# บทที่ 1
# บทนำ

เหตุผลสำคัญข้อหนึ่งในการเลือกใช้การควบคุมแบบปรับตัวเองก็เพื่อชดเชยพารามิเตอร์ของระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงมาก ข้อโต้เถียงข้อหนึ่งคือ ถ้าระบบเป็นแบบเชิงเส้นไม่แปรตามเวลา (Linear time-invariant) อาศัยการทดสอบอย่างเพียงพอพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ก็น่าจะมีความถูกต้องอย่างเพียงพอด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นในการใช้การควบคุมแบบปรับตัวเองเมื่อระบบเป็นแบบเชิงเส้นไม่แปรตามเวลา อีกข้อหนึ่งก็คือถ้าทราบขอบเขตของพารามิเตอร์อย่างคร่าวๆการควบคุมแบบมั่นคง (Robust control) ก็น่าจะเพียงพอจึงไม่มีความจำเป็นในการใช้ตัวควบคุมแบบปรับตัวเองอีกเช่นกัน อย่างไรก็ตามในการควบคุมระบบ เช่น กระบวนการทางอุตสาหกรรม หรือ เครื่องบิน การใช้แบบจำลองระบบแบบเชิงเส้นไม่แปรตามเวลาจึงอาจไม่เพียงพอเพราะระบบมีการเปลี่ยนแปลงค่าของพารามิเตอร์ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการเปลี่ยนแปลงจุดทำงานหรือเกิดจากความเสียหายของอุปกรณ์บางชิ้นเป็นต้น ในกรณีนี้การใช้แบบจำลองระบบแบบเชิงเส้นที่แปรตามเวลา (Linear time-varying) จะให้ผลการประมาณที่ดีกว่า

งานวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมแบบปรับตัวเองส่วนใหญ่ในช่วงก่อนกลางทศวรรษที่ 80 เป็นผลจากการสมมุติให้ระบบเป็นแบบเชิงเส้นไม่แปรตามเวลา ต่อมาคือการพิจารณาระบบเชิงเส้นที่มีพารามิเตอร์ของระบบเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆเมื่อเทียบกับเวลาซึ่งก็น่าจะนำการควบคุมแบบปรับตัวเองที่ออกแบบไว้กับระบบเชิงเส้นไม่แปรตามเวลามาใช้ได้ แต่ความคิดนี้ได้ถูกพิสูจน์แล้วว่าไม่เป็นความจริง ปัญหาในการออกแบบตัวควบคุมแบบปรับตัวเองกับระบบเชิงเส้นที่แปรตามเวลาคือไม่สามารถพิสูจน์เสถียรภาพได้จากการสร้างสมการความคลาดเคลื่อนเหมือนกับระบบเชิงเส้นไม่แปรตามเวลา

ปัญหาการควบคุมแบบปรับตัวเองกับระบบเชิงเส้นที่แปรตามเวลาซึ่งอยู่ในรูปทั่วไปสามารถมองเป็นปัญหาทางด้านความมั่นคง (Robusness problem) ได้ ดังนั้นเทคนิคในการควบคุมแบบปรับตัวเองที่มั่นคง (Robust adaptive control) ซึ่งใช้กับระบบเชิงเส้นไม่แปรตามเวลาจึงสามารถนำมาใช้กับระบบเชิงเส้นที่แปรตามเวลาได้ [1] การออกแบบและวิเคราะห์การควบคุมแบบปรับตัวเองสำหรับระบบเชิงเส้นที่แปรตามเวลาได้ถูกรวบรวมไว้ใน [2] แต่ความคลาดเคลื่อนในการตาม (Tracking error) ที่ได้จากผลการจำลอง (Simulation) นั้นยังมีขนาดใหญ่โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่สัญญาณอ้างอิงประกอบด้วยส่วนที่แป็นค่าคงที่ เช่น สัญญาณขั้นบันได (Step singnal) เป็นต้น งานวิจัยหลายชิ้นซึ่งแทนแบบจำลองระบบเชิงเส้นที่แปรตามเวลาด้วยฟังก์ชันถ่ายโอน [2, 3] ทำให้มีข้อจำกัดคือ พารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงนั้นต้องหาอนุพันธ์ได้หรืออีกนัยหนึ่งคืออนุพันธ์ที่หาได้ต้องมีค่าจำกัด มีการพิจารณาระบบเชิงเส้นที่แปรตามเวลาซึ่งมีลักษณะเฉพาะ [4] เป็นระบบที่วัดตัวแปรสถานะ (State variable) ได้

ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ได้พิสูจน์ว่ากฎการปรับ (Adaptation law) พารามิเตอร์แบบพื้นฐานที่ใช้กับระบบเชิงเส้นไม่แปรตามเวลายังคงทำให้ระบบวงปิดมีเสถียรภาพเมื่อนำมาใช้กับระบบที่มีพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงอย่างไรก็ได้ในขอบเขตจำกัดหนึ่งๆ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์นั้นไม่ได้กล่าวถึงผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนในการตาม (Tracking error) ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์และในกรณีที่ระบบไม่เท่าเทียม (Unmatch) กับแบบจำลอง (Model)

ในกรณีที่สามารถใช้สัญญาณควบคุมแบบสวิตชิงได้ การควบคุมแบบโครงสร้างแปรผัน (Variable structure) [5, 6, 7, 8] ก็เป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมระบบเชิงเส้นที่แปรตามเวลา โดยจะมองการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์และสัญญาณรบกวนต่างๆเป็นความไม่แน่นอน (Uncertainty) อย่างไรก็ตามวิธีนี้ต้องรู้ขอบเขตคร่าวๆของพารามิเตอร์หรืออีกนัยหนึ่งคือ รู้ค่าพารามิเตอร์ค่าหนึ่งและรู้ขอบเขตความไม่แน่นอนของค่าๆนี้ งานวิจัยต่อมา [9, 10] ไม่จำเป็นต้องรู้ขอบเขตความไม่แน่นอนแต่ยังคงจำเป็นต้องรู้ค่าในนาม (Nominal value) ของพารามิเตอร์ อีกทั้งความไม่แน่นอนต่างๆจะต้องสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปการรบกวนของสัญญาณเข้า (Input disturbance) ได้ การควบคุมระบบเชิงเส้นที่แปรตามเวลาซึ่งไม่ทราบค่าของพารามิเตอร์มักจะมองพารามิเตอร์นั้นเป็นความไม่แน่นอนโดยตรง [3] ดังนั้นสัญญาณควบคุมที่ได้จึงมีขนาดและความถี่สูงมากจนไม่เหมาะสมกับการใช้งานจริง ในความเป็นจริงส่วนที่เป็นสวิตชิง จะถูกประมาณให้เป็นเชิงเส้นเพื่อลดความถี่ของสัญญาณควบคุม ผลการวิจัยที่ได้จาก [3, 9, 10] ยังไม่ได้วิเคราะห์ผลกระทบข้อนี้

การควบคุมไม่เชิงเส้นแบบเรขาคณิต (Geometric nonlinear control) เป็นประโยชน์อย่างมากในการควบคุมระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นแบบต่อเนื่อง (Continuous nonlinearities) [13, 14] ต่อมาได้นำการควบคุมแบบปรับตัวเองมาใช้กับระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นแบบต่อเนื่อง [15, 16] ความไม่เป็นเชิงเส้นอีกชนิดหนึ่งได้แก่ความไม่เป็นเชิงเส้นแบบไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous nonlinearities) เพราะว่ามีความไม่ต่อเนื่องจึงไม่สามารถประมาณด้วยฟังก์ชันเชิงเส้น (Local approximation) ได้ และมักถูกเรียกว่าความไม่เป็นเชิงเส้นอย่างยาก (hard nonlinearities) ตัวอย่างของความไม่เป็นเชิงเส้นแบบนี้ได้แก่ การอิ่มตัว (Saturation) รีเลย์ (Relay) ฮีสเตอริซีส (Hyssteresis) และเขตไร้ผลสนอง (Deadzone) เป็นต้น ความไม่เป็นเชิงเส้นเหล่านี้มักจะเปลี่ยนแปลงได้ตามเวลาขึ้นกับ อุณหภูมิ ความฝืด หรือโหลดที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

การควบคุมระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นแบบไม่ต่อเนื่องซึ่งสามารถวิเคราะห์เสถียรภาพได้ เช่น การควบคุมแบบไถล (Sliding mode) [6, 7] ซึ่งมีข้อจำกัดคือ จำเป็นต้องรู้พารามิเตอร์และความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์นั้น หรือใช้ การดิเทอร์ (Dithering) คือใช้ความถี่สูงที่มีขนาดพอเหมาะโดยจะทำให้ส่วนไม่เป็นเชิงเส้นมีลักษณะต่อเนื่องแล้วใช้หลักการควบคุมเหมือนกับส่วนไม่เป็นเชิงเส้นแบบต่อ

เนื่องแต่วิธีนี้จะเหมาะกับบางระบบเท่านั้น ส่วนแนวทางอื่นๆที่ไม่สามารถวิเคราะห์เสถียรภาพได้อย่างแน่ชัดได้แก่การใช้ตัวควบคุมแบบเครือข่ายระบบประสาท (Neural network) [17, 18]

ในที่นี้จะเริ่มศึกษาจากเขตไร้ผลสนอง เนื่องจากสามารถพบได้โดยทั่วไปกับอุปกรณ์หลายชนิด เช่น มอเตอร์แบบเซอร์โว (Servomotor) วาล์วแบบเซอร์โว (Servovalve) หรือในระบบชีวการแพทย์ (Biomedical system) [25] นอกจากนี้พื้นฐานการควบคุมระบบที่มีเขตไร้ผลสนองยังนำไปประยุกต์ใช้กับความไม่เป็นเชิงเส้นชนิดอื่นได้ [19] เขตไร้ผลสนองโดยส่วนมากมีสาเหตุจากคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ไม่สามารถตอบสนองได้ในทันที วิธีการแก้ไขที่ง่ายที่สุดคือการเพิ่มความสามารถของอุปกรณ์ซึ่งก็หมายถึงราคาของอุปกรณ์ที่ต้องเพิ่มตามไปด้วย

การศึกษาการควบคุมแบบปรับตัวเองสำหรับระบบที่มีเขตไร้ผลสนองไม่ทราบค่าหรืออีกนัยหนึ่งก็คือไม่สามารถวัดสัญญาณออกของเขตไร้ผลสนองได้เริ่มจาก [11] โดยอาศัยหลักการสร้าง*ส่วนผกผันของเขตไร้ผลสนองแบบปรับตัวเอง* (Adaptive deadzones inverse) ซึ่งพยายามที่จะคาดเดาพารามิเตอร์ของเขตไร้ผลสนองแล้วนำพารามิเตอร์เหล่านี้มาสร้างส่วนผกผันของเขตไร้ผลสนองแบบปรับตัวเองเพื่อกำจัดผลที่เกิดจากเขตไร้ผลสนอง ข้อสมมุติที่สำคัญของ [11] คือ จะต้องรู้พารามิเตอร์ทั้งหมดของระบบยกเว้นเพียงส่วนที่เป็นเขตไร้ผลสนองเท่านั้นและต้องสามารถวัดตัวแปรสถานะได้ ต่อมาได้มีการลดข้อจำกัดเหล่านี้ลง [12] ซึ่งอาศัยหลักการหาโครงสร้างของตัวควบคุมที่ทำให้สมการความคลาดเคลื่อนระหว่างสัญญาณออกของระบบกับสัญญาณออกของแบบจำลองอ้างอิงมีลักษณะแบบเดียวกับสมการความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการควบคุมแบบปรับตัวเองที่มั่นคง (Robust adaptive control) [1, 20, 21, 22] ทำให้สามารถใช้กฎการปรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเหมือนกัน ผลจากการจำลองแสดงได้ว่าความคลาดเคลื่อนมีขนาดลดลง หลักการใช้ส่วนผกผันแบบปรับตัวเอง (Adaaptive inverse) ซึ่งนำไปใช้กับส่วนไม่เป็นเชิงเส้นแบบอื่นๆได้ถูกรวบรวมไว้ใน [23]

ข้อสมมุติที่เหมือนกันใน [11, 12, 23] คือ พารามิเตอร์ของเขตไร้ผลสนองมีค่าคงที่และระบบเป็นเชิงเส้นไม่แปรตามเวลา แต่ในความเป็นจริงนั้นพารามิเตอร์ของเขตไร้ผลสนองอาจไม่เป็นค่าคงที่ เช่น มีแถบไร้ผลสนอง (Dead band) ที่เปลี่ยนตามเวลา หรืออีกนัยหนึ่งก็คือมีฮีสเตอริซิส (Hysteresis)

ดังนั้นการคาดเดาพารามิเตอร์ของเขตไร้ผลสนองตามหลักการที่ใช้ใน [11, 12, 23] จึงทำได้ยาก เพราะว่าเพียงการควบคุมแบบปรับตัวเองกับระบบเชิงเส้นที่แปรตามเวลาธรรมดายังให้ผลไม่เป็นที่น่าพอใจดังที่กล่าวไว้แล้วในตอนต้นและพารามิเตอร์คาดเดาที่นำมาใช้สร้างส่วนผกผันของเขตไร้ผลสนองแบบปรับตัวเองก็ไม่แน่ว่าจะเป็นค่าจริง อีกทั้งตัวควบคุมที่ได้จาก [11, 12, 23] ยังมีความซับซ้อนมากจนเกินความจำเป็น

## วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการวิจัยแบ่งออกได้เป็น 4 ข้อ ดังนี้

1. ดังที่กล่าวไว้แล้วในตอนต้นถึงการควบคุมแบบปรับตัวเองกับระบบไม่ทราบค่าที่แปรตามเวลาส่วนใหญ่จะสมมุติว่าอนุพันธ์ของพารามิเตอร์เหล่านั้นต้องมีขอบเขตและควรมีค่าน้อย แต่ในทางปฏิบัติเราไม่อาจรับประกันได้ว่าข้อสมมุตินี้จะเป็นจริง ดังนั้นวัตถุประสงค์ในข้อแรกคือ การหาโครงสร้างของตัวควบคุมที่ปราศจากข้อจำกัดนี้

2. ในหนังสือเกี่ยวกับการควบคุมไม่เชิงเส้นโดยทั่วไป [13, 14] ไม่ได้แสดงการควบคุมระบบดังที่กล่าวไว้ในตอนต้นส่วนใหญ่แล้วจะกล่าวถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ แนวทางที่แสดงการควบคุมระบบดังที่กล่าวไว้โดยตรง [11, 12, 23] ซึ่งอาศัยหลักการสร้างส่วนผกผันของเขตไร้ผลสนองแบบปรับตัวเอง ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการวิจัย คือ ต้องการหาโครงสร้างของตัวควบคุมแบบปรับตัวเองที่สามารถแก้ไขข้อจำกัดของวิธีส่วนผกผันของเขตไร้ผลสนองแบบปรับตัวเอง ดังต่อไปนี้
   - ไม่เหมาะสมกับระบบที่มีแถบไร้ผลสนองเปลี่ยนตามเวลาซึ่งสามารถพบได้เสมอๆใน ทางปฏิบัติ
   - ไม่เหมาะกับเขตไร้ผลสนองที่มีฮีสเตอริซิส ผสมอยู่
   - โครงสร้างของตัวควบคุมมีความซับซ้อนเกินไป
   - ใช้ได้เฉพาะกับระบบเชิงเส้นไม่แปรตามเวลา
   - ส่วนผกผันของเขตไร้ผลสนองแบบปรับตัวเองอาจไม่สามารถชดเชยเขตไร้ผลสนองได้ดีพอเพราะว่าพารามิเตอร์คาดเดาอาจไม่ใช่ค่าจริง

3. โครงสร้างของตัวควบคุมควรมีลักษณะใกล้เคียงกับโครงสร้างของการควบคุมแบบปรับตัวเองชนิดแบบจำลองอ้างอิงธรรมดา เพื่อที่จะสามารถนำเทคนิคต่างๆที่มีอยู่แล้วมาใช้ร่วมกันได้

4. ตัวควบคุมที่ได้ควรมีความมั่นคงและยังคงทำให้การควบคุมบรรลุจุดประสงค์ได้เมื่อมีการรบกวนต่างๆ เช่น การรบกวนสัญญาณควบคุม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ข้อตกลงเบื้องต้น

การควบคุมแบบปรับตัวเองตลอดทั้งวิทยานิพนธ์นี้เป็นการควบคุมแบบปรับตัวเองชนิดแบบจำลองอ้างอิงแบบตรง (Direct model reference adaptive control) ระบบที่สนใจ คือ ระบบเชิงเส้นที่วัดตัวแปรสถานะได้ครบ หรือ อีกนัยหนึ่งสัญญาณออกก็คือตัวแปรสถานะ ข้อสมมุติอื่นๆเป็นไปตามการควบคุมแบบปรับตัวเองชนิดแบบจำลองอ้างอิงธรรมดาทั่วๆไป เช่น ระบบที่ถูกควบคุมเป็นแบบเฟสต่ำสุด (Minimum phase) จุดประสงค์ของการควบคุม คือ ต้องการให้สัญญาณออกของระบบตามสัญญาณออกที่ได้จากแบบจำลองอ้างอิง

## ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

1. ปรับปรุงโครงสร้างของการควบคุมแบบปรับตัวเองชนิดแบบจำลองอ้างอิงธรรมดาให้สามารถใช้ได้กับระบบเชิงเส้นที่แปรตามเวลา
2. ปรับปรุงโครงสร้างของการควบคุมแบบปรับตัวเองชนิดแบบจำลองอ้างอิงธรรมดาให้สามารถใช้ได้กับระบบเชิงเส้นไม่แปรตามเวลาที่มีเขตไร้ผลสนองไม่ทราบค่าที่แปรตามเวลา
3. นำโครงสร้างที่ได้จาก 1 และ 2 มาประกอบกันเพื่อให้สามารถใช้ได้กับระบบเชิงเส้นแปรตามเวลาที่มีเขตไร้ผลสนองไม่ทราบค่าที่แปรตามเวลา
4. แสดงการออกแบบตัวควบคุมที่กล่าวไปแล้วพร้อมผลการจำลองเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพื้นฐาน

## ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีทางเลือกใหม่ในการควบคุมระบบเชิงเส้นไม่ทราบค่าที่แปรตามเวลา
2. มีทางเลือกใหม่ในการควบคุมระบบที่ประกอบด้วยเขตไร้ผลสนองให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น
3. ช่วยให้สามารถชดเชยความไม่สมบูรณ์แบบของอุปกรณ์ด้วยอัลกอริทึมจากตัวควบคุมมากกว่าการที่จะต้องเปลี่ยนไปใช้อุปกรณ์ที่มีราคาสูงกว่า
4. เป็นพื้นฐานในการควบคุมระบบที่มีส่วนไม่เป็นเชิงเส้นชนิดอื่น เช่น ฮีสเตอริซิส (Hysteresis) เป็นต้น