บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันแขนกลแบบอ่อนตัวมีบทบาทต่องานอุตสาหกรรมมาก เนื่องจากแขนกลแบบอ่อนตัวมีน้ำหนักเบา ใช้พลังงานการขับเคลื่อนต่ำ และมีประสิทธิภาพในการรับโหลดสูง [3] อย่างไรก็ตามแขนกลแบบอ่อนตัวมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งมีอันดับอนันต์และลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น การวิเคราะห์ระบบและสังเคราะห์ตัวควบคุมจึงมีความซับซ้อน ในทางปฏิบัติการประมาณระบบโดยใช้แบบจำลองที่มีอันดับจำกัดและเป็นเชิงเส้น ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างแบบจำลองกับระบบจริง ความแตกต่างนี้เรียกว่า ความไม่แน่นอน นอกจากนี้ความไม่แน่นอนยังรวมถึงการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงาน ซึ่งอาจเกิดจากการสึกหรอของระบบ หรือความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์วัดและตัวกระทำที่ไม่ละเอียดพอ ความไม่แน่นอนนี้อาจทำให้ระบบขาดเสถียรภาพและสมรรถนะที่ดี ดังนั้นเราจึงออกแบบตัวควบคุมเพื่อประกันเสถียรภาพและสมรรถนะของระบบ เมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความไม่แน่นอนตัวควบคุมดังกล่าวเรียกว่า ตัวควบคุมคงทน

หนึ่งในเครื่องมือที่ช่วยในการวิเคราะห์ความคงทนของระบบคือ นอร์มอนันต์ (Inifinity norm) [4] เนื่องจากนอร์มอนันต์เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดการรบกวนจากสัญญาณรบกวน วิธีการควบคุมเอชอินฟินิตี้ คือ การออกแบบตัวควบคุมที่ทำให้การรบกวนมีผลต่อระบบน้อยที่สุด โดยใช้นอร์มอนันต์เป็นเครื่องมือวัดการรบกวน นอกจากนี้นอร์มอนันต์เป็นเครื่องมือสำคัญในการกำหนดขนาดของความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นในระบบ ดังนั้นตัวควบคุมเอชอินฟินิตี้จึงประกันเสถียรภาพคงทนและสมรรถนะคงทน ปัจจุบันมีโปรแกรมสำเร็จ [5, 6] ช่วยให้เราออกแบบตัวควบคุมได้สะดวกขึ้น ด้วยเหตุนี้เราจึงเลือกใช้วิธีการควบคุมเอชอินฟินิตี้ แต่การควบคุมด้วยวิธีนี้มีความอนุรักษ์สูงอันเป็นผลมาจากการประมาณในขั้นตอนการออกแบบ โดยเฉพาะขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างความไม่แน่นอน ตัวอย่างเช่น การออกแบบตัวควบคุมเอชอินฟินิตี้จะไม่คำนึงถึงโครงสร้างความไม่แน่นอน หรือกำหนดให้ความไม่แน่นอนเป็นแบบไร้โครงสร้าง (unstructured uncertainty) ทั้งๆที่ในความเป็นจริงความไม่แน่นอนเป็นแบบมีโครงสร้าง (structured uncertainty) [7] เพื่อลดความอนุรักษ์ที่เกิดจากขั้นตอนดังกล่าว เราจึงสนใจการออกแบบตัวควบคุมที่คำนึงถึงโครงสร้างความไม่แน่นอน หนึ่งในวิธีที่สามารถลดความอนุรักษ์คือ วิธีการสังเคราะห์มิว (μ synthesis) ค่ามิว (μ) เป็นฟังก์ชันที่บ่งชี้ถึงเสถียรภาพคงทนและสมรรถนะคงทนของระบบ โดยขึ้นกับโครงสร้างความไม่แน่นอน ถ้าไม่พิจารณาโครงสร้างความไม่แน่นอน การออกแบบจากวิธีการสังเคราะห์มิว จะให้ผลตอบเชิงความถี่เหมือนกับวิธีการควบคุมเอชอินฟินิตี้ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาโครงสร้างความไม่แน่นอน การออกแบบด้วยวิธีการสังเคราะห์มิวจะให้สมรรถนะดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีการควบคุมเอชอินฟินิตี้

วัตถุประสงค์หลักของการควบคุมแขนกลคือ การควบคุมให้แขนกลเคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ และรวดเร็ว ภายใต้สภาวะการทำงานที่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้มีข้อจำกัดในการจ่ายพลังงานของตัวขับเร้า แต่เนื่องจากการสังเคราะห์ตัวควบคุมให้สอดคล้องกับเงื่อนไขเสถียรภาพคงทน

และสมรรถนะคงทนต้องทำในโดเมนความถี่ ฟังก์ชันน้ำหนักสมรรถนะ (performance weight) ซึ่งเป็นตัวกำหนดสมรรถนะของระบบจึงเป็นฟังก์ชันในเชิงความถี่ด้วย ดังนั้นการเลือกฟังก์ชันน้ำหนักสมรรถนะเพื่อให้ระบบมีผลตอบเชิงเวลาที่ดีเป็นเรื่องที่ทำได้ยาก หากเรากำหนดเงื่อนไขเชิงเวลา และสามารถออกแบบตัวควบคุมให้สอดคล้องกับเงื่อนไขเชิงความถี่และเชิงเวลาได้แล้ว เราจะได้ตัวควบคุมที่ทำให้ระบบที่มีความไม่แน่นอนแสดงลักษณะตามที่ต้องการได้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในช่วง 30 ปีที่ผ่านมา นักวิจัยส่วนใหญ่ให้ความสนใจกับการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนและการสังเคราะห์ตัวควบคุมคงทน เนื่องจากการออกแบบตัวควบคุมที่คำนึงถึงความไม่แน่นอน จะทำให้ระบบสอดคล้องกับเงื่อนไขเสถียรภาพคงทนและสมรรถนะตามต้องการได้ โดยบทความในช่วงปี 1980-1990 นำเสนอเกี่ยวกับการวิเคราะห์ระบบที่มีความไม่แน่นอนและการพิจารณาลักษณะของความไม่แน่นอน เพื่อวิเคราะห์ความอนุรักษ์ของระบบ เช่น บทความของ Doyle [7, 8] วิเคราะห์ระบบที่มีความไม่แน่นอนแบบมีโครงสร้าง จากนั้น Chapellat และคณะ [9] เปรียบเทียบระบบที่มีความไม่แน่นอนแบบมีโครงสร้างและไร้โครงสร้าง ซึ่งสรุปว่าความไม่แน่นอนแบบไร้โครงสร้างมีความอนุรักษ์มากกว่าความไม่แน่นอนแบบมีโครงสร้าง ในช่วง 10 ปีต่อมา บทความนำเสนอเกี่ยวกับการสังเคราะห์ตัวควบคุมคงทน เริ่มจาก Doyle และคณะ [10] เสนอทฤษฎีการสังเคราะห์ตัวควบคุมเอชอินฟินิตี้โดยใช้สมการริกคาติ 2 สมการในการหาคำตอบ บทความนี้กระตุ้นให้นักวิจัยหลายท่านนำทฤษฎีของ Doyle ไปประยุกต์ใช้กับระบบควบคุมต่างๆ อาทิ เช่น หอกลั่น (distillation column) [11] การขับเคลื่อนแถบแม่เหล็ก (magnetic-tape-drive) [12] โครงสร้างอ่อนตัว (flexible structure) [13] และระบบเซอร์โว (servo system) [14] เป็นต้น

สำหรับระบบแขนกลแบบอ่อนตัว ได้มีนักวิจัยหลายท่านเสนอตัวควบคุมหลายวิธี เช่น การควบคุมแบบ LQG [15] ซึ่งสามารถควบคุมให้ระบบแขนกลมีผลตอบที่น่าพอใจ แต่การควบคุมด้วยวิธีนี้ไม่สามารถประกันเสถียรภาพคงทนได้ [16] ในปี 1991 Arakawa และคณะ [17] ได้ออกแบบตัวควบคุม LQ ร่วมกับการควบคุมเอชอินฟินิตี้ โดยคำนวณหาขอบเขตการเปลี่ยนแปลงความยาวของแขนกลที่ยังทำให้ระบบมีเสถียรภาพ ต่อมา Matsuno [18, 19] ได้วิจัยเพิ่มเติม โดยรวมตัวควบคุม LQ การควบคุมเอชอินฟินิตี้และตัวกรองผ่านต่ำเข้าด้วยกัน เพื่อลดผลของสัญญาณรบกวนที่บริเวณความถี่สูงและลดการสั่นของแขนกลแบบอ่อนตัว เป็นผลให้การควบคุมแขนกลทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพนอกจากนี้ยังมีการควบคุมแบบปรับตัวซึ่งเป็นการออกแบบที่คำนึงถึงความไม่แน่นอนของระบบแขนกล [20, 21] อย่างไรก็ตามการควบคุมด้วยวิธีนี้ไม่มีทฤษฎีรองรับว่า ระบบจะสอดคล้องเสถียรภาพคงทนและสมรรถนะคงทนต่างจากการควบคุมคงทนซึ่งมีทฤษฎีรองรับ

เป็นที่ทราบกันดีว่า วิธีการจัดสัณฐานวงรอบเป็นวิธีการควบคุมเอชอินฟินตี้วิธีหนึ่งที่ง่ายต่อการควบคุมโดยเฉพาะกับระบบ SISO [22] แต่ไม่นิยมใช้กับระบบ MIMO เนื่องจากความซับซ้อนของระบบ ทำให้ยากต่อการวิเคราะห์ระบบและเลือกฟังก์ชันน้ำหนัก ในปี 1992 Goh และคณะ [23] ได้นำวิธีการจัดสัณฐานวงรอบของ Glover และ McFarlane [24] ประยุกต์ใช้กับโครงสร้างอ่อนตัวซึ่งเป็นระบบ MIMO บทความนี้แสดงให้เห็นว่าวิธีของ Glover และ McFarlane สามารถ

ประยุกต์ใช้กับระบบ MIMO ได้ง่าย และมีข้อดีคือ ตัวควบคุมจะไม่เกิดการตัดกันของขั้วและศูนย์ระหว่างระบบจำลองและตัวควบคุม อย่างไรก็ตามวิธีนี้ยังไม่มีวิธีการเลือกฟังก์ชันน้ำหนักที่ดี อาจต้องมีการลองผิดลองถูกเพื่อเลือกฟังก์ชันน้ำหนักในการออกแบบตัวควบคุม นอกจากวิธีข้างต้นแล้วยังมีบทความที่ใช้วิธีการสังเคราะห์มิวร่วมกับการควบคุมเอชอินฟินิตี้ เช่น บทความของ Moser [25] ออกแบบตัวควบคุมมิวสำหรับโครงสร้างอ่อนตัว การทดลองแสดงให้เห็นว่า วิธีการสังเคราะห์มิวสามารถลดความอนุรักษ์ในขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างความไม่แน่นอน และบทความของ Balas และ Doyle [26] เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพและสมรรถนะของระบบเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมมิว บทความนี้สรุปว่าการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบที่มีแบบจำลองความไม่แน่นอนไม่สอดคล้องกับระบบจริง อาจทำให้ระบบขาดเสถียรภาพหรือมีสมรรถนะที่เลวได้ หากเรากำหนดเงื่อนไขเชิงเวลาเพื่อต้องการให้ระบบมีผลตอบเชิงเวลาที่ดี วิธีการควบคุมเอชอินฟินิตี้หรือการสังเคราะห์มิวจะไม่สามารถสังเคราะห์ตัวควบคุมให้ระบบสอดคล้องกับเงื่อนไขเชิงเวลาได้อย่างชัดเจน เนื่องจากวิธีการควบคุมทั้งสองจำเป็นต้องออกแบบตัวควบคุมบนโดเมนความถี่ จึงมีนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาการออกแบบตัวควบคุมทั้งสองให้สอดคล้องเงื่อนไขเชิงเวลา เช่น ในปี 1991 Lundstrom และคณะ [27] เสนอการเลือกฟังก์ชันน้ำหนักเพื่อให้ระบบมีสมรรถนะที่ดี โดยเลือกฟังก์ชันน้ำหนักสมรรถนะที่มีความกว้างแถบความถี่กว้าง จะทำให้ความกว้างแถบความถี่ของระบบกว้าง นั่นคือ ระบบจะมีผลตอบเชิงเวลาเร็ว ในปี 1996 Franchek [28] ได้เสนอวิธีการเลือกฟังก์ชันน้ำหนักให้สอดคล้องกับเงื่อนไขเชิงเวลา โดยเงื่อนไขเชิงเวลาดังกล่าวคือ ข้อจำกัดของขนาดสัญญาณควบคุมและขนาดของสัญญาณออก ซึ่งผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่าฟังก์ชันน้ำหนักที่เลือกทำให้ระบบสอดคล้องกับเงื่อนไขเชิงเวลาได้ และในบทความของ Rotstein และ Sideris [29] กล่าวไว้ว่าการเปลี่ยนเงื่อนไขเชิงเชิงเวลาเป็นเงื่อนไขความถี่ เป็นการเพิ่มความอนุรักษ์ให้กับระบบ Rotstein และ Sideris จึงเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบไม่ต่อเนื่องที่ทำให้ระบบสอดคล้องกับเงื่อนไขเชิงเวลา โดยเงื่อนไขในบทความนี้คือ การกำหนดเวลาคงตัวและส่วนพุ่งเกิน ผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมสามารถควบคุมระบบให้สอดคล้องกับเงื่อนไขเชิงเวลา โดยไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนให้เป็นเงื่อนไขเชิงความถี่ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดความอนุรักษ์ขึ้นในระบบ อย่างไรก็ตามวิธีนี้ยากต่อการออกแบบตัวควบคุม และยังไม่มีโปรแกรมช่วยในการออกแบบ

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุมคงทนด้วยวิธีการควบคุมเอชอินฟินิตี้ [30] และวิธีการสังเคราะห์มิว เพื่อให้ระบบสอดคล้องกับเงื่อนไขเชิงเวลา รวมถึงสอดคล้องกับเงื่อนไขเสถียรภาพคงทนและสมรรถนะคงทนของระบบ โดยจะประยุกต์ใช้จริงกับระบบแขนกลแบบอ่อนตัวข้อต่อเดียว [31, 32]

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาการควบคุมคงทนในระบบเชิงเส้นที่มีความไม่แน่นอน และเพื่อให้สมรรถนะของระบบสอดคล้องกับเงื่อนไขในเชิงความถี่และเชิงเวลา
2. เพื่อประยุกต์ใช้ทฤษฎีการควบคุมและทดลองจริง กับระบบแขนกลแบบอ่อนตัวข้อต่อเดียว

1.3 ขอบเขตงานวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาทฤษฎีการควบคุมคงทนด้วยวิธีการควบคุมเอชอินฟินิตี้และวิธีการสังเคราะห์มิว
2. ออกแบบตัวควบคุมคงทน เพื่อให้ระบบแขนกลมีเสถียรภาพและสมรรถนะภายใต้การเปลี่ยนแปลงมวลโหลดและตำแหน่งมวล
3. ศึกษาแนวทางการเลือกฟังก์ชันน้ำหนักสมรรถนะ โดยรวมเงื่อนไขเชิงความถี่และเงื่อนไขเชิงเวลาเพื่อใช้ออกแบบตัวควบคุมคงทน โดยเงื่อนไขเชิงความถี่คือ ความกว้างแถบความถี่ของระบบ (ไม่ต่ำกว่า 1 เรเดียนต่อวินาที) และเชิงเวลาประกอบด้วย ค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว (ไม่เกิน 0.1 เปอร์เซนต์) และขนาดของสัญญาณขับเร้า (ไม่เกิน 5 โวลต์)
4. เปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมที่ออกแบบใหม่กับตัวควบคุมในโครงงาน [3] รวมถึงปรับแก้การออกแบบตัวควบคุมให้เหมาะสม
5. นำตัวควบคุมไปใช้จริงกับระบบแขนกลแบบอ่อนตัวข้อต่อเดียว

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาแบบจำลองระบบแขนกลและลักษณะพลวัตของระบบแขนกล เพื่อเป็นประโยชน์ในการกำหนดฟังก์ชันน้ำหนักความไม่แน่นอน
2. ศึกษาทฤษฎีการควบคุมคงทนด้วยวิธีการควบคุมเอชอินฟินิตี้และการสังเคราะห์มิว
3. ออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการควบคุมเอชอินฟินิตี้และการสังเคราะห์มิว และปรับแก้การออกแบบตัวควบคุมให้เหมาะสม
4. ศึกษาทฤษฎีการกำหนดเงื่อนไขการออกแบบเชิงเวลา เพื่อใช้กับวิธีการควบคุมเอชอินฟินิตี้และการสังเคราะห์มิว
5. ออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ระบบสอดคล้องกับเงื่อนไขเชิงความถี่และเชิงเวลา จากนั้นจะจำลองผลการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์และปรับแก้ตัวควบคุมให้เหมาะสม
6. นำตัวควบคุมไปใช้กับระบบแขนกลจริงและปรับแต่งตัวควบคุมให้เหมาะสม
7. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการใช้งานจริงและเขียนสรุปเป็นวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ออกแบบตัวควบคุมที่สามารถรับรองเสถียรภาพของระบบแขนกล เมื่อสภาวะการทำงานของระบบแขนกลเปลี่ยนแปลงไป และมีสมรรถนะเป็นที่พอใจทั้งผลตอบในเชิงความถี่และเชิงเวลา

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. ผลวิจัยสามารถระบุถึงข้อดีข้อเสียของตัวควบคุมเอชอินฟินิตี้และตัวควบคุมมิว เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการออกแบบตัวควบคุมคงทนต่อไป