

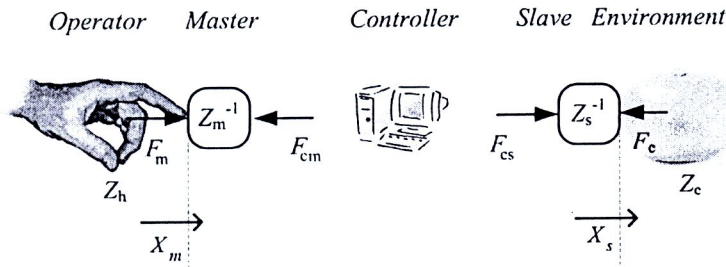
บทที่ 2

แบบจำลองของแสปติกและพื้นฐานการควบคุม

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของส่วนต่าง ๆ และรูปแบบของการควบคุมตลอดจนวิธีการตรวจสอบเสถียรภาพและสมรรถนะของระบบที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย

2.1 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแสปติก

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนต่าง ๆ ของระบบแสปติกโดยทั่วไปจะจำลองให้เป็นระบบเชิงเส้นที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (linear time-invariant) ซึ่งประกอบไปด้วยสามส่วนหลัก ๆ ดังนี้ ส่วนแรกคือ ส่วนของอุปกรณ์แสปติกด้านมาสเตอร์ซึ่งเป็นชุดอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับผู้ใช้งาน ส่วนที่สองคือ ส่วนของอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ควบคุม และสุดท้ายคือส่วนของอุปกรณ์แสปติกด้านสเลฟซึ่งเป็นชุดอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับสิ่งแวดล้อม แสดงดังรูป 2.1 หลักการทำงานของระบบเริ่มจากผู้ควบคุมทำการควบคุมแกนกลของชุดอุปกรณ์แสปติกด้านมาสเตอร์ แรงจากการควบคุม F_m จะทำให้แกนกลเกิดการเคลื่อนที่เป็นระยะกระจัด X_m สัญญาณแรงและตำแหน่งที่ถูกวัดค่าได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้ (sensor) จะถูกส่งให้กับอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ควบคุมเพื่อประมวลผลและส่งสัญญาณควบคุม F_{cs} ไปควบคุมอุปกรณ์ขับ (actuator) ทำให้แกนกลของชุดอุปกรณ์แสปติกด้านสเลฟเกิดการเคลื่อนที่ด้วยระยะกระจัด X_s และเมื่อแกนกลเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับวัตถุหรือสิ่งแวดล้อมจะเกิดแรงปฏิกิริยาที่เกิดจากการสัมผัส F_e สัญญาณแรงและตำแหน่งที่เกิดขึ้นจะถูกวัดค่าจากอุปกรณ์ตรวจรู้และส่งให้กับอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ควบคุมเพื่อประมวลผลและส่งสัญญาณควบคุม F_{cm} กลับมาควบคุมอุปกรณ์ขับเพื่อควบคุมแกนกลด้านมาสเตอร์ให้เคลื่อนด้านการควบคุม จึงทำให้ผู้ควบคุมรู้สึกถึงตำแหน่งและแรงต้านเกิดขึ้นกับมือเหมือนได้สัมผัสกับวัตถุโดยตรง

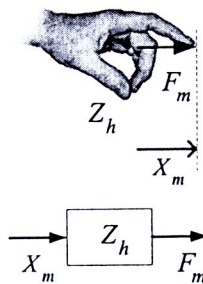


รูป 2.1 การเชื่อมต่อของส่วนประกอบต่างๆ ของระบบแฮปติก (ที่มา : G.Christiansson ค.ศ.2005)

กำหนดให้สัญญาณแรงและตำแหน่งมีความสัมพันธ์ในรูปอิมพีแดนซ์ (impedance) ดังนี้ Z_h คืออิมพีแดนซ์ของมือผู้ควบคุมเป็นความสัมพันธ์ของแรงกดจากมือผู้ควบคุมและตำแหน่งการขยับตัวของนิ้วมือผู้ควบคุม Z_m คืออิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์มาสเตอร์เป็นความสัมพันธ์ของแรงของผู้ควบคุมและตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกนกลด้านมาสเตอร์ Z_s คืออิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์สเลฟเป็นความสัมพันธ์ของแรงปฏิกิริยาที่เกิดจากการสัมผัสกับวัตถุและตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกนกลด้านสเลฟ Z_e คืออิมพีแดนซ์ของวัตถุเป็นความสัมพันธ์ของแรงปฏิกิริยาที่เกิดจากการสัมผัสกับวัตถุและตำแหน่งการขยับตัวของวัตถุ ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้ถูกกำหนดอยู่ใน laplace domain รูป 2.1 แสดงถึงการเชื่อมต่อของส่วนประกอบต่างๆ ของระบบและสามารถพิจารณาแบบจำลองของส่วนต่างๆ ของระบบดังนี้

2.1.1 แบบจำลองของมือผู้ควบคุม

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมือผู้ควบคุมนั้นถึงแม้ว่ามือของผู้ควบคุมไม่ได้อยู่ในส่วนของการควบคุม อย่างไรก็ตามมือของผู้ควบคุมมีการเชื่อมต่อแบบเชิงกลกับส่วนของอุปกรณ์ที่ถูกควบคุมทำให้มีผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ [8, 11-15] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมือผู้ควบคุมเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ระบบ



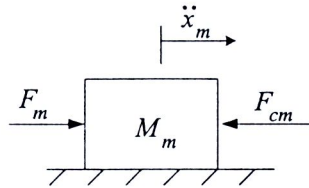
รูป 2.2 แบบจำลองของมือผู้ควบคุม

$$Z_h = \frac{F_m}{X_m} = (m_h)s^2 + (b_h)s + k_h \quad (2.1)$$

โดยที่อิมพีแดนซ์ของมือผู้ควบคุมมีความสัมพันธ์กับแรงและตำแหน่งแสดงดังรูป 2.2 ถึงแม้ว่านิ้วมือของผู้ควบคุมแต่ละคนมีความแข็งแรงที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามนักวิจัยหลายท่าน [5, 7, 22] ได้ศึกษาและสามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ของนิ้วมือให้เป็นลักษณะ มวล สปริง และตัวหน่วงแสดงดังสมการที่ (2.1)

2.1.2 แบบจำลองของอุปกรณ์มาสเตอร์

อุปกรณ์มาสเตอร์ (master device) เป็นอุปกรณ์แฮปติกที่เชื่อมต่อกับผู้ใช้งาน เพื่อให้เห็นภาพโดยรวมสามารถพิจารณาการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์แฮปติกเชิงเส้นอย่างง่ายเป็นการเคลื่อนที่ของมวล M_m ที่มีการเคลื่อนที่ในแนวตรง โดยที่ผู้ควบคุมออกแรงกระทำ F_m เพื่อให้มวลเกิดการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ขณะที่ F_{cm} คือแรงต้านที่เกิดจากการประมวลผลของสัญญาณควบคุมที่ทำให้ผู้ควบคุมรู้สึกถึงการสัมผัสเมื่ออุปกรณ์สเลฟไปสัมผัสกับวัตถุ สามารถเขียนแผนผังวัตถุอิสระได้ดังรูป 2.3



รูป 2.3 อุปกรณ์มาสเตอร์

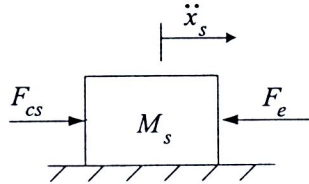
$$F_m - F_{cm} = (M_m)\ddot{x}_m \quad (2.2)$$

สมการที่ (2.2) เป็นสมการการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์แฮปติกด้านมาสเตอร์ซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์สามารถวิเคราะห์ได้จากกฎของนิวตันโดยพิจารณาระบบไม่มีความฝืด จากสมการการเคลื่อนที่ที่สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์มาสเตอร์ Z_m ของระบบได้

2.1.3 แบบจำลองของอุปกรณ์สเลฟ

อุปกรณ์สเลฟ (slave device) เป็นอุปกรณ์แฮปติกที่เชื่อมต่อกับสิ่งแวดล้อม เพื่อให้เห็นภาพโดยรวมสามารถพิจารณาการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์แฮปติกเชิงเส้นอย่างง่ายนี้เช่นเดียวกับการเคลื่อนที่ของมวล M_s ที่มีการเคลื่อนที่ในแนวตรง โดยที่แรง F_{cs} ที่เกิดจากการประมวลผลของ

สัญญาณควบคุมที่ทำให้มวลเกิดการเคลื่อนที่และเมื่อเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับสิ่งแวดลอมจะเกิดแรงต้าน F_e ที่เกิดจากการสัมผัส สามารถเขียนแผนผังวัตถุอิสระได้ดังรูป 2.4



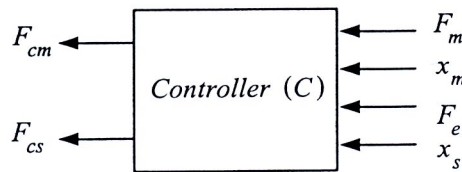
รูป 2.4 อุปกรณ์สเลฟ

$$F_{cs} - F_e = (M_s) \ddot{x}_s \quad (2.3)$$

สมการที่ (2.3) เป็นสมการการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์แฮปติกด้านสเลฟซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์สามารถวิเคราะห์ได้จากกฎของนิวตันโดยพิจารณาระบบไม่มีความฝืด จากสมการการเคลื่อนที่ที่สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์สเลฟ Z_s ได้

2.1.4 แบบจำลองของตัวควบคุม

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวควบคุมส่วนมากถูกสร้างให้เป็นลักษณะ Multi Input-Multi Output (MIMO) แสดงดังรูป 2.5 และสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้อยู่ในรูปสมการที่ (2.4) และ (2.5) ตามลำดับ การสร้างแบบจำลองตัวควบคุมนี้ได้ถูกนำเสนอโดย Goran Christiansson [7] และ Kyongho Park และคณะ [13]



รูป 2.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของของตัวควบคุม

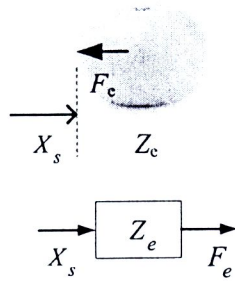
$$F_{cm} = C_{11}(F_m) + C_{12}(F_e) + C_{13}(X_m) + C_{14}(X_s) \quad (2.4)$$

$$F_{cs} = C_{21}(F_m) + C_{22}(F_e) + C_{23}(X_m) + C_{24}(X_s) \quad (2.5)$$

สมการที่ (2.4) และ (2.5) แสดงสัญญาณควบคุม F_{cm} และ F_{cs} ซึ่งเป็นฟังก์ชันของแรงและตำแหน่งที่ถูกวัดค่าได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้และส่งให้กับอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ควบคุมเพื่อประมวลผลผ่านตัวควบคุม C และส่งสัญญาณควบคุมไปควบคุมอุปกรณ์ขับเคลื่อนทางด้านมอเตอร์และสเลฟให้เคลื่อนที่อย่างสัมพันธ์กัน

2.1.5 แบบจำลองของสิ่งแวดล้อม

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสิ่งแวดล้อนั้นถึงแม้ว่าสิ่งแวดล้อนไม่ได้อยู่ในส่วนของการควบคุม อย่างไรก็ตามสิ่งแวดล้อนมีการเชื่อมต่อแบบเชิงกลกับส่วนของอุปกรณ์ที่ถูกควบคุมทำให้มีผลกระทบโดยตรงต่อเสถียรภาพของระบบเช่นเดียวกันกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมือผู้ควบคุม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสิ่งแวดล้อนเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ระบบ



รูป 2.6 แบบจำลองของสิ่งแวดล้อน

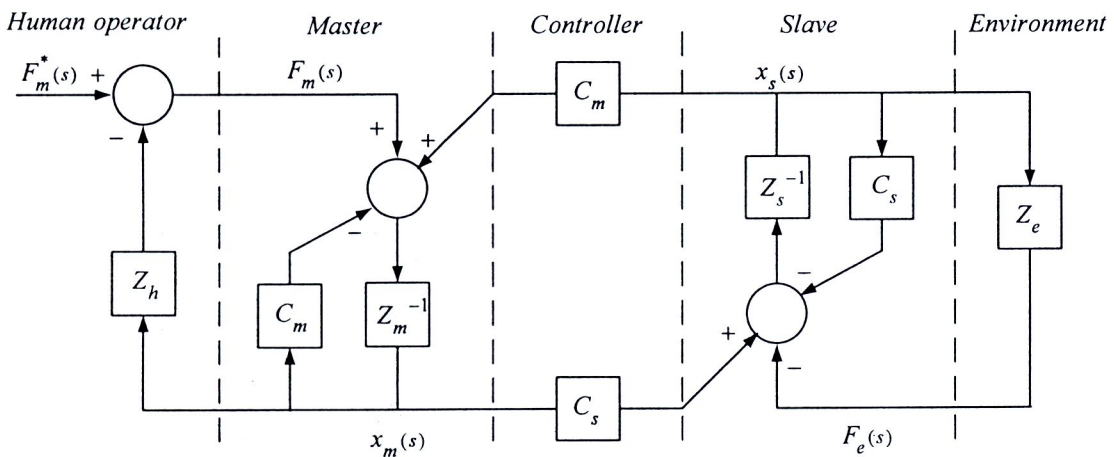
แบบจำลองอย่างง่ายของสิ่งแวดล้อนสามารถแสดงโดยสมการที่ (2.6)

$$Z_e = \frac{F_e}{X_s} = (b_e)s + k_e \quad (2.6)$$

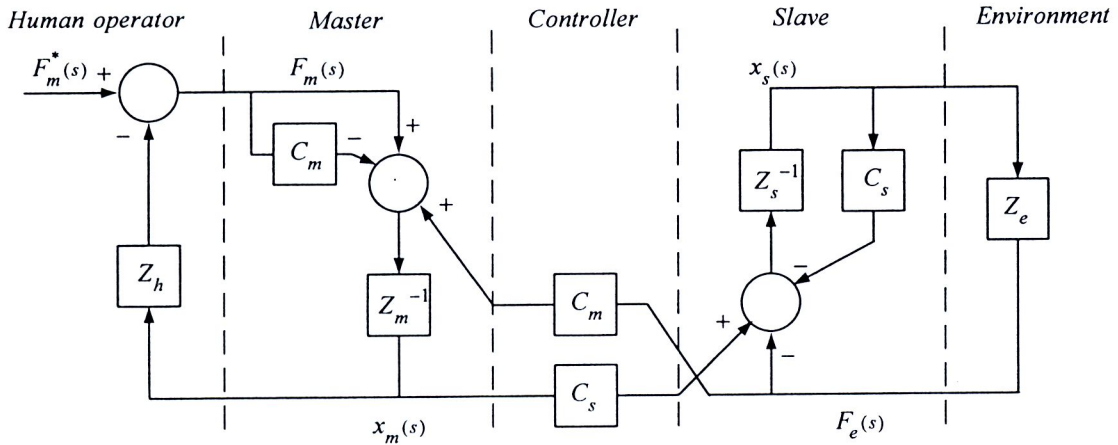
นักวิจัยหลายท่าน [5, 7, 16, 20] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสิ่งแวดล้อนให้เป็นลักษณะสปริง และตัวหน่วง โดยที่อิมพีแดนซ์ของสิ่งแวดล้อน Z_e มีความสัมพันธ์กับแรงและตำแหน่งดังรูป 2.6

2.2 โครงสร้างทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ใช้ในการควบคุม

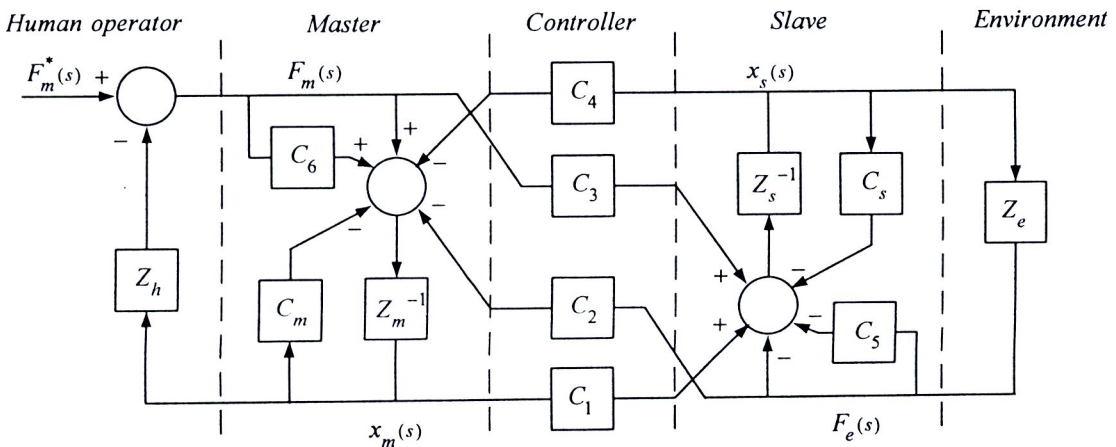
โครงสร้างพื้นฐานที่ใช้ในการควบคุมระบบแฮปติกอินเตอร์เฟซสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบ บล็อกไดอะแกรมในแบบ position error base (ตัวควบคุม $C_{11}, C_{12}, C_{21}, C_{22} = 0$) ดังรูป 2.7 force-position base (ตัวควบคุม $C_{13}, C_{14}, C_{21}, C_{22} = 0$) ดังรูป 2.8 และ 4-channel architecture ดังรูป 2.9 การควบคุมโดยใช้โครงสร้างแบบ position-position base มีหลักการทำงานคือใช้ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนกลทางด้านมาสเตอร์เป็นสัญญาณอ้างอิงเพื่อไปควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลทางด้านสเลฟและเมื่อแขนกลทางด้านสเลฟเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับวัตถุสัญญาณค่าผิดพลาดของตำแหน่งที่เกิดขึ้นจากการสัมผัสก็จะถูกใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลทางด้านมาสเตอร์ สำหรับโครงสร้างการควบคุมแบบ force-position base มีหลักการทำงานคือใช้ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนกลทางด้านมาสเตอร์เป็นสัญญาณอ้างอิงเพื่อไปควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลทางด้านสเลฟและเมื่อแขนกลทางด้านสเลฟเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับวัตถุสัญญาณแรงที่เกิดขึ้นจากการสัมผัสก็จะถูกใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลทางด้านมาสเตอร์ สำหรับโครงสร้างแบบ 4-channel architecture มีหลักการทำงานคือใช้ทั้งแรงและตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนกลในการควบคุมการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ทั้งทางด้านมาสเตอร์และสเลฟ โดยรูปแบบของโครงสร้างการควบคุมทั้งหมดนี้มีลักษณะการควบคุมแบบสองทิศทาง (bilateral control)



รูป 2.7 โครงสร้างในการควบคุมแบบ position error base



รูป 2.8 โครงสร้างในการควบคุมแบบ Force-position base

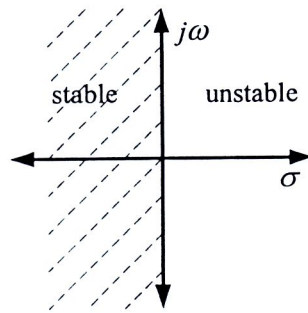


รูป 2.9 โครงสร้างในการควบคุมแบบ 4-channel architecture

รูปแบบของโครงสร้างการควบคุมพื้นฐานทั้งสามรูปแบบที่ใช้ในการควบคุมระบบแฮปติก อินเตอร์เฟซถูกนำมาศึกษากันอย่างแพร่หลายสามารถพบได้ในงานวิจัย [5, 11-14, 16-18, 21] อย่างไรก็ตามจากการศึกษาพบว่า การควบคุมระบบโดยใช้โครงสร้างแบบ position error base นั้นทำให้สมรรถนะของระบบยังไม่ดีพอ และโครงสร้างแบบ 4-channel architecture ก็มีความยุ่งยาก เนื่องจากมีการเพิ่มตัวแปรมากกว่าโครงสร้างการควบคุมแบบอื่น ๆ ทำให้มีความซับซ้อนในการหาตัวควบคุมให้กับระบบเมื่อเปรียบเทียบกับ การควบคุมด้วยโครงสร้างแบบ force-position base ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้พิจารณาใช้โครงสร้างแบบ force-position base ในการควบคุมระบบ

2.3 การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ

การตรวจสอบเสถียรภาพสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการ transfer function ของระบบ โดยมีเงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอสำหรับเสถียรภาพคือระบบจะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อโพล (pole) ทุกตัวของระบบมีองค์ประกอบจริงมีค่าเป็นลบหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าโพลทุกตัวของระบบจะต้องอยู่ซีกซ้ายของ s -plane (left-half plane) และหากพิจารณาแกนจินตภาพที่ตัดจุดกำเนิดเป็นเส้นแบ่ง s -plane แล้วซีกซ้ายของ s -plane เป็นพื้นที่ตำแหน่งโพลที่มีเสถียรภาพ แสดงดังรูป 2.10



รูป 2.10 พื้นที่ตำแหน่ง pole ที่มีเสถียรภาพบน s -plane

ภายใต้เงื่อนไขของเสถียรภาพนี้ ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอรูปแบบในการตรวจสอบเสถียรภาพด้วยวิธีการที่แตกต่างกันดังนี้

2.3.1 วิธีเกณฑ์ของเรย์ (Routh-Hurwitz)

R.W. Daniel และ P.R. McAree [20] ได้ใช้การตรวจสอบเสถียรภาพโดยวิธีเกณฑ์ของเรย์ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่จำเป็นต้องหาค่าราก (root) ของ characteristic polynomial ของ transfer function ของระบบซึ่งง่ายต่อการตรวจสอบสำหรับระบบที่มี order สูง นอกจากนั้นยังสามารถใช้วิธีการนี้ในการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบในรูปฟังก์ชันที่มีตัวแปรมากกว่าหนึ่งตัวแปร อย่างไรก็ตามวิธีการนี้มีความยุ่งยากในการจัดเรียงสัมประสิทธิ์ใน Routh-table

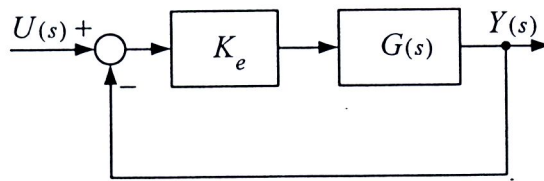
2.3.2 Lyapunov Stability

การตรวจสอบเสถียรภาพด้วยวิธีการ Lyapunov Stability พบได้ในงานวิจัยของ Greg R. Luecke และ Young-Ho Chai [8] วิธีการนี้มีข้อดีคือ การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบไม่จำเป็นต้องหารากหรือตำแหน่งโพลของระบบโดยตรงเช่นเดียวกับวิธีเกณฑ์ของเรย์ และสามารถตรวจสอบระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ยังมีข้อจำกัดคือการสร้าง Lyapunov function ยังไม่มีระเบียบวิธีการที่ชัดเจนซึ่งผู้ศึกษาต้องมีประสบการณ์ในการเลือกใช้



2.3.3 Root locus Method

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธี root locus เป็นวิธีการเดียวกันกับงานวิจัย [8, 20] เพื่อใช้ในการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบซึ่งจะอ้างอิงกับโครงสร้างของระบบป้อนกลับเป็นหลัก พิจารณาระบบ negative feedback สามารถจัดรูปแบบของโครงสร้างบล็อกไดอะแกรมที่ใช้ในการควบคุมระบบแอสปดิกดังรูป 2.11



รูป 2.11 โครงสร้างระบบ negative feedback

รูป 2.11 แสดงตัวอย่างระบบ feedback โดยที่ K_e คือค่าความแข็งของวัตถุ เมื่อค่าความแข็งของวัตถุเปลี่ยนค่าไปจะทำให้ pole ของระบบเปลี่ยนตำแหน่งไปด้วย เนื่องจากฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบคือ $Y(s)/U(s) = K_e G(s) / (1 + K_e G(s))$ โดยสมการคุณลักษณะของระบบที่มีความสัมพันธ์กับความแข็งของวัตถุซึ่งวิธีการ root locus สามารถบอกได้ว่าระบบยังคงมีเสถียรภาพอยู่หรือไม่จากการปรับตัวของตำแหน่งโพลของระบบ เมื่อค่า K_e เปลี่ยนค่าจากศูนย์ไปจนถึงค่าอนันต์ โดยสามารถสรุปได้ว่าวิธีการ root locus มีข้อดีคือ ตำแหน่ง pole ที่ได้จากการคำนวณสามารถตรวจสอบเสถียรภาพและสมรรถนะได้โดยตรง อย่างไรก็ตามการเลือกใช้วิธีการนี้ยังมีข้อเสียคือ สามารถตรวจสอบเสถียรภาพของระบบในรูปฟังก์ชันที่มีตัวแปรได้เพียงหนึ่งตัวแปรเท่านั้น

2.4 เกณฑ์การตรวจสอบสมรรถนะ

การตรวจสอบสมรรถนะเป็นตัวยืนยันถึงขีดความสามารถโดยรวมของระบบควบคุม โดยทั่วไปจะตรวจสอบจากผลการติดตามของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต และยังมีวิธีการที่นิยมใช้กันอย่างมากคือ ช่วงความถี่ (bandwidths) ของการควบคุมระบบถูกใช้เป็นเกณฑ์ในการตรวจสอบสมรรถนะอีกด้วย

2.4.1 ผลการติดตามของสัญญาณคลาดเคลื่อน (Tracking Errors)

เป็นการทดสอบเพื่อดูผลการติดตามของสัญญาณซึ่งเป็นการเปรียบเทียบขนาดของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต โดยสมรรถนะของระบบจะถูกประเมินจากการตอบสนองของระบบ

ด้วยสัญญาณอินพุตที่ดูต่อไปนี้

ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 31 ต.ค. 2555
เลขทะเบียน 250462
เลขเรียกหนังสือ

ระบบที่ทำการควบคุมมีผลการติดตามของขนาดสัญญาณแรงและตำแหน่งที่ดีก็จะทำให้ผู้ควบคุมรู้สึกถึงการสัมผัสผ่านการควบคุมแขนกลทางด้านมาสเตอร์ในขณะที่แขนกลทางด้านสเลฟเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับวัตถุได้

2.4.2 ช่วงความถี่ที่ใช้ในการควบคุมระบบ (Control Bandwidth)

การตอบสนองเชิงความถี่ทั้ง amplitude ratio และ phase difference นั้นแปรผันไปตามความถี่ของสัญญาณอินพุต เพื่อให้เห็นภาพรวมของการตอบสนองของระบบตลอดช่วงความถี่ที่เราสนใจ การตอบสนองมักจะถูกแสดงให้อยู่ในรูปกราฟที่เรียกว่า bode diagram จากการศึกษาทางด้านการทำงานร่วมกันระหว่างหุ่นยนต์และมนุษย์ [18, 21] พบว่าระบบต้องการการควบคุมให้แขนกลทางด้านสเลฟสามารถเคลื่อนที่ตามการเคลื่อนไหวของผู้ควบคุมในช่วงความถี่ตั้งแต่ 0 ถึง 10 เฮิรตซ์ ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่เป็นขีดความสามารถในการเคลื่อนไหวของมนุษย์ นอกจากนั้นระบบต้องการการควบคุมให้แขนกลทางด้านมาสเตอร์สามารถเคลื่อนไหวตามแขนกลทางด้านสเลฟในช่วงความถี่ตั้งแต่ 0 ถึง 20 เฮิรตซ์ ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมระบบแฮปติกอินเตอร์เฟสเพื่อให้ผู้ควบคุมรับรู้ถึงแรงและตำแหน่งขณะที่เกิดการสัมผัสของหุ่นยนต์ด้านสเลฟกับสิ่งแวดล้อม