van Der Pol และพิสูจน์โดยใช้วิธีการ Averaging method ร่วมกับ Singular perturbation



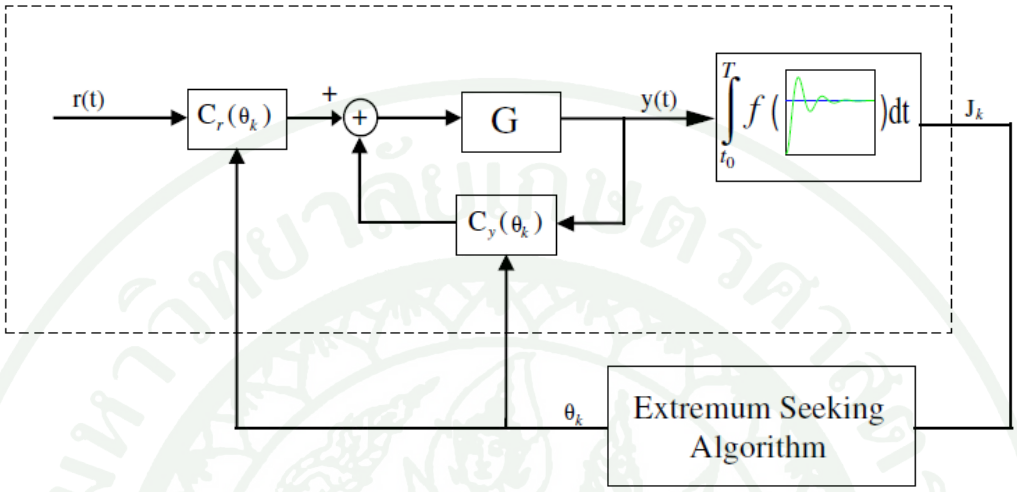
ภาพที่ 6 แผนภาพการแสวงหาค่าสุดขีดร่วมกับฟังก์ชันการลดแอมพลิจูดของ Limit cycle

ที่มา: Wang and Krstic. (1998)

ในปี ค.ศ. 2005 Killingsworth and Krstic ได้แสดงให้เห็นถึงปัญหาเกี่ยวกับระบบควบคุมแบบพีไอดีซึ่งเป็นระบบควบคุมที่ใช้กันอย่างมากมายในอุตสาหกรรม ซึ่งมีข้อเสียคือการปรับค่าอัตราขยายของระบบนั้นทำได้ยากซึ่งกว่าจะได้ค่าที่ดีในการนำมาควบคุมก็ต้องใช้เวลา และยังไม่รู้อีกว่าค่าที่ได้มานั้นดีที่สุดแล้วหรือยัง จึงได้มีการเสนอนำการแสวงหาค่าสุดขีดมาให้ปรับค่าอัตราขยายของระบบควบคุมแบบพีไอดีเพื่อให้ได้ระบบที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และการแสวงหาค่าสุดขีดที่นำเสนอนี้ยังมีการปรับค่าแบบเรียลไทม์ โดยมีลักษณะดังภาพที่ 7 ซึ่งทำให้สามารถรองรับกับสิ่งรบกวนหรือความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นได้มากยิ่งขึ้นด้วย การแสวงหาค่าสุดขีดเป็นระบบควบคุมที่ไม่ต้องการโมเดลทางคณิตศาสตร์จึงค่อนข้างเหมาะกับการนำไปใช้ปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอซึ่งมักใช้ในอุตสาหกรรมที่ควบคุมระบบที่ซับซ้อน ผลจากการทดลองจะทำการเปรียบเทียบกับระบบควบคุม IFT และกับอีกการปรับค่าอัตราขยายแบบ Ziegler-Nichols และ Internal Model Control ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับอัตราขยายแบบเรียลไทม์โดยใช้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การแสวงหาค่าสุดขีดสามารถทำได้อย่างดีค่าดรรชนีสมรรถนะจากระบบควบคุมที่นำเสนอมีค่าที่ดี ในส่วนสุดท้ายยังได้มีการนำเสนอการจัดการกับปัญหาการถึงจุดอิ่มตัวของแอคชูเอเตอร์อีกด้วย

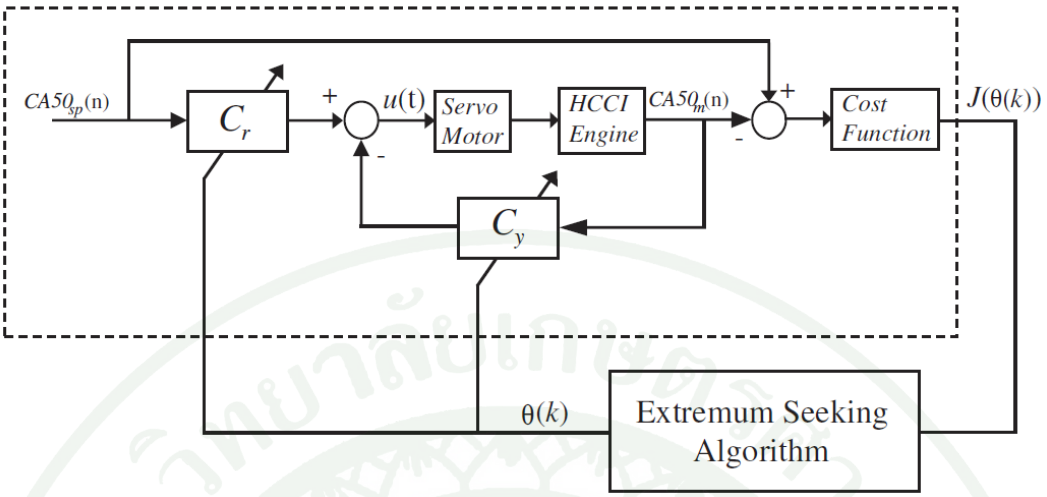


ภาพที่ 7 แผนภาพการปรับอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดีด้วยการแสวงหาค่าสุดขีด

ที่มา: Killingsworth and Krstic. (2005)

Haskara *et al.* (2006) นำการแสวงหาค่าสุดขีดมาประยุกต์ใช้กับระบบของเครื่องยนต์โดยนำมาใช้ในการควบคุมปริมาณการเปิดของวาล์ว EGR (Exhaust Gas Recirculation) เป็นอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อระหว่างท่อร่วมไอดีกับไอเสีย EGR วาล์วจะนำอากาศที่เผาไหม้แล้วไปผสมกับอากาศบริสุทธิ์ก่อนที่จะเข้าสู่ห้องเผาไหม้เพื่อลดการเกิด NO_x เพื่อให้เครื่องยนต์ได้มาตรฐานทางอุตสาหกรรม การนำไอเสียเข้ามาเจือจางของ EGR ยังช่วยให้ระบบประหยัดเชื้อเพลิงมากขึ้นแต่ยังคงได้ประสิทธิภาพที่ยังดีอยู่ การทดลองได้สังเกตการทำงานของวาล์วซึ่งเห็นได้ชัดว่าเมื่อมีองศาที่ยอมให้อากาศเสียเข้ามามากก็จะสามารถลดการเกิด NO_x ได้มากเช่นกัน ในงานวิจัยนี้ทำการควบคุมองศาการเปิดวาล์วร่วมกับการควบคุมเวลาการประจุของเครื่องยนต์ ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการควบคุมวาล์ว EGR แบบระบบปิดสามารถช่วยลดการเกิด NO_x และทำให้เครื่องยนต์ยังคงมีประสิทธิภาพที่ดี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 8 แผนภาพแสดงการควบคุมเวลาในการจุดระเบิดด้วยการแสวงหาค่าสุดขีด

ที่มา: Killingsworth *et al.* (2007)

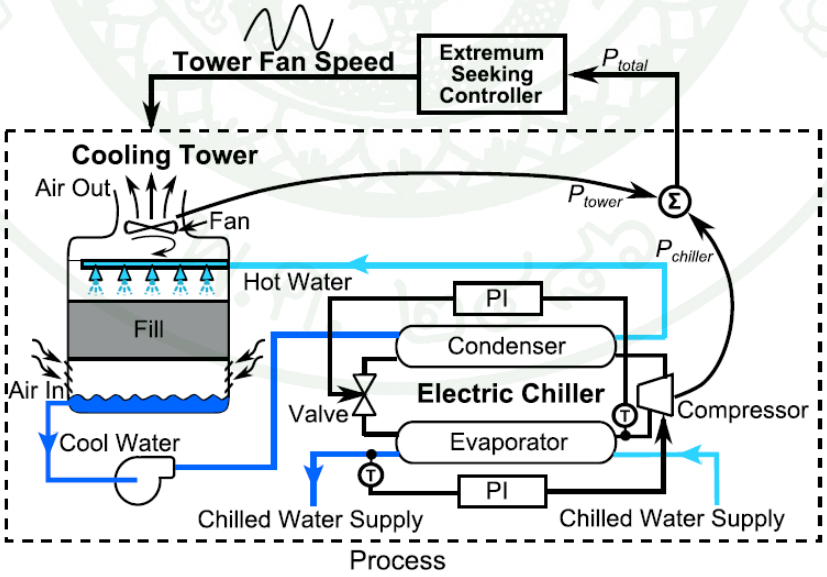
Killingsworth *et al.* (2007) ได้นำการปรับอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดีด้วยการแสวงหาค่าสุดขีดที่ได้เคยนำเสนอไว้ในบทความก่อนหน้า นำมาใช้ควบคุมเวลาของการจุดระเบิดของเครื่องยนต์ HCCI (Homogenous Charge Compression Ignition) เครื่องยนต์ลักษณะนี้จะทำการผสมอากาศและเชื้อเพลิงกันก่อนเหมือนกับเครื่องยนต์เบนซิน แต่จะจุดระเบิดโดยการอัดเหมือนเครื่องยนต์ดีเซล เครื่องยนต์ HCCI มีข้อดีในเรื่องของปริมาณไอเสียที่ออกมาจะมีค่าน้อย แต่จุดที่ยากคือการควบคุมเวลาในการจุดระเบิดซึ่งจะยากกว่าทั้งเครื่องยนต์ดีเซลและเบนซิน จากภาพที่ 8 จะเห็นได้ว่าค่าดรรชนีสมรรถนะ เป็นฟังก์ชันของค่าความผิดพลาดระหว่างค่า CA50 ที่ใช้อ้างอิงกับค่า CA50 ที่ได้จริงจากการปรับค่าโดยการแสวงหาค่าสุดขีด ผลที่ได้จากการทดลองนี้คือค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดีมีการวิ่งอยู่ตลอดเวลาเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ค่าดรรชนีสมรรถนะที่น้อยที่สุด ซึ่งระบบควบคุมนี้ทำได้ดีค่าอัตราขยายวิ่งไปสู่ค่าที่เหมาะสมและสามารถทำได้อย่างรวดเร็วทำให้ได้เวลาการจุดระเบิดที่ถูกต้องส่งผลให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพมากขึ้น

Cochran *et al.* (2009) ได้จำลองการเคลื่อนที่ของปลาโดยใช้แบบจำลองทำจากวัสดุทรงรียาว 3 ชิ้นมาต่อกันทำให้เกิดมี 2 องศาอิสระขึ้นมา โดยจุดเชื่อมต่อแรกให้มีลักษณะการเคลื่อนที่เป็นฟังก์ชัน Sine ส่วนในจุดเชื่อมต่อที่สองให้มีลักษณะการเคลื่อนที่เป็นฟังก์ชัน Cosine เพื่อให้มีการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เคลื่อนที่คล้ายกับปลามากที่สุด การทดลองกำหนดให้ปลาเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปสู่ตำแหน่งเป้าหมาย ปัญหาเกี่ยวกับระบบควบคุมลักษณะนี้เรียกว่า Source-seeking ทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวปลาจะขึ้นอยู่กับค่าแอมพิจูด และค่าความถี่ เมื่อใช้วิธีแสวงหาค่าสุดขีดในการกำหนดให้ตัวแบบจำลองปลานี้สามารถว่ายเข้าสู่เป้าหมายในทิศทางที่ดีที่สุดได้ และยังทำการทดลองในลักษณะที่ให้ว่ายตามเส้นทางที่ได้กำหนดไว้ก่อนหน้า ซึ่งก็ยังสามารถทำได้ดี

Ghods and Krstic (2009) ได้เสนอวิธีการจัดการกับเซนเซอร์ที่มีผลตอบสนองช้าซึ่งพบได้ทั่วไปในงานทางเคมีหรือในการตรวจจับการรั่วไหลของก๊าซ เซนเซอร์ที่มีผลตอบสนองช้านี้มีผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบน้อยลง ในบทความนี้จึงใช้วิธีการแสวงหาค่าสุดขีด โดยทำการจำลองใน 3 เงื่อนไขคือ 1. ระบบที่มี washout filter และเซนเซอร์เข้าสู่สภาวะอยู่ตัวช้า 2. ระบบที่มี washout filter และเซนเซอร์วิ่งเข้าสู่ค่าอนันต์ และ 3. ระบบที่ไม่มี washout filter และเซนเซอร์วิ่งเข้าสู่ค่าอนันต์ โดยการจำลองการทดลองให้ทำการตรวจจับก๊าซที่มีการรั่วไหลที่ตำแหน่งหนึ่งโดยมีความเข้มข้น 250 ppm ซึ่งผลจากการจำลองนั้นสามารถใช้วิธีการแสวงหาค่าสุดขีดจัดการกับทั้งสามเงื่อนไขได้เป็นอย่างดี สามารถตรวจหาตำแหน่งและความเข้มข้นของก๊าซที่รั่วไหลออกมาได้อย่างถูกต้องและเร็ว แม้เซนเซอร์จะมีผลตอบสนองช้าก็ตาม

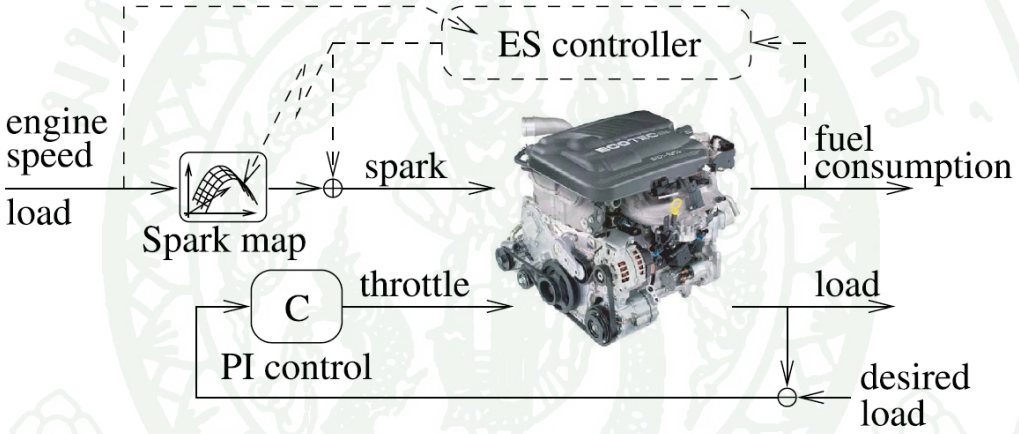


ภาพที่ 9 แผนภาพการทำงานของการแสวงหาค่าสุดขีดในระบบ Chilled-Water

ที่มา: Li *et al.* (2012)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Li *et al.* (2012) เสนอการใช้การแสวงหาค่าสุดขีดมาประยุกต์ใช้กับระบบ Chilled-water system เพื่อที่จะต้องการประหยัดพลังงานที่ใช้ในระบบให้มากที่สุด โดยต้องการที่จะลดการใช้พลังงานของตัวพัดลมและตัว Compressor ดังแสดงในภาพที่ 9 การแสวงหาค่าสุดขีดจะทำการลดการใช้พลังงานของระบบ โดยสัญญาณอินพุตจะเป็นการรวมกันของพลังงานที่ใช้ของพัดลมและ Compressor ผ่านเข้าไปสู่ระบบการแสวงหาค่าสุดขีดเพื่อให้ได้คำสั่งที่จะนำมาใช้ปรับความเร็วของพัดลมได้อย่างเหมาะสม ผลจากการทดลองสามารถปรับความเร็วของพัดลมให้ลดลงให้น้อยสุดในขณะที่ระบบยังสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้พลังงานที่ใช้ในระบบโดยรวมแล้วมีค่าลดลง ประหยัดพลังงานมากขึ้น



ภาพที่ 10 แผนภาพแสดงการควบคุมเวลาการจุดระเบิดและการควบคุมลิ้นปีกผีเสื้อ

ที่มา: HellStrom *et al.* (2013)

HellStrom *et al.*(2013) ได้เสนอนำการแสวงหาค่าสุดขีดมาจัดการกับปัญหาเวลาการจุดระเบิดของเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างเอทานอลกับเบนซินที่อัตราส่วนต่างๆ จุดมุ่งหมายเพื่อที่จะหาเวลาการจุดระเบิดที่ทำให้เชื้อเพลิงที่ใช้มีประสิทธิภาพสูงสุดโดยจะประมาณค่ามาจากข้อมูลของความดันในกระบอกสูบ ภาพที่ 10 แสดงให้เห็นถึงการใช้การแสวงหาค่าสุดขีดในการควบคุมเวลาในการจุดระเบิดโดยข้อมูลอินพุตที่รับเข้าจะเป็นอัตราการใช้เชื้อเพลิงและความเร็วของเครื่องยนต์ ค่าเอาท์พุตที่ได้จะนำมาปรับปรุงเวลาการจุดระเบิดของเครื่องยนต์ การทดลองจะทำการทดลองที่ความเร็วของเครื่องยนต์คงที่สองค่าคือที่ความเร็ว 1500 rpm และ 2000 rpm เท่านั้น เชื้อเพลิงที่ใช้คือ E70 และ E85 ซึ่งตัวเลขจะแสดงถึงอัตราส่วนของเอทานอลที่ผสมอยู่ ผลจากการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ทดลองเป็นที่น่าพอใจซึ่งการปรับเวลาการจุดระเบิดทำให้การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์มีค่าลดลง

Scheinker *et al.* (2013) ได้กล่าวถึงการใช้การแสวงหาค่าสุดขีดเพื่อต้องการลดช่วงเวลาขาขึ้น (Rise time) ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เป็นสัญญาณเอาท์พุตของเครื่อง high voltage converter modulator, HVCM ซึ่งเป็นตัวแปลงไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่ภายในศูนย์วิจัยที่ผู้เขียนบทความได้ทำงานอยู่ โดยสัญญาณก่อนเข้า HVCM เป็นสัญญาณพัลส์ (Pulse Width Modulation, PWM) ที่ออกมาจากวงจร H-bridge ชุด โดยต่อเข้ากับไฟสามเฟสที่ต่อแบบวายของ HVCM การควบคุมจะใช้การแสวงหาค่าสุดขีดปรับเวลาของขอบขาลง (Switch Edge)ของสัญญาณ PWM 8 ค่าแรกซึ่งส่งผลต่อช่วงเวลาขาขึ้นของสัญญาณเอาท์พุตดังนั้นค่าตัวแปรที่ระบบควบคุมต้องปรับมีทั้งหมด 24 ค่าเพราะมีวงจร H-bridge ทั้งหมด 3 ชุด ผลการทดลองเมื่อให้ระบบมีการปรับค่าขอบขาลงของระบบไปเรื่อยๆจะพบว่าช่วงเวลาขาขึ้นของสัญญาณเอาท์พุตมีค่าลดลงอย่างมากรวมทั้งค่าความผิดพลาดในช่วงสถานะอยู่ตัวมีค่าน้อย ค่าดรรชนีสมรรถนะของระบบมีค่าลดลง

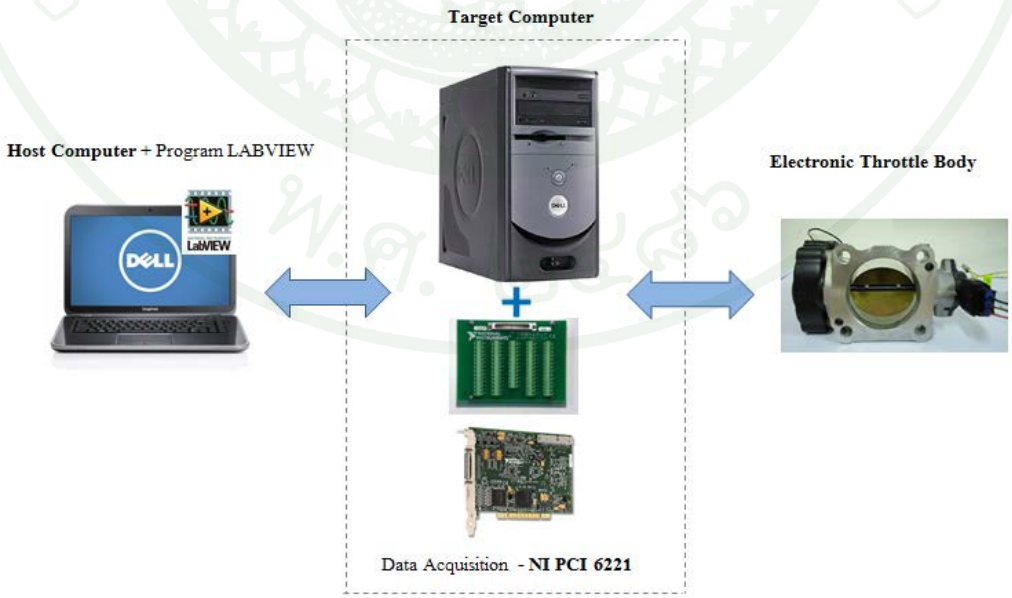
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของอุปกรณ์แต่ละชนิดที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งมีทั้งส่วนที่เป็นอุปกรณ์ทางด้านฮาร์ดแวร์และซอฟแวร์ และกล่าวถึงวิธีการออกแบบระบบควบคุมที่ใช้มาควบคุมลิ้นปีกผีเสื้อของเครื่องยนต์ซึ่งอธิบายทั้งระบบควบคุมแบบพีไอดี ระบบควบคุมด้วยการแสวงหาค่าสุดขีดและการนำการแสวงหาค่าสุดขีดมาใช้กับการปรับอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดีเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของลิ้นปีกผีเสื้อ

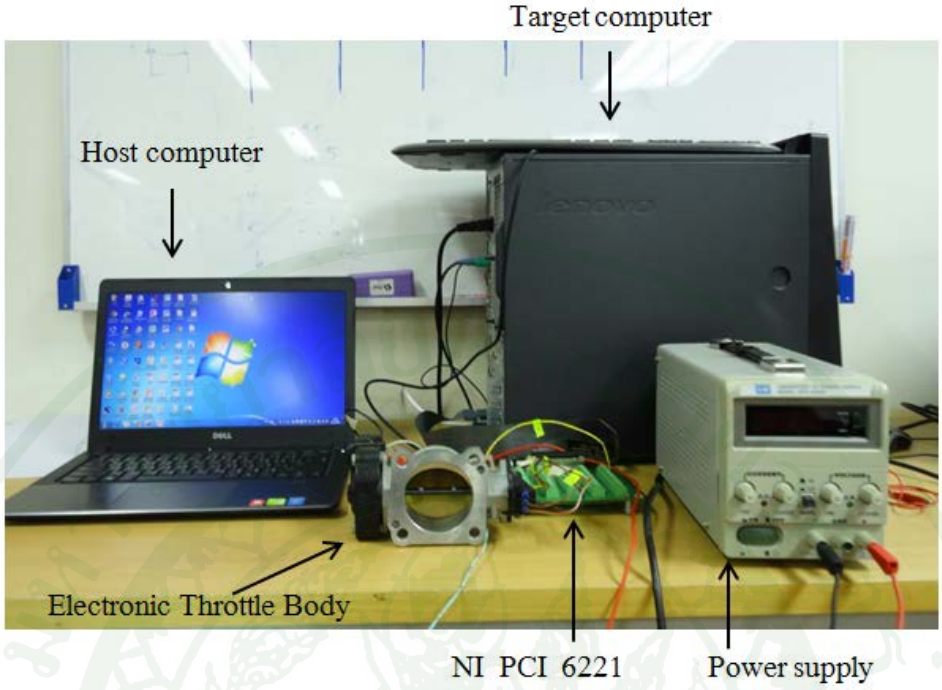
อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการควบคุมตำแหน่งของลิ้นปีกผีเสื้อประกอบไปด้วยลิ้นปีกผีเสื้อที่นำมาจากเครื่องยนต์โตโยต้า วีโก้ คอมพิวเตอร์สองเครื่องใช้สำหรับเป็น Host Computer และ Target Computer โปรแกรมที่ใช้ติดตั้งอยู่ใน Host Computer คือโปรแกรม LABVIEW และโปรแกรม MATLAB ภาพที่ 11 แสดงตัวอย่างการเชื่อมต่อแต่ละอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และภาพที่ 12 แสดงการจัดวางอุปกรณ์ในการทำการทดลองในห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสั่นสะเทือน ส่วนรายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์จะกล่าวต่อไป



ภาพที่ 11 อุปกรณ์และแผนภาพการเชื่อมต่อที่ใช้ในการทดลอง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 12 แสดงอุปกรณ์และการจัดวางในการทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ

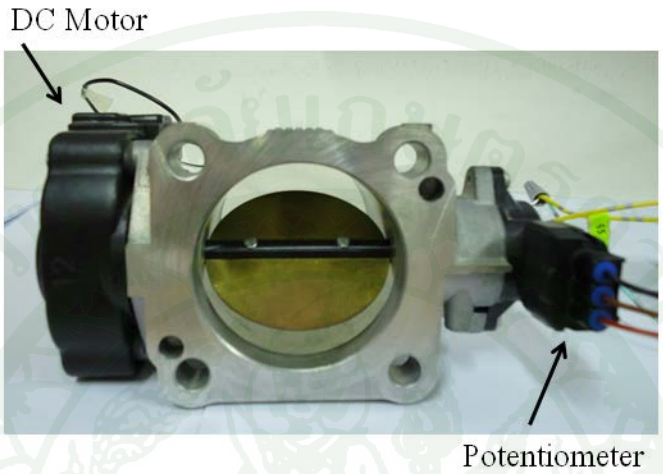
1. ลิ้นปีกผีเสื้ออีเล็กทรอนิกส์ (Electronic Throttle)

ลิ้นปีกผีเสื้ออีเล็กทรอนิกส์จะทำหน้าที่ในการปรับมุมของลิ้นปีกผีเสื้อให้มีองศาที่เหมาะสมกับปริมาณของความต้องการความเร่ง แรงบิด ของผู้ขับรถยนต์ ลิ้นปีกผีเสื้ออีเล็กทรอนิกส์จะมีการปรับองศาของลิ้นปีกผีเสื้อโดยรับคำสั่งมาจากชุดควบคุมอีเล็กทรอนิกส์ (Electronic Control Unit, ECU) ที่มีระบบควบคุมของลิ้นปีกผีเสื้ออยู่ซึ่งต่างจากลิ้นปีกผีเสื้อแบบดั้งเดิมที่ปรับตำแหน่งตามคันเร่งของผู้ขับโดยตรงซึ่งจะมีสายเคเบิ้ลเชื่อมต่ออยู่ ระบบลิ้นปีกผีเสื้อแบบใหม่นี้จะช่วยให้การควบคุมเป็นแบบวงปิด (Close Loop Control) จะทำให้ได้ตำแหน่งที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้นลิ้นปีกผีเสื้อที่ใช้เป็นลิ้นปีกผีเสื้อที่นำมาจากเครื่องยนต์ของรถโตโยต้า วีโก้ ซึ่งในชุดของลิ้นปีกผีเสื้อจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนที่สำคัญ

1.1 มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) ใช้ปรับองศาของวาล์วโดยรับคำสั่งในลักษณะสัญญาณพัลส์ (Pulse Width Modulation, PWM) การสั่งงานจะทำโดยให้ไฟกระแสตรงขนาด 12 โวลต์และให้สัญญาณพัลส์เพื่อสั่งให้ลิ้นปีกผีเสื้อเคลื่อนที่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

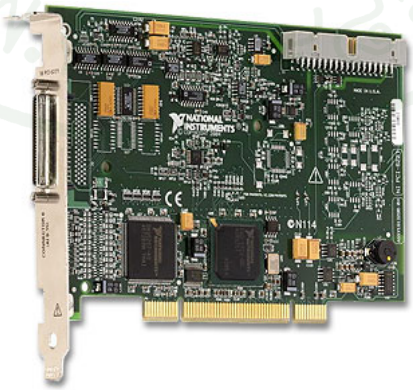
1.2 ตัวรับรู้ (Sensor) ซึ่งมีลักษณะการทำงานเหมือนตัวความต้านทานปรับค่าได้ (Potentiometer) ไฟกระแสตรง 5 โวลต์เป็นไฟเลี้ยง ค่าเอาท์พุตเป็นโวลต์ที่เปลี่ยนแปลงตามมุมที่ลิ้นปีกผีเสื้อขยับซึ่งเป็นสัญญาณอะแนล็อก



ภาพที่ 13 ลิ้นปีกผีเสื้ออีเล็กทรอนิกส์ (Electronic Throttle) ของรถโตโยต้า วีโก้

2. Host Computer

คอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับการออกแบบระบบควบคุมที่เราต้องการ สามารถทำหน้าที่เป็นตัวแสดงผลที่ได้รับจากสัญญาณที่ตอบสนองมาจากระบบที่เราควบคุม และยังใช้ในการแก้ไขหรือเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่างๆของระบบควบคุมหรือแม้กระทั่งกำหนดค่าสัญญาณอินพุตที่จะเข้าสู่ระบบที่ควบคุม



ภาพที่ 14 การ์ดรับส่งข้อมูล (Data Acquisition) NI PCI 6221

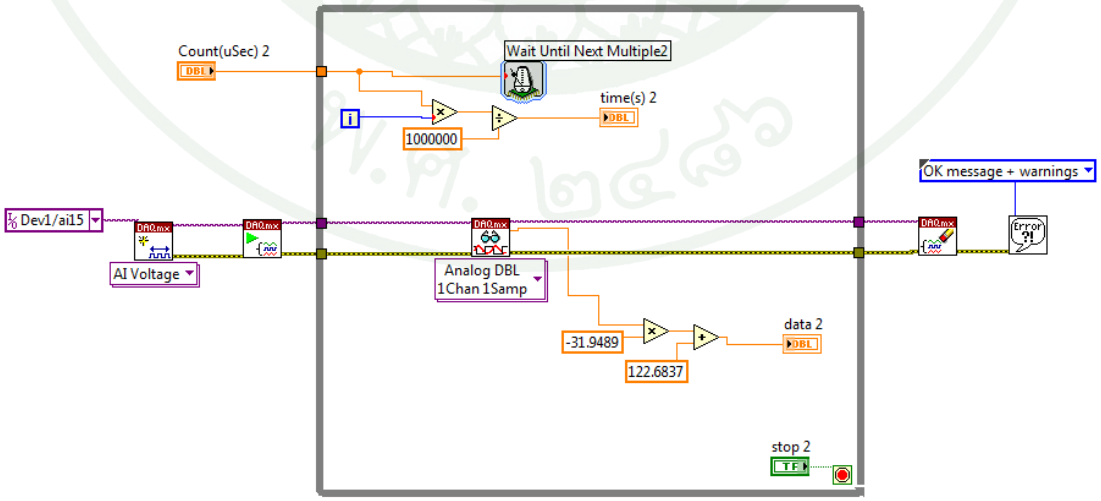
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. Target Computer

คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในระบบควบคุม จะถูกติดตั้งการ์ดรับส่งข้อมูล (Data Acquisition) NI PCI 6221 ทำหน้าที่รับส่งสัญญาณ มีความเร็ว 250 ks ต่อวินาทีและความละเอียด 16 บิตสำหรับอนาลอก ความละเอียด 8 บิตสำหรับดิจิตอล และความละเอียด 32 บิต 80 เมกกะเฮิร์ต สำหรับช่องต่อเคาท์เตอร์ ต่ออยู่กับการ์ดเชื่อมต่อ (CB68) และในคอมพิวเตอร์ตัวนี้ติดตั้งโปรแกรม LABVIEW Real-Time 8.2.0 รายละเอียดเพิ่มเติมที่ www.ni.com/labview

4. โปรแกรมออกแบบระบบควบคุม LABVIEW 2012

LABVIEW เป็นโปรแกรมที่นักวิจัยและผู้สนใจทางด้านระบบควบคุมมีการนำไปใช้งานออกแบบระบบควบคุมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่รองรับกับระบบควบคุมหลายๆ อย่างตั้งแต่พื้นฐานจนถึงซับซ้อน การใช้โปรแกรมจะเป็นลักษณะคล้ายการวาดแผนภาพซึ่งสะดวกและเข้าใจง่ายมากกว่าการใช้ภาษา C ในการเขียนคำสั่ง โปรแกรม LABVIEW มีการพัฒนาร่วมกับการ์ดรับส่งข้อมูลซึ่งมีหลากหลายรุ่นให้เลือกใช้ให้เหมาะกับงานในแต่ละระบบเพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ดีและคุ้มค่ามากที่สุด จากภาพที่ 15 แสดงตัวอย่างการใช้งานโปรแกรมสำหรับการรับสัญญาณอะแนล็อกจากตัวรับรู้ (Sensor) จะเห็นได้ว่ามีลักษณะเหมือนแผนภาพเห็นถึงแต่ละตัวทำหน้าที่อะไรทำให้ลดความซับซ้อนและยุ่งยากในขั้นตอนการเขียนโปรแกรมไป

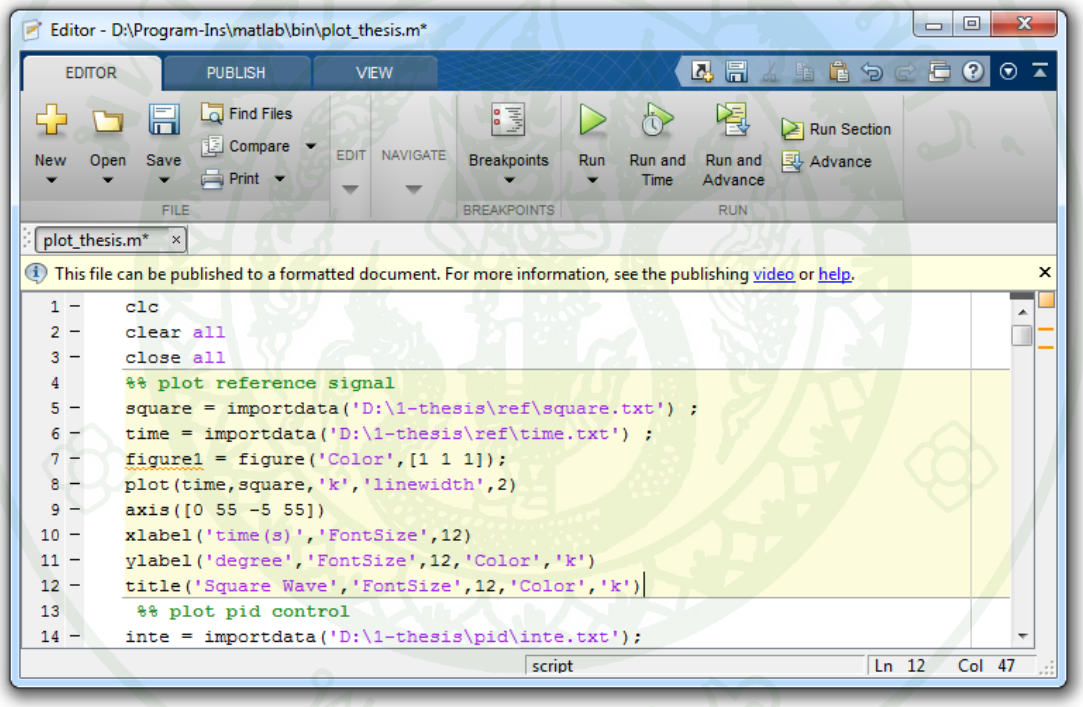


ภาพที่ 15 ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรม LABVIEW

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5. โปรแกรมออกแบบระบบควบคุม MATLAB 2013a

MATLAB เป็นโปรแกรมที่มีการนำมาใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมสูงเพราะเป็นโปรแกรมที่มีความหลากหลายสามารถใช้คิดวิเคราะห์แก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์วิศวกรรมและการใช้ในการออกแบบระบบควบคุม โดยภายในมีส่วนของโปรแกรมที่ชื่อว่า SIMULINK ใช้สำหรับการเขียนระบบควบคุม ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม MATLAB สำหรับงานวิเคราะห์ผลที่ได้มาจากโปรแกรม MATLAB โดยนำมาแสดงผลในลักษณะกราฟ เพื่อให้เห็นผลที่ได้จากระบบควบคุมที่ออกแบบได้ชัดเจนยิ่งขึ้น การใช้งานโปรแกรมเป็นดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรม MATLAB

6. Power Supply

แหล่งจ่ายไฟสำหรับจ่ายให้ลิ้นปีกผีเสื้อ สำหรับที่ใช้ในการทดลองคือ GW INSTEK รุ่น GPS-3030D ดังภาพที่ 17 สามารถจ่ายแรงดันได้สูงสุด 30 โวลต์ กระแสสูงสุด 3 แอมแปร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพที่ 17 Power Supply GW INSTEK รุ่น GPS-3030D

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

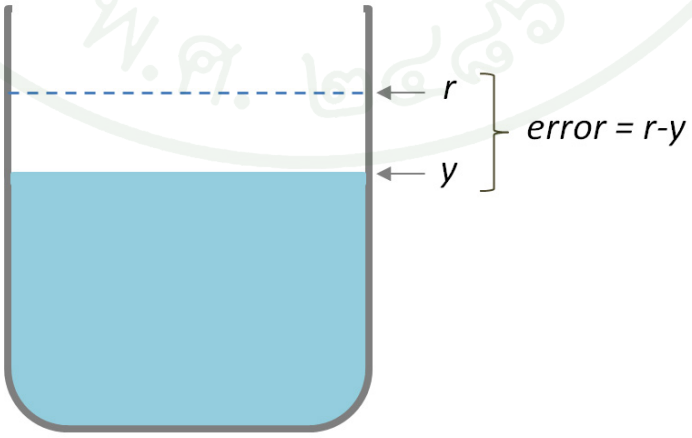
วิธีการ

1. การออกแบบระบบควบคุมแบบพีไอ (PI Control)

ระบบควบคุมแบบพีไอหรือระบบควบคุมเชิงสัดส่วนบวกอินทิกรัล (Proportional Integral Control, PI Control) เป็นระบบควบคุมพื้นฐานซึ่งมีการนำระบบควบคุมชนิดนี้ไปใช้กับงานทางด้านปัญหาควบคุมต่างๆ อย่างเช่นในทางอุตสาหกรรมมีการใช้ระบบควบคุมชนิดนี้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ เพราะเป็นระบบควบคุมที่เข้าใจง่ายไม่ยุ่งยาก ซึ่งในบางครั้งอาจไม่ต้องมีความเข้าใจทางด้านระบบควบคุมมากนักก็สามารถใช้งานได้และในปัจจุบันยังมีบริษัทที่ผลิตระบบควบคุมแบบพีไอสำเร็จรูปจึงนำไปใช้ได้อย่างง่ายมากขึ้น ระบบควบคุมแบบพีไอจะประกอบด้วยสองส่วนคือระบบควบคุมเชิงสัดส่วนและระบบควบคุมแบบอินทิกรัลซึ่งทั้งสองแบบมีลักษณะการทำงานที่แตกต่างกันออกไปซึ่งจะนำเสนอให้เห็นในลำดับต่อไป

1.1) ระบบควบคุมเชิงสัดส่วน(Proportional Control)

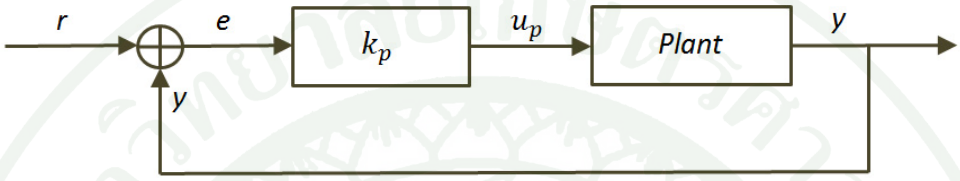
ระบบควบคุมเชิงสัดส่วนเป็นระบบควบคุมที่มีจุดประสงค์เพื่อที่จะต้องการลดค่าความผิดพลาดของระบบให้น้อยลงให้ระบบสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการได้อย่างถูกต้องมากขึ้น ในภาพที่ 18 เป็นระบบที่จะใช้ยกตัวอย่างในการใช้ระบบควบคุมเชิงสัดส่วน โดยเป็นระบบที่มีน้ำเข้าออกตลอดเวลาโดยสิ่งที่เราสามารถควบคุมได้คือปริมาณน้ำที่เข้าไปและปริมาณน้ำที่ปล่อยออกมาเพื่อที่จะทำให้ระบบนี้มีระดับน้ำตามที่ต้องการ



ภาพที่ 18 ตัวอย่างระบบที่ต้องการควบคุมเพื่อให้ได้ระดับน้ำตามที่ต้องการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากภาพที่ 18 กำหนดให้ r คือระดับน้ำที่ต้องการ, y คือระดับน้ำในปัจจุบัน ดังนั้นค่าความผิดพลาดที่เราต้องการลดคือระดับน้ำที่แตกต่างกันของระดับน้ำที่ต้องการกับระดับน้ำปัจจุบัน ซึ่งเท่ากับ $r-y$ ภาพที่ 19 แสดงให้เห็นแผนภาพการทำงานของระบบควบคุมเชิงสัดส่วนที่ใช้กับระบบในภาพที่ 18 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการ (1)



ภาพที่ 19 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบควบคุมเชิงสัดส่วน

$$u_P(t) = k_P e = k_P(r-y) \tag{1}$$

กำหนดให้ k_P คืออัตราขยายของระบบเป็นค่าที่เราต้องออกแบบโดยค่าอัตราขยายจะไปคูณกับค่าความผิดพลาดและให้เป็นสัญญาณควบคุม u_P ออกมา การควบคุมระดับน้ำนี้จะมีการทำงานแบ่งได้เป็น 3 สภาวะคือ

1.1.1 เมื่อระดับน้ำ y มีตำแหน่งต่ำกว่าระดับน้ำที่ต้องการ r ค่าความผิดพลาดจะมีค่ามากกว่า 0 ส่งผลให้ค่าสัญญาณควบคุม u_P มีค่ามากกว่า 0 จึงมีการสั่งงานให้ระบบมีการเติมน้ำเข้าไปเพื่อให้ระดับน้ำสูงขึ้น

1.1.2 เมื่อระดับน้ำ y มีระดับน้ำสูงกว่าระดับที่ต้องการ r ค่าความผิดพลาดจะมีค่าน้อยกว่า 0 ส่งผลให้ค่าสัญญาณควบคุม u_P มีค่าน้อยกว่า 0 จึงมีการสั่งงานให้ระบบปล่อยน้ำออกเพื่อให้ระดับน้ำลดลง

1.1.3 เมื่อระดับน้ำ y อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ r แล้วค่าความผิดพลาดและสัญญาณควบคุม u_P มีค่าเท่ากับศูนย์

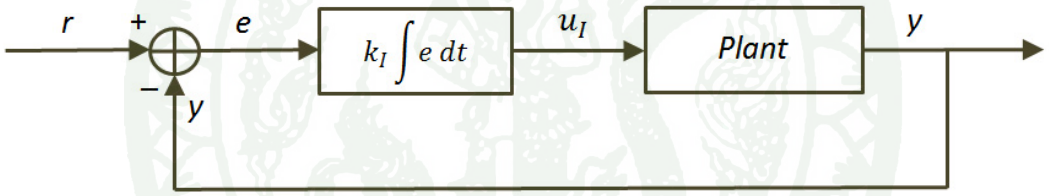
จะเห็นได้ว่าสัญญาณควบคุม u_P มีผลตอบสนองตามสัญญาณผิดพลาดในทันทีจึงเป็นระบบที่เหมาะกับการนำไปใช้งานที่เราต้องการผลตอบสนองเร็วๆ ส่วนค่าอัตราขยาย k_P ก็มีความสำคัญที่ช่วยให้ระบบเข้าสู่ช่วงสถานะอยู่ตัวได้เร็วมากขึ้น แต่ในความเป็นจริงแล้วไม่สามารถ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

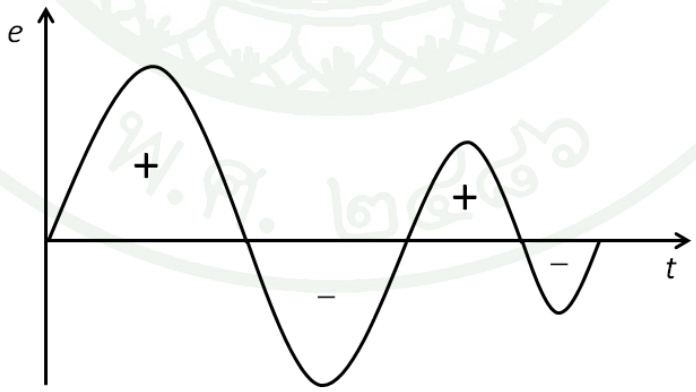
ใช้ระบบควบคุมแบบสัดส่วนเพียงอย่างเดียวได้ เพราะระบบที่ต้องการควบคุมส่วนใหญ่มีความเฉื่อยจึงจำเป็นต้องมีระบบควบคุมแบบอื่นเช่นระบบควบคุมแบบอินทิกรัลเพิ่มเข้ามา

1.2) ระบบควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral Control)

ระบบควบคุมแบบอินทิกรัลมีการออกแบบมาเพื่อปรับปรุงระบบในช่วงสภาวะอยู่ตัว ให้มีค่าเข้าใกล้ค่าจริงมากที่สุดคือลดความผิดพลาดในช่วงสถานะอยู่ตัว การทำงานของระบบควบคุมแบบอินทิกรัลเป็นดังภาพที่ 20 จะเห็นได้ว่าสัญญาณควบคุม u_I จะได้มาจากค่าปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดคูณกับอัตราขยาย k_I ซึ่งเป็นค่าที่เราต้องออกแบบ ค่าปริพันธ์ก็เปรียบเสมือนพื้นที่ใต้กราฟของสัญญาณความผิดพลาดรอบๆสัญญาณอ้างอิงตามภาพที่ 21 ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามสมการที่ (2)



ภาพที่ 20 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบควบคุมแบบอินทิกรัล



ภาพที่ 21 ปริพันธ์ของสัญญาณความคลาดเคลื่อนกับเวลา

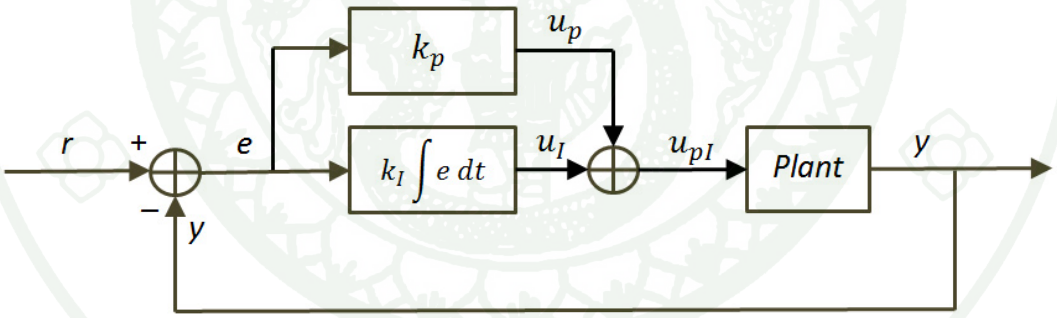
$$u_I(t) = k_I \int e(t)\,dt \tag{2}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ถึงแม้ว่าระบบควบคุมแบบอินทิกรัลจะช่วยลดค่าความผิดพลาดในช่วงสภาวะอยู่ตัวได้ดีแต่เนื่องจากเป็นฟังก์ชันปริพันธ์ซึ่งค่าจะสะสมไปเรื่อยๆทำให้ในบางครั้งค่าความผิดพลาดลดลงแล้วแต่สัญญาณควบคุมยังมีปริมาณมากอยู่ ซึ่งอาจส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบให้มีค่าแย่ลง จึงไม่นิยมนำระบบควบคุมแบบอินทิกรัลมาใช้ตัวเดียวแต่มักนำมาใช้ร่วมกับระบบควบคุมชนิดอื่นด้วย เช่นใช้ร่วมกับระบบควบคุมเชิงสัดส่วน โดยเรียกระบบควบคุมที่ใช้ระบบควบคุมทั้งสองนี้ร่วมกันว่าระบบควบคุมแบบพีไอ

1.3) ระบบควบคุมเชิงสัดส่วนบวกอินทิกรัล (Proportional-Integral Control)

ระบบควบคุมแบบพีไอเป็นส่วนหนึ่งของระบบควบคุมแบบพีไอดีแต่ไม่มีการนำในส่วนของดีหรือระบบควบคุมแบบอนุพันธ์มาใช้เนื่องจากระบบควบคุมแบบอนุพันธ์มีการตอบสนองไวในช่วงความถี่สูงเช่นสัญญาณรบกวน (Noise) ระบบควบคุมแบบพีไอสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 22และสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (3)



ภาพที่ 22 แผนภาพการทำงานของระบบควบคุมแบบพีไอ

$$u_{PI} = k_P e + k_I \int e(t)\,dt \qquad (3)$$

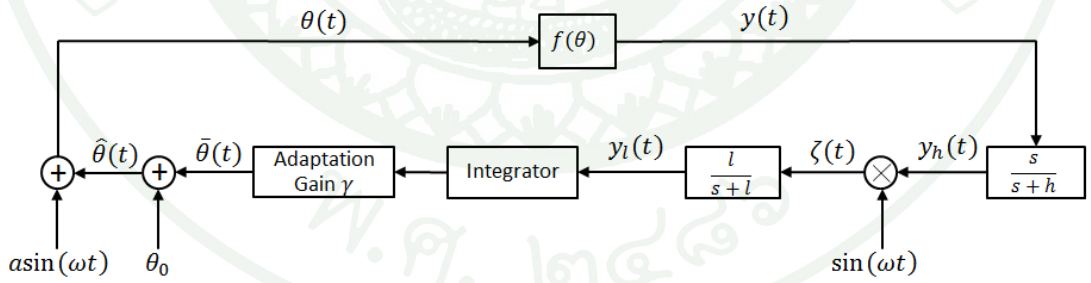
เนื่องจากระบบควบคุมเชิงสัดส่วนเพียงตัวเดียวแม้สามารถควบคุมระบบได้ดีในการลดช่วงเวลาขึ้น(Rise time) แต่ก็ยังมีปัญหาความผิดพลาดในช่วงเวลาอยู่ตัวจึงต้องการระบบควบคุมที่เพิ่มเข้ามาช่วยให้ความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวมีค่าน้อยลง ระบบควบคุมแบบอินทิกรัลซึ่งมีข้อดีในการลดความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวจึงถูกนำมาใช้คู่กับระบบควบคุมเชิงสัดส่วนเพื่อให้ระบบที่ต้องการควบคุมมีผลตอบสนองที่ดีมากขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. ระบบควบคุมแบบการแสวงหาค่าสุดขีด (Extremum Seeking Control)

การแสวงหาค่าสุดขีดเป็นระบบควบคุมที่เป็นแบบ Optimal Control คือระบบควบคุมที่หาค่าที่ทำให้ค่าดรรชนีสมรรถนะ (Performance Index) มีค่าตอบสนองที่ดีที่สุดเช่นต้องการให้ระบบมีประสิทธิภาพมากที่สุดในปัญหาควบคุมค่ามากที่สุด หรือให้ค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุดในปัญหาการควบคุมค่าน้อยที่สุด การแสวงหาค่าสุดขีดเป็นระบบควบคุมที่สามารถปรับค่าได้แบบเรียลไทม์ (Adaptive Control) ทำให้เป็นระบบที่มีความ Robustness คือสามารถรองรับต่อความไม่แน่นอน (Uncertainty) เช่นสิ่งรบกวน (Disturbance) สัญญาณรบกวน (Noise) และความไม่แม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model Uncertainty) จึงเหมาะกับการนำมาใช้ในงานควบคุมที่ระบบมีสภาวะในการทำงานที่หลากหลายหรือมีสิ่งรบกวนมาก

จุดเด่นที่สำคัญของการแสวงหาค่าสุดขีดคือเป็นระบบควบคุมที่ไม่ต้องการใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์แต่สามารถควบคุมให้ระบบเข้าหาค่าที่ดีที่สุดได้โดยการใส่สัญญาณรบกวน (Perturbation Signal) ค่าน้อยๆให้แก่ระบบโดยเรียกวิธีนี้ว่า Perturbation based Extremum Seeking โดยสัญญาณรบกวนที่ใส่เพิ่มเข้าไปที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือสัญญาณไซน์(Sine Wave) โดยการแสวงหาค่าสุดขีดสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 แผนภาพแสดงการแสวงหาค่าสุดขีด

จุดประสงค์หลักของการแสวงหาค่าสุดขีดที่แสดงในภาพที่ 23 เพื่อที่จะต้องการหาค่า θ เพื่อให้ได้ผลตอบสนอง y ซึ่งมีค่าเท่ากับ $f(\theta)$ หรือ $y = f(\theta)$ มีค่าที่ดีที่สุด(Extremum Value)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กำหนดให้ $\hat{\theta}$ มีค่าที่ได้จากการประมาณค่า และให้ค่า θ^* คือค่าที่ทำให้ได้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด ดังนั้นสามารถเขียนความผิดพลาดจากการประมาณค่า (Estimation Error)ได้คือ

$$\tilde{\theta}(t) = \hat{\theta}(t) - \theta^*(t) \tag{4}$$

ค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่า $\tilde{\theta}$ เป็นค่าที่เราต้องการให้มีค่าเท่ากับศูนย์ และจากภาพที่ 23 สามารถเขียนค่าเอาท์พุตเป็น

$$y = f(\theta) = f(\hat{\theta} + a\sin(\omega t)) \tag{5}$$

$$y \approx f(\hat{\theta}) + \left.\frac{\partial f}{\partial \theta}\right|_{\theta=\hat{\theta}} a\sin(\omega t) \tag{6}$$

สมการที่ (6) เป็นค่าประมาณค่าที่ได้มาจาก First-Order Taylor Series ของ f ที่รอบๆค่า $\hat{\theta}$ จากภาพที่ 23 จะเห็นได้ว่าในลำดับต่อไป y จะผ่านตัวกรองความถี่สูงผ่านได้(High Pass Filter, HPF)

$$HPF = \frac{s}{s+h} \tag{7}$$

High Pass Filter จะไปลบพจน์ค่าคงที่ $f(\hat{\theta})$ ที่เป็นความถี่ต่ำออกไปเป็นผลทำให้

$$y_h = \frac{s}{s+h}(y) \approx \left.\frac{\partial f}{\partial \theta}\right|_{\theta=\hat{\theta}} a\sin(\omega t) \tag{8}$$

ดังนั้น

$$\zeta = y_h \sin(\omega t) \approx \left(\left.\frac{\partial f}{\partial \theta}\right|_{\theta=\hat{\theta}} a\sin(\omega t)\right)\sin(\omega t) \tag{9}$$

$$\zeta \approx \left.\frac{\partial f}{\partial \theta}\right|_{\theta=\hat{\theta}} a\sin^2(\omega t) \tag{10}$$

จากสมการที่ (10) จะเห็นได้ว่ามีค่าฟังก์ชันไซน์กำลังสองอยู่ เราสามารถจัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปกำลังหนึ่งโดยใช้ทฤษฎีทางตรีโกณมิติเข้ามาช่วยคือ

$$2\sin^2(\omega t) = 1 - \cos(2\omega t) \tag{11}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จัดสมการที่ (11) ให้มีลักษณะเหมือนสมการที่ (10) จะได้

$$\sin^2(\omega t) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\cos(2\omega t) \tag{12}$$

$$a\sin^2(\omega t) = \frac{a}{2} - \frac{a}{2}\cos(2\omega t) \tag{13}$$

แทนสมการที่ (13) ไปในสมการที่ (10)

$$\zeta \approx \left(\left.\frac{\partial f}{\partial \theta}\right|_{\theta=\hat{\theta}} \frac{a}{2} \right) - \left(\left.\frac{\partial f}{\partial \theta}\right|_{\theta=\hat{\theta}} \frac{a}{2}\cos(2\omega t) \right) \tag{14}$$

จากภาพที่ 23 ต่อไปจะผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่านได้(Low Pass Filter, LPF) คือ

$$LPF = \frac{l}{s+l} \tag{15}$$

หลังจากผ่าน Low Pass Filter พจน์ที่มีความถี่สูงจะถูกลบออกไปซึ่งก็คือพจน์ $\cos(2\omega t)$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$y_l = \frac{l}{s+l}(\zeta) \approx \left.\frac{\partial f}{\partial \theta}\right|_{\theta=\hat{\theta}} \frac{a}{2} \tag{16}$$

จาก Updating law และกำหนดให้ตัวแปร y อยู่ในรูปของ θ จะได้

$$\dot{\hat{\theta}} = \dot{\bar{\theta}} = \gamma y_l \tag{17}$$

เมื่อกำหนดให้ θ_0 เป็นค่าเริ่มต้น (Initial guess) ของ θ^* และเป็นค่าคงที่ ส่วนค่า γ กำหนดให้เป็นค่าคงที่และ $\gamma < 0$ ซึ่งเป็นค่าตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเพื่อนำไปปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายที่ต้องการ

พิจารณา Second-Order Taylor Series โดยนำมาประมาณค่าของฟังก์ชัน f รอบๆค่า θ^*

$$f(\theta) \approx f(\theta^*) + f'(\theta^*)(\theta - \theta^*) + \frac{1}{2} f''(\theta^*)(\theta - \theta^*)^2 \tag{18}$$

$$= f(\theta^*) + \frac{1}{2} f''(\theta^*)(\theta - \theta^*)^2 \tag{19}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อ $f'(\theta^*)=0$ เนื่องจาก θ^* คือค่าที่จุดสุดขีด (Extremum point) ของ f ดังนั้นจากสมการที่ (18) จะได้ว่า

$$\left.\frac{\partial f}{\partial \theta}\right|_{\theta=\hat{\theta}} \approx f''(\theta^*)(\hat{\theta}-\theta^*) \tag{20}$$

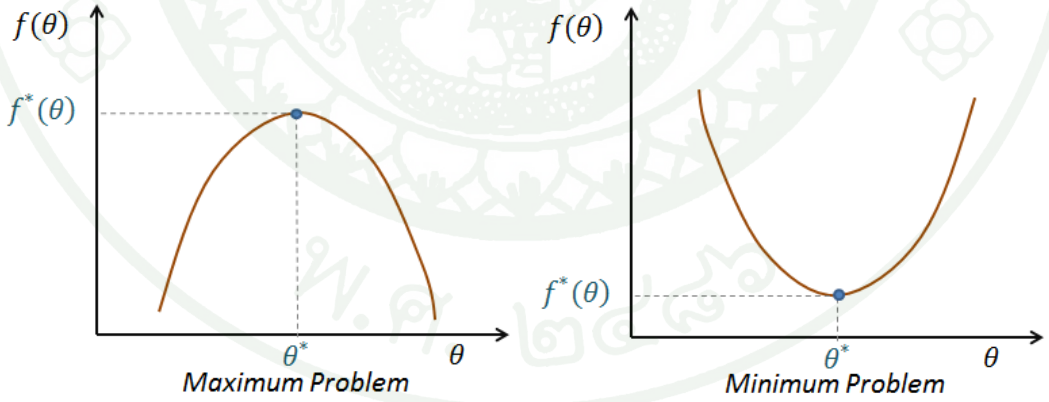
เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (4) จะได้

$$\dot{\tilde{\theta}} = \dot{\hat{\theta}} \tag{21}$$

จากสมการที่ (16), (17), (20) และ (21) จะได้

$$\dot{\tilde{\theta}} \approx \frac{a\gamma f''(\theta^*)}{2}\tilde{\theta} \tag{22}$$

เนื่องจากจุดประสงค์ต้องการให้ $\tilde{\theta}$ มีค่าน้อยที่สุดหรือเท่ากับศูนย์ จากสมการที่ (22) สามารถแสดงให้เห็นว่า $\tilde{\theta}$ จะวิ่งเข้าหาศูนย์เมื่อค่า $a<0$ สำหรับปัญหาค่าสูงสุด $(f''(\theta^*)<0)$ หรือเมื่อค่า $a>0$ สำหรับปัญหาค่าต่ำสุด $(f''(\theta^*)>0)$ ดังที่ได้แสดงในภาพที่ 24



ภาพที่ 24 กราฟแสดงปัญหาค่าสูงสุดและปัญหาค่าต่ำสุด

3. การปรับอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอด้วยการแสวงหาค่าสุดขีด

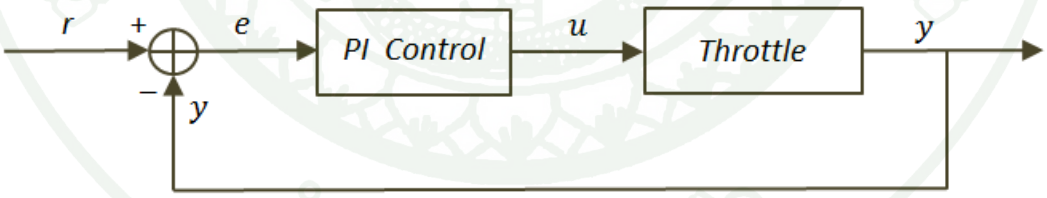
ระบบควบคุมแบบพีไอดีเป็นระบบที่มีการนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายโดยมีมากถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ของระบบควบคุมทั้งหมดที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันเนื่องจากเป็นระบบควบคุมที่สะดวก ไม่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ซับซ้อน การใช้ระบบควบคุมก็ยังมีข้อเสียอยู่นั่นก็คือการปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของระบบให้ดีที่สุดนั้นทำได้ยาก การปรับค่าอัตราขยายเป็นการปรับด้วยมือ(Manual tuning) ซึ่งอาจจะต้องใช้ประสบการณ์ หรือการเดาสุ่มเพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุดออกมา และการปรับด้วยมือสามารถปรับได้ทีละค่าเท่านั้นจึงค่อนข้างใช้เวลาในส่วนนี้มากเพื่อให้ได้ผลตอบสนองตามที่ผู้ใช้ต้องการ

ในปัจจุบันมีการศึกษาค้นคว้าเพื่อที่จะหาวิธีการที่จะสามารถปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยอัตโนมัติ แต่วิธีการที่มีการคิดค้นขึ้นมาส่วนใหญ่จะมีการอ้างอิงถึงเรื่องแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องได้แบบจำลองที่มีความแม่นยำอย่างมาก จึงได้มีการนำการแสวงหาค่าสุดขีดมาใช้ในการปรับอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดีซึ่งมีข้อดีอยู่ที่ไม่ต้องการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเหมาะกับการนำมาประยุกต์ใช้กับพีไอดีเพราะเป็นระบบควบคุมที่เราไม่รู้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก็ได้

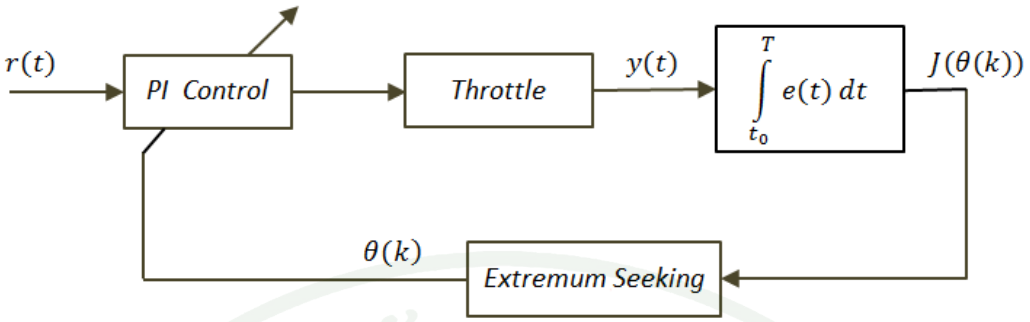
การแสวงหาค่าสุดขีดเป็นระบบควบคุมแบบ Feedback Tuning สามารถปรับอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอดีได้โดยการรับสัญญาณอินพุตและเอาท์พุตเพื่อมาหาค่าพีไอดีออกมาเพื่อให้ได้ค่าดรรชนีสมรรถนะ(Performance Index) ดีที่สุด



ภาพที่ 25 ระบบควบคุมแบบปิดของระบบควบคุมแบบพีไอ

จากภาพที่ 25 แสดงระบบควบคุมแบบพีไอแบบดั้งเดิมที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของลิ้นปีกผีเสื้อ r คือตำแหน่งอ้างอิงที่ต้องการ y คือตำแหน่งเอาท์พุตจริงๆที่ลิ้นปีกผีเสื้ออยู่ e คือความผิดพลาดของตำแหน่งอ้างอิงลบด้วยค่าเอาท์พุต ลิ้นปีกผีเสื้อเป็นระบบที่มีความซับซ้อนมาก มีพฤติกรรมการเคลื่อนที่ในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นจึงกำหนดให้เป็นระบบที่เราไม่รู้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 26 การแสวงหาค่าสุดขีดมาใช้กับระบบควบคุมแบบพีไอ

การแสวงหาค่าสุดขีดสามารถนำมาใช้กับระบบควบคุมแบบพีไอโดยมาใช้ในส่วนของสัญญาณป้อนกลับโดยค่าอินพุตก่อนเข้าสู่การแสวงหาค่าสุดขีดคือดรรชนีสมรรถนะ ซึ่งเราเป็นคนออกแบบค่าที่ได้ออกมาคือค่าอัตราขยาย k_p และค่า k_I ดังที่แสดงในภาพที่ 26 แสดงให้เห็นว่าการแสวงหาค่าสุดขีดเป็นระบบปรับเปลี่ยนค่าอัตโนมัติ (Adaptive) โดยจะเปลี่ยนค่าอัตราขยายทุกๆ รอบของการคำนวณ ซึ่งกำหนดได้จากความถี่หรือ Sampling time ของระบบ

ดรรชนีสมรรถนะของระบบหรือ Cost function ที่ใช้กับลิ้นปีกผีเสื้อคือค่าความผิดพลาดสะสมของการเคลื่อนที่ สามารถเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$J(\theta) \triangleq \int_{t_0}^{T} e(t,\theta)dt \tag{23}$$

โดยที่ $e(t,\theta)$ คือค่าความผิดพลาดของค่าอ้างอิงกับค่าเอาท์พุตที่ได้จากระบบปิดจากภาพที่ 23 และกำหนดให้

$$e(t,\theta) \triangleq r(t) - y(t,\theta) \tag{24}$$

เมื่อ θ คือค่าของตัวแปรของระบบในที่นี้คือค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอ คือ

$$\theta \triangleq \left[k_p, k_I\right] \tag{25}$$

ค่า Cost function ที่ได้จากสมการที่ (23) คือค่าความผิดพลาดสะสมในช่วงเวลา t_0 ถึง T โดยกำหนดให้ t_0 คือเวลาประมาณที่ T_{peak} ของการตอบสนองแบบขั้นบันได(Step response) เพื่อ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ต้องการที่จะหลีกเลี่ยงค่าผิดพลาดในช่วงสภาวะชั่วครู่ของระบบเพราะว่าการแสวงหาค่าสุดขีดเป็นระบบที่จะทำการปรับปรุงค่าในช่วงสถานะอยู่ตัว

High Pass Filter ทำหน้าที่ในการกรองความถี่รอบๆค่า ω และ Low Pass Filter ทำหน้าที่ในการกรองความถี่รอบๆค่า 2ω ในการทดลองค่าความถี่ Cut-off จะต้องออกแบบให้มีค่าน้อยกว่าค่าความถี่ของสัญญาณรบกวนที่ใส่เข้าสู่ระบบเนื่องจากระบบมีความเร็วในแต่ละส่วนไม่เท่ากันโดยแบ่งได้ตามนี้คือ 1. เร็ว คือระบบที่เราต้องการควบคุมเสถียรภาพ 2. ปานกลาง คือคาบของสัญญาณรบกวน และ 3. ช้า คือส่วนของตัวกรองความถี่ต่างๆ

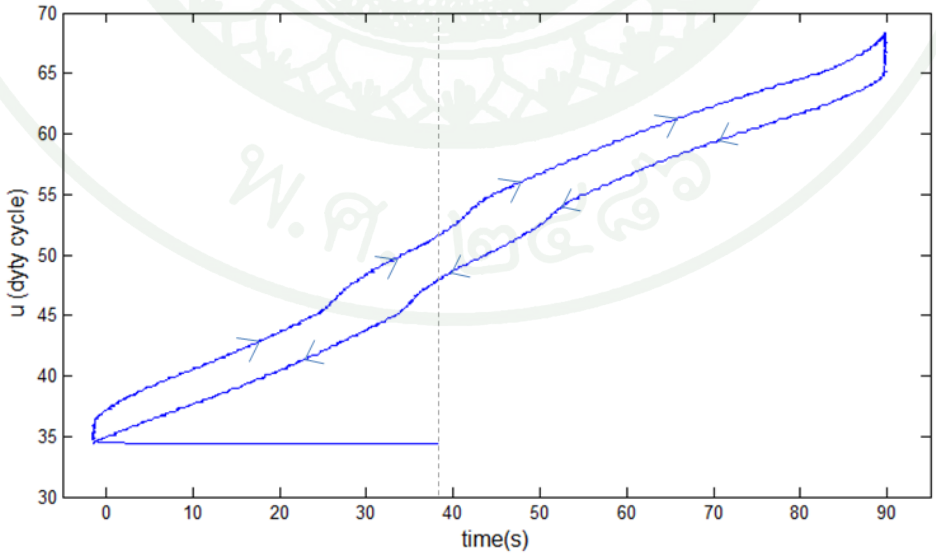
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะใช้การแสวงหาค่าสุดขีดเพื่อปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอโดยในการทดลองจะนำมาประยุกต์ใช้กับลิ้นปีกผีเสื้อของเครื่องยนต์ดีเซล เพื่อให้ลิ้นปีกผีเสื้อมีประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ได้ดีและแม่นยำมากขึ้น การทดลองจะใช้โปรแกรม LABVIEW 2012 การทดลองแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักๆคือส่วนแรกแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของลิ้นปีกผีเสื้อที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น ในส่วนที่สองจะแสดงให้เห็นถึงการทำงานของการแสวงหาค่าสุดขีดที่ไปปรับอัตราการขยายให้เปลี่ยนแปลงโดยทำการวิเคราะห์ทั้งในขณะที่ไม่มีสิ่งรบกวนจากภายนอกและมีสิ่งรบกวนจากภายนอกซึ่งก็คือแรงดันไฟฟ้าของลิ้นปีกผีเสื้อที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปมาเพื่อที่จะดูว่าการแสวงหาค่าสุดขีดสามารถปรับค่าอัตราขยายให้เหมาะสมกับแต่ละสภาวะที่มีการรบกวนเข้าสู่ระบบ

1. ผลการศึกษาพฤติกรรมและการทำงานของลิ้นปีกผีเสื้อ

การศึกษาการเคลื่อนที่ของลิ้นปีกผีเสื้อทำโดยการเพิ่มสัญญาณอินพุตเข้าสู่ระบบและเมื่อลิ้นปีกผีเสื้อเคลื่อนที่ถึงตำแหน่ง 90 องศาก็ค่อยๆลดสัญญาณอินพุตลงมาโดยการทดลองนี้ทำในระบบเปิด ผลจากการศึกษาเป็นไปตามรูปที่ 27 คือเมื่อเพิ่มสัญญาณอินพุตลิ้นปีกผีเสื้อจะเคลื่อนที่



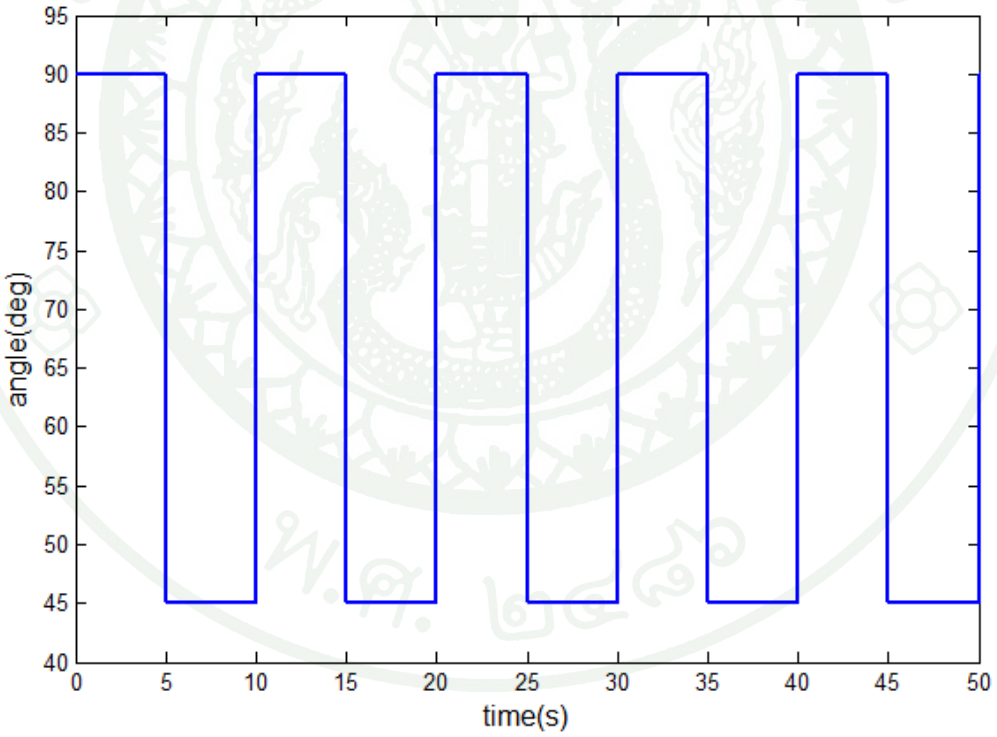
ภาพที่ 27 พฤติกรรมความเป็น hysteresis ที่ไม่เป็นเชิงเส้นของการเคลื่อนที่ของลิ้นปีกผีเสื้อ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ออกจากตำแหน่ง Limp-home ไปอยู่ที่ตำแหน่ง 0 องศาและจะมีองศามากขึ้นตามสัญญาณอินพุตแต่มีพฤติกรรมการเคลื่อนที่แบบไม่เป็นเชิงเส้น ในช่วงลดสัญญาณอินพุตมุมของลิ้นปีกผีเสื้อจะไม่ลดลงตามในทันทีแต่จะค้างอยู่ในตำแหน่ง 90 องศาจนถึงค่าอินพุตค่าหนึ่งที่เหมาะสมลิ้นปีกผีเสื้อถึงเริ่มขยับ สาเหตุนี้ทำให้ลิ้นปีกผีเสื้อมีพฤติกรรมที่เป็น hysteresis เพิ่มเข้ามาซึ่งก็คือการให้สัญญาณอินพุตเท่ากันแต่สั่งให้การเคลื่อนที่ของลิ้นปีกผีเสื้อเพิ่มขึ้นหรือลดลงจะได้ตำแหน่งของลิ้นปีกผีเสื้อที่ต่างกัน

2. สัญญาณอ้างอิงรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

ในขั้นตอนแรกในการศึกษาการแสวงหาค่าสุดขีดกำหนดสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการให้ลิ้นปีกผีเสื้อเคลื่อนที่ตาม สัญญาณที่ให้เป็นสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม(Square wave) โดยกำหนดให้



ภาพที่ 28 สัญญาณอ้างอิงรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ใช้ในการทดลอง

เคลื่อนที่ไปกลับระหว่าง 90 องศากับ 45 องศาทุกๆ 5 วินาที (เมื่อเริ่มต้นลิ้นปีกผีเสื้อจะอยู่ที่ตำแหน่ง 90 องศาคือตำแหน่งที่กำหนดให้อากาศสามารถผ่านตัวลิ้นปีกผีเสื้อได้ 100 เปอร์เซ็นต์หรือเปิดสุด เมื่อผ่านไป 5 วินาทีสัญญาณอ้างอิงจะให้ลิ้นปีกผีเสื้อเคลื่อนที่ไปที่ตำแหน่ง 45 องศา อยู่ที่ตำแหน่ง

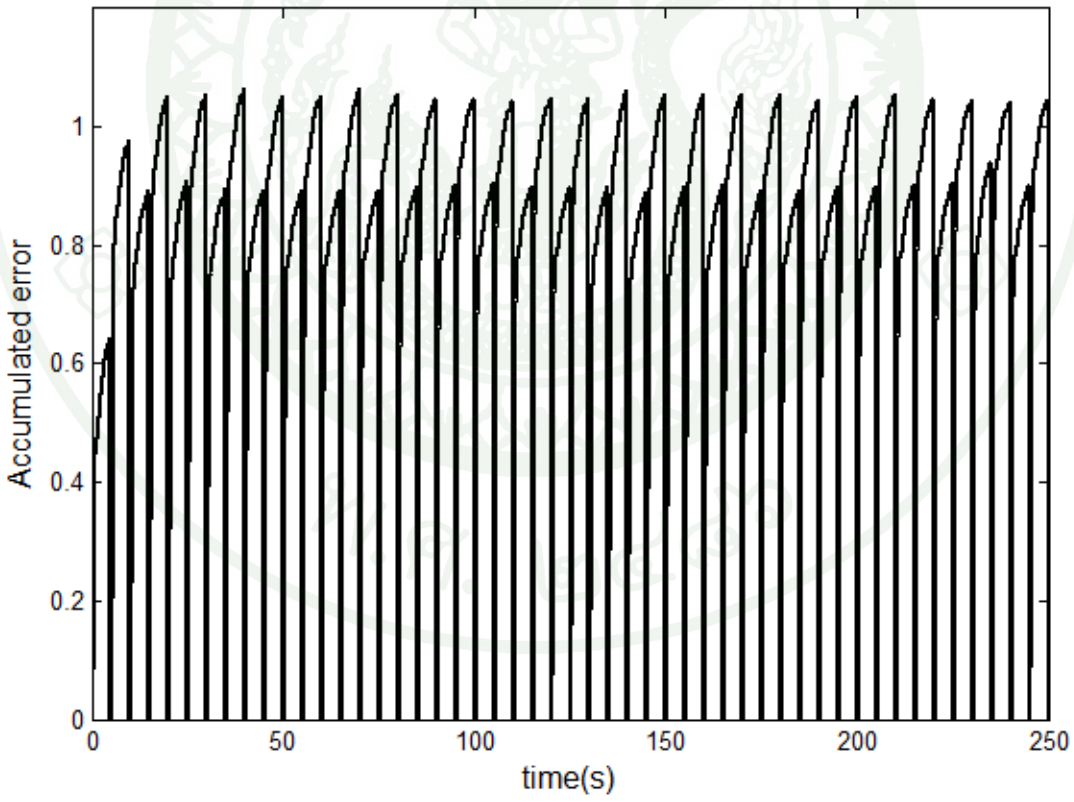
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นี้อีก 5 วินาทีจนวินาทีที่ 10 ก็ให้เคลื่อนที่กลับไปที่ตำแหน่ง 90 องศา สัญญาณจะสั่งงานแบบนี้ไปเรื่อยๆ) โดยตัวอย่างของสัญญาณอ้างอิงแสดงดังภาพที่ 28

การควบคุมลิ้นปีกผีเสื้อในสภาวะทั่วไปที่ยังไม่ใส่สิ่งรบกวนเข้าสู่ระบบ จะทำการทดลองที่ค่าอัตราขยายเริ่มต้นสองชุดคือเมื่อ $k_p = 2.5$ และ $k_I = 12$ และเมื่อ $k_p = 2.5$ และ $k_I = 8.2$ เพื่อดูผลการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราขยายและค่าความผิดพลาดสะสมเมื่ออัตราขยาย มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมโดยจะแสดงตามลำดับ

3. การควบคุมลิ้นปีกผีเสื้อด้วยระบบควบคุมแบบพีไอเมื่อ $k_p = 2.5$ และ $k_I = 12$

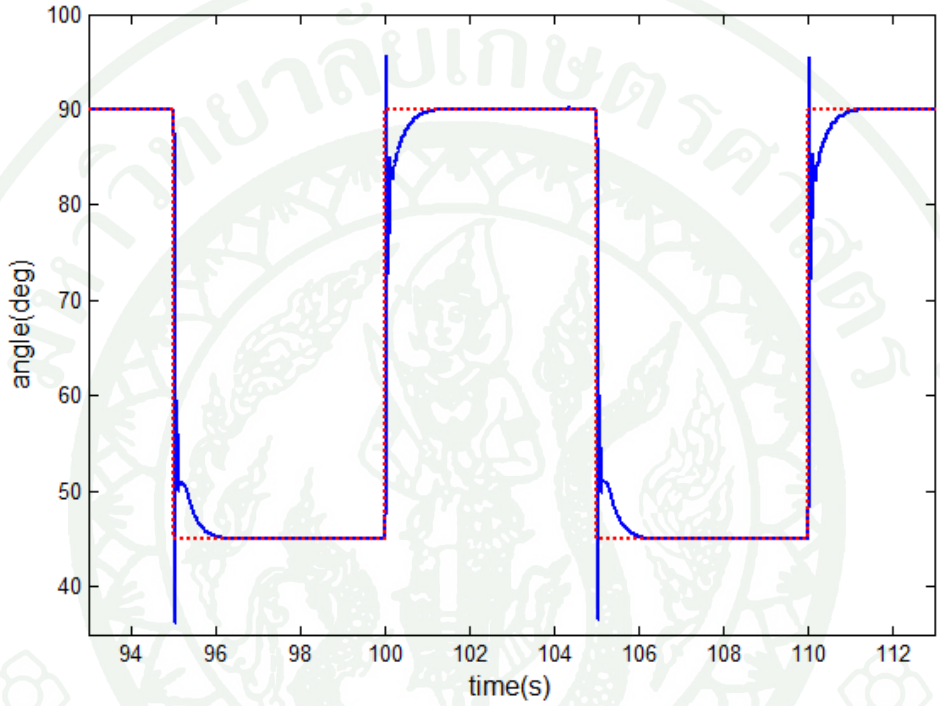
การเริ่มต้นควบคุมระบบลิ้นปีกผีเสื้อจะเริ่มโดยใช้ระบบควบคุมแบบพีไอที่ใช้กันทั่วไปดังที่เคยแสดงไว้ในหัวข้อก่อนหน้าในภาพที่ 25 ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมทั้งสองตัวกำหนดให้



ภาพที่ 29 ค่าความผิดพลาดสะสมของตัวควบคุมแบบพีไอเมื่อ $k_p = 2.5$ และ $k_I = 12$ ก่อนใช้วิธีการแสวงหาค่าสุดขีด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เป็น $k_p = 2.5$ และ $k_I = 12$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลองสุ่มค่าจนได้ค่าที่พอที่จะคุมลิ้นปีกผีเสื้อให้ตามสัญญาณอ้างอิงได้แต่ยังไม่ดีนัก ในการทดลองกำหนดให้ Sampling time มีค่าเท่ากับ 0.01 วินาที และทำการบันทึกค่าความผิดพลาดสะสมซึ่งได้มาจากสมการดรรชนีสมรรถนะสมการที่ (23) ซึ่งกำหนดให้ $t_0 = 0.45$ วินาทีและ $T = 5$ วินาที



ภาพที่ 30 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอต่อสัญญาณอ้างอิงเมื่อ $k_p = 2.5$ และ $k_I = 12$

ค่าความผิดพลาดสะสมของตัวควบคุมแบบพีไอแสดงดังภาพที่ 29 แกนตั้งแสดงถึงค่าความผิดพลาดสะสมที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้งที่ลิ้นปีกผีเสื้อเคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิงรูปคลื่นสี่เหลี่ยม แกนนอนคือเวลาซึ่งแสดงผลถึงแค่ช่วงเวลา 250 วินาทีเนื่องจากค่าความผิดพลาดจะมีค่าซ้ำเช่นนี้ไปตลอด โดยจากผลค่าความผิดพลาดของตัวควบคุมแบบพีไอจะมีอยู่ที่สองค่าคือ ค่าประมาณ 1.06 และค่าประมาณ 0.90 ที่มีสองค่าเนื่องจากลิ้นปีกผีเสื้อมีพฤติกรรมที่เป็น Hysteresis การเคลื่อนที่จาก 0 ไป 50 องศา กับการเคลื่อนที่จาก 50 ไป 0 องศามีพฤติกรรมที่แตกต่างกันดังนั้นค่าอัตราขยายค่าเดียวกันจึงทำให้เกิดค่าความผิดพลาดในสองทิศทางที่ต่างกัน ในการเคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิงครั้งแรก คือในช่วงประมาณ 5 วินาทีแรกค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยเนื่องจากลิ้นปีกผีเสื้อไม่ได้เคลื่อนที่จากตำแหน่ง 50 องศาไป 0 องศาแต่ครั้งแรกจะเคลื่อนที่จาก

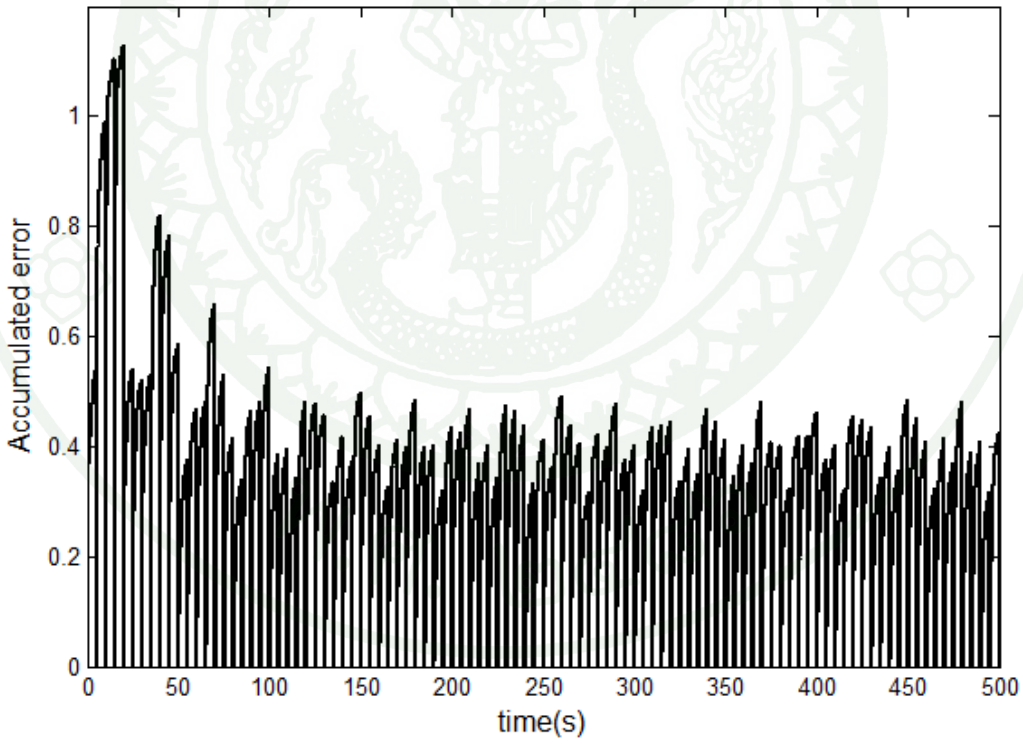
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตำแหน่ง Limp-home ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่งประมาณ 40 องศาไปที่ 0 องศา ดังนั้นค่าความผิดพลาดสะสมในการเคลื่อนที่ครั้งแรกจึงมีค่าน้อยกว่าครั้งต่อๆไป

จากภาพที่ 30 แสดงการเคลื่อนที่ของลิ้นปีกผีเสื้อตามสัญญาณอ้างอิงโดยใช้ระบบควบคุมแบบพีไอและค่าอัตราขยายตามกำหนดซึ่งจะเห็นว่าแม้ลิ้นปีกผีเสื้อจะเคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิงได้ แต่ในช่วงสภาวะชั่วครู่ลิ้นปีกผีเสื้อมีการสั่นมากและมีค่าโอเวอร์ชูตที่สูงซึ่งเราจะใช้การแสวงหาค่าสุดขีดแก้ไข ซึ่งจะกล่าวในส่วนต่อไป

4. การควบคุมลิ้นปีกผีเสื้อด้วยการแสวงหาค่าสุดขีดเมื่อ $k_{P0} = 2.5$ และ $k_{I0} = 12$

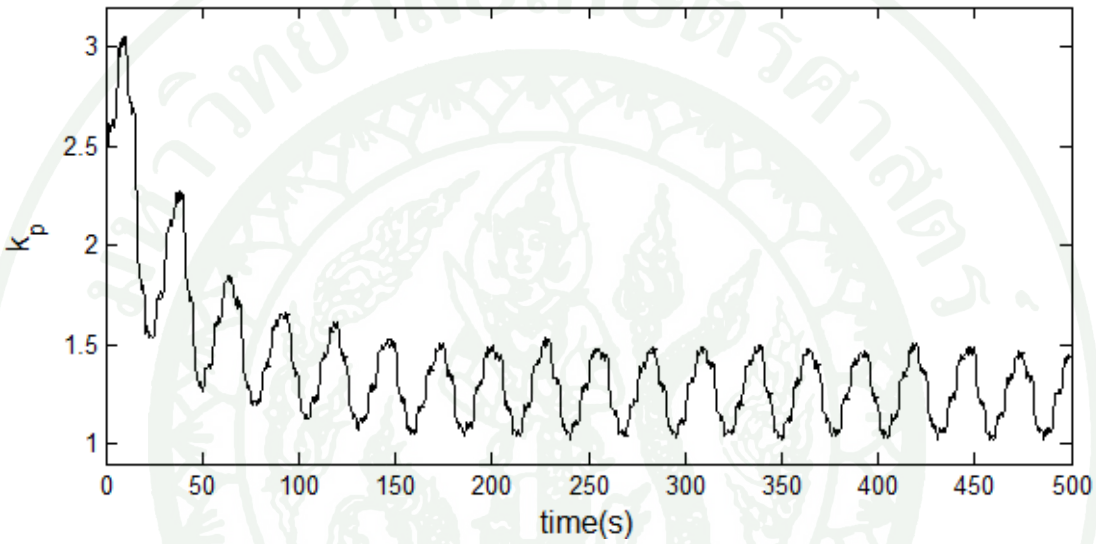
การแสวงหาค่าสุดขีดที่จะนำมาใช้กับลิ้นปีกผีเสื้อมีลักษณะเป็นเช่นเดียวกับแผนภาพที่แสดงไว้ในส่วนของวิธีการในภาพที่ 23 และภาพที่ 26 ส่วนค่าตัวแปรต่างๆในระบบกำหนดให้เป็น



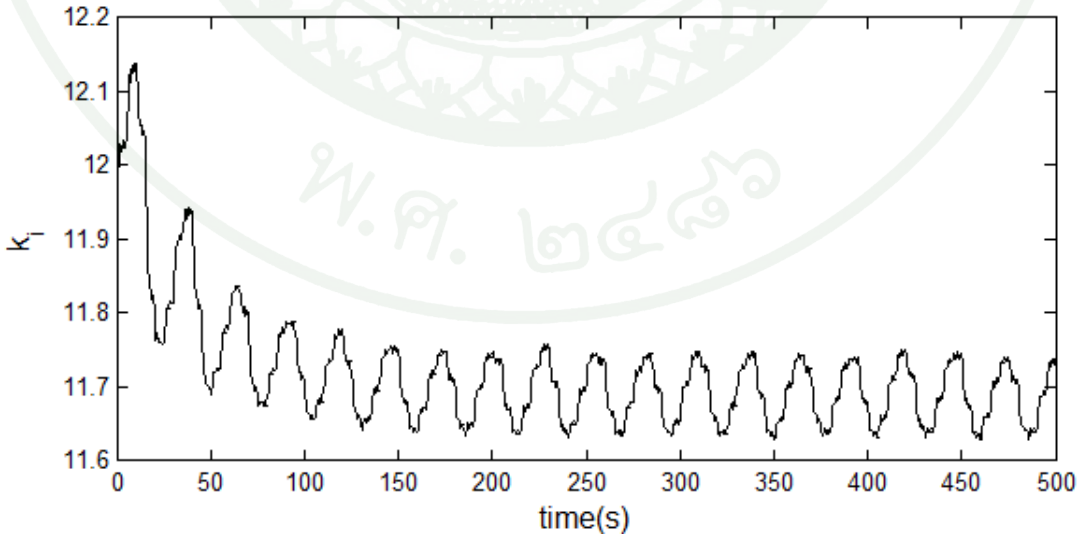
ภาพที่ 31 ค่าความผิดพลาดสะสมของการแสวงหาค่าสุดขีดที่ $k_{P0} = 2.5$ และ $k_{I0} = 12$ หลังจากใช้วิธีการแสวงหาค่าสุดขีด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดังนี้ *high pass filter*, $h = 0.5$ และ *low pass filter*, $l = 1$ และให้ค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณรบกวนเป็น $a_{kp} = 0.005$, $a_{ki} = 0.001$, $\omega = 2\ rad \cdot s^{-1}$ ค่า Adaptation gain คือ $\gamma_{kp} = -2$, $\gamma_{kI} = -0.5$, ค่าอัตราขยายเริ่มต้นให้มีค่าเท่ากับระบบควบคุมแบบพีไอที่ทดลองก่อนหน้าคือ $k_{P0} = 2.5$ และ $k_{I0} = 12$ สุดท้ายค่าดรรชนีสมรรถนะเป็นค่าเดียวกันเช่นกันคือให้ $t_0 = 0.45$ วินาทีและ $T = 5$ วินาที



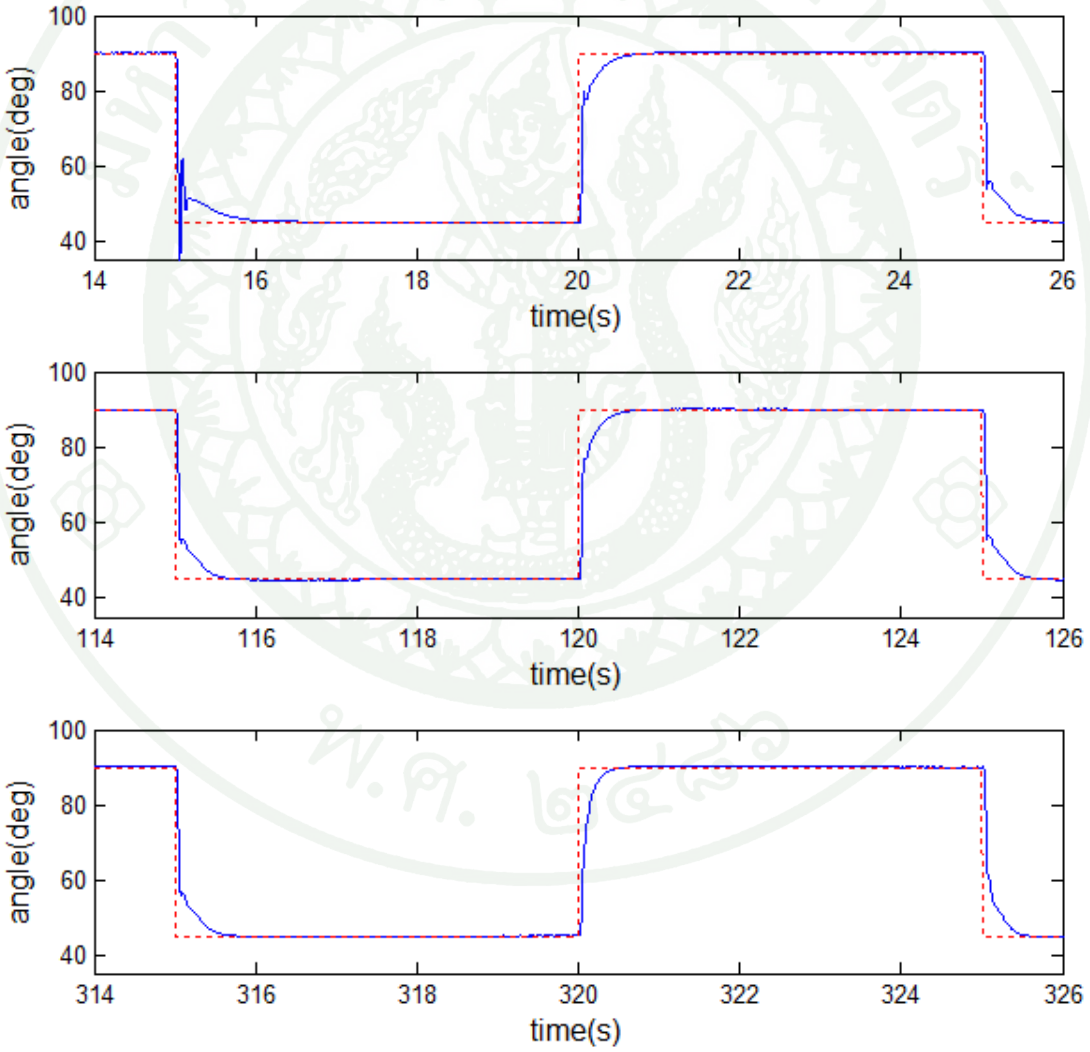
ภาพที่ 32 อัตราขยาย k_p ที่เปลี่ยนแปลงจาก $k_{p0} = 2.5$ เนื่องจากการแสวงหาค่าสุดขีด



ภาพที่ 33 อัตราขยาย k_i ที่เปลี่ยนแปลงจาก $k_{i0} = 12$ เนื่องจากการแสวงหาค่าสุดขีด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

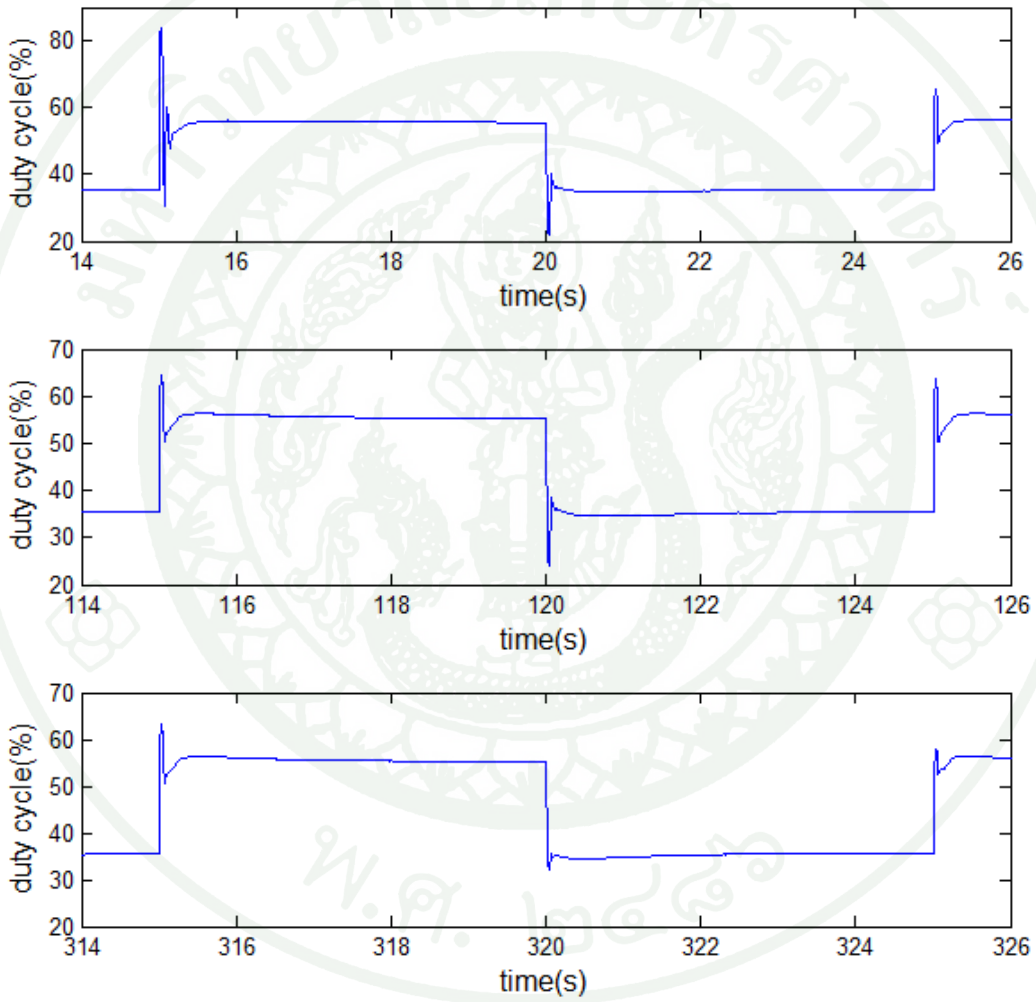
ค่าความผิดพลาดสะสมของการแสวงหาค่าสุดขีดโดยแสดงถึงเวลา 500 วินาทีตามภาพที่ 31 จากภาพเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดสะสมมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วงแรกจนถึงเวลาประมาณ 150 วินาทีก็เริ่มคงที่โดยค่าความผิดพลาดสะสมในช่วงสภาวะอยู่ตัวจะลดลงมาอยู่ที่ประมาณ 0.31 ถึง 0.49 ค่าอัตราขยาย k_P และ k_I ที่เปลี่ยนแปลงแสดงไว้ในภาพที่ 32 และภาพที่ 33 ตามลำดับ ค่าอัตราขยาย k_P มีการเปลี่ยนแปลงค่าจากตอนเริ่มต้นที่ 2.5 โดยค่าลดลงมาอยู่ที่ประมาณ 1.03 ถึง 1.48 ค่าอัตราขยาย k_I ก็มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงจาก 12 ลดลงไปอยู่ที่ค่าประมาณ 11.63 ถึง 11.73 โดยค่าทั้งสองเปลี่ยนแปลงเพื่อให้ค่าความผิดพลาดสะสมของระบบมีค่าน้อยที่สุด



ภาพที่ 34 การเคลื่อนที่ของลิ้นปีกผีเสื้อตามสัญญาณอ้างอิงในแต่ละช่วงเวลา บน: ผลตอบสนองในช่วงเวลา 14 ถึง 26 วินาที, กลาง: ผลตอบสนองในช่วงเวลา 114 ถึง 126 วินาที, ล่าง: ผลตอบสนองในช่วงเวลา 314 ถึง 326 วินาที

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าความผิดพลาดสะสมของระบบควบคุมแบบพีไอทั่วไปจะเห็นได้ชัดว่าการแสวงหาค่าสุดขีดสามารถปรับค่าอัตราขยายของระบบจนได้ค่าความผิดพลาดสะสมที่น้อยลงมาก ถึงแม้จะมีลักษณะที่สั่นไม่คงที่เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่ใส่เข้าไปซึ่งเป็นสัญญาณคลื่นไซน์ แต่ค่าความผิดพลาดสะสมที่สูงที่สุด(ประมาณ 0.49) ก็ยังมีค่าน้อยกว่าค่าต่ำสุด(ประมาณ 0.90) ของตัวควบคุมแบบพีไอ



ภาพที่ 35 สัญญาณอินพุต PWM ที่ให้ลิ้นปีกผีเสื้อในแต่ละช่วงเวลา บน: สัญญาณอินพุต ในช่วงเวลา 14 ถึง 26 วินาที, กลาง: สัญญาณอินพุต ในช่วงเวลา 114 ถึง 126 วินาที, ล่าง: สัญญาณอินพุต ในช่วงเวลา 314 ถึง 326 วินาที

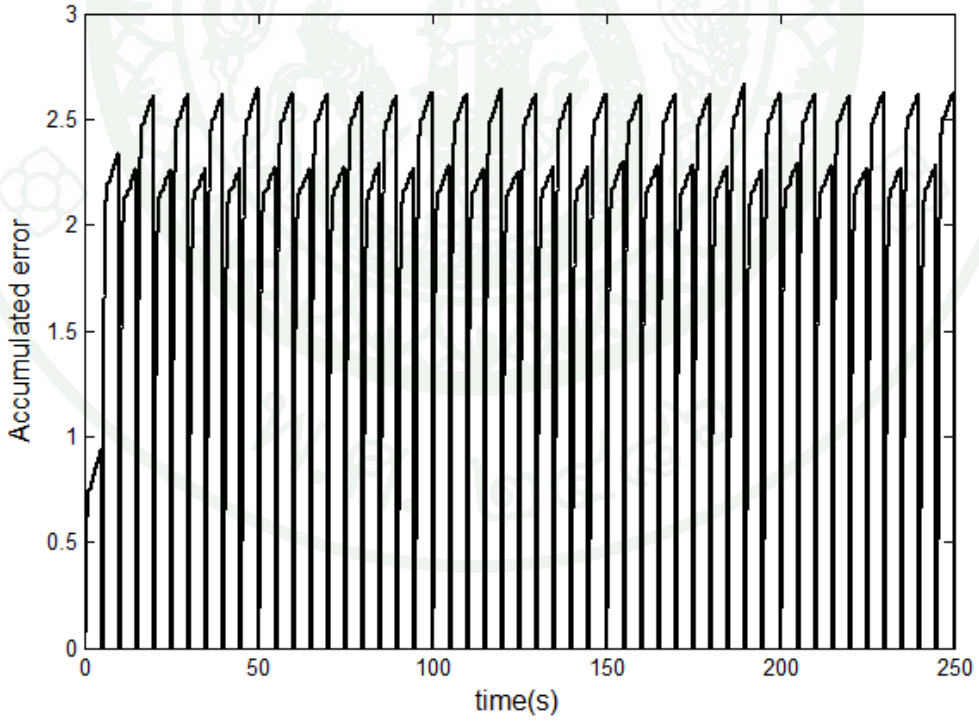
ภาพที่ 34 แสดงผลตอบสนองของลิ้นปีกผีเสื้อต่อสัญญาณอ้างอิง ซึ่งเห็นได้ชัดว่าในช่วงแรกการตอบสนองมีค่าโอเวอร์ชูตมากมีการสั่นก่อนเข้าสู่ช่วงสภาวะอยู่ตัวซึ่งเป็นผลจากค่า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อัตราขยายที่ไม่ดี เมื่อเวลาผ่านไป 120 วินาทีผลการตอบสนองของลิ้นปีกผีเสื้อดีขึ้นค่าโอเวอร์ชูตหายไปเนื่องจากการแสวงหาค่าสุดขีดไปปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายให้มีความเหมาะสมมากขึ้น และเมื่อเวลาผ่านไป 320 วินาทีการตอบสนองมีค่าที่เรียบขึ้นอีกเนื่องจากการแสวงหาค่าสุดขีดปรับค่าอัตราขยายของระบบจนกระทั่งได้ค่าความผิดพลาดสะสมน้อยที่สุด ซึ่งเป็นผลให้ผลตอบสนองของระบบต่อสัญญาณอ้างอิงมีค่าที่ดีตามไปด้วย เช่นเดียวกับค่าของสัญญาณอินพุตที่มีลักษณะที่เรียบขึ้นโอเวอร์ชูตและการสั่นในช่วงแรกหายไปเมื่อเวลาผ่านไปดังแสดงในภาพที่ 35

5. การควบคุมลิ้นปีกผีเสื้อด้วยระบบควบคุมแบบพีไอเมื่อ $k_P = 2.5$ และ $k_I = 8.2$

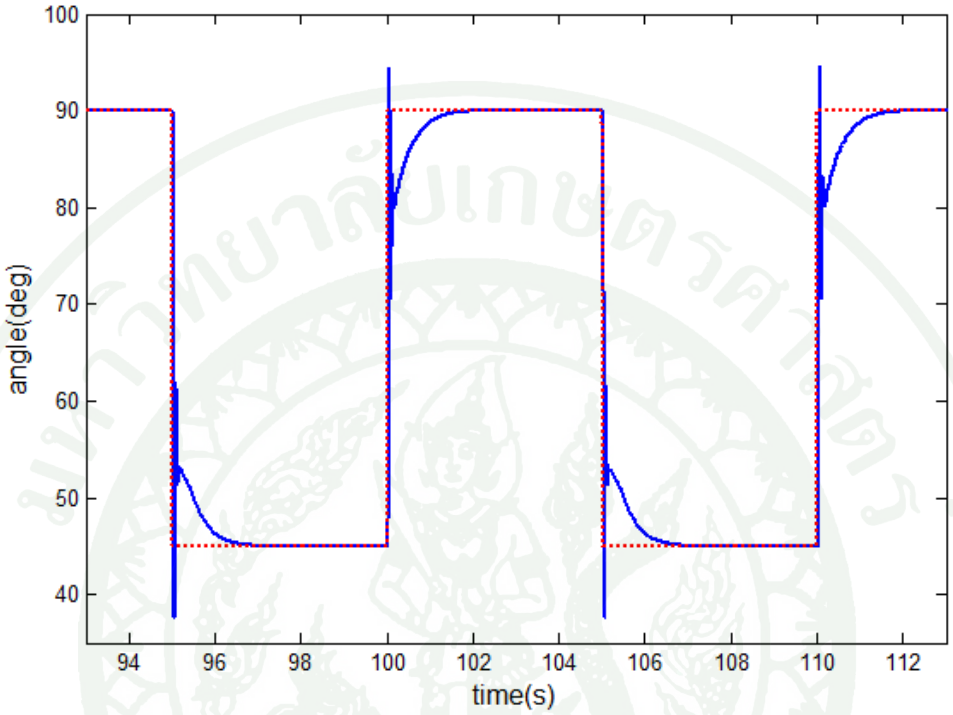
ในส่วนนี้แสดงตัวอย่างเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอัตราขยายเริ่มต้นเพื่อที่จะดูถึงการทำงานของการแสวงหาค่าสุดขีดเมื่อค่าอัตราขยายเริ่มต้นเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยจากภาพที่ 36 เป็นค่าความผิดพลาดสะสมของตัวควบคุมแบบพีไอซึ่งค่าความผิดพลาดอยู่ที่ประมาณ 2.27 และ 2.61 ค่าความผิดพลาดที่มากเกิดจากอัตราขยายที่ไม่เหมาะสมทำให้ระบบตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงได้



ภาพที่ 36 ค่าความผิดพลาดสะสมของตัวควบคุมแบบพีไอเมื่อ $k_P = 2.5$ และ $k_I = 8.2$ ก่อนใช้วิธีการแสวงหาค่าสุดขีด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ไม่ดีดังแสดงในภาพที่ 37 ก่อนเข้าสู่ช่วงสภาวะอยู่ตัว และเข้าสู่ช่วงสภาวะอยู่ตัวช้า จากภาพแสดงตัวอย่างในช่วงเวลาที่ 94 ถึง 112 วินาที



ภาพที่ 37 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอต่อสัญญาณอ้างอิงเมื่อ $k_P = 2.5$ และ $k_I = 8.2$

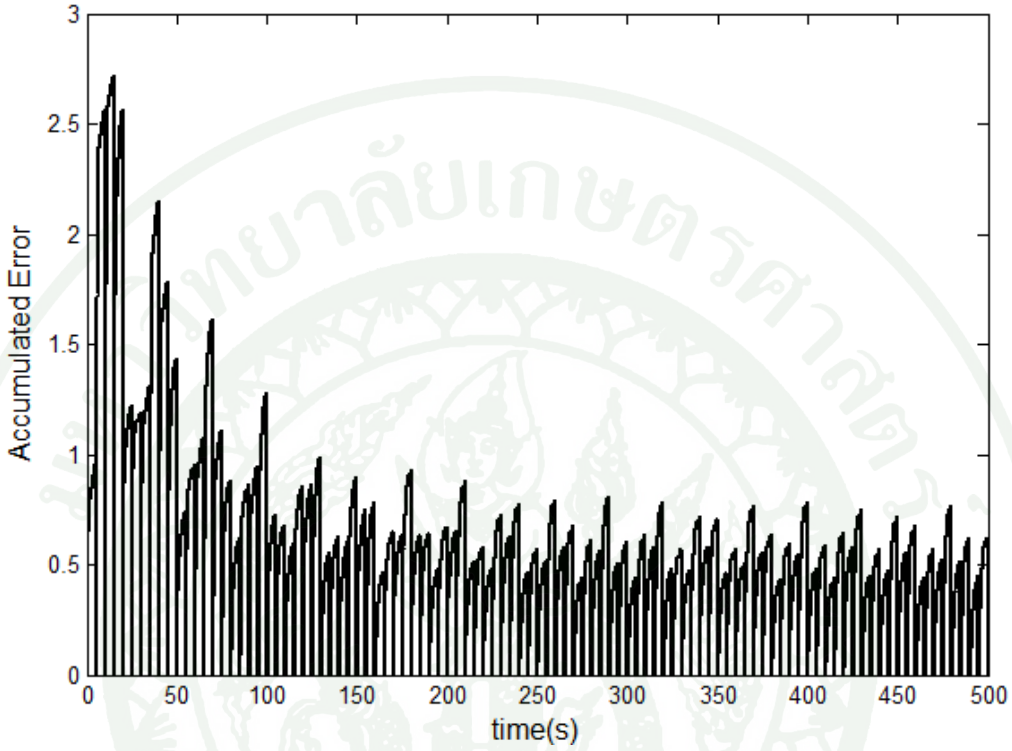
6. การควบคุมลิ้นปีกผีเสื้อด้วยการแสวงหาค่าสุดขีดเมื่อ $k_{P0} = 2.5$ และ $k_{I0} = 8.2$

เมื่อเปลี่ยนค่าตัวแปรเริ่มต้นให้เป็น $k_{P0} = 2.5$ และ $k_{I0} = 8.2$ เพื่อที่จะดูการทำงานของการแสวงหาค่าสุดขีด โดยค่าตัวแปรในระบบที่เราต้องทำการออกแบบกำหนดให้เป็นดังนี้ $high\ \ pass\ \ filter$, $h = 0.5$ และ $low\ \ pass\ \ filter$, $l = 1$ และให้ค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณรบกวนเป็น $a_{kp} = 0.005$, $a_{ki} = 0.001$, $\omega = 2\ rad \cdot s^{-1}$ ค่า Adaptation gain ของระบบเป็น $\gamma_{kp} = -0.7$, $\gamma_{kI} = 0.5$

ค่าความผิดพลาดสะสมมีค่าลดลงอย่างมากจากที่ไม่ใช้การแสวงหาค่าสุดขีดค่าความผิดพลาดน้อยสุดจะอยู่ที่ประมาณ 2.27 แต่เมื่อใช้การแสวงหาค่าสุดขีดค่าความผิดพลาดสะสมลดลงมาอยู่ที่ประมาณ 0.43 ถึง 0.76 ดังที่แสดงในภาพที่ 38 ซึ่งยืนยันให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีของการแสวงหาค่าสุดขีด ความผิดพลาดสะสมเริ่มมีค่าอยู่ในช่วงค่าๆหนึ่งตั้งแต่เวลาผ่านไปประมาณ 150

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วินาที โดยที่ค่าไม่นิ่งเนื่องจากสัญญาณรบกวนที่ได้ใส่เข้าสู่ระบบ ถึงแม้ค่าความผิดพลาดจะมีการสั่นแต่ผลที่ออกมาก็เป็นที่น่าพอใจเนื่องจากมีค่าความผิดพลาดลงมาก



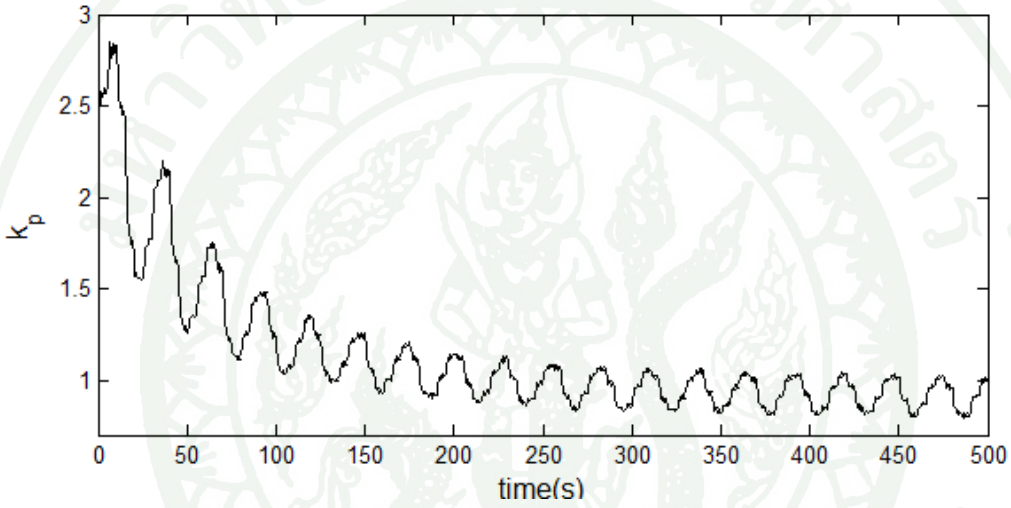
ภาพที่ 38 ค่าความผิดพลาดสะสมของการแสวงหาค่าสุดขีดที่ $k_{P0} = 2.5$ และ $k_{I0} = 8.2$ หลังจากใช้วิธีการแสวงหาค่าสุดขีด

การแสวงหาค่าสุดขีดสามารถทำให้อัตราขยายของตัวควบคุมแบบพีไอวิ่งเข้าสู่ค่าที่ดีที่สุดเพื่อให้ระบบมีค่าความผิดพลาดสะสมน้อยที่สุดตามสมการดรรชนีสมรรถนะที่กำหนดให้ การเปลี่ยนแปลงค่าของอัตราขยายเป็นไปตามภาพที่ 39 และภาพที่ 40 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของอัตราขยาย k_p และ k_i ตามลำดับ โดยอัตราขยาย k_p เปลี่ยนแปลงค่าลงมาจาก 2.5 ลดลงมาอยู่ที่ประมาณ 0.79 ถึง 1.02 ส่วนค่าอัตราขยาย k_i ค่าอัตราขยายเปลี่ยนแปลงจาก 8.2 ขึ้นมาอยู่ที่ประมาณ 9.25 ถึง 9.39

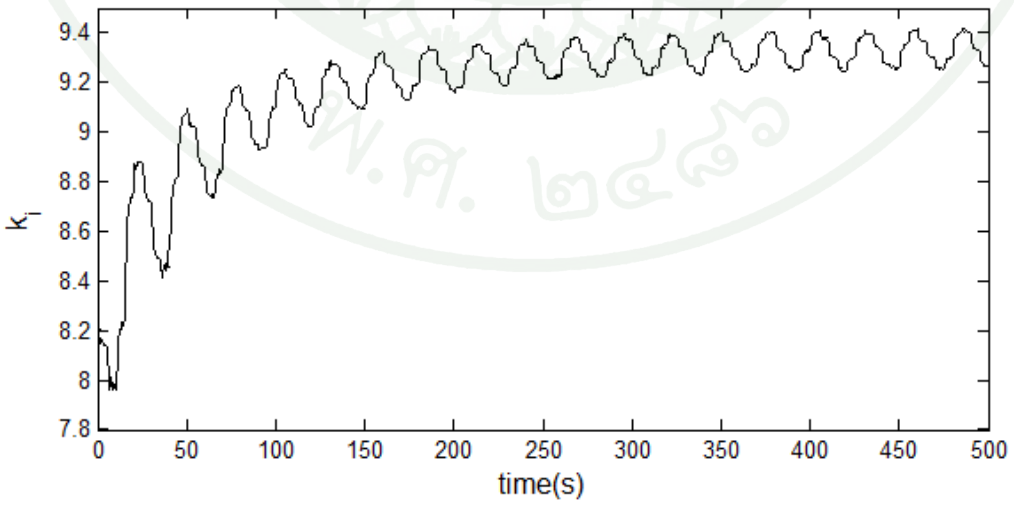
ผลตอบสนองของลิ้นปีกผีเสื้อต่อสัญญาณอ้างอิงเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าเริ่มต้นแสดงดังภาพที่ 41 โดยแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองที่ดีขึ้นในแต่ละช่วงเวลาที่ผ่านไป ภาพบนแสดงการตอบสนองในช่วงแรกที่ระบบควบคุมเริ่มทำงานการตอบสนองค่ายังไม่ต่างไปจากระบบควบคุม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แบบพีไอมากนัก เมื่อเวลาผ่านไปเป็นเวลา 120 วินาที อัตราขยายถูกปรับจนกระทั่งการสั่นของการตอบสนองในช่วงแรกหายไปแต่ระบบยังเข้าสู่ช่วงสภาวะอยู่ตัวช้าอยู่ และเมื่อเวลาผ่านไปจนค่าอัตราขยายแกว่งอยู่ในค่าคงที่คือเมื่อเข้าสู่ค่าขีดสุดแล้ว การตอบสนองของระบบค่อนข้างดีมาก ตอบสนองตามสัญญาณอ้างอิงได้อย่างดีไม่มีค่าโอเวอร์ชูต และระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวเร็วขึ้น โดยผลที่เกิดขึ้นเหล่านี้เป็นผลมาจากที่ระบบควบคุมต้องการให้ค่าความผิดพลาดสะสมของระบบมีค่าลดลง

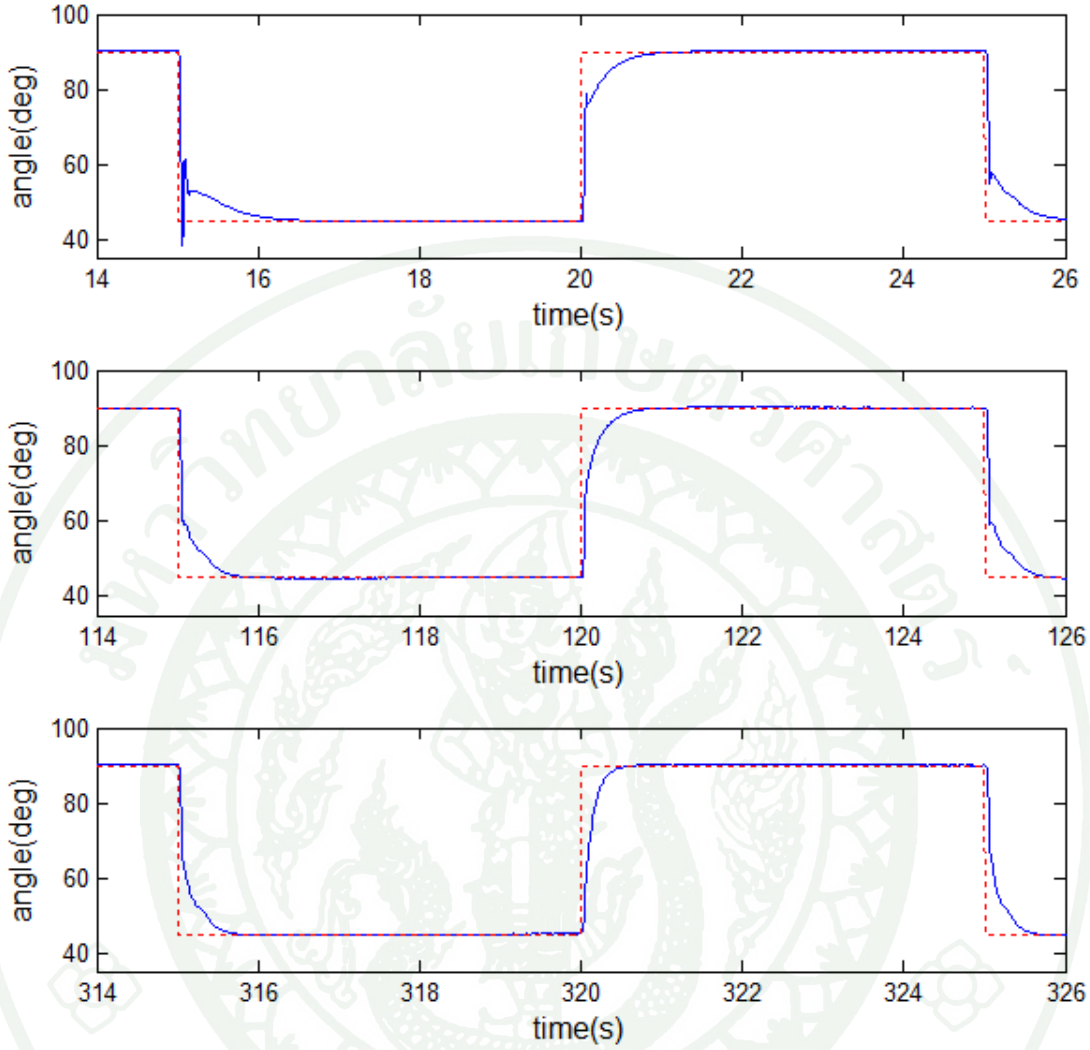


ภาพที่ 39 อัตราขยาย k_p ที่เปลี่ยนแปลงจาก $k_{P0} = 2.5$ เนื่องจากการแสวงหาค่าสุดขีด



ภาพที่ 40 อัตราขยาย k_i ที่เปลี่ยนแปลงจาก $k_{I0} = 8.2$ เนื่องจากการแสวงหาค่าสุดขีด

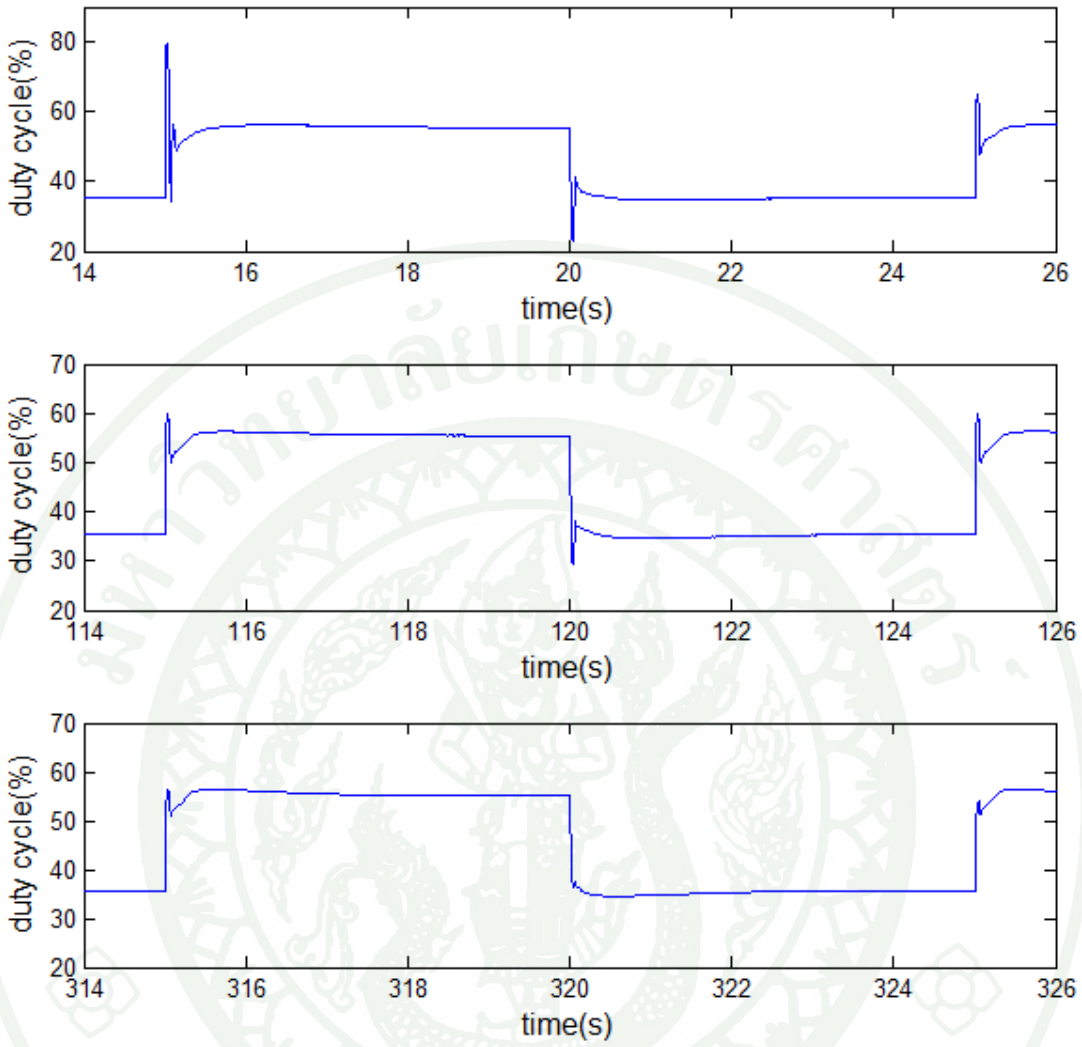
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 41 การเคลื่อนที่ของลิ้นปีกผีเสื้อตามสัญญาณอ้างอิงในแต่ละช่วงเวลาเมื่อ $k_{P0} = 2.5$ และ $k_{I0} = 8.2$ บน: ผลตอบสนอง ในช่วงเวลา 14 ถึง 26 วินาที, กลาง: ผลตอบสนองในช่วงเวลา 114 ถึง 126 วินาที, ล่าง: ผลตอบสนองในช่วงเวลา 314 ถึง 326 วินาที

สัญญาณอินพุตที่ใช้ควบคุมลิ้นปีกผีเสื้อมีพฤติกรรมที่ดีขึ้นเมื่อใช้ระบบควบคุมด้วยการแสวงหาค่าสุดขีด ดังที่แสดงในภาพที่ 42 ที่แสดงสัญญาณอินพุตในแต่ละช่วงเวลาเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงวินาทีที่ 320 สัญญาณอินพุตจะมีการเคลื่อนที่เรียบขึ้น โอเวอร์ชูตและการสั่นในช่วงแรกหายไป เป็นผลทำให้ไปสั่งงานควบคุมลิ้นปีกผีเสื้อได้ดียิ่งขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 42 สัญญาณอินพุต PWM ที่ให้ลิ้นปีกผีเสื้อในแต่ละช่วงเวลา $k_{P0} = 2.5$ และ $k_{I0} = 8.2$ บน: สัญญาณอินพุตในช่วงเวลา 14 ถึง 26 วินาที, กลาง: สัญญาณอินพุต ในช่วงเวลา 114 ถึง 126 วินาที, ล่าง: สัญญาณอินพุต ในช่วงเวลา 314 ถึง 326 วินาที

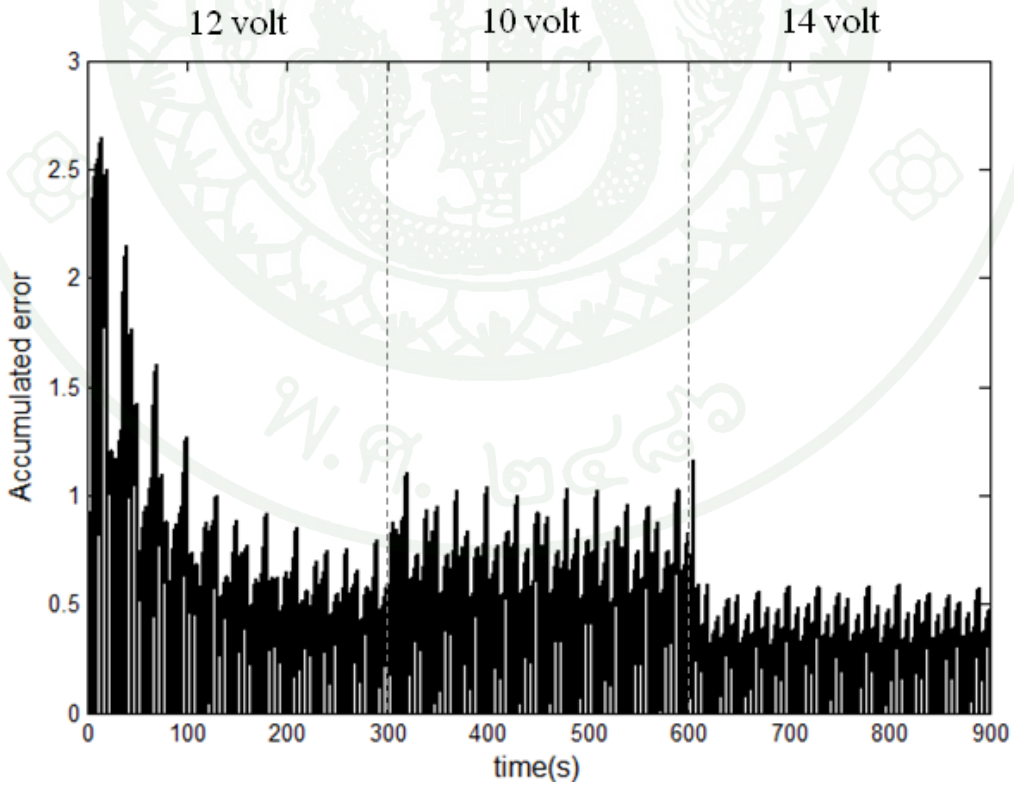
ในการทดลองในหัวข้อที่ 4 และหัวข้อที่ 6 แสดงให้เห็นถึงการทำงานของการแสวงหาค่าสุดขีดยังสามารถเปลี่ยนค่าอัตราขยายให้ไปสู่ค่าที่เหมาะสมได้ แม้กำหนดค่าอัตราขยายเริ่มต้นมีค่าที่ต่างกัน แต่สังเกตได้ว่าค่าสุดขีดของทั้งสองกรณีมีค่าที่ต่างกันเนื่องจากลิ้นปีกผีเสื้อเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นและการควบคุมแบบการแสวงหาค่าสุดขีดเป็นระบบควบคุมแบบหาค่าเสถียรภาพที่จุดๆหนึ่ง (Locally Stabilization) จึงส่งผลให้ค่าสุดขีดของอัตราขยายของทั้งสองกรณีมีค่าที่ไม่เท่ากัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7. การควบคุมลิ้นปีกผีเสื้อเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบ

การแสวงหาค่าสุดขีดซึ่งเป็นระบบควบคุมแบบปรับค่าได้ (Adaptive Control) ซึ่งรองรับระบบที่ไม่มีความแน่นอนหรือระบบที่มีการรบกวน ลิ้นปีกผีเสื้อจะทำงานได้อย่างเหมาะสมเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าเข้ามาที่ 12 โวลต์ แต่ในส่วนนี้จะทำการทดลองเพิ่มการรบกวนเข้าสู่ระบบ โดยเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขาเข้าให้มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจาก 12 โวลต์ ให้เป็น 10 โวลต์และ 14 โวลต์ เพื่อที่จะดูประสิทธิภาพในการทำงานของการแสวงหาค่าสุดขีด

รถยนต์ที่ใช้งานกันโดยทั่วไปนั้นความต่างศักย์จากแหล่งจ่ายไฟมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาโดยสาเหตุอาจเกิดจากรอบของเครื่องยนต์ที่มีการเปลี่ยนแปลงซึ่งส่งผลต่อไดชาร์จ (Alternator) ที่จะประจุไฟเข้าสู่แบตเตอรี่ซึ่งส่งผลให้ความต่างศักย์เปลี่ยนแปลงไปด้วย หรืออาจเกิดจากโหลดที่มากขึ้น เช่นการเปิดเครื่องปรับอากาศหรือเครื่องเสียงก็ส่งผลต่อไดชาร์จซึ่งทำให้ความต่างศักย์เปลี่ยนแปลง รวมถึงอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ก็มีส่วนเช่นเดียวกัน



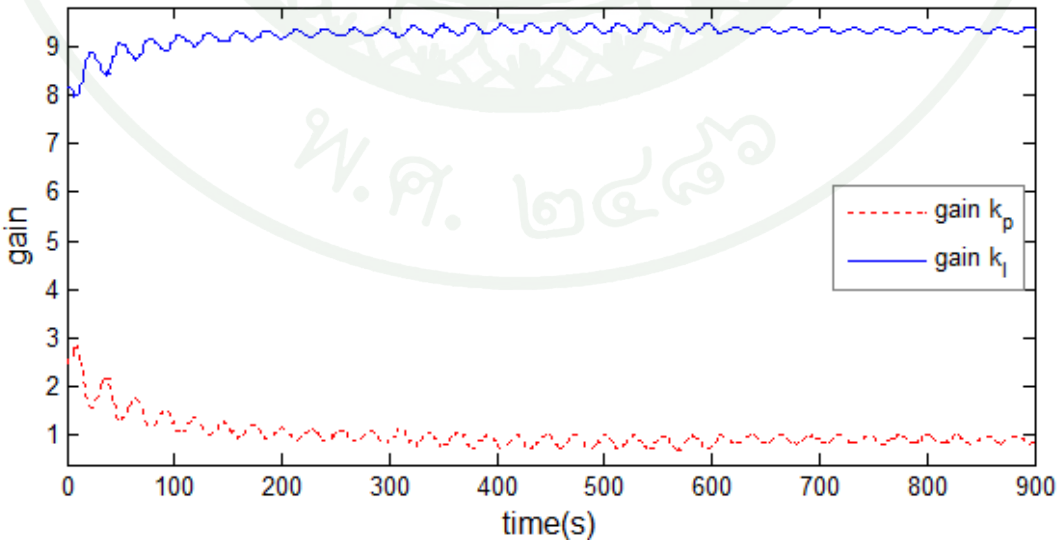
ภาพที่ 43 ค่าความผิดพลาดสะสมเมื่อแรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง หลังจากใช้วิธีการแสวงหาค่าสุดขีด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ในการทดลองเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าของระบบแบ่งออกเป็น 3 ช่วงเวลาคือ ในตอนแรกช่วงวินาทีที่ 0 ถึงวินาทีที่ 300 ให้แรงดันไฟตามปกติคือ 12 โวลต์ ต่อมาเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าเป็น 10 โวลต์ในช่วงวินาทีที่ 300 ถึงวินาทีที่ 600 ที่เปลี่ยนแรงดันในช่วงวินาทีที่ 300 เนื่องจากการทดลองก่อนหน้าเห็นว่าเมื่อถึงเวลาช่วงนี้ค่าอัตราขยายของระบบเริ่มคงที่ และในช่วงเวลาวินาทีที่ 600 ถึงวินาทีที่ 900 ให้แรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 14 โวลต์ ตามลำดับ

ตัวแปรที่ใช้ในตอนเริ่มต้นกำหนดให้มีค่าเหมือนหัวข้อก่อนหน้านี้ ค่าตัวแปรเริ่มต้นให้เป็น $k_{P0} = 2.5$ และ $k_{I0} = 8.2$ $high\ \ pass\ \ filter$, $h = 0.5$ และ $low\ \ pass\ \ filter$, $l = 1$ และให้ค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณรบกวนเป็น $a_{kp} = 0.005$, $a_{ki} = 0.001$, $\omega = 2\ rad \cdot s^{-1}$ ค่าอัตราการขยายของการปรับตัว(Adaptation gain) ของระบบเป็น $\gamma_{kp} = -0.7$, $\gamma_{ki} = 0.5$

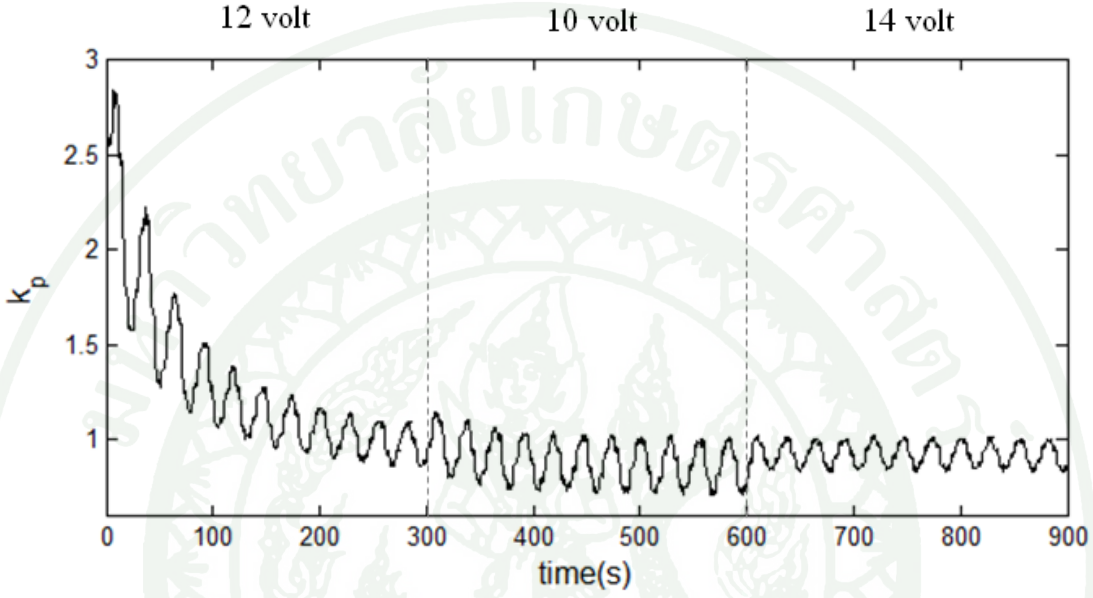
ค่าความผิดพลาดสะสมที่ได้จากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 43 ซึ่งอธิบายได้ตามนี้ ในช่วงแรกที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ตามปกติการแสวงหาค่าสุดขีดจะทำการลดค่าความผิดพลาดสะสมเรื่อยๆจนถึงวินาทีที่ 300 ก็จะเริ่มมีค่าความผิดพลาดสะสมที่คงที่ซึ่งผลในช่วงแรกนี้ก็จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับผลที่ได้จากการทดลองก่อนหน้าในภาพที่ 38 เมื่อความผิดพลาดสะสมเริ่มคงที่จึงลดแรงดันไฟฟ้าให้เหลือ 10 โวลต์เมื่อแรงดันเปลี่ยนส่งผลให้ความผิดพลาดสะสมเพิ่มขึ้นเนื่องจากค่าอัตราขยายมีการสั่นเพื่อหาค่าที่เหมาะสมมากขึ้น แต่ผลก็ยังเป็นที่น่าพอใจเพราะระบบยัง



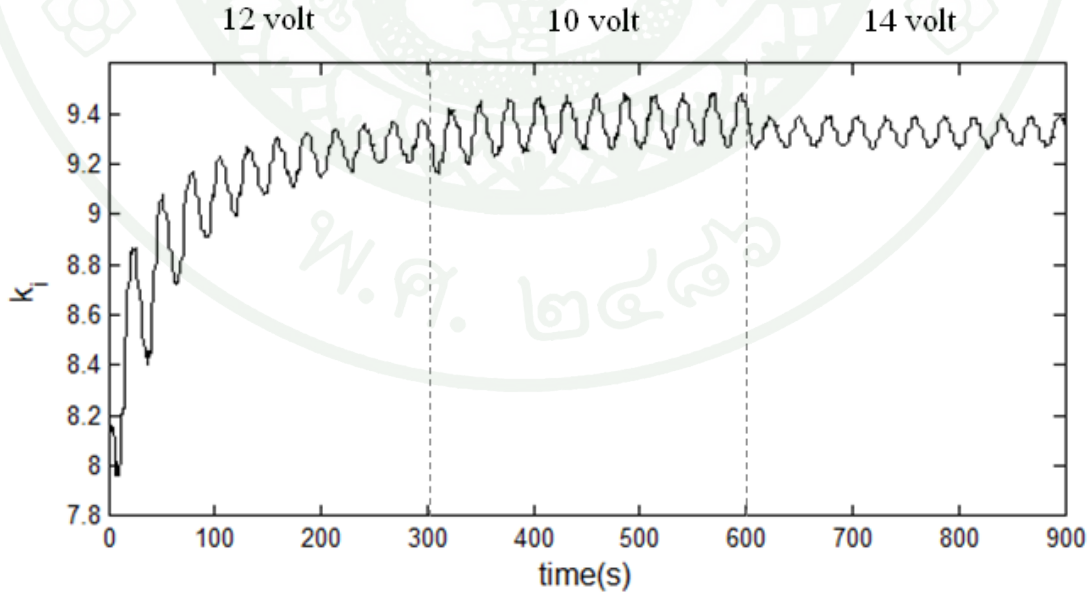
ภาพที่ 44 การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราขยายของระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เคลื่อนที่ได้เรียบแม้ค่าความผิดพลาดจะสูงขึ้น ในส่วนสุดท้ายหลังจากวินาทีที่ 600 แรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นเป็น 14 โวลต์ การแสวงหาค่าสุดขีดก็สามารถทำงานได้อย่างดี ค่าอัตราขยายมีการเคลื่อนที่ที่แตกต่างไปจากเดิมซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเช่นกัน



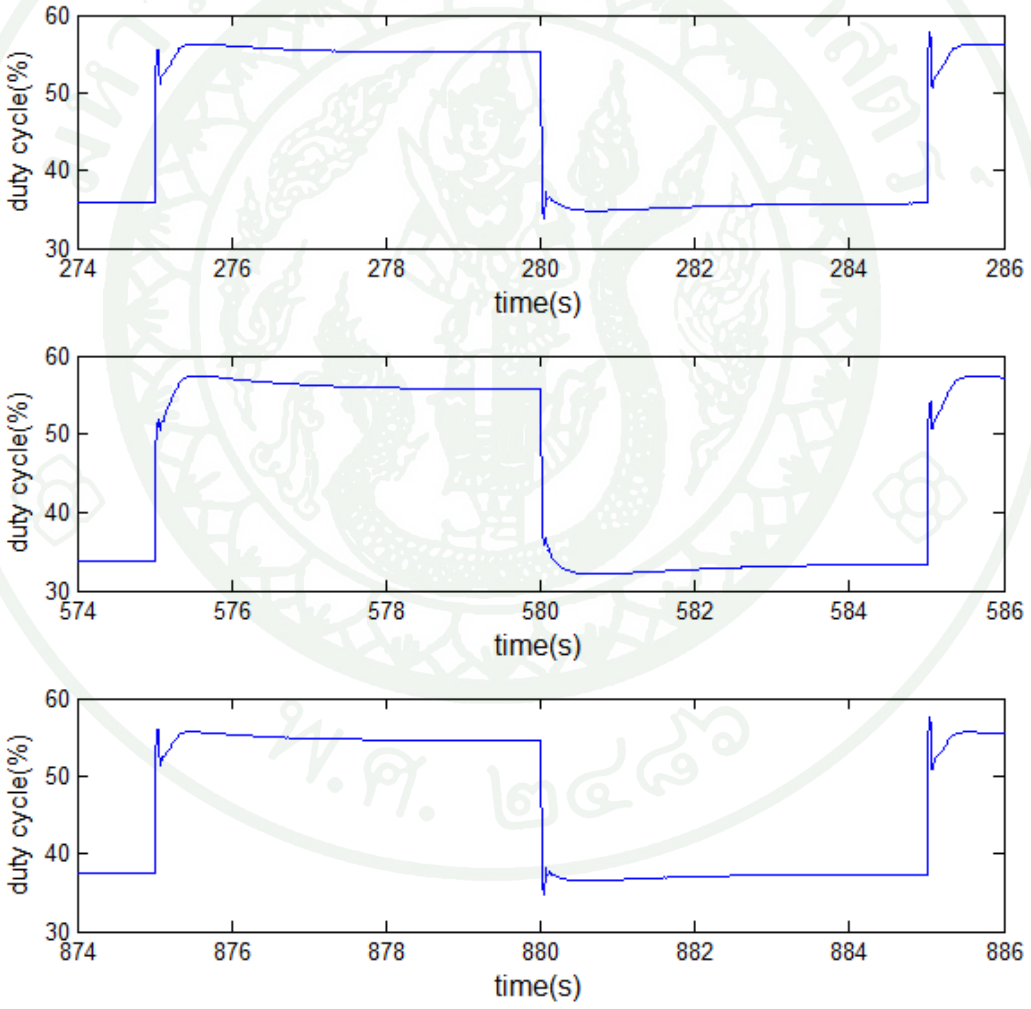
ภาพที่ 45 อัตราขยาย k_p ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของระบบ



ภาพที่ 46 อัตราขยาย k_I ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของระบบ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การเปลี่ยนแปลงของอัตราขยายเป็นไปดังภาพที่ 44 ซึ่งสามารถดูรายละเอียดการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราขยายของค่า k_P ได้จากภาพที่ 45 และการเปลี่ยนแปลงอัตราขยาย k_I ได้จากภาพที่ 46 จากผลที่ได้สังเกตเห็นว่าเมื่อระบบเข้าสู่ช่วงที่ความผิดพลาดสะสมคงที่ แล้วเริ่มทำการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้า อัตราขยายทั้งสองค่าก็จะมีพฤติกรรมการแกว่งรอบๆค่าขีดสุดที่เปลี่ยนแปลงไปเช่นกันโดยเมื่อแรงดันไฟฟ้าลดลงการสั่นของอัตราขยายเนื่องจากการแสวงหาค่าสุดขีดมีมากขึ้นและสั่นในช่วงแคบลงเมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น โดยสั่นเพื่อที่จะหาค่าอัตราขยายที่ดีที่สุดในขณะที่แรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนเพื่อให้ระบบมีค่าความผิดพลาดน้อยสุดเท่าที่เป็นไปได้



ภาพที่ 47 สัญญาณอินพุต PWM ที่ให้ลิ้นปีกผีเสื้อเมื่อแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง โดยให้ $k_{P0} = 2.5$ และ $k_{I0} = 8.2$ บน: สัญญาณอินพุตเมื่อแรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์, กลาง: สัญญาณอินพุตเมื่อแรงดันไฟฟ้า 10 โวลต์, ล่าง: สัญญาณอินพุตเมื่อแรงดันไฟฟ้า 14 โวลต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพที่ 47 แสดงให้เห็นถึงสัญญาณอินพุตเมื่อมีการเพิ่มการรบกวนโดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า ภาพบนเป็นสัญญาณอินพุตที่ให้แก่ระบบในช่วงเวลาวินาทีที่ 274 ถึงวินาทีที่ 286 ซึ่งก็คือช่วงที่ให้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 12 โวลต์ภาพกลางเป็นสัญญาณอินพุตในช่วงเวลาวินาทีที่ 574 ถึงวินาทีที่ 586 ซึ่งก็คือช่วงที่ให้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 10 โวลต์และภาพล่าง เป็นสัญญาณอินพุตที่ให้แก่ระบบในช่วงเวลาวินาทีที่ 874 ถึงวินาทีที่ 886 ซึ่งก็คือช่วงที่ให้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 14 โวลต์ตามลำดับ จากผลที่แสดงค่าสัญญาณอินพุตเมื่อแรงดันไฟฟ้าเป็น 10 โวลต์จะมีค่ามากกว่าตอนแรงดันไฟฟ้าปกติ(12 โวลต์) เนื่องจากไฟที่มาเลี้ยงมอเตอร์ลดลงระบบจึงเพิ่มสัญญาณอินพุตเพื่อให้ลิ้นปีกผีเสื้อสามารถเคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิงได้ดีและมีค่าความผิดพลาดสะสมน้อยที่สุด เช่นเดียวกันกับสัญญาณอินพุตเมื่อแรงดันไฟฟ้าเป็น 14 โวลต์จะมีค่าน้อยกว่าตอนแรงดันไฟฟ้าปกติเนื่องจากไฟที่เลี้ยงมอเตอร์ของลิ้นปีกผีเสื้อมีค่ามากขึ้นระบบจึงต้องลดสัญญาณอินพุตลงเพื่อไม่ให้เกิดโอเวอร์ชูตและทำให้ค่าความผิดพลาดสะสมมีค่าน้อยที่สุดเช่นกัน

8. การศึกษาเมื่อค่าดรรชนีสมรรถนะของระบบในค่าอื่นๆ

ค่าดรรชนีสมรรถนะเป็นค่าที่เราต้องการให้มีค่าน้อยที่สุด โดยที่ค่าดรรชนีสมรรถนะนี้เป็นค่าอินพุตที่เข้าสู่กระบวนการของการแสวงหาค่าสุดขีด ดังนั้นค่าดรรชนีสมรรถนะที่แตกต่างกันก็น่าจะส่งผลต่อระบบที่ต้องการควบคุมต่างกัน ในส่วนนี้จึงได้ออกแบบค่าดรรชนีสมรรถนะใหม่เพื่อไปเปรียบเทียบกับค่าดรรชนีสมรรถนะเดิมในสมการที่ (23) โดยดรรชนีสมรรถนะใหม่กำหนดให้เป็น

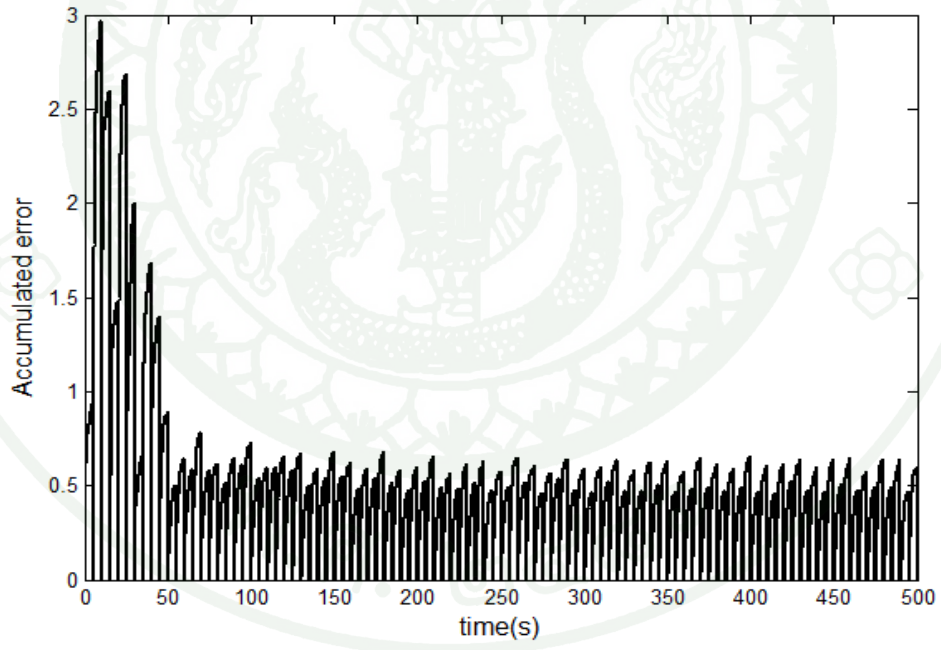
$$J_2 = \int_{t_0}^{T} e^2 dt \tag{27}$$

โดยกำหนดให้ $t_0 = 0.45$ วินาทีและ $T = 5$ วินาที ค่าอัตราขยายเริ่มต้น $k_{P0} = 2.5$ และ $k_{I0} = 8.2$ ค่าตัวแปรในระบบที่ออกแบบกำหนดให้เป็นดังนี้ *high pass filter*, $h = 0.5$ และ *low pass filter*, $l = 1$ และให้ค่าแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณรบกวนเป็น $a_{kp} = 0.005$, $a_{ki} = 0.001$, $\omega = 2\ rad \cdot s^{-1}$ ค่า Adaptation gain ของระบบเป็น $\gamma_{kp} = -0.7$, $\gamma_{kI} = 0.5$ โดยค่าที่กล่าวมาเป็นค่าเดียวกันกับการทดลองในส่วนที่ 6 แตกต่างกันเฉพาะสมการของดรรชนีสมรรถนะเท่านั้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

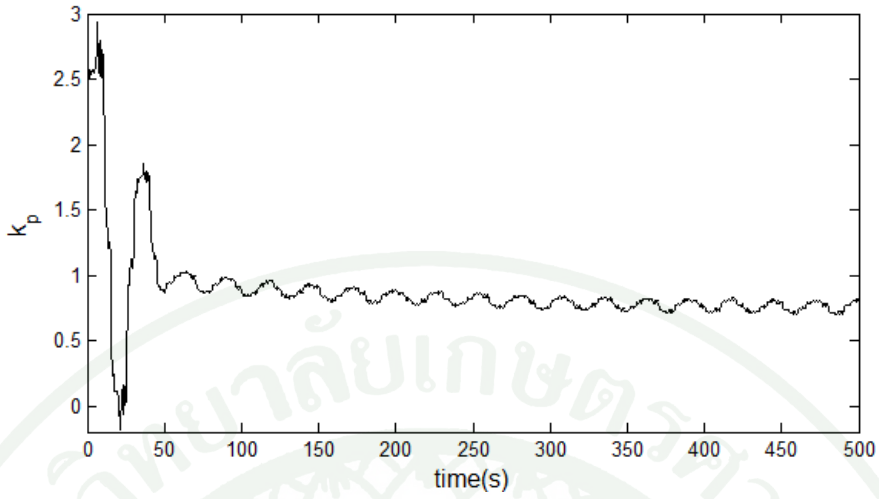
ค่าความผิดพลาดสะสมที่จากการเปลี่ยนค่าดรรชนีสมรรถนะตามสมการที่ (27) แสดงให้เห็นดังภาพที่ 48 ซึ่งเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดสะสมเข้าสู่ช่วงสภาวะอยู่ตัวเร็วขึ้นและการสั่นของค่าความผิดพลาดสะสมในช่วงสภาวะอยู่ตัวมีค่าลดลง โดยการสั่นที่ลดลงเนื่องมาจากค่าอัตราขยายมีการสั่นที่ลดลงดังภาพที่ 49 และภาพที่ 50

ค่าความผิดพลาดกำลังสองในช่วงสภาวะอยู่ตัว ความผิดพลาดมีค่าน้อยส่งผลให้ค่าดรรชนีสมรรถนะมีค่าน้อยเมื่อไปคูณกับค่า Adaptation gain ส่งผลให้อัตราขยายที่ได้มีการสั่นที่ลดลง แต่ในช่วงสภาวะชั่วครู่ที่อัตราขยายมีการสั่นมาก ก็เนื่องมาจากค่าความผิดพลาดกำลังสองเพราะในช่วงแรกระบบมีโอเวอร์ชูตมากทำให้ค่าความผิดพลาดมากส่งผลให้ค่าดรรชนีสมรรถนะมีค่ามากเมื่อคูณกับค่า Adaptation gain ส่งผลให้อัตราขยายในช่วงสภาวะชั่วครู่มีการสั่นอย่างมากก่อนเข้าสู่ช่วงอยู่ตัว

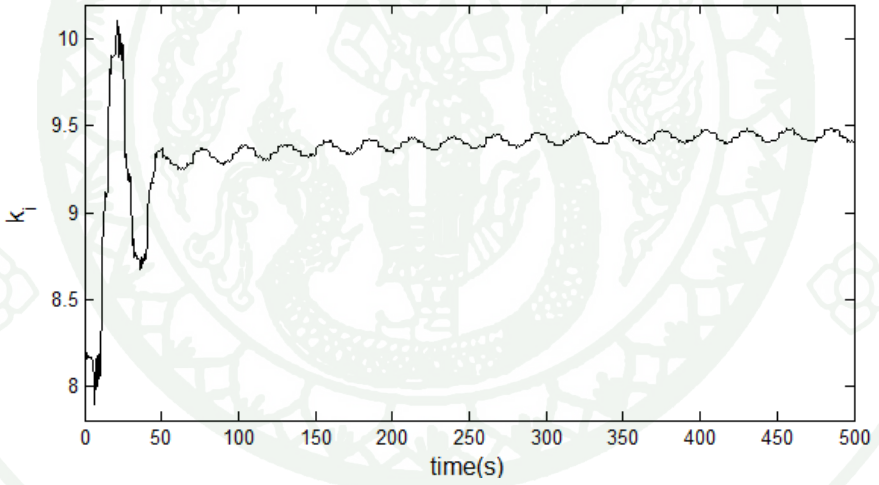


ภาพที่ 48 ค่าความผิดพลาดสะสมของการแสวงหาค่าสุดขีดที่ $k_{P0} = 2.5$ และ $k_{I0} = 8.2$ หลังจากใช้วิธีการแสวงหาค่าสุดขีดเมื่อใช้ค่าความผิดพลาดกำลังสองเป็นค่าดรรชนีสมรรถนะ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 49 อัตราขยาย k_p ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการแสวงหาค่าสุดขีดเมื่อใช้ค่าความผิดพลาดกำลังสองเป็นค่าดรรชนีสมรรถนะ



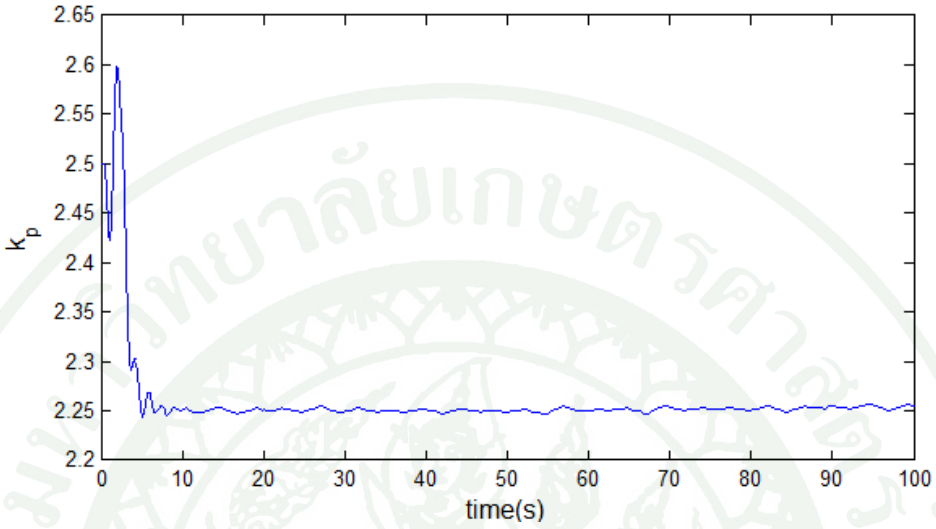
ภาพที่ 50 อัตราขยาย k_I ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการแสวงหาค่าสุดขีดเมื่อใช้ค่าความผิดพลาดกำลังสองเป็นค่าดรรชนีสมรรถนะ

9. การควบคุมตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อเมื่อให้สัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันได

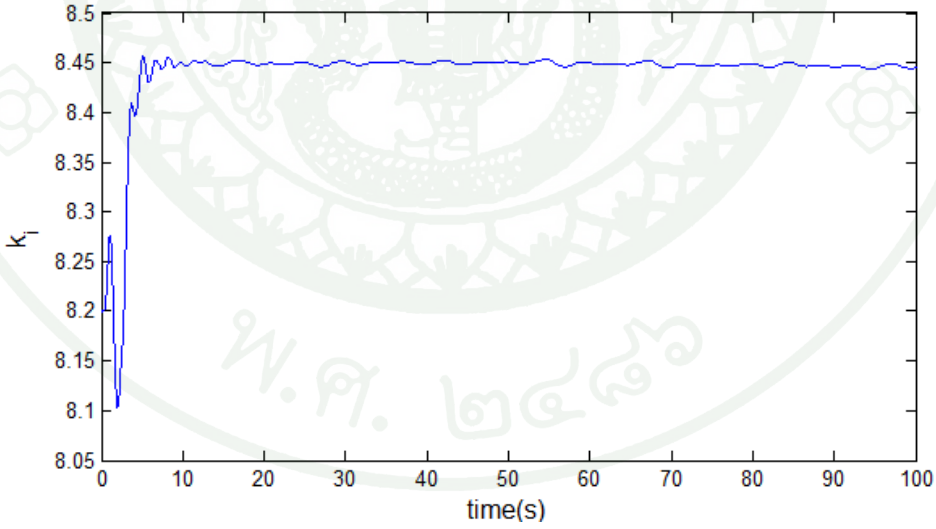
กำหนดให้ลิ้นปีกผีเสื้อเคลื่อนที่จากตำแหน่ง Limp-home ไปที่ตำแหน่งที่ 90 องศาโดยกำหนดค่าดรรชนีสมรรถนะให้เป็นตามสมการที่ (23) แต่กำหนดให้ $t_0 = 0.25$ วินาที $T = 2.5$ วินาที ค่าอัตราขยายเริ่มต้น $k_{P0} = 2.5$ และ $k_{I0} = 8.2$ ค่าตัวแปรในระบบที่ออกแบบกำหนดให้เป็นดังนี้ $high\ \ pass\ \ filter,\ h = 0.5$ และ $low\ \ pass\ \ filter,\ l = 1$ และให้ค่าแอมพลิจูดและ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ความถี่ของสัญญาณรบกวนเป็น $a_{kp} = 0.005$, $a_{ki} = 0.001$, $\omega = 2\ rad \cdot s^{-1}$ ค่า Adaptation gain ของระบบเป็น $\gamma_{k_P} = -1$ และ $\gamma_{k_I} = 1$



ภาพที่ 51 ค่าอัตราขยาย k_P ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากใช้การแสวงหาค่าสุดขีดเมื่อสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันได



ภาพที่ 52 ค่าอัตราขยาย k_I ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากใช้การแสวงหาค่าสุดขีดเมื่อสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันได

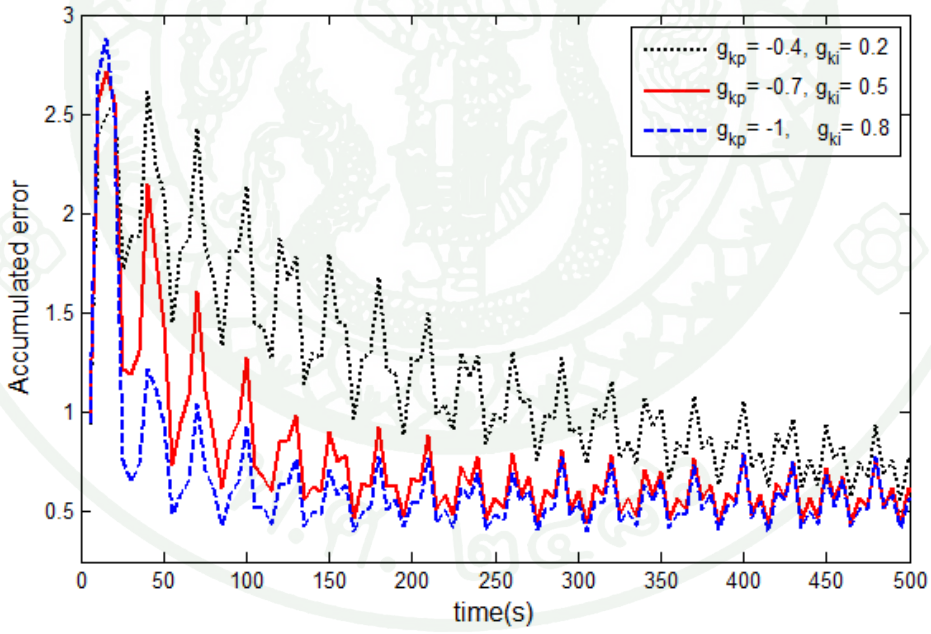
จากภาพที่ 51 และภาพที่ 52 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของอัตราขยายเมื่อสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบขั้นบันได ค่าอัตราขยายจะมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงแรกเนื่องจากในช่วงสภาวะ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ชั่วครู่มีค่าความผิดพลาดมากส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราขยายเพื่อที่จะต้องการให้มีค่าความผิดพลาดลดลง ในช่วงสภาวะอยู่ตัวค่าอัตราขยายมีค่าค่อนข้างคงที่เนื่องจากสัญญาณอ้างอิงไปเปลี่ยนแปลง ค่าความผิดพลาดน้อยการเปลี่ยนแปลงของอัตราขยายก็มีค่าลดลงเช่นกัน

10. เปรียบเทียบการแสวงหาค่าสุดขีดเมื่อระบบควบคุมมีค่า Adaptation gain ที่แตกต่างกัน

ค่า Adaptation gain ส่งผลต่อเสถียรภาพของการแสวงหาค่าสุดขีดที่ใช้ควบคุมลิ้นปีกผีเสื้อโดยตรง ในส่วนนี้จะทำการเปรียบเทียบค่า Adaptation gain โดยทำการทดลอง 3 ครั้งใช้ค่า Adaptation gain ที่แตกต่างกัน 3 ค่า โดยครั้งแรกให้ค่าเหมือนการทดลองก่อนหน้านี้คือ $\gamma_{kP} = -0.7$ และ $\gamma_{kI} = 0.5$ ครั้งที่สองกำหนดให้มีค่าลดลงเป็น $\gamma_{kP} = -0.4$ และ $\gamma_{kI} = 0.2$ ในครั้งที่สามกำหนดให้มีค่าสูงขึ้นเป็น $\gamma_{kP} = -1$และ $\gamma_{kI} = 0.8$ ซึ่งผลของการทดลองแสดงให้เห็นดังภาพที่ 53 ถึงภาพที่ 55

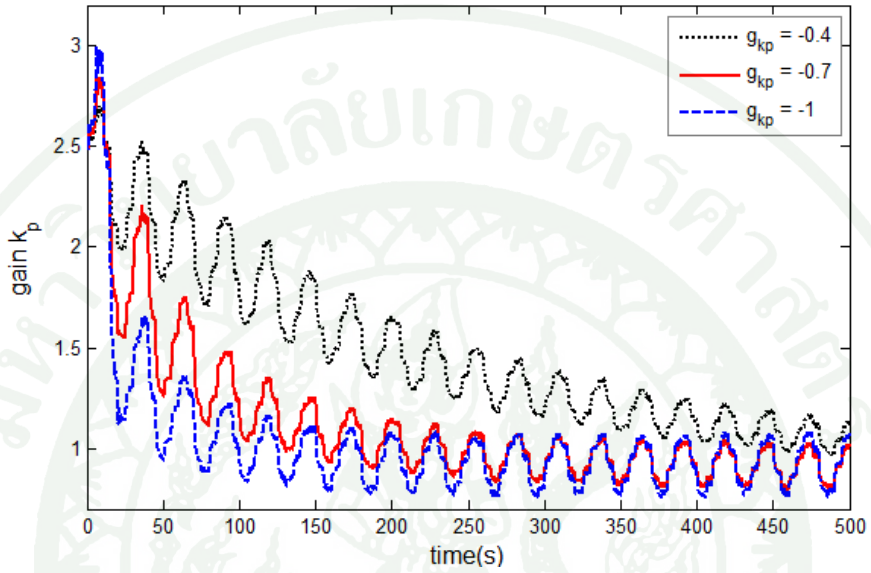


ภาพที่ 53 ค่าความผิดพลาดสะสมเมื่อ $k_{P0} = 2.5$ และค่า $k_{I0} = 8.2$ โดยกำหนดให้เส้นจุดมีค่า $\gamma_{kP} = -0.4$ และ $\gamma_{kI} = 0.2$, เส้นทึบกำหนดให้ $\gamma_{kP} = -0.7$ และ $\gamma_{kI} = 0.5$, เส้นประกำหนดให้ $\gamma_{kP} = -1$ และ $\gamma_{kI} = 0.8$

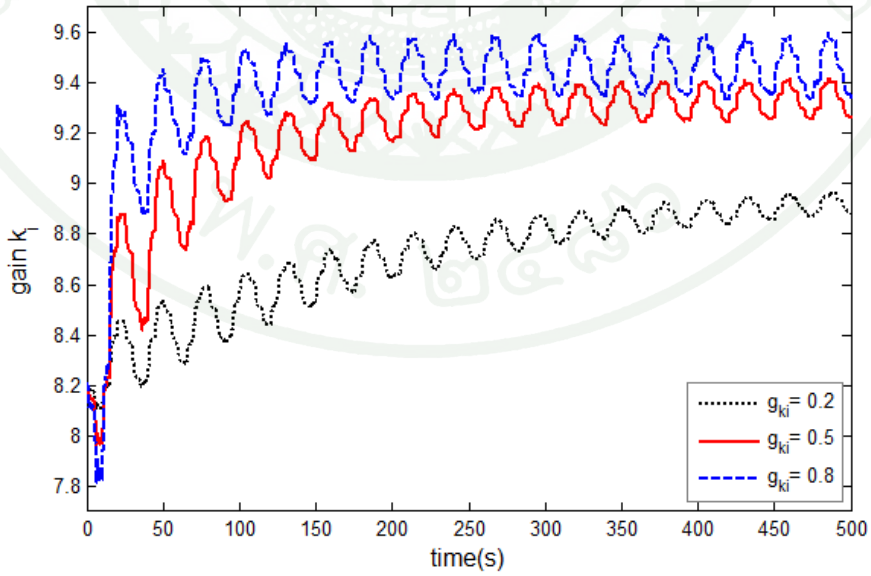
จากผลการทดลองในภาพที่ 53 แสดงให้เห็นว่า ค่าความผิดพลาดสะสมจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีค่า Adaptation gain สูงขึ้น แต่มีข้อเสียตรงที่ในช่วงสภาวะอยู่ตัวจะมีการสั่นมากขึ้นค่า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ความผิดพลาดสะสมในช่วงสภาวะอยู่ตัวมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ในทางตรงกันข้ามเมื่อลดค่า Adaptation gain การลดลงของค่าความผิดพลาดสะสมช้าลง แต่มีความผิดพลาดสะสมในช่วงอยู่ตัวน้อยกว่า



ภาพที่ 54 การเปลี่ยนแปลงของอัตราการขยาย k_P เมื่อ $k_{P0} = 2.5$ โดยกำหนดให้เส้นจุดมีค่า $\gamma_{kP} = -0.4$, เส้นทึบกำหนดให้ $\gamma_{kP} = -0.7$ และเส้นประกำหนดให้ $\gamma_{kP} = -1$



ภาพที่ 55 การเปลี่ยนแปลงของอัตราการขยาย k_I เมื่อ $k_{I0} = 2.5$ โดยกำหนดให้เส้นจุดมีค่า $\gamma_{kI} = 0.2$, เส้นทึบกำหนดให้ $\gamma_{kI} = 0.5$ และเส้นประกำหนดให้ $\gamma_{kI} = 0.8$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ในภาพที่ 54 และภาพที่ 55 แสดงให้เห็นถึงค่าอัตราขยายทั้งสองค่าที่ค่า Adaptation gain ต่างๆ โดยผลที่ได้มีลักษณะเดียวกันกับค่าความผิดพลาดสะสม เนื่องจากค่าความผิดพลาดสะสมที่เปลี่ยนแปลงก็เนื่องมาจากค่าอัตราขยายทั้งสองค่าที่เปลี่ยนแปลง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของลิ้นปีกผีเสื้อแสดงให้เห็นว่าลิ้นปีกผีเสื้อมีการเคลื่อนที่ที่ไม่เป็นเชิงเส้นและยังมีลักษณะที่เป็น Hysteresis ซึ่งมีความยากในการควบคุม เนื่องจากจะส่งผลต่อสัญญาณควบคุมเมื่อมีการเปลี่ยนทิศทางการเพิ่มหรือลดมุมของลิ้นปีกผีเสื้อให้เป็นไปตามสัญญาณอ้างอิงที่กำหนด

การใช้วิธีการแสวงหาค่าสุดขีดมาปรับค่าอัตราการขยายของตัวควบคุมแบบพีไอโดยประยุกต์ใช้กับลิ้นปีกผีเสื้อของเครื่องยนต์เป็นไปอย่างดี ซึ่งการใช้ระบบควบคุมแบบพีไอมีข้อดีตรงที่มีความง่ายและใช้กันอย่างแพร่หลายแต่มีข้อเสียอยู่ที่การเลือกค่าอัตราขยายของระบบควบคุมซึ่งได้มาจากการลองผิดลองถูกนั้นอาจจะต้องมีการลองผิดลองถูกอยู่หลายครั้งกว่าที่จะได้ระบบควบคุมให้เป็นไปตามที่ต้องการ และถึงแม้ว่าค่าที่ได้จะสามารถควบคุมลิ้นปีกผีเสื้อได้แต่ก็อาจจะยังไม่เป็นค่าที่ดีที่สุดสำหรับระบบควบคุมที่จะทำให้ดรรชนีสมรรถนะหรือค่าความผิดพลาดสะสมที่กำหนดมีค่าต่ำสุด

การแสวงหาค่าสุดขีดที่นำมาใช้สามารถปรับค่าอัตราขยายของระบบควบคุมแบบพีไอที่ได้มาจากการลองผิดลองถูกซึ่งยังไม่ดี ให้ได้ค่าที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้นเพื่อให้ค่าความผิดพลาดสะสมน้อยลงไปและเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าเริ่มต้นที่ได้จากการลองผิดลองถูก การแสวงหาค่าสุดขีดก็ยังสามารถปรับค่าอัตราขยายให้เหมาะสมเช่นกัน โดยที่เมื่อค่าอัตราขยายเริ่มต้นของระบบที่เปลี่ยนไปค่าอัตราขยายสุดท้ายหรือค่าสุดขีดที่ได้จากการแสวงหาค่าสุดขีดก็มีค่าที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าค่าเริ่มต้นส่งผลต่อการแสวงหาค่าสุดขีด ซึ่งค่าสุดขีดสุดท้ายที่ได้แตกต่างกันอาจเกิดเนื่องจากระบบที่ทำการควบคุมมีจุดสมดุลอยู่หลายจุด

การออกแบบตัวแปรของการแสวงหาค่าสุดขีดส่งผลต่อการควบคุมระบบและการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราขยายของระบบโดยค่าแอมพลิจูดของสัญญาณรบกวนที่ใส่เข้าไปของการแสวงหาค่าสุดขีดก็ส่งผลต่อค่าอัตราขยายสุดท้ายเนื่องจากถ้าค่ายิ่งมากอัตราขยายสุดท้ายก็จะมีการสั่นมากซึ่งอาจส่งผลเสียเมื่อสั่นเข้าไปอยู่ในค่าที่ไม่เหมาะสม ส่วนในค่าอัตราขยายของการปรับตัว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หรือค่า γ ค่านี้จะส่งผลต่อความเร็วในการลู่เข้าค่าสุดขีดของอัตราขยายยิ่งมีค่าที่มากอัตราขยายก็จะเข้าสู่ค่าสุดขีดเร็วแต่ก็จะมีข้อเสียอยู่ที่การสั่นของอัตราขยายในช่วงสภาวะอยู่ตัวมีค่าเพิ่มสูงขึ้นทำให้ค่าความผิดพลาดสะสมมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถ้าค่าน้อยค่าความผิดพลาดในช่วงสภาวะอยู่ตัวจะมีค่าน้อยแต่ก็จะเพิ่มเวลาเข้าที่ หรือเวลาที่ลู่เข้าสู่ค่าสุดขีดแทน

การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่เข้าสู่ระบบเพื่อให้เป็นสิ่งรบกวนของระบบนั้น การแสวงหาค่าสุดขีดก็มีการปรับเปลี่ยนค่าอัตราขยายของระบบควบคุมเพื่อให้ค่าความผิดพลาดสะสมน้อยที่สุด โดยที่อัตราขยายมีค่าการสั่นที่เปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับสิ่งรบกวนเข้ามาซึ่งส่งผลต่อค่าความผิดพลาดสะสม อัตราขยายมีการเปลี่ยนแปลงการสั่นโดยสั่นรอบๆค่าที่เปลี่ยนไปเมื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า แต่เนื่องจากค่าสุดขีดของแต่ละแรงดันมีค่าใกล้เคียงกันจึงอาจยังไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงและการลู่เข้าของอัตราขยายที่ชัดเจนมากนัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข้อเสนอแนะ

การสั่นเนื่องจากสัญญาณรบกวนของการแสวงหาค่าสุดขีดในช่วงของสภาวะอยู่ตัวซึ่งส่งผลให้ค่าความผิดพลาดสะสมของระบบมีค่าที่ไม่คงที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา การศึกษาแก้ไขปัญหาการสั่นมีอยู่บ้างแต่ก็ยังเป็นเรื่องที่ใหม่ การแก้ไขปัญหาในส่วนนี้จะทำให้การแสวงหาค่าสุดขีดเป็นระบบควบคุมที่น่าสนใจเพิ่มมากขึ้น โดยวิธีแก้ไขการสั่นที่น่าสนใจคือการใช้ Lyapunov มาพิจารณาเมื่อระบบเข้าสู่ค่าสุดขีด ก็สั่งให้ลดค่าแอมพลิจูดของสัญญาณรบกวนลงเพื่อให้การสั่นลดลง

การออกแบบการแสวงหาค่าสุดขีดที่ประยุกต์ใช้กับลิ้นปีกผีเสื้อนั้นได้ออกแบบเฉพาะการเคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิงคลื่นสี่เหลี่ยมเท่านั้นซึ่งยังไม่ครอบคลุมการเคลื่อนที่ของลิ้นปีกผีเสื้อของเครื่องยนต์จริงๆที่มีการเคลื่อนที่ที่หลากหลายตามผู้ขับขี่ ดังนั้นการวิเคราะห์เพิ่มเติมในส่วนของการเคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิงร่วมกับระบบควบคุมที่เหมาะสมก็จะทำให้ลิ้นปีกผีเสื้อทำงานได้อย่างครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. 2556. **การควบคุมระบบพลศาสตร์**. พิมพ์ครั้งที่ 3. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

Aono, T. and T. Kowatari. 2006. Throttle-control algorithm for improving engine response based on air-intake model and throttle-response model. **IEEE Transaction on Industrial Electronics** 53(3): 915-921.

Ariyur, K. B. and M. Krstic. 2003. **Real-time Optimization by Extremum-Seeking Control**. John Wiley & Sons, Inc., Canada.

Chatlatanagulchai, W. 2011. **System Modeling and Control.** Misterkopy(thailand), Bangkok.

Cochran, J., E. Kanso and M. Krstic. 2009. Source seeking for three-link model of fish locomotion, pp. 1808-1813. In **Proceedings of the 2009 American Control Conference**. 10-12 June 2009.

Ghods, N. and M. Krstic. 2009. Extremum seeking with very slow or drifting sensor, pp. 1946-1951. **In Proceedings of the 2009 American Control Conference**. 10-12 June 2009.

Haskara, I., G. Gouming and J. Winkelman. 2006. Multivariable EGR/Spark timing control for IC engines via extremum seeking, pp. 1173-1178. In **Proceedings of the 2006 American Control Conference**. 14-16 June 2006.

Hellstrom, E., D. Lee, L. Jiang, G. Anna and H. Yilmaz. 2013. On-board calibration of spark timing by extremum seeking for flex-fuel engines. **IEEE Transaction on Control System Technology** :1-7.

Killingsworth, N., S. Aceves, D. Flowers and M. Krstic. 2007. Extremum seeking tuning of an experimental HCCI engine combustion timing controller, pp. 3665-3670. **In Proceedings of the 2007 American Control Conference**. 11-13 July 2007.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Killingsworth, N and M. Krstic. 2005. Auto-tuning of PID controllers via extremum seeking, pp. 2251-2256. **In Proceedings of the 2005 American Control Conference**. 8-10 June 2005.

Krstic, M and H. H. Wang. 1997. Design and stability analysis of extremum seeking feedback for general nonlinear system. In **Proceeding of the 36th Conference on Decision & Control.** December 1997.

Kim, D., H. Peng, S. Bai and M. Maguire. 2007. Control of integrated powertrain with electronic throttle and automatic transmission. **IEEE Transaction on Control System Technology** 15(3): 474-482.

Li, X., Y. Li, J. Seem and P. Li. 2012. Extremum seeking control of cooling tower for Self-optimizing efficient operation of chilled water systems, pp. 3396-3401. In **Proceedings of the 2012 American Control Conference**. 27-29 June 2012.

Montanaro, U., A. Gaeta and V. Giglio. 2014. Robust discrete-time MRAC with minimal controller synthesis of an electronic throttle body. **IEEE/ASME Transaction on Mechatronic** 19(2): 524-536.

Pavkovic, D., J. Deur, M. Jansz and N. Peric. 2005. Adaptive control of automotive electronic throttle. **Control Engineering Practice** 14: 121-136.

Reichhartinger, M. and M. Horn. 2009. Application of higher order sliding-mode concept to a throttle actuator for gasoline engine. **IEEE Transaction on Industrial Electronics** 56(9): 3322-3329.

Scheinker, A., M. Bland, M. Krstic and J.Audia. 2013. Extremum seeking-based optimization of high voltage converter modulator rise-time. **IEEE Transaction on Control System Technology** 21(3): 1-10.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Wang, H. H. and M. Krstic. 1998. Extremum seeking for limit cycle minimization. **In Proceeding of the 37th Conference on Decision & Control.** December 1998.

Zhang, C. and R. Ordonez. 2012. **Extremum-Seeking Control and Application**. Springer London Dordrecht Heidelberg New York, USA.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

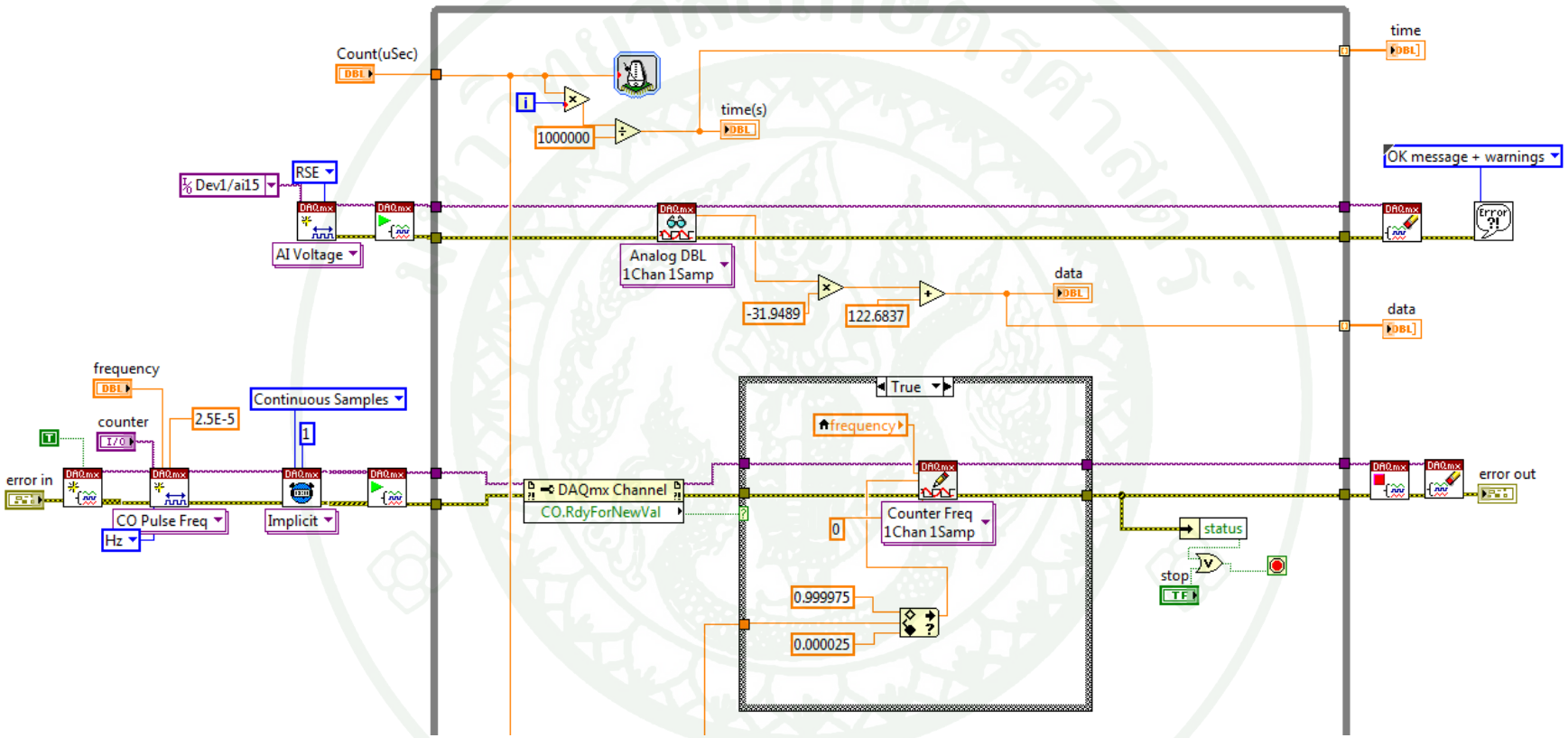
ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

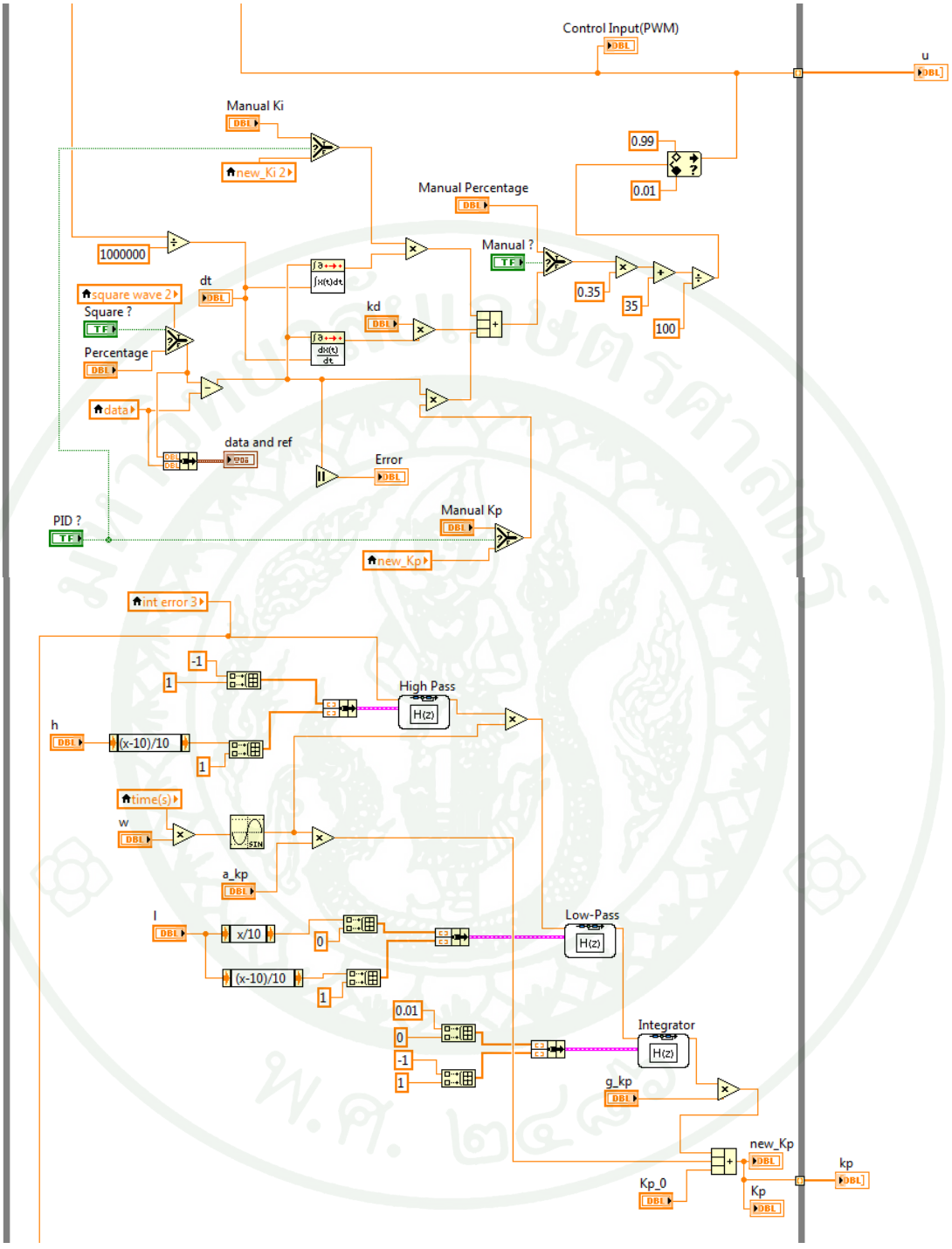
ภาคผนวก ก

แผนภาพระบบควบคุมด้วยการแสวงหาค่าสุดขีดที่ออกแบบด้วยโปรแกรม LABVIEW

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

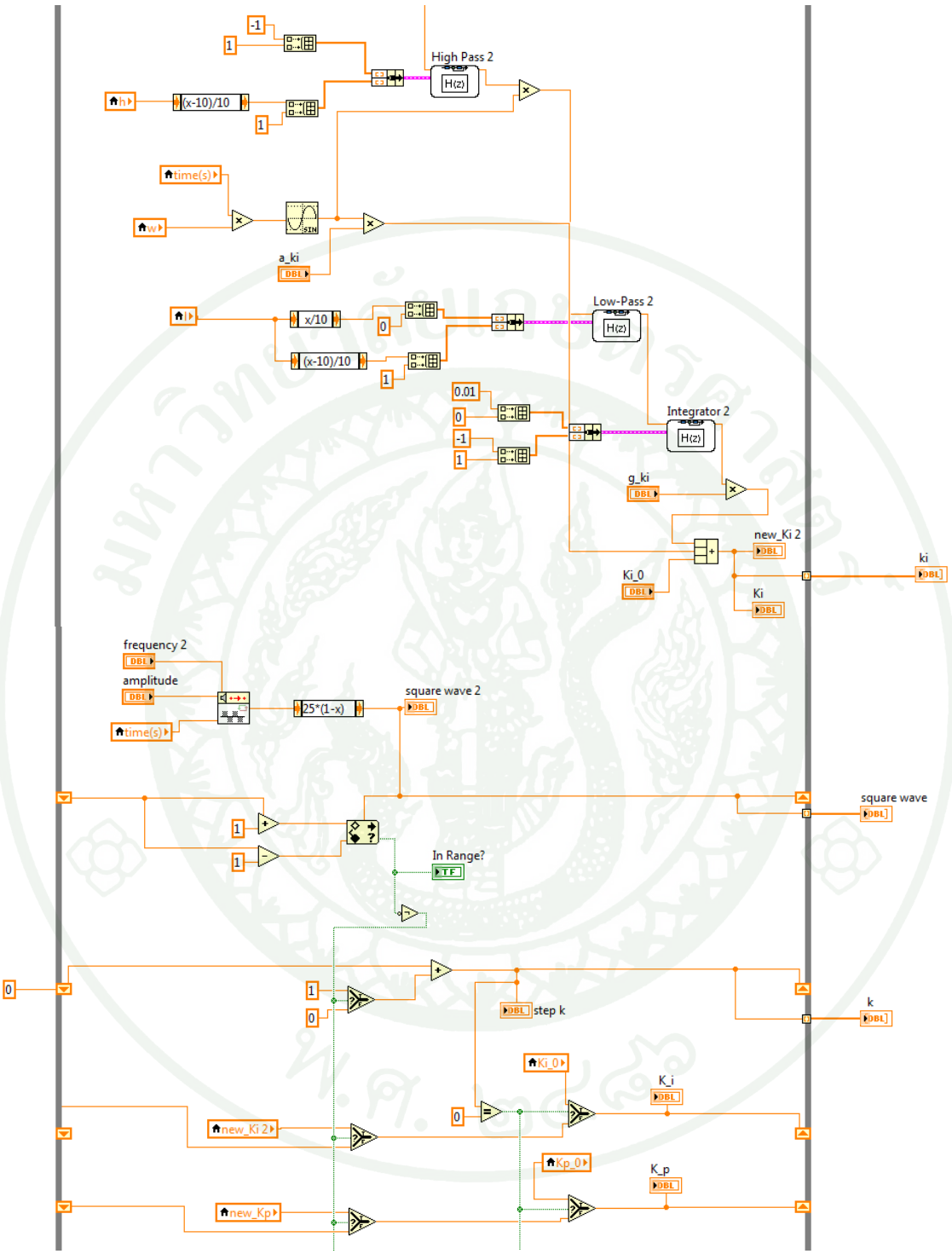


ภาพผนวกที่ ก1 แผนภาพระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยโปรแกรม LABVIEW ในส่วนของการรับสัญญาณ Analog และส่งสัญญาณ PWM



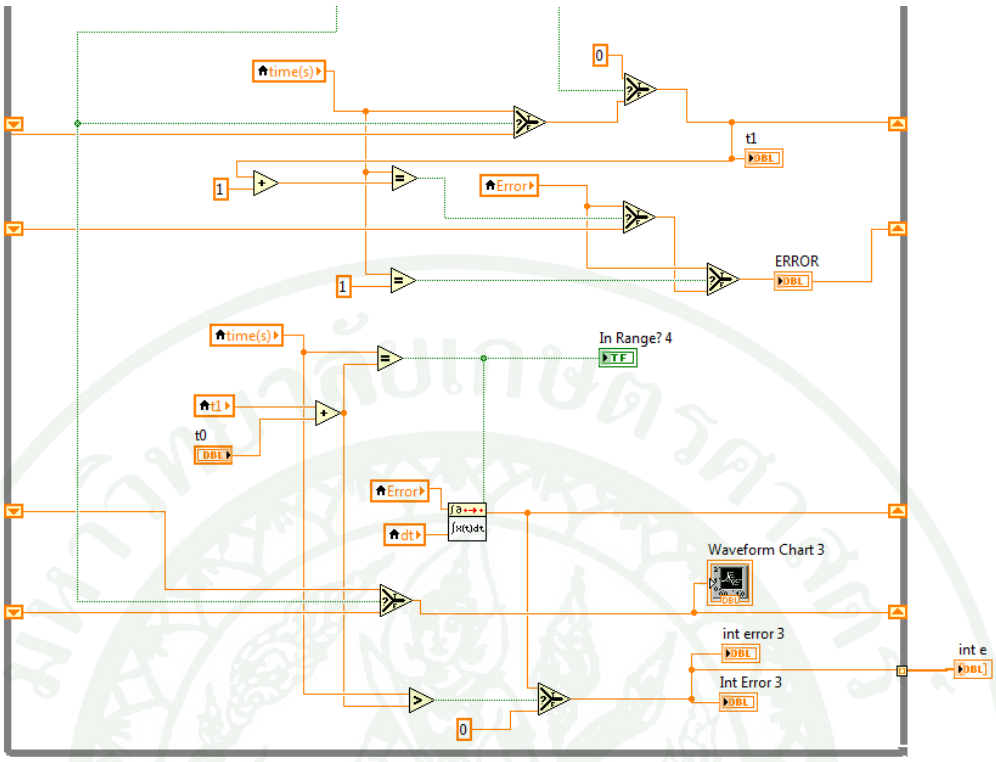
ภาพผนวกที่ ก2 แผนภาพระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยโปรแกรม LABVIEW ในส่วนของระบบควบคุมแบบพีไอดีและการแสวงหาค่าสุดขีด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ ก3 แผนภาพระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยโปรแกรม LABVIEW ในส่วนของการแสวงหาค่าสุดขีดและสัญญาณอ้างอิง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



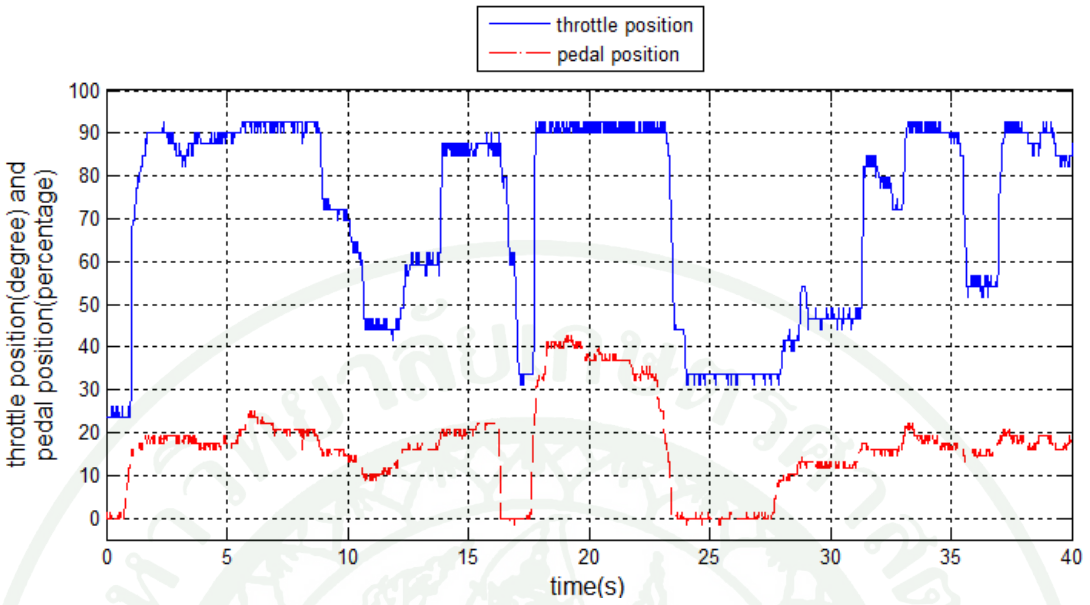
ภาพผนวกที่ ก4 แผนภาพระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยโปรแกรม LABVIEW ในส่วนของการหาค่าความผิดพลาดสะสม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

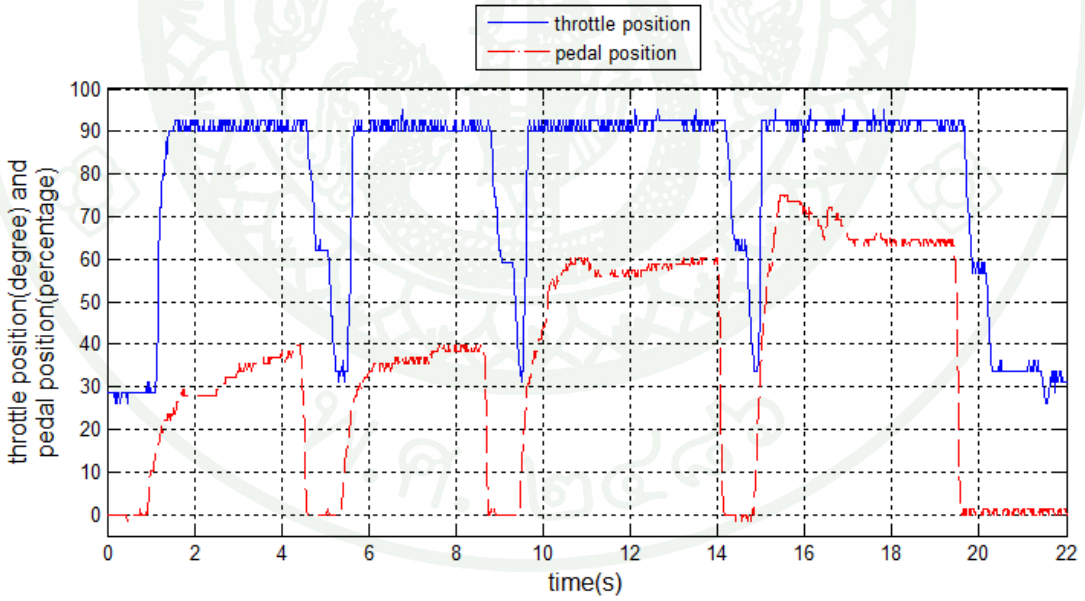
ภาคผนวก ข

การเคลื่อนที่ของลิ้นปีกผีเสื้อโดยอ้างอิงกับสัญญาณจากคันเร่งของรถ Toyota Vigo ภายใต้สภาวะการขับขี่จริงบนท้องถนน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ ข1 ตำแหน่งของลิ้นปีกผีเสื้อเทียบกับตำแหน่งของการเหยียบคันเร่งภายใต้สภาวะการขับขี่ในเมือง



ภาพผนวกที่ ข2 ตำแหน่งของลิ้นปีกผีเสื้อเทียบกับตำแหน่งของการเหยียบคันเร่งภายใต้สภาวะการขับขี่นอกเมือง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	นายเสริมศักดิ์ โชตนา
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 24 กันยายน 2531
สถานที่เกิด	จังหวัดฉะเชิงเทรา
ประวัติการศึกษา	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้าเครื่องกลการผลิต) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน) พ.ศ. 2554
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์