

บทที่ 4

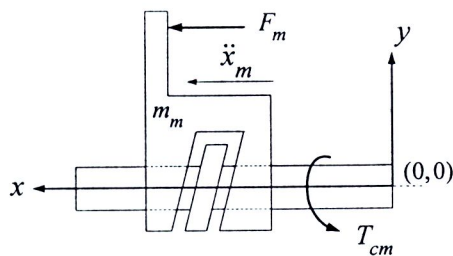
การออกแบบตัวควบคุมและการทดสอบสมรรถนะ

หากทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจะทำให้เราสามารถออกแบบตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพสูงได้ สำหรับงานวิจัยนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถสร้างได้จากการวิเคราะห์สมการการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์แฮปติกทั้งทางด้านมอเตอร์และสเลฟ

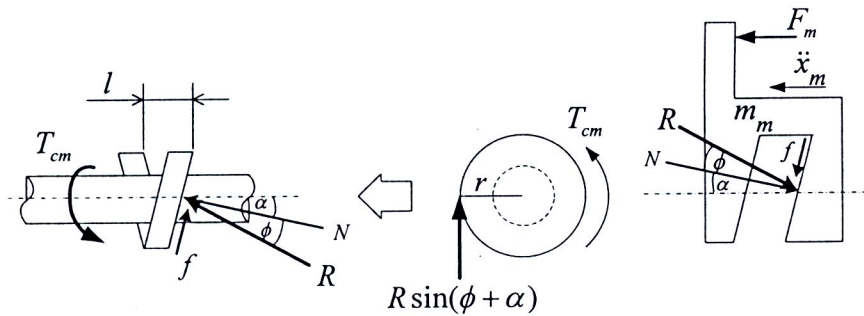
4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์แฮปติก

4.1.1 สมการการเคลื่อนที่ของแขนควบคุมด้านมอเตอร์

อุปกรณ์แฮปติกด้านมอเตอร์ (master device) เป็นชุดอุปกรณ์ที่สื่อสารสองทางกับผู้ใช้งาน ในงานวิจัยนี้ถูกออกแบบให้มีแขนควบคุมการเคลื่อนที่เป็นลักษณะคานยื่น (cantilever beam) อย่างง่ายติดตั้งบน linear guide ขับเคลื่อนด้วย ball screw โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้า โดยติดตั้ง encoder ที่เพลาของ ball screw เพื่อวัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ รูป 4.1 แสดงแผนผังวัตถุอิสระ (free body diagram) ของอุปกรณ์แฮปติกด้านมอเตอร์สำหรับหาสมการการเคลื่อนที่ในรูปของสมการอนุพันธ์จากกฎของนิวตันตามสมการที่ (4.4) โดยพิจารณาให้ความฝืดของระบบมีค่าน้อยมาก



รูป 4.1 อุปกรณ์แฮปติกด้านมอเตอร์



รูป 4.2 แผนผังวัตถุอิสระของอุปกรณ์แฮปติกด้านมาสเตอร์

โดยกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

- J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของสกรู
- m_m คือ มวลของแขนควบคุมการเคลื่อนที่ทางด้านมาสเตอร์
- m_s คือ มวลของ gripper ทางด้านสเลฟ
- l คือ ระยะพิช (Pitch) ของสกรู
- r คือ รัศมีเฉลี่ยที่แรงลัพท์กระทำกับสกรู
- F_m คือ แรงจากมือผู้ควบคุม
- F_e คือ แรงปฏิกิริยาของ gripper ทางด้านสเลฟที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อม
- T_{cm} คือ แรงบิดของมอเตอร์ที่ควบคุมการเคลื่อนที่ทางด้านมาสเตอร์
- T_{cs} คือ แรงบิดของมอเตอร์ที่ควบคุมการเคลื่อนที่ทางด้านสเลฟ
- x_m คือ ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนควบคุมการเคลื่อนที่ทางด้านมาสเตอร์
- x_s คือ ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของ gripper ทางด้านสเลฟ
- f คือ แรงที่เกิดจากความฝืด
- N คือ แรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉาก
- R คือ แรงลัพท์ที่เกิดจากความฝืดและแรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉาก
- ϕ คือ มุมระหว่างแรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉากและแรงลัพท์
- α คือ มุมระหว่างแรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉากและแกนเพลลา

จากแผนผังวัตถุอิสระในรูป 4.2 สามารถคำนวณหาสมการการเคลื่อนที่ของแขนควบคุมการเคลื่อนที่ทางด้านมาสเตอร์จากกฎของนิวตันได้ดังนี้

พิจารณาจากการเคลื่อนที่เชิงมุมของเพลา

$$\sum M = J\ddot{\theta} ; r \sin(\alpha + \phi)R - T_{cm} = J\ddot{\theta} \quad (4.1)$$

และการเคลื่อนที่ในแนวตรง

$$\sum F_x = m\ddot{x} ; F_m - \cos(\alpha + \phi)R = m_m\ddot{x}_m \quad (4.2)$$

จากสมการที่ (1) และ (2) จะได้

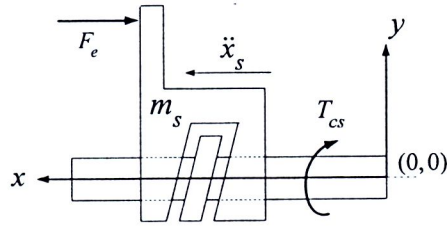
$$T_{cm} + J\ddot{\theta} = r(F_m - m_m\ddot{x}_m)\tan(\alpha + \phi) \quad (4.3)$$

เมื่อ $\frac{d\theta}{dx} = \frac{2\pi}{l}$ พิจารณาระบบไม่มีความฝืด ($\phi = 0$) และ $\tan(\alpha) = \frac{l}{2\pi r}$ จะได้สมการการเคลื่อนที่ของแขนควบคุมการเคลื่อนที่ทางด้านมาสเตอร์ดังนี้

$$F_m\left(\frac{l}{2\pi}\right) - T_{cm} = \left(\frac{J(2\pi)^2 + m_m l^2}{2\pi l}\right)\ddot{x}_m \quad (4.4)$$

4.1.2 สมการการเคลื่อนที่ของ gripper

อุปกรณ์สเลฟ (slave device) เป็นชุดอุปกรณ์ที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมถูกออกแบบคล้ายกับอุปกรณ์ด้านมาสเตอร์คือ มี gripper เป็นลักษณะกานขึ้นอย่างง่ายติดตั้งบน linear guide ขับเคลื่อนด้วย ball screw โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้า โดยติดตั้ง encoder ที่เพลาของ ball screw เพื่อวัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ รูป 4.3 แสดงแผนผังวัตถุอิสระของอุปกรณ์แฮปติกด้านสเลฟสำหรับหาสมการการเคลื่อนที่ในรูปของสมการอนุพันธ์จากกฎของนิวตันตามสมการที่ (4.5) โดยพิจารณาให้ความฝืดของระบบมีค่าน้อยมาก



รูปที่ 4.3 อุปกรณ์สเลฟ

$$T_{cs} - F_e \left(\frac{l}{2\pi} \right) = \left(\frac{J(2\pi)^2 + m_s l^2}{2\pi l} \right) \ddot{x}_s \quad (4.5)$$

โดยอุปกรณ์แฮปติกที่ได้ออกแบบมีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตาราง 4.1

ตาราง 4.1 พารามิเตอร์ของอุปกรณ์แฮปติก

สัญลักษณ์	ขนาด	หน่วย
J	0.00000264	Kg.m ²
l	4	mm
m_m	370	g
m_s	370	g

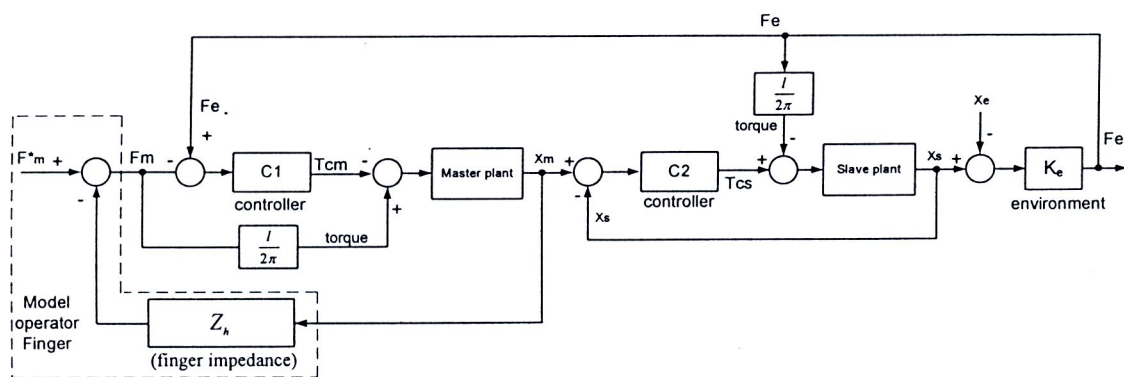
4.2 โครงสร้างการควบคุม

งานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวควบคุมให้กับระบบแฮปติกอินเตอร์เฟสโดยใช้โครงสร้างในการควบคุมแบบ Force-Position Bilateral Control Architecture ในการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ด้านมาสเตอร์ T_{cm} และด้านสเลฟ T_{cs} ถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันของแรงและตำแหน่งเพื่อใช้ในการควบคุมระบบซึ่งเขียนให้อยู่ในรูปสมการ

$$T_{cm} = C_1 (F_e - F_m) \quad (4.6)$$

$$T_{cs} = C_2 (X_m - X_s) \quad (4.7)$$

สมการที่ (4.6) และ (4.7) แสดงสัญญาณควบคุมที่ใช้ควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ด้าน มาสเตอร์และสเลฟเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนควบคุมด้านมาสเตอร์และ gripper ด้านสเลฟ ตามลำดับ โดยใช้สัญญาณความคลาดเคลื่อนของแรง (force error) ในการควบคุมแรงบิดของ มอเตอร์ด้านมาสเตอร์ T_{cm} และใช้สัญญาณความคลาดเคลื่อนของตำแหน่ง (position error) ในการ ควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ด้านสเลฟ T_{cs} ทำให้ระบบแฮปติกมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ ระบบแสดงดังบล็อกไดอะแกรมของการควบคุมตามรูป 4.4

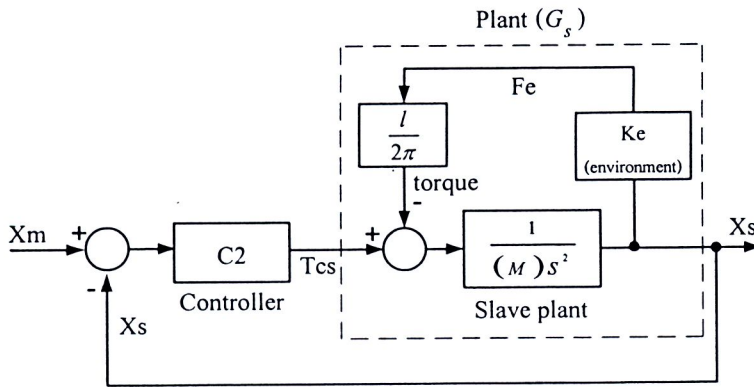


รูป 4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างการควบคุมของระบบ

ในการออกแบบตัวควบคุมเราต้องการให้ gripper สามารถเคลื่อนที่ตามการเคลื่อนไหว ของผู้ควบคุมที่ความถี่ไม่เกิน 10 เฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นค่าประมาณของขีดจำกัดของช่วงความถี่ (bandwidth) ของการเคลื่อนไหวของแขนมนุษย์ และออกแบบให้ผู้ควบคุมสามารถรับรู้ถึงแรงและ ตำแหน่งจากการสัมผัส (kinesthetic sensing) ในช่วงความถี่ไม่เกิน 20 เฮิร์ตซ์ [6] ซึ่งเป็น ค่าประมาณความถี่ที่มนุษย์จะรับรู้ผ่านการเคลื่อนไหวได้

4.3 การออกแบบตัวควบคุมด้านสเลฟ

จากรูปแบบการควบคุมตามสมการที่ (4.6) และ (4.7) ได้แยกการควบคุมอุปกรณ์แฮปติก ด้านสเลฟโดยใช้สัญญาณป้อนกลับ (feedback) เฉพาะตำแหน่งการเคลื่อนที่แสดงเป็น บล็อกไดอะแกรมได้ตามรูป 4.5



รูป 4.5 บล็อกไดอะแกรมสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของ gripper ของอุปกรณ์สเลฟ

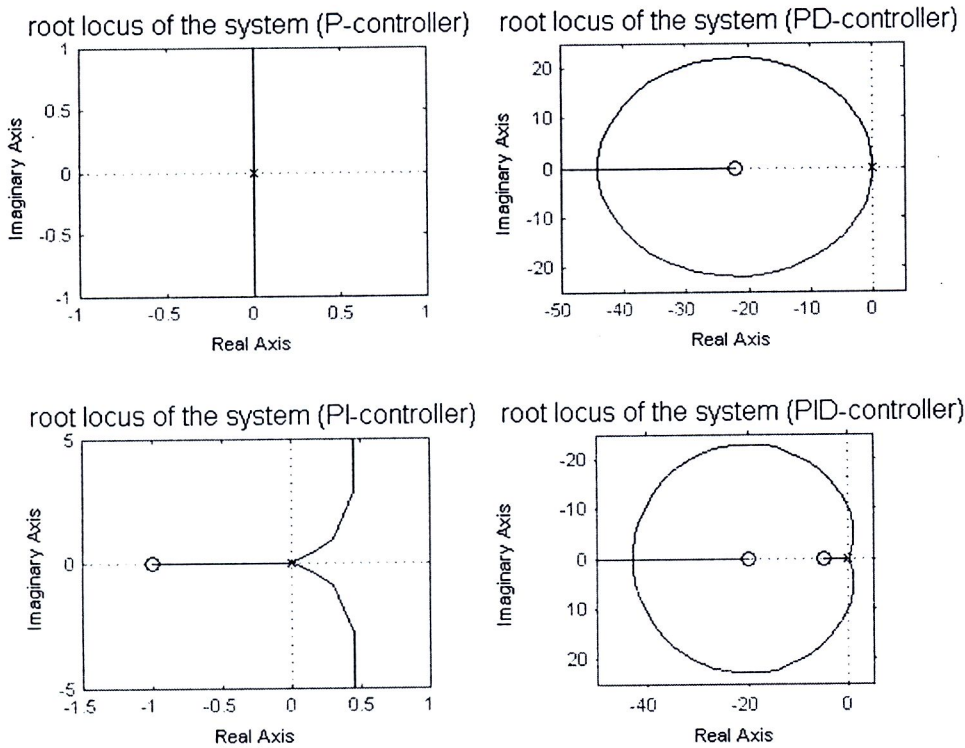
และสามารถหา transfer function ระหว่างตำแหน่งการเคลื่อนที่ของ gripper ของอุปกรณ์แฮปติกด้านสเลฟและแขนควบคุมการเคลื่อนที่ทางด้านมาสเตอร์เป็น

$$\frac{X_s(s)}{X_m(s)} = \frac{C_2 G_s(s)}{1 + C_2 G_s(s)} \quad (4.8)$$

โดยที่

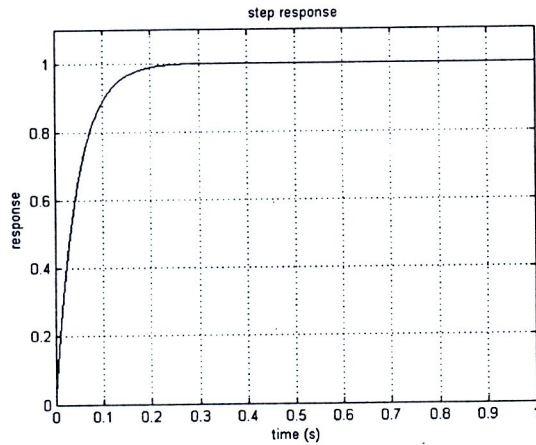
$$G_s(s) = \frac{1}{\left(\frac{J(2\pi)^2 + m_s l^2}{2\pi l} \right) s^2 + \left(\frac{l}{2\pi} \right) K_e}$$

สมการคุณลักษณะ(Characteristic equation) ของ transfer function ในสมการที่ (4.8) สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อออกแบบตัวควบคุมและตรวจสอบเสถียรภาพของระบบแฮปติกด้านสเลฟด้วยวิธี root locus โดยพิจารณาขณะที่ gripper ของอุปกรณ์แฮปติกด้านสเลฟถูกควบคุมให้เคลื่อนที่อย่างอิสระโดยไม่มีการสัมผัสกับวัตถุ $K_e = 0$ รูป 4.6 แสดง root locus ของระบบควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของ gripper เมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบต่าง ๆ

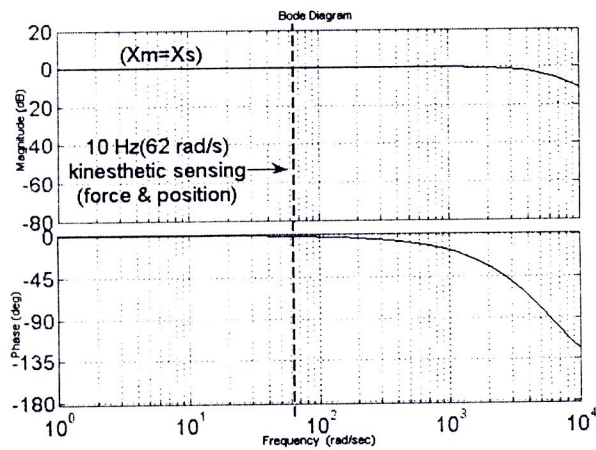


รูป 4.6 root locus ของตัวควบคุมแบบ P PD PI และ PID สำหรับด้านสเลฟ

จาก root locus บ่งบอกถึงความไม่เหมาะสมที่จะเลือกใช้ตัวควบคุมแบบ P PI และ PID เนื่องจากตัวควบคุมแบบ P จะทำให้ระบบมีผลการตอบสนองแบบ maginary stable สำหรับตัวควบคุมแบบ PI ก็จะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพและตัวควบคุมแบบ PID จะมีบางช่วงของเส้นทาง root locus อยู่ทางด้านขวาของแกนจินตภาพหากเราเลือกค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ไม่เหมาะสมก็จะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้เช่นกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ออกแบบตัวควบคุมด้านสเลฟเป็นตัวควบคุมแบบ PD โดยให้ผลการตอบสนองกรณีที่ไม่มีการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสม (rise time ประมาณ 0.1 วินาที และไม่มี overshoot) ซึ่งได้ตัวควบคุม $C_2 = 15(s + 22)$



รูป 4.7 ผลการตอบสนองต่อ step response ของตัวควบคุมแบบ PD ที่ใช้ควบคุมตำแหน่งด้านสเลฟ

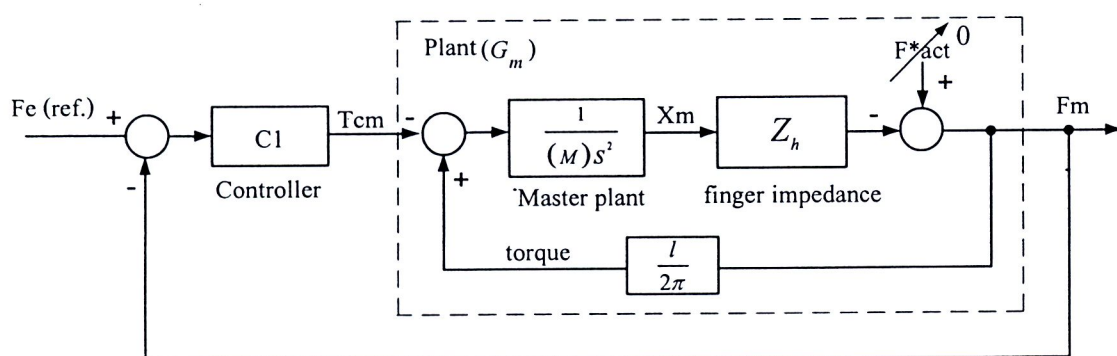


รูป 4.8 ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของตัวควบคุมที่ใช้ควบคุมตำแหน่งด้านสเลฟ

รูป 4.7 และ รูป 4.8 แสดงผลการตอบสนองต่อ step response และผลการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบเมื่อไม่มีการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมตามลำดับ ซึ่งบ่งบอกถึงผลการติดตามของตำแหน่งการเคลื่อนที่ระหว่างแขนควบคุมการเคลื่อนที่ทางด้านมาสเตอร์และ gripper ทางด้านสเลฟที่สามารถทำงานภายใต้ช่วงความถี่ตั้งแต่ 0 – 10 เฮิรตซ์ โดยตัวควบคุมแบบ PD ตามที่ระบบต้องการ

4.4 การออกแบบตัวควบคุมด้านมาสเตอร์

จากรูปแบบการควบคุมตามสมการที่ (4.6) และ (4.7) การควบคุมด้านมาสเตอร์ใช้สัญญาณป้อนกลับเฉพาะแรงเท่านั้น โดยมองปัญหาการออกแบบตัวควบคุมด้านมาสเตอร์เป็นแบบ force tracking โดยไม่คำนึงถึงพลวัต (dynamics) ของด้านสเลฟ รูป 4.9 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบด้านมาสเตอร์



รูป 4.9 บล็อกไดอะแกรมสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ด้านมาสเตอร์

จากบล็อกไดอะแกรมในรูป 4.9 สามารถหา transfer function ระหว่างแรงปฏิกิริยาของ gripper ทางด้านสเลฟที่สัมผัสกับวัตถุและแรงจากมือผู้ควบคุมเป็น

$$\frac{F_m(s)}{F_e(s)} = \frac{(G_m)C_1}{1 + (G_m)C_1} \quad (4.9)$$

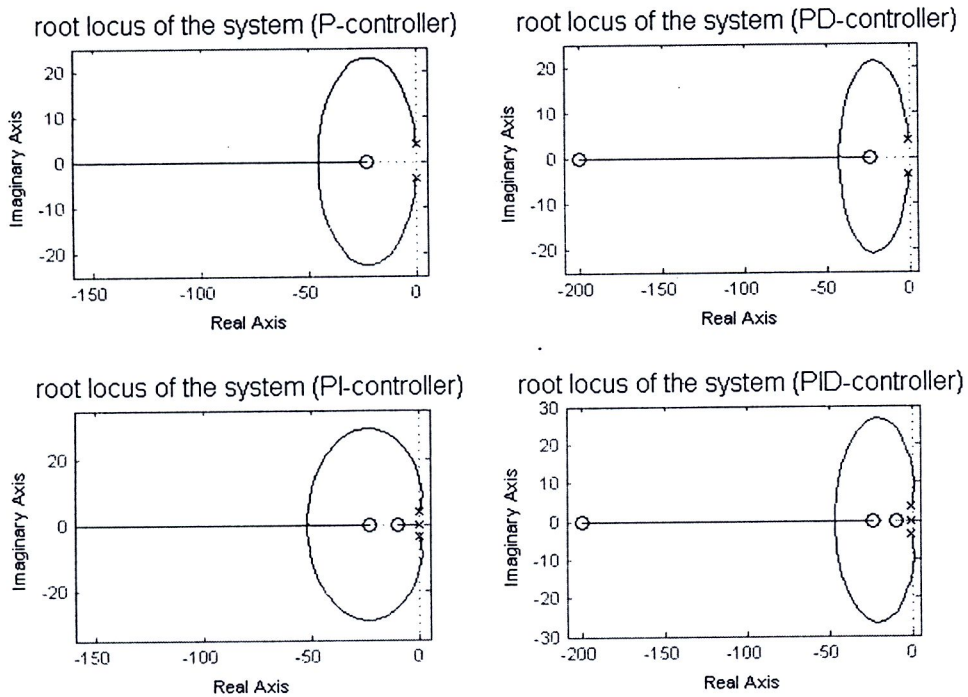
โดยที่

$$G_m(s) = \frac{Z_h}{Ms^2 + Z_h \left(\frac{l}{2\pi} \right)}$$

เมื่ออิมพีแดนซ์ของนิ้วมือ [22] มีค่า $Z_h = 0.00306s^2 + 4.32s + 98.9$

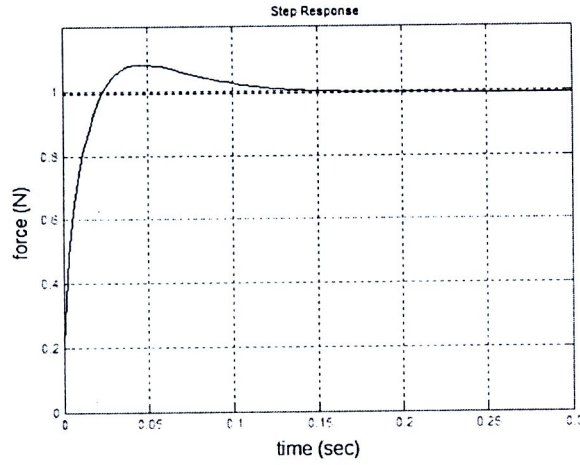
สมการคุณลักษณะ (Characteristic equation) ของ transfer function ในสมการที่ (4.9) สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อออกแบบตัวควบคุมและตรวจสอบเสถียรภาพของระบบแฮปติกด้าน

มาสเตอร์ด้วยวิธี root locus รูป 4.10 แสดง root locus ของระบบควบคุมแรงต้านมาสเตอร์เมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบต่าง ๆ

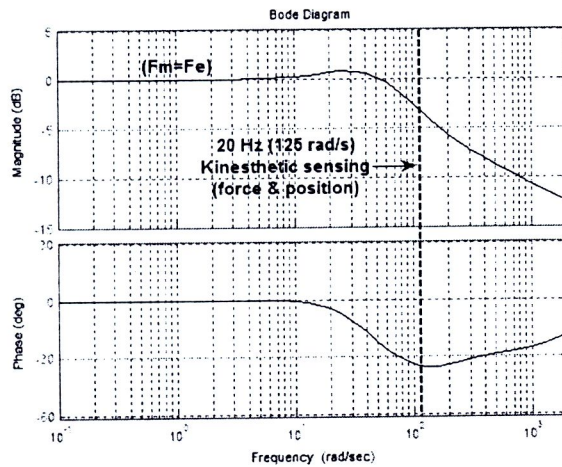


รูป 4.10 root locus ของตัวควบคุมแบบ P PD PI และ PID สำหรับด้านมาสเตอร์

ในการออกแบบตัวควบคุมทางด้านมาสเตอร์นั้นต้องการให้ระบบมีผลการตอบสนองที่รวดเร็ว เพื่อสร้างแรงป้อนกลับให้ผู้ควบคุมสามารถรับรู้ถึงแรงในการสัมผัสได้ทันทีขณะที่ gripper สัมผัสกับสิ่งแวดล้อม สำหรับงานวิจัยนี้ได้ออกแบบผลการตอบสนองของระบบที่ rise time ประมาณ 0.03 วินาที และต้องการให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) ภายในเวลาประมาณ 0.15 วินาที โดยออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี root locus ดังรูป 4.10 แสดง root locus ของระบบแสปติกด้านมาสเตอร์เมื่อใช้ออกแบบตัวควบคุมแบบ P PD PI และ PID พบว่าตัวควบคุม PI และ PID มีโพลเด่น (dominate pole) อยู่หนึ่งตำแหน่งบริเวณใกล้จุดกำเนิดทำให้ผลการตอบสนองของระบบช้าซึ่งไม่เหมาะที่จะนำมาใช้งาน ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบตัวควบคุมเป็นแบบ PD โดยออกแบบให้ $C_1 = 0.0005(s + 200)$ ซึ่งให้ผลการตอบสนองของระบบดังรูป 4.11 และรูป 4.12 ตามลำดับ



รูป 4.11 ผลการตอบสนองต่อ step response ของตัวควบคุมแบบ PD ที่ใช้ควบคุมด้านมาสเตอร์

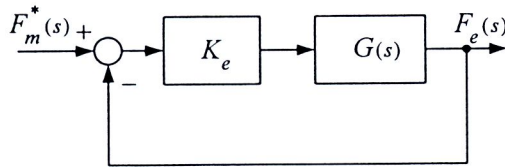


รูป 4.12 ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของตัวควบคุมแบบ PD ที่ใช้ควบคุมด้านมาสเตอร์

รูป 4.11 และรูป 4.12 แสดงผลการตอบสนองต่อ step response และผลการตอบสนองเชิงความถี่ของระบบตามลำดับ ซึ่งบ่งบอกถึงผู้ควบคุมสามารถรับรู้ถึงแรงสัมผัสผ่านการควบคุมแขนควบคุม การเคลื่อนที่ทางด้านมาสเตอร์ขณะที่ gripper มีการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม โดยตัวควบคุมสามารถทำให้ระบบทำงานภายใต้ช่วงความถี่ตั้งแต่ 0 – 20 เฮิร์ตซ์ ตามที่ระบบต้องการ

4.5 เสถียรภาพและสมรรถนะของระบบ

ในความเป็นจริงการควบคุมระบบแอสเปติกอินเตอร์เฟสเป็นการควบคุมแบบสองทาง (bilateral control) ซึ่งพลวัตของระบบทางด้านมาสเตอร์และสเลฟไม่สามารถแยกกันได้เมื่อพิจารณาขณะที่ gripper มีการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงต้องพิจารณาผลกระทบที่เกิดจากค่าความแข็งของสิ่งแวดล้อม K_e ซึ่งมีผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ เราสามารถตรวจสอบหาขอบเขตของเสถียรภาพได้จากสมการคุณลักษณะของ transfer function ของระบบแอสเปติกตามรูป 4.13



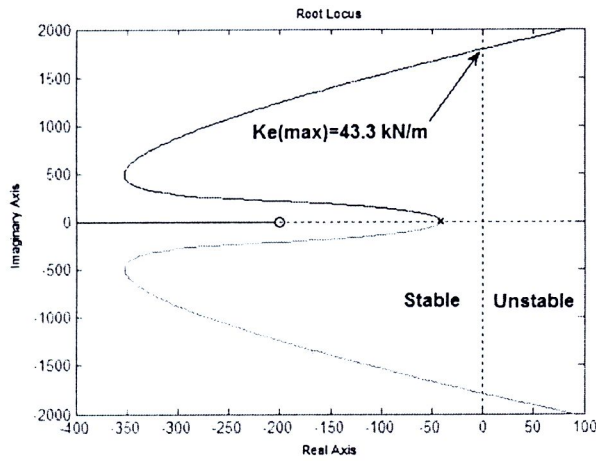
รูป 4.13 บล็อกไดอะแกรมของระบบแอสเปติกสำหรับตรวจสอบเสถียรภาพระบบจากผลกระทบของความแข็งของสิ่งแวดล้อม

จากรูป 4.13 สามารถหา transfer function ของระบบแอสเปติกได้ตามสมการที่ 4.10

$$\frac{F_e(s)}{F_m^*(s)} = \frac{(K_e)G(s)}{1 + (K_e)G(s)} \quad (4.10)$$

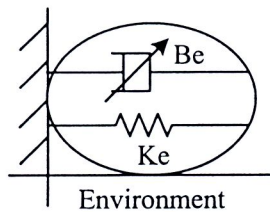
$$\text{โดยที่ } G(s) = \frac{0.1447s^2 + (3.281 \times 10^5)s + 6.559 \times 10^7}{s^4 + (4567)s^3 + (4.091 \times 10^6)s^2 + (3.171 \times 10^8)s + 6.478 \times 10^9}$$

สมการคุณลักษณะของ transfer function สมการที่ (4.10) ของระบบแอสเปติกอินเตอร์เฟสคือ $1 + (K_e)G(s) = 0$ เสถียรภาพของระบบสามารถวิเคราะห์โดยวิธี root locus เมื่อ $K_e = 0$ และปรับค่าเพิ่มขึ้นไปจนถึงค่าอนันต์ $K_e = \infty$ พบว่าระบบจะเริ่มขาดเสถียรภาพที่ค่าความแข็งของวัตถุมีค่ามากกว่า 43.3 กิโลนิวตัน/เมตร ดังแสดงในรูป 4.14

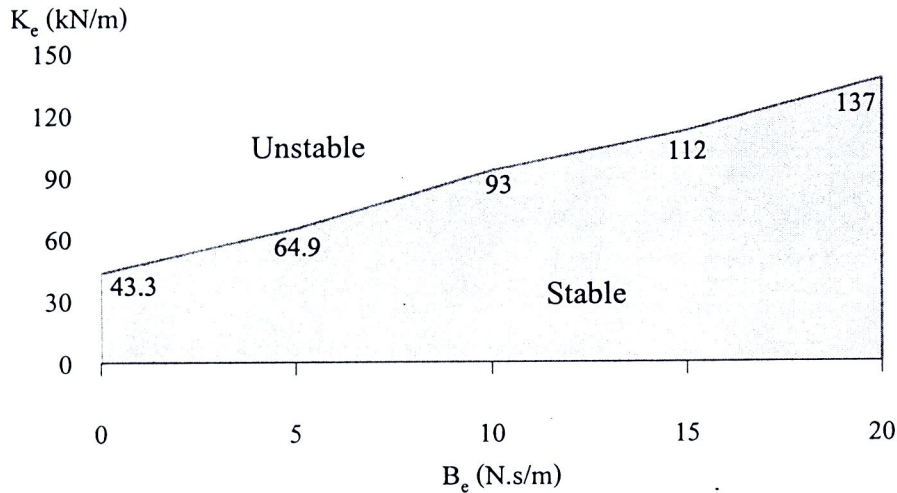


รูป 4.14 ขอบเขตของเสถียรภาพของระบบเนื่องจากค่าความแข็งของสิ่งแวดล้อม K_e (N/m)

พิจารณาผลกระทบจากความแข็งของวัตถุต่อเสถียรภาพของระบบสำหรับตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 4.3 และหัวข้อที่ 4.4 เมื่อวัตถุหรือสิ่งแวดล้อมถูกพิจารณาให้มีแบบจำลองเป็นสปริงและตัวหน่วง ดังรูป 4.15



รูป 4.15 แบบจำลองของสิ่งแวดล้อมที่ประกอบด้วยสปริงและตัวหน่วง



รูป 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง B_e และ K_e ของวัตถุที่มีผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ

จากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบพบว่า ค่าความหน่วงมีผลกระทบต่อเสถียรภาพคือ เมื่อค่าสัมประสิทธิ์ของตัวหน่วงมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ขอบเขตของเสถียรภาพของระบบกว้างขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในรูป 4.16 อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัตินั้นเราไม่สามารถควบคุมคุณสมบัติของสิ่งแวดลอมที่จะทดสอบได้ ดังนั้นระบบจึงต้องการการควบคุมที่มีความซับซ้อนมากขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาขอบเขตเสถียรภาพ

4.6 การควบคุมแบบ Time-Domain Passivity Control

การควบคุมตามหลักการ passivity control เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถปรับปรุงเสถียรภาพของระบบได้ B.Hannaford ได้นำเสนอวิธีการเชิงพลังงานนี้มาใช้ในระบบแฮดติกในปี ค.ศ.2002 ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถใช้ได้กับระบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น (non-linear system) ได้ นอกจากนั้นยังไม่จำเป็นต้องทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ โดยทั่วไปหลักการควบคุม Passivity นั้น เหมาะสมสำหรับนำมาใช้งานกับระบบที่มีความซับซ้อน เช่น วงจรไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อกับระบบย่อยหลายระบบ

4.6.1 คุณสมบัติ passive ของระบบ

คุณสมบัติ passive ของระบบนั้นอ้างอิงกับพลังงานสุทธิ (net energy) ที่ไหลเข้าหรือออกจากระบบ โดยมีการกำหนดให้พลังงานมีค่าเป็นบวกเมื่อพลังงานเข้าสู่ระบบและเป็นลบเมื่อพลังงานออกจากระบบ ระบบที่มีคุณสมบัติเป็น passive นั้นพลังงานรวมจะไหลเข้าสู่ระบบซึ่งหมายถึงระบบ dissipate energy ในทางกลับกันหากพลังงานไหลออกจากระบบซึ่งหมายถึงระบบ

generate energy ระบบจะไม่มีคุณสมบัติเป็น passive สามารถพิจารณาพลังงานที่ผ่านจุดเข้าออก ระบบตามสมการดังนี้

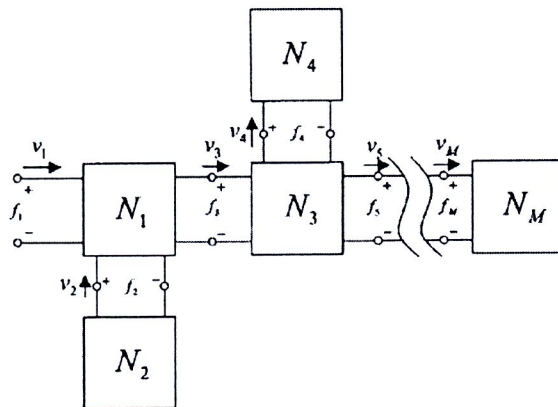
$$\int_0^t f(\tau)v(\tau)d\tau + E(0) \geq 0, \quad \forall t \geq 0 \quad (4.11)$$

โดยพลังงานที่ไหลเข้าหรือออกระบบสามารถคำนวณได้จากแรง $f(\tau)$ และความเร็ว $v(\tau)$ ที่กระทำกับระบบที่เวลา τ ในพจน์แรกของสมการที่ (4.11) แสดงถึงพลังงานที่เกิดขึ้นของระบบ ตั้งแต่เวลาเท่ากับศูนย์จนถึงเวลา t เมื่อพิจารณาเป็นระบบเวลาต่อเนื่อง (continuous time) โดยที่ $E(0)$ คือพลังงานเริ่มต้นของระบบซึ่งกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์ อย่างไรก็ตามในระบบจริงที่ใช้ในการทดสอบการวัดค่าพลังงานเพื่อนำมาประมวลผลจะเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง (discrete time) ซึ่งสามารถเขียนสมการของพลังงานสุทธิ $E_{obsv}(n)$ ของระบบจากสมการที่ (4.11) ได้ในรูป

$$E_{obsv}(n) = \Delta T \sum_{k=0}^n f(k)\dot{x}(k) \quad (4.12)$$

ในการสังเกตค่า $E_{obsv}(n)$ ในสมการ (4.12) ถูกเรียกว่า Passivity Observer (PO)

พิจารณาตัวอย่างระบบเครือข่ายที่มีระบบย่อยจำนวน M ระบบดังรูป 4.17



รูป 4.17 ตัวอย่างของระบบเครือข่าย N ที่ประกอบด้วยระบบย่อยจำนวน M ระบบ (ที่มา : B.Hannaford ค.ศ. 2002)

จากรูปค่าพลังงานที่ผ่านเข้าออกแต่ละระบบสามารถหาได้ดังนี้

$$E_{N_1}(n) = \Delta T \sum_{k=0}^n [f_1(k)v_1(k) + f_2(k)v_2(k) - f_3(k)v_3(k)]$$

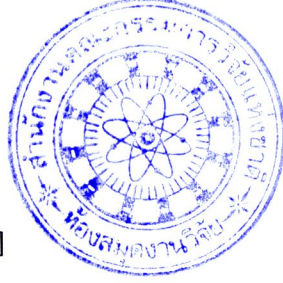
$$E_{N_2}(n) = -\Delta T \sum_{k=0}^n f_2(k)v_2(k)$$

$$E_{N_3}(n) = \Delta T \sum_{k=0}^n [f_3(k)v_3(k) - f_4(k)v_4(k) - f_5(k)v_5(k)]$$

$$E_{N_4}(n) = \Delta T \sum_{k=0}^n f_4(k)v_4(k)$$

...

$$E_{N_M}(n) = \Delta T \sum_{k=0}^n f_M(k)v_M(k)$$



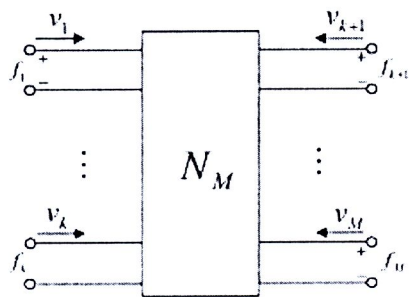
โดยค่าพลังงานรวมคือ

$$E_{obsv}(n) = E_{N_1}(n) + E_{N_2}(n) + E_{N_3}(n) + E_{N_4}(n) + \dots + E_{N_M}(n) \quad (4.13)$$

$$E_{obsv}(n) = \Delta T \sum_{k=0}^n [f_1(k)v_1(k)] \quad (4.14)$$

จากสมการที่ (4.14) จะเห็นว่าค่าพลังงานรวมของระบบมีค่าเท่ากับพลังงานที่ไหลเข้าออกจุดของระบบที่เปิดสู่ภายนอก (opened end) ที่ระบบย่อย N_1 ดังนั้น passivity ของระบบสามารถสังเกตได้ที่ระบบย่อย N_1

สำหรับตัวอย่างระบบที่มี open port จำนวน M-port ดังรูป 4.18



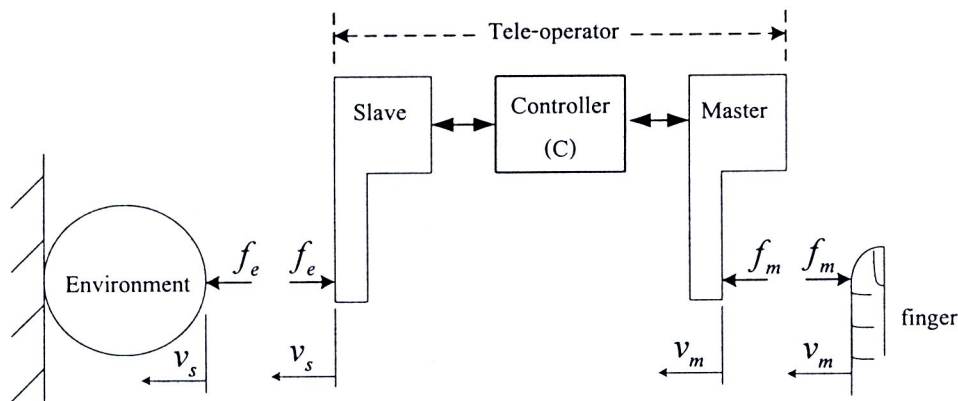
รูป 4.18 ตัวอย่างของระบบ M-port network (ที่มา : B.Hannaford ค.ศ.2004)

จากสมการ (4.11) หรือ (4.12) จะสามารถคำนวณค่า PO ของระบบเป็น

$$E_{obsv}(n) = \Delta T \sum_{k=0}^n [f_1(k)v_1(k) + \dots + f_M(k)v_M(k)] \tag{4.15}$$

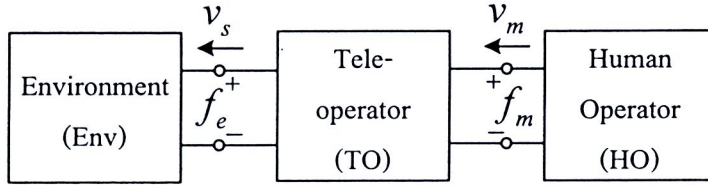
4.6.2 แบบจำลอง 2-port network ของระบบแฮปติก

พิจารณาระบบแฮปติกในรูป 4.19 เมื่อผู้ควบคุมทำการควบคุมระบบแฮปติกให้ gripper เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมจะเกิดแรงปฏิกิริยา f_m , f_e และความเร็ว v_m , v_s ทางด้าน มาสเตอร์และสเลฟตามลำดับ



รูป 4.19 แผนผังวัตถุอิสระแสดงทิศทางของแรงปฏิกิริยาและความเร็วของระบบแฮปติก

โดยรูป 4.19 สามารถเขียนแบบจำลอง 2-port network ของระบบแฮปติกได้ตามรูป 4.20

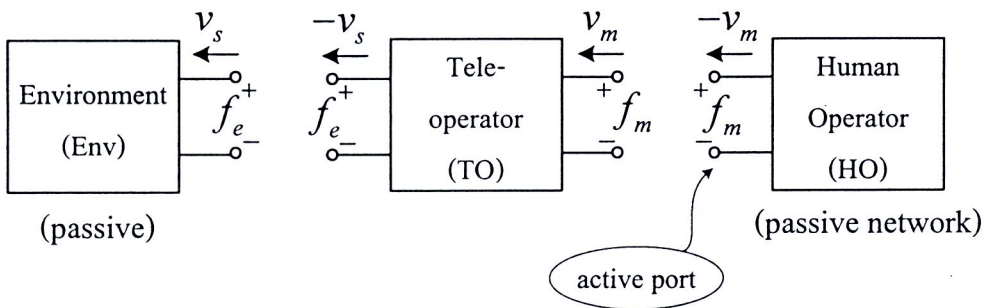


รูป 4.20 ระบบแฮปติกในลักษณะ 2-port network

รูป 4.20 แสดงระบบแฮปติกในลักษณะ 2-port network โดยระบบถูกพิจารณาให้ประกอบด้วยระบบย่อย 3 ระบบคือ ระบบของสิ่งแวดล้อม ระบบในส่วนของ Tele-operator และระบบของผู้ควบคุมตามลำดับ ซึ่งสามารถวิเคราะห์การไหลเข้าหรือออกของพลังงานในแต่ละส่วนเพื่อตรวจสอบเสถียรภาพของระบบได้

4.6.3 เงื่อนไขเสถียรภาพเชิง Passivity

ในระบบแฮปติกอินเตอร์เฟสโดยทั่วไปนั้นสิ่งแวดล้อมและมือของผู้ควบคุมถูกพิจารณาให้มีคุณสมบัติเป็น passive ดังนั้นเราสามารถตรวจสอบเสถียรภาพของระบบแฮปติกได้โดยมีเงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอสำหรับเสถียรภาพคือ ระบบจะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อระบบในส่วนของ Tele-operator มีคุณสมบัติเป็น passive [3, 9]



รูป 4.21 ระบบ Tele-operator ในลักษณะ 2-port network

จากรูป 4.21 ค่า PO ของระบบ Tele-operator สามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned}
 E_{obsv}(t) &= \int_0^t f_m(\tau) v_m(\tau) d\tau - \int_0^t f_e(\tau) v_s(\tau) d\tau \\
 &= \int_0^{t-\Delta t} f_m(\tau) v_m(\tau) d\tau + \int_{t-\Delta t}^t f_m(\tau) v_m(\tau) d\tau - \int_0^{t-\Delta t} f_e(\tau) v_s(\tau) d\tau - \int_{t-\Delta t}^t f_e(\tau) v_s(\tau) d\tau
 \end{aligned}$$

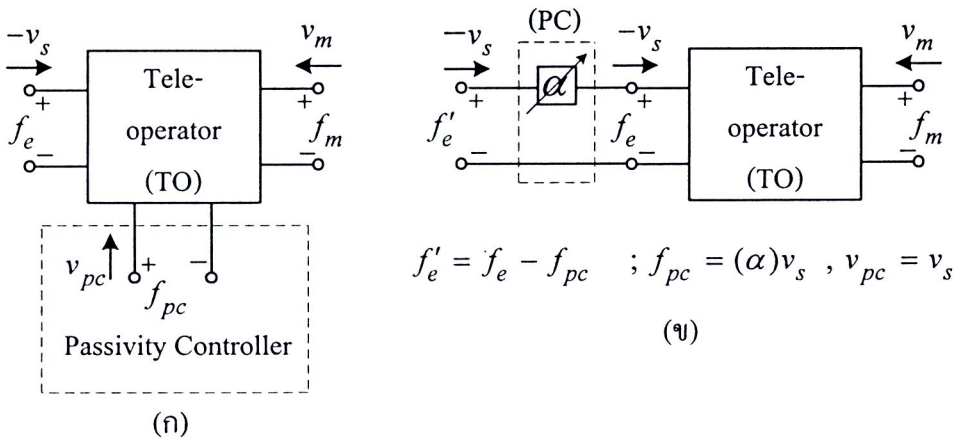
$$E_{obsv}(n) = E_{obsv}(n-1) + f_m(n) v_m(n) \Delta T - f_e(n) v_s(n) \Delta T \quad (4.16)$$

จากสมการที่ (4.16) ค่า $E_{obsv}(n)$ สามารถวัดได้จากการทดสอบในเวลาจริง (real-time) ถ้า $E_{obsv}(n) \geq 0$ ระบบจะมีคุณสมบัติเป็น passive ซึ่งสามารถระบุได้ว่าระบบแฮปติกมีเสถียรภาพ

4.6.4 ตัวควบคุม Passivity

ในบางกรณี เช่น เมื่อผู้ควบคุมทำการควบคุมระบบแฮปติกให้ gripper เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับวัตถุแข็งเกร็งทำให้ค่า $E_{obsv}(n) < 0$ ระบบจะไม่มีคุณสมบัติเป็น passive แต่จะ generate energy ในปริมาณเท่ากับ $-E_{obsv}(n)$ ซึ่งหมายถึงระบบแฮปติกจะไม่มีเสถียรภาพ ดังนั้นจะต้องเพิ่มตัวควบคุมให้กับระบบเพื่อทำหน้าที่ dissipate energy ในปริมาณที่เท่ากับระบบได้สร้างพลังงานออกมา โดยตัวควบคุมนี้เรียกว่า Passivity Controller (PC) และมีการเชื่อมต่อเข้ากับระบบดังรูป

4.22



รูป 4.22 Passivity controller สำหรับระบบ Tele-operator

รูป 4.22 (ก) แสดงการเพิ่มตัวควบคุม passivity ให้กับระบบ ซึ่งมีลักษณะเป็น virtual port โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวควบคุม passivity ทำการควบคุมทางด้านสเลฟ เมื่อ f_{pc} คือแรงที่เกิดจากตัวควบคุม passivity และความเร็ว v_{pc} มีค่าเท่ากับความเร็วของ gripper ด้านสเลฟ v_s โดยแรงที่เกิดจากตัวควบคุม passivity จะมีขนาดเปลี่ยนแปลงไปตามค่า α ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของตัวหน่วงที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าตามพลังงานที่ระบบสร้างขึ้นมาเมื่อระบบไม่มีคุณสมบัติเป็น passive สามารถเขียนให้อยู่ในลักษณะ 2-port network ดังรูป 4.22 (ข) โดยที่ f_e' คือแรงที่ถูกปรับปรุงโดยตัวควบคุม passivity ที่ใช้สำหรับควบคุมมอเตอร์ด้านสเลฟและสามารถหาค่า PO ของระบบได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 E_{obsv}(t) &= \int_0^t f_m(\tau) v_m(\tau) d\tau - \int_0^t f_e(\tau) v_s(\tau) d\tau + \int_0^t f_{pc}(\tau) v_s(\tau) d\tau \quad , \quad f_{pc} = (\alpha) v_s \quad , \quad v_{pc} = v_s \\
 &= \int_0^t f_m(\tau) v_m(\tau) d\tau + \int_0^t (f_{pc}(\tau) - f_e(\tau)) v_s(\tau) d\tau \quad , \quad -f_e' = f_{pc} - f_e \\
 &= \int_0^{t-\Delta t} f_m(\tau) v_m(\tau) d\tau + \int_{t-\Delta t}^t f_m(\tau) v_m(\tau) d\tau \\
 &\quad - \int_0^{t-\Delta t} f_e(\tau) v_s(\tau) d\tau - \int_{t-\Delta t}^t f_e(\tau) v_s(\tau) d\tau \\
 &\quad + \int_0^{t-\Delta t} \alpha(\tau) v_s^2(\tau) d\tau + \int_{t-\Delta t}^t \alpha(\tau) v_s^2(\tau) d\tau \\
 E_{obsv}(n) &= E_{obsv}(n-1) + f_m(n) v_m(n) \Delta T - f_e(n) v_s(n) \Delta T + \alpha(n-1) v_s^2(n-1) \Delta T \quad (4.17)
 \end{aligned}$$

โดยที่ Passivity controller มีเงื่อนไขการทำงานดังนี้

$$\alpha(n) = -\frac{E_{obsv}(n)}{v_s^2(n) \Delta T} \quad \text{เมื่อ } E_{obsv}(n) < 0$$

$$\alpha(n) = 0 \quad \text{เมื่อ } E_{obsv}(n) \geq 0$$

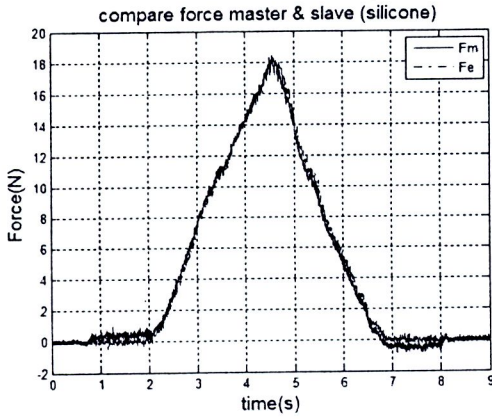
โดยตัวควบคุมจะทำงานเมื่อระบบไม่มีคุณสมบัติเป็น passive หรือขณะที่ค่า PO ของระบบมีค่าน้อยกว่าศูนย์ แรงที่เกิดจากตัวควบคุม passivity จะมีขนาดเปลี่ยนแปลงไปตามค่า α ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของตัวหน่วงที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าตามค่าพลังงานที่ระบบสร้างขึ้นขนาด

เท่ากับ $-E_{obsv}(n)$ โดยแรงที่เกิดจากตัวควบคุมจะควบคุมให้ระบบมีค่า $E_{obsv}(n)=0$ ซึ่งทำให้ระบบมีเสถียรภาพ

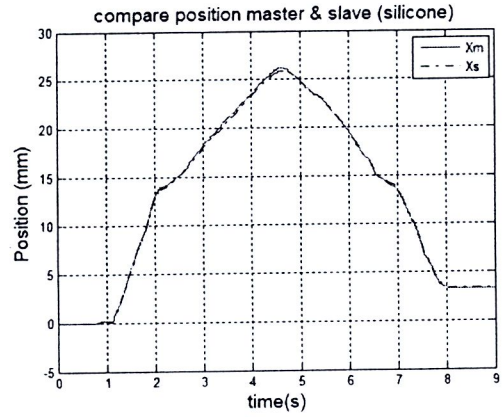
4.7 การทดสอบกับแท่นทดสอบ

ในการทดสอบระบบแอสปติกที่ได้ออกแบบและควบคุมนั้นประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ๆ ในส่วนแรกเป็นการทดสอบระบบโดยทดสอบกับสิ่งแวดล้อม 2 ชนิด คือ วัตถุอ่อนตัวประเภทซิลิโคนซึ่งมีค่าความแข็งต่ำ และก้อนโลหะซึ่งมีค่าความแข็งสูงมากถูกสมมุติให้เป็นวัตถุแข็งเกร็ง โดยการทดสอบในส่วนแรกนี้มีจุดประสงค์เพื่อดูพฤติกรรมของผลการตอบสนองและตรวจสอบค่า PO ของระบบเมื่อระบบไม่มีการควบคุม passivity ส่วนที่สองเป็นการทดสอบระบบกับวัตถุอ่อนตัวประเภทซิลิโคนและก้อนโลหะเพื่อดูผลการตอบสนองของระบบเมื่อระบบมีการควบคุม passivity และการทดสอบในส่วนที่สามเป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบสมรรถนะของระบบ โดยทดสอบระบบแอสปติกกับสปริงตัวอย่างที่มีค่าความแข็งต่างกันจำนวน 10 ค่าเมื่อระบบไม่ใช้การควบคุม passivity และใช้การควบคุม passivity ตามลำดับ ซึ่งให้ผลการทดสอบดังนี้

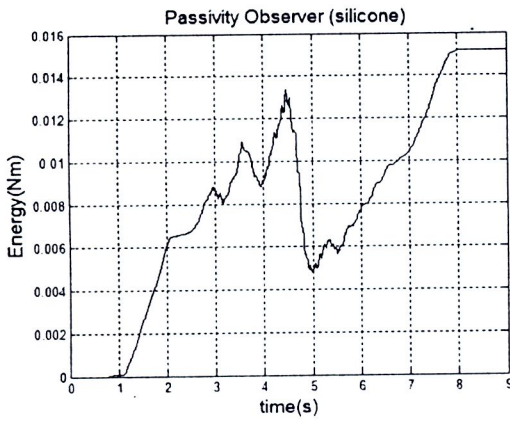
สำหรับในส่วนแรกได้ทดสอบระบบแอสปติกกับวัตถุอ่อนตัวประเภทซิลิโคน โดยที่ตัวควบคุม passivity ไม่ทำงานเพื่อดูผลการตอบสนองและตรวจสอบค่า PO ของระบบ ซึ่งให้ผลการทดสอบตามรูป 4.23



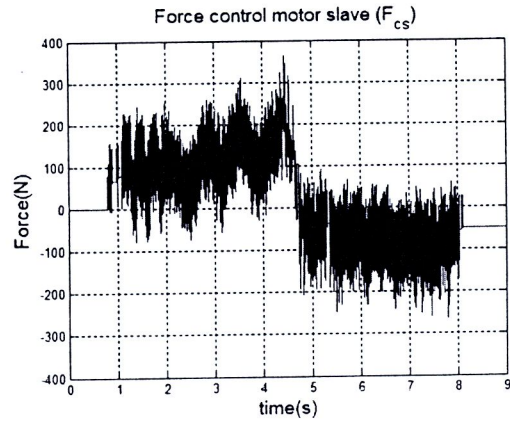
(ก)



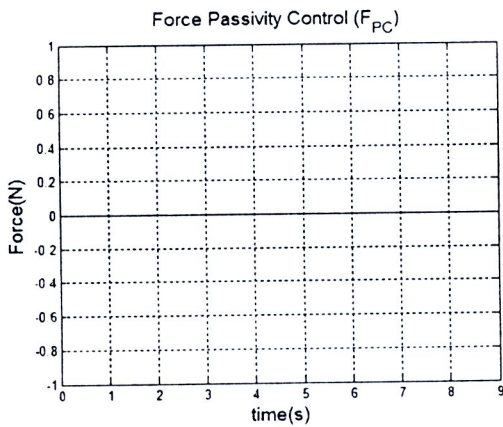
(ข)



(ค)



(ง)

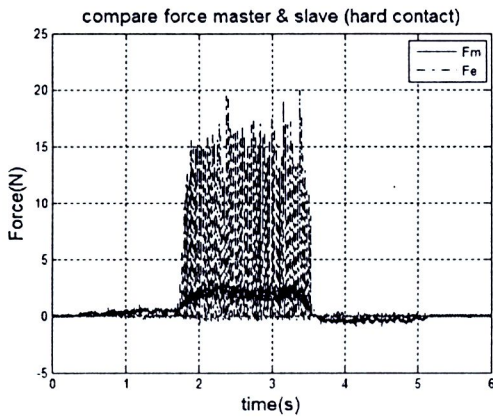


(จ)

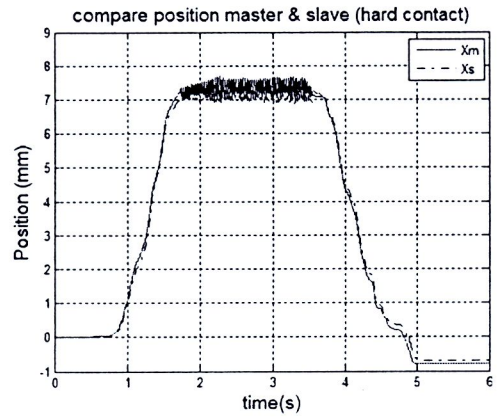
รูป 4.23 ผลการทดสอบกรณีทดสอบระบบกับวัตถุประเภทซิลิโคนเมื่อไม่ใช้ PC (ก) ผลการติดตามของสัญญาณแรง (ข) ผลการติดตามของสัญญาณตำแหน่ง (ค) ค่า PO ของระบบ (ง) สัญญาณควบคุมมอเตอร์ด้านสเลฟ (จ) สัญญาณควบคุม passivity (PC)

จากผลการทดสอบให้ผลที่สอดคล้องกับทฤษฎีคือ เมื่อนำวัตถุประเภทซิลิโคนซึ่งเป็นวัตถุที่มีความอ่อนตัวมาทดสอบ ผลการตอบสนองของระบบขณะที่มีการสัมผัสกับวัตถุอ่อนตัวแสดงดังรูป 4.23 โดยรูป 4.23 (ก) แสดงผลการติดตามของสัญญาณแรงและรูป 4.23 (ข) แสดงผลการติดตามของสัญญาณตำแหน่งระหว่างด้านมาสเตอร์และสเลฟตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าที่เวลาวินาทีที่ 2 เป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงจากการเคลื่อนที่อย่างอิสระเป็นการสัมผัสกับวัตถุอ่อนตัวจนถึงเวลา วินาทีที่ 7 ในช่วงเวลาดังกล่าวค่า PO ของระบบมีค่ามากกว่าศูนย์ดังแสดงในรูป 4.23 (ค) บ่งบอกถึงระบบมีเสถียรภาพ โดยมีสัญญาณควบคุมมอเตอร์ด้านสเลฟดังรูป 4.23 (ง) และระบบไม่ใช้การควบคุม passivity แสดงดังรูป 4.23 (จ) ทำให้สัญญาณของแรงและตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนควบคุมและ gripper ทางด้านสเลฟสามารถติดตามกันได้อย่างมีเสถียรภาพ ดังนั้นขณะที่ผู้ควบคุมทำการควบคุมแขนควบคุมการเคลื่อนที่ทางด้านมาสเตอร์ทำให้ gripper ทางด้านสเลฟเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับวัตถุจึงทำให้ผู้ควบคุมสามารถรู้สึกถึงแรงด้านเหมือนได้สัมผัสกับวัตถุนั้นด้วยตนเองผ่านการควบคุมอุปกรณ์แฮปติกได้

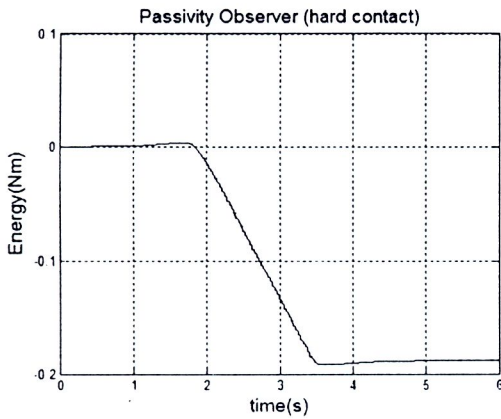
ต่อมาเป็นการทดสอบระบบแฮปติกกับวัตถุแข็งเกร็งโดยใช้ก้อนโลหะขนาด 2x5x6 ลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับทดสอบระบบ โดยตัวควบคุม passivity ไม่ทำงานเพื่อดูผลการตอบสนองและตรวจสอบค่า PO ของระบบ ซึ่งให้ผลการทดสอบตามรูป 4.24



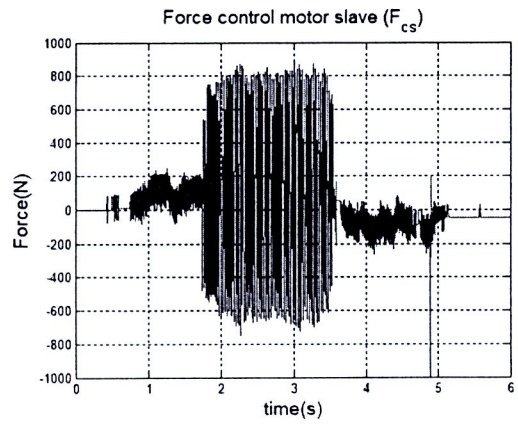
(ก)



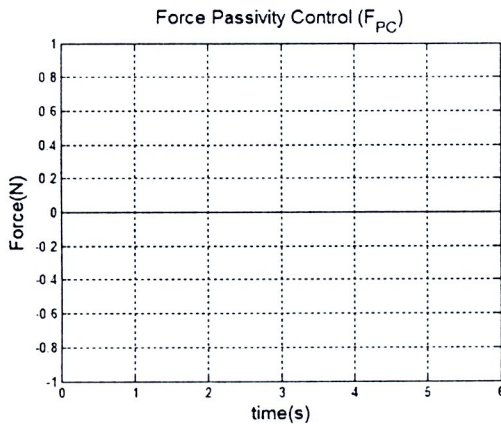
(ข)



(ค)

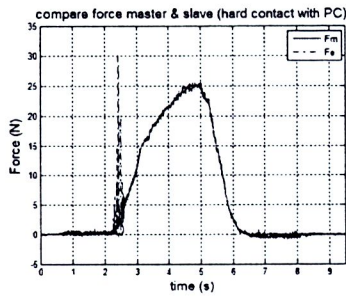


(ง)

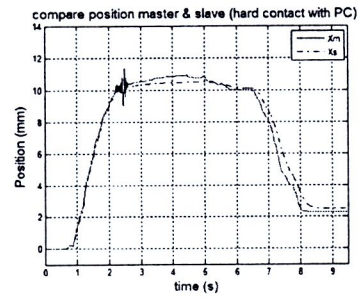


(จ)

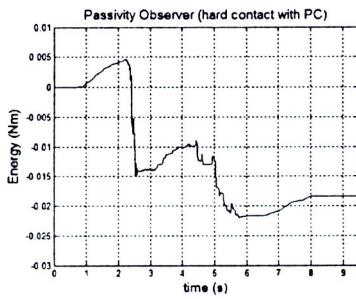
รูป 4.24 ผลการทดสอบกรณีทดสอบระบบกับวัตถุแข็งเกร็งเมื่อไม่ใช้ PC (ก) ผลการติดตามของสัญญาณแรง (ข) ผลการติดตามของสัญญาณตำแหน่ง (ค) ค่า PO ของระบบ (ง) สัญญาณควบคุมมอเตอร์ด้านสเลฟ (จ) สัญญาณควบคุม passivity (PC)



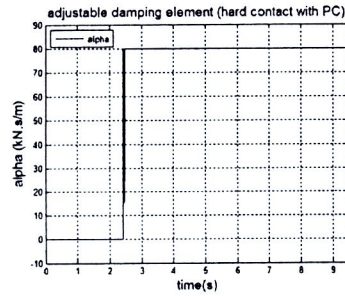
(ก)



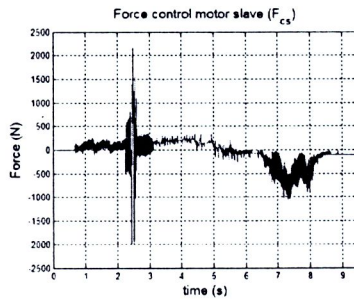
(ง)



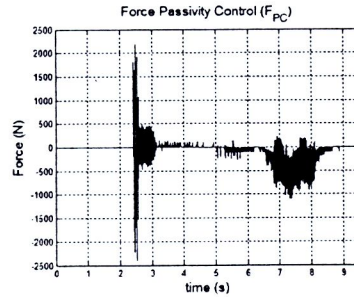
(ค)



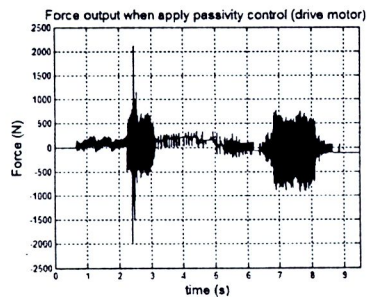
(จ)



(ข)

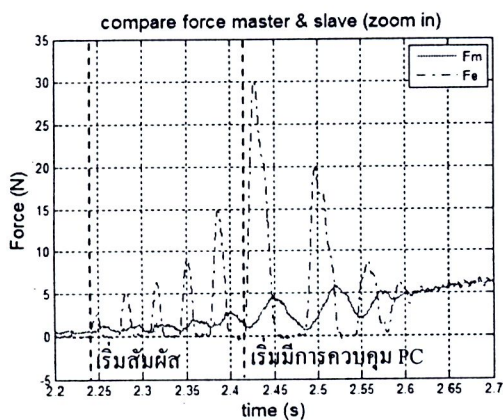


(ฉ)

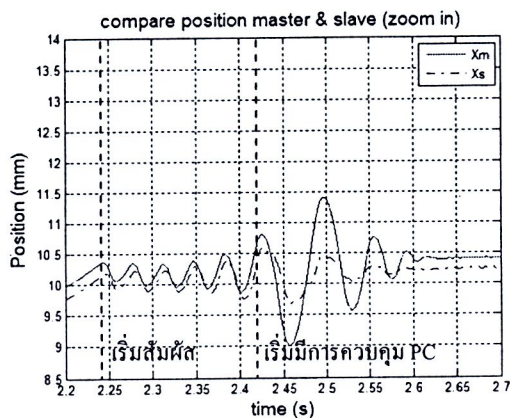


(ซ)

รูป 4.26 ผลการทดสอบกรณีทดสอบระบบกับวัตถุแข็งเกร็งเมื่อใช้ PC (ก) ผลการติดตามของสัญญาณแรง (ข) ผลการติดตามของสัญญาณตำแหน่ง (ค) ค่า PO ของระบบ (ง) ค่าตัวหน่วงของตัวควบคุม passivity (จ) สัญญาณควบคุมมอเตอร์ด้านสเลฟ (ฉ) สัญญาณควบคุมจากตัวควบคุม passivity (PC) (ซ) สัญญาณควบคุมเอาต์พุตสำหรับควบคุมมอเตอร์ด้านสเลฟ



(ก)



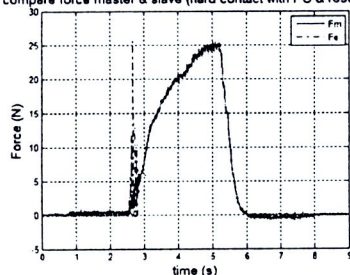
(ข)

รูป 4.27 ผลการติดตามของสัญญาณแรงและตำแหน่งการเคลื่อนที่ขยายในช่วงเวลาวินาทีที่ 2.2 ถึงวินาทีที่ 2.7 กรณีทดสอบกับวัตถุแข็งเกร็งเมื่อใช้ PC

รูป 4.26 แสดงผลการตอบสนองของระบบกรณีทดสอบระบบกับวัตถุแข็งเกร็งเมื่อใช้ตัวควบคุม passivity โดยรูป 4.26 (ก) แสดงผลการติดตามของสัญญาณแรงและรูป 4.26 (ข) แสดงผลการติดตามของสัญญาณตำแหน่งระหว่างด้านมาสเตอร์และสเลฟ รูป 4.26 (ค) แสดงค่า PO ของระบบ รูป 4.26 (ง) แสดงค่าตัวหน่วงของตัวควบคุม passivity ซึ่งในทางปฏิบัติออกแบบให้ถูกจำกัดค่าสูงสุดที่ไว้ที่ 80,000 นิวตัน-วินาทีต่อเมตร เนื่องจากขณะที่ gripper สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมความเร็วของ gripper มีค่าเข้าสู่ศูนย์ทำให้ค่าตัวหน่วงของตัวควบคุม passivity ที่พิจารณาได้จากสมการที่ 4.17 มีค่าเข้าสู่อนันต์ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ รูป 4.26 (จ) แสดงสัญญาณควบคุมมอเตอร์ด้านสเลฟ รูป 4.26 (ฉ) แสดงสัญญาณควบคุมจาก passivity (PC) และรูป 4.26 (ช) แสดงสัญญาณควบคุมเอาต์พุตสำหรับควบคุมมอเตอร์ด้านสเลฟ รูป 4.27 แสดงผลการติดตามของสัญญาณแรงและตำแหน่งการเคลื่อนที่ขยายในช่วงเวลาวินาทีที่ 2.2 ถึงวินาทีที่ 2.7 ตามลำดับ โดยระบบแฮปติกได้ถูกผู้ควบคุมทำการควบคุมแขนควบคุมทางด้านมาสเตอร์ทำให้ gripper ทางด้านสเลฟเริ่มมีการเคลื่อนที่ตามตั้งแต่เวลาวินาทีที่ 0.8 ไปจนถึงวินาทีที่ 2.24 โดยไม่มีการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม ในช่วงนี้ค่า PO มีค่ามากกว่าศูนย์บ่งบอกว่าระบบยังคงมีเสถียรภาพ หลังจากนั้น gripper เริ่มมีการสัมผัสกับวัตถุแข็งเกร็งทำให้ gripper เกิดการสั่นและค่า PO เริ่มมีค่าลดลงจนกระทั่งเวลาวินาทีที่ 2.43 ค่า PO เริ่มมีค่าน้อยกว่าศูนย์แสดงดังรูป 4.26 (ค) ทำให้ตัวควบคุม passivity เริ่มทำงานดังรูป 4.26 (ฉ) โดยสัญญาณควบคุมมีการแกว่งในช่วงเริ่มต้นและมีขนาดลดลงจนกระทั่งระบบเริ่มเข้าสู่เสถียรภาพในวินาทีที่ 2.6 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการทำงานของระบบ

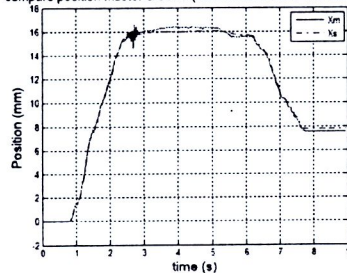
ยังไม่สมบูรณ์เนื่องจากตัวควบคุม passivity ไม่ได้ทำงานโดยทันทีเมื่อ gripper เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับวัตถุ นอกจากนั้นในวินาทีที่ 6.5 พบว่า gripper ถูกควบคุมให้ไม่มีการสัมผัสกับวัตถุแต่ตัวควบคุม passivity ยังคงทำงานอยู่ ซึ่งมีผลกระทบทำให้การติดตามของตำแหน่งระหว่างแขนควบคุมทางด้านมอเตอร์และ gripper ด้านสเลฟแย่งดังแสดงในรูป 4.26 (ข) ดังนั้นจึงต้องทำการแก้ไขโดยการ reset ค่า PO ให้มีค่าเป็นศูนย์ขณะที่ gripper ไม่มีการสัมผัสกับวัตถุ โดยใช้สัญญาณแรงทางด้านสเลฟ f_c ที่สามารถวัดค่าได้เป็นตัว reset ค่า PO โดยพิจารณาหากค่า f_c มีค่าน้อยกว่า ε อย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาสั้น ๆ τ วินาที (สำหรับงานวิจัยนี้ออกแบบให้ $\varepsilon = 0.4$ นิวตัน และ $\tau = 0.15$ วินาที) แล้วให้ทำการ reset ค่า PO ให้มีค่าเป็นศูนย์ เพื่อให้ตัวควบคุม passivity ทำงานโดยทันทีเมื่อ gripper สัมผัสกับวัตถุแข็งแรง ในการทดลองได้มีการทดสอบระบบเมื่อใช้ตัวควบคุม passivity กับวัตถุแข็งแรงโดยมีการ reset ค่า PO ซึ่งให้ผลการทดสอบตามรูป 4.28

compare force master & slave (hard contact with PC & reset PO)



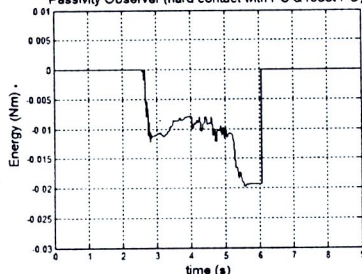
(ก)

compare position master & slave (hard contact with PC & reset PO)



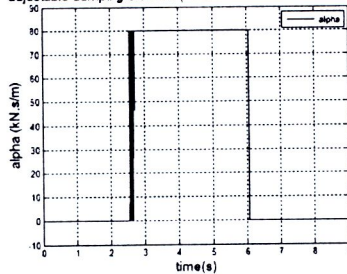
(ข)

Passivity Observer (hard contact with PC & reset PO)

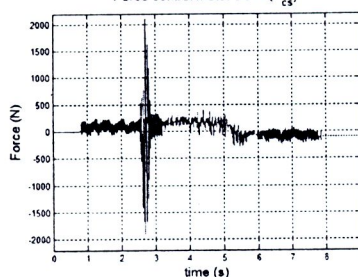


(ค)

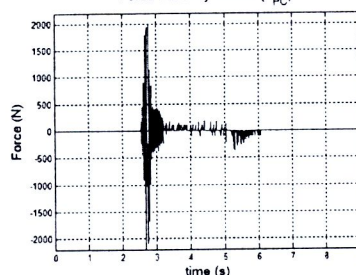
adjustable damping element (hard contact with PC & reset PO)



(ง)

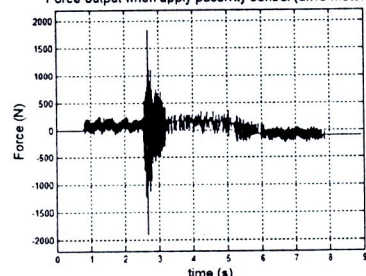
Force control motor slave (F_{cs})

(จ)

Force Passivity Control (F_{pc})

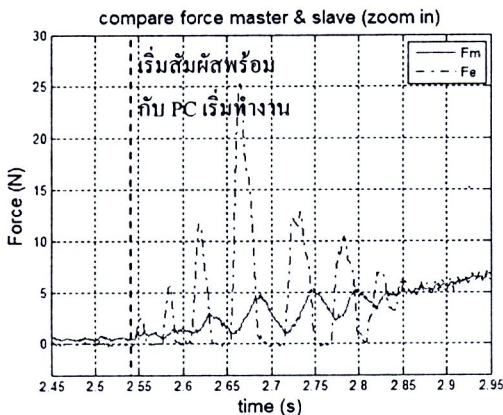
(ฉ)

Force output when apply passivity control (drive motor)

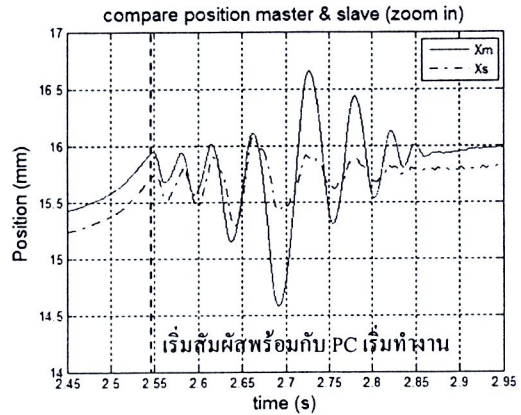


(ช)

รูป 4.28 ผลการทดสอบกรณีทดสอบระบบกับวัตถุแข็งเกร็งเมื่อใช้ PC และมีการ reset ค่า PO (ก) ผลการติดตามของสัญญาณแรง (ข) ผลการติดตามของสัญญาณตำแหน่ง (ค) ค่า PO ของระบบ (ง) ค่าตัวหน่วงของตัวควบคุม passivity (จ) สัญญาณควบคุมมอเตอร์ด้านสเลฟ (ฉ) สัญญาณควบคุมจากตัวควบคุม passivity (PC) (ช) สัญญาณควบคุมเอาต์พุตสำหรับควบคุมมอเตอร์ด้านสเลฟ



(ก)



(ข)

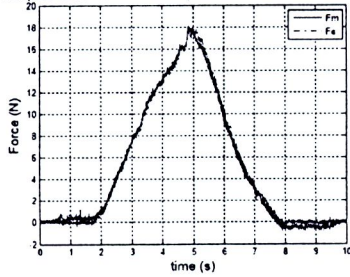
รูป 4.29 ผลการติดตามของสัญญาณแรงและตำแหน่งการเคลื่อนที่ขยายในช่วงเวลาวินาทีที่ 2.45 ถึงวินาทีที่ 2.95 กรณีทดสอบกับวัตถุแข็งเกร็งเมื่อใช้ PC และมีการ reset ค่า PO

รูป 4.28 แสดงผลการตอบสนองของระบบกรณีทดสอบระบบกับวัตถุแข็งเกร็งเมื่อใช้ตัวควบคุม passivity และมีการ reset ค่า PO โดยรูป 4.28 (ก) แสดงผลการติดตามของสัญญาณแรงและรูป 4.28 (ข) แสดงผลการติดตามของสัญญาณตำแหน่งระหว่างด้านมาสเตอร์และสเลฟ รูป 4.28 (ค) แสดงค่า PO ของระบบ รูป 4.28 (ง) แสดงค่าตัวหน่วงของตัวควบคุม passivity รูป 4.28 (จ) แสดงสัญญาณควบคุมมอเตอร์ด้านสเลฟ รูป 4.28 (ฉ) แสดงสัญญาณควบคุมจาก passivity (PC) และรูป 4.28 (ช) แสดงสัญญาณควบคุมเอาต์พุตสำหรับควบคุมมอเตอร์ด้านสเลฟ รูป 4.29 แสดงผลการติดตามของสัญญาณแรงและตำแหน่งการเคลื่อนที่ขยายในช่วงเวลาวินาทีที่ 2.45 ถึงวินาทีที่ 2.95 ตามลำดับ โดยระบบแฮปติกได้ถูกผู้ควบคุมทำการควบคุมแขนควบคุมทางด้านมาสเตอร์ทำให้ gripper ทางด้านสเลฟเริ่มมีการเคลื่อนที่ตามตั้งแต่เวลาวินาทีที่ 0.8 ไปจนถึงวินาทีที่ 2.54 ในช่วงเวลานี้ค่า PO ถูก reset ค่าให้เป็นศูนย์เนื่องจากไม่มีการสัมผัสกับวัตถุ และหลังจากนั้น gripper เริ่มมีการสัมผัสกับวัตถุแข็งเกร็งพร้อมกับตัวควบคุม passivity เริ่มทำงานดังแสดงในรูป 4.28 (ฉ) โดยสัญญาณควบคุมมีการแกว่งในช่วงเริ่มต้นและมีขนาดลดลงจนกระทั่งระบบเริ่มเข้าสู่เสถียรภาพในวินาทีที่ 2.85 ตามลำดับ และเมื่อ gripper ถูกควบคุมให้เคลื่อนที่ออกจากวัตถุในวินาทีที่ 6.15 พบว่า gripper ไม่มีการสัมผัสกับวัตถุทำให้ค่า PO ถูก reset ให้มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นในช่วงเวลานี้ตัวควบคุม passivity จะไม่ทำงานดังแสดงตามรูป 4.28 (ข)

ต่อมาเป็นการทดสอบระบบเมื่อใช้ตัวควบคุม passivity กับวัตถุอ่อนตัวประเภทซิลิ

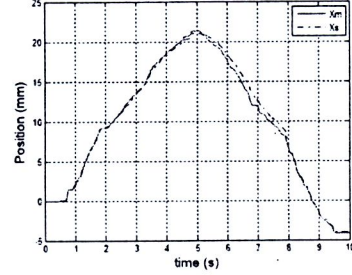
โคน โดยมีการ reset ค่า PO ซึ่งให้ผลการทดสอบตามรูป 4.30

compare force master & slave (soft contact with PC & reset PO)



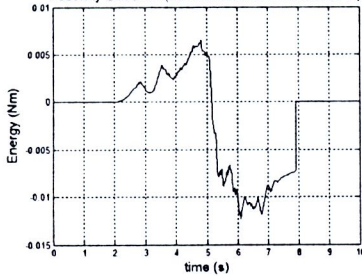
(ก)

compare position master & slave (soft contact with PC & reset PO)



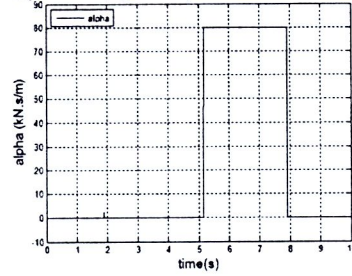
(ข)

Passivity Observer (soft contact with PC & reset PO)

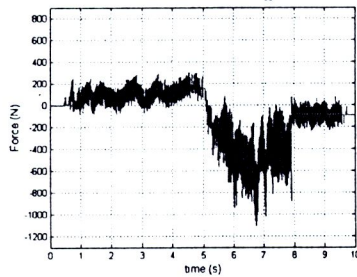


(ค)

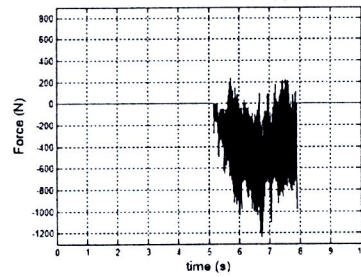
adjustable damping element (soft contact with PC & reset PO)



(ง)

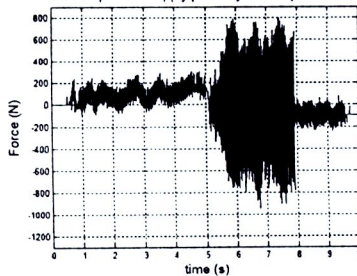
Force control motor slave (F_{cs})

(จ)

Force Passivity Control (F_{PC})

(ฉ)

Force output when apply passivity control (drive motor)



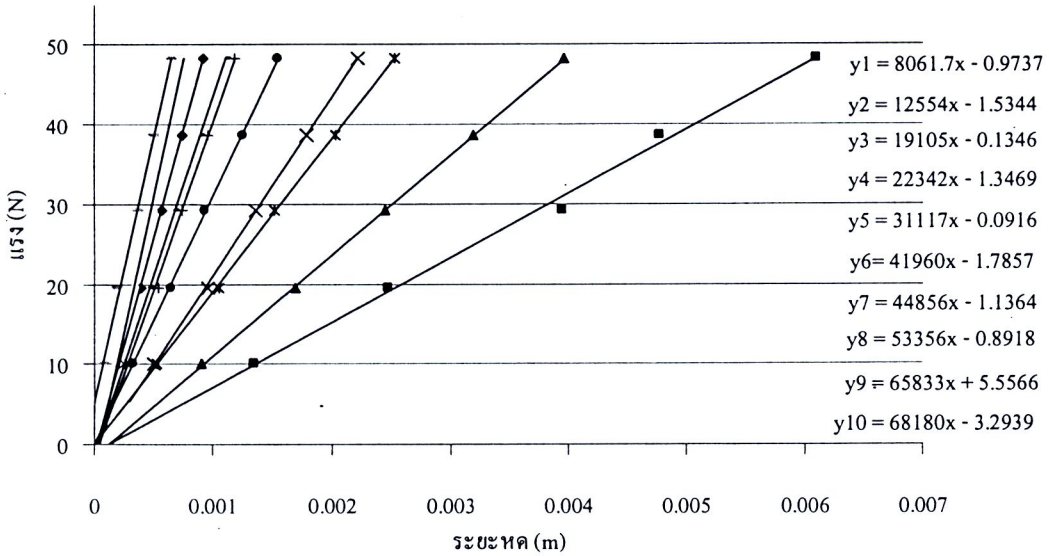
(ช)

รูป 4.30 ผลการทดสอบกรณีทดสอบระบบกับวัตถุอ่อนตัว (ซิลิโคน) เมื่อใช้ PC และมีการ reset ค่า PO (ก) ผลการติดตามของสัญญาณแรง (ข) ผลการติดตามของสัญญาณตำแหน่ง (ค) ค่า PO ของระบบ (ง) ค่าตัวหน่วงของตัวควบคุม passivity (จ) สัญญาณควบคุมมอเตอร์ด้านสเลฟ (ฉ) สัญญาณควบคุมจากตัวควบคุม passivity (PC) (ช) สัญญาณควบคุมเอาต์พุตสำหรับควบคุมมอเตอร์ด้านสเลฟ

รูป 4.30 แสดงผลการตอบสนองของระบบกรณีทดสอบระบบกับวัตถุอ่อนตัวเมื่อใช้ตัวควบคุม passivity โดยรูป 4.30 (ก) แสดงผลการติดตามของสัญญาณแรงและรูป 4.30 (ข) แสดงผลการติดตามของสัญญาณตำแหน่งระหว่างด้านมาสเตอร์และสเลฟ รูป 4.30 (ค) แสดงค่า PO ของระบบ รูป 4.30 (ง) แสดงค่าตัวหน่วงของตัวควบคุม passivity รูป 4.30 (จ) แสดงสัญญาณควบคุมมอเตอร์ด้านสเลฟ รูป 4.30 (ฉ) แสดงสัญญาณควบคุมจาก passivity (PC) และรูป 4.30 (ช) แสดงสัญญาณควบคุมเอาต์พุตสำหรับควบคุมมอเตอร์ด้านสเลฟ โดยระบบแฮปติกได้ถูกผู้ควบคุมทำการควบคุมแขนควบคุมทางด้านมาสเตอร์ทำให้ gripper ทางด้านสเลฟเริ่มมีการเคลื่อนที่ตามตั้งแต่วินาทีที่ 0.7 ไปจนถึงวินาทีที่ 2 ในช่วงนี้ค่า PO ถูก reset ค่าให้เป็นศูนย์เนื่องจากไม่มีการสัมผัสกับวัตถุ หลังจากนั้น gripper เริ่มมีการสัมผัสกับวัตถุอ่อนตัวพบว่าเมื่อผู้ควบคุมออกแรงในการสัมผัสมากขึ้นจะทำให้ค่า PO มีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อลดระดับของแรงสัมผัสลงจะทำให้ค่า PO ลดลงจนกระทั่งในวินาทีที่ 5.15 ถึงวินาทีที่ 7.9 ในช่วงเวลาดังกล่าวค่า PO ของระบบมีค่าน้อยกว่าศูนย์ดังแสดงตามรูป 4.30 (ค) ทำให้ตัวควบคุม passivity เริ่มทำงานดังรูป 4.30 (จ) ซึ่งมีผลกระทบต่อสัญญาณการติดตามของตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนควบคุมการเคลื่อนที่ด้านมาสเตอร์และ gripper ด้านสเลฟ คือเกิดการประวิงเวลาของสัญญาณตำแหน่งการเคลื่อนที่ดังแสดงในรูป 4.30 (ข) และเมื่อ gripper ถูกควบคุมให้เคลื่อนที่ออกจากวัตถุหลังจากวินาทีที่ 7.9 พบว่า gripper ไม่มีการสัมผัสกับวัตถุทำให้ค่า PO ถูก reset ให้มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นในช่วงเวลานี้ตัวควบคุม passivity จะไม่ทำงานจึงทำให้ระบบมีผลการติดตามของตำแหน่งระหว่างแขนควบคุมทางด้านมาสเตอร์และ gripper ด้านสเลฟดีขึ้น

การทดสอบในส่วนที่สามเป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบสมรรถนะของระบบในช่วงของผลการตอบสนองชั่วคราว (transient) โดยพิจารณาสัญญาณที่ได้จากการทดสอบในช่วงเวลา 3 วินาที หลังจาก gripper เริ่มสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม กรณีแรกเป็นการตรวจสอบสมรรถนะของระบบเมื่อระบบไม่ใช้การควบคุม passivity และกรณีที่สองเป็นการตรวจสอบสมรรถนะของระบบเมื่อใช้การควบคุม passivity ตามลำดับ โดยทดสอบระบบกับสปริงตัวอย่างที่มีค่าความแข็งของสปริงต่างกันจำนวน 10 ตัวอย่าง ซึ่งมีผลการทดสอบค่าความแข็งของสปริงตามรูป 4.31

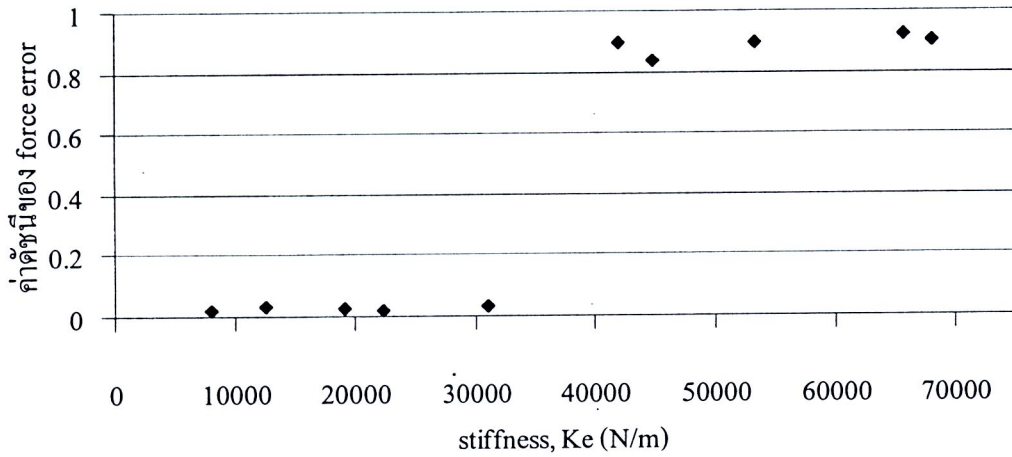
ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะหดตัวของตัวอย่างสปริง



รูป 4.31 ผลการทดสอบค่าความแข็ง (stiffness) ของสปริงตัวอย่าง

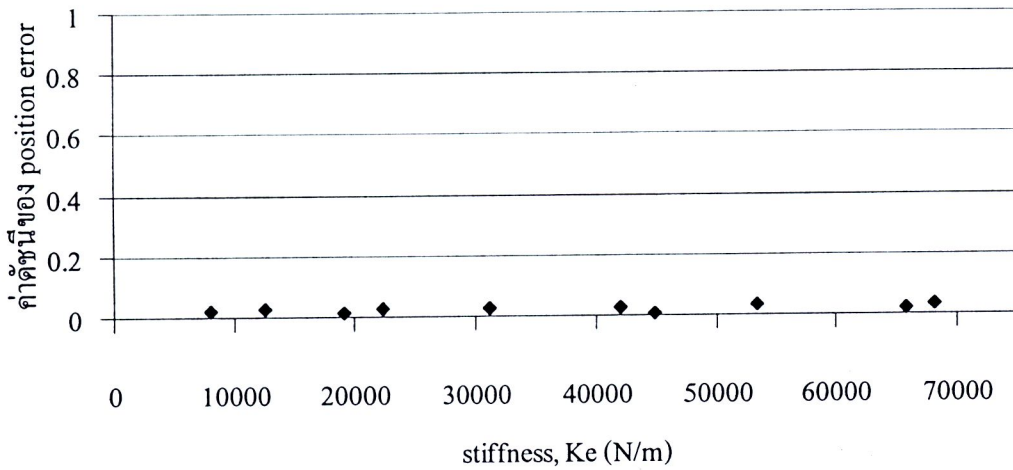
จากการทดสอบพบว่าสปริงตัวอย่างมีค่าความแข็ง (stiffness) เป็น $K_{e1} = 8061.7$ นิวตัน/เมตร $K_{e2} = 12554$ นิวตัน/เมตร $K_{e3} = 19105$ นิวตัน/เมตร $K_{e4} = 22342$ นิวตัน/เมตร $K_{e5} = 31117$ นิวตัน/เมตร $K_{e6} = 41960$ นิวตัน/เมตร $K_{e7} = 44856$ นิวตัน/เมตร $K_{e8} = 53356$ นิวตัน/เมตร $K_{e9} = 65833$ นิวตัน/เมตร และ $K_{e10} = 68180$ นิวตัน/เมตร ตามลำดับ ในการตรวจสอบสมรรถนะของระบบได้เลือกค่าดัชนีสมรรถนะ (performance index) กำหนดให้ η_1 คือค่าดัชนีสมรรถนะของการติดตามของสัญญาณแรงระหว่างแรงจากมือผู้ควบคุมและแรงปฏิกิริยาของ gripper ด้านสเลฟที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อม โดย $\eta_1 = \frac{\| \text{force error } (F_m - F_e) \|_2}{\| \text{force input } (F_e) \|_2}$ และ η_2 คือค่าดัชนีสมรรถนะของการติดตามของตำแหน่งการเคลื่อนที่ระหว่างเซนเซอร์ควบคุมการเคลื่อนที่ทางด้านมอเตอร์และ gripper ด้านสเลฟ โดย $\eta_2 = \frac{\| \text{position error } (X_m - X_s) \|_2}{\| \text{position input } (X_m) \|_2}$ โดยที่ $\| \text{error} \|_2 \equiv \sqrt{(\int (\text{error})^2 dt)}$ จากการทดสอบระบบกับสปริงตัวอย่างเมื่อไม่มีการควบคุม passivity พบว่าค่าดัชนีสมรรถนะของระบบแสดงได้ตามรูป 4.32

ค่าดัชนี $\eta_1 = \| \text{force error (Fm-Fe)} \|_2 / \| \text{force input (Fe)} \|_2$; off-PC



(ก)

ค่าดัชนี $\eta_2 = \| \text{position error (Xm-Xs)} \|_2 / \| \text{position input (Xm)} \|_2$; off-PC



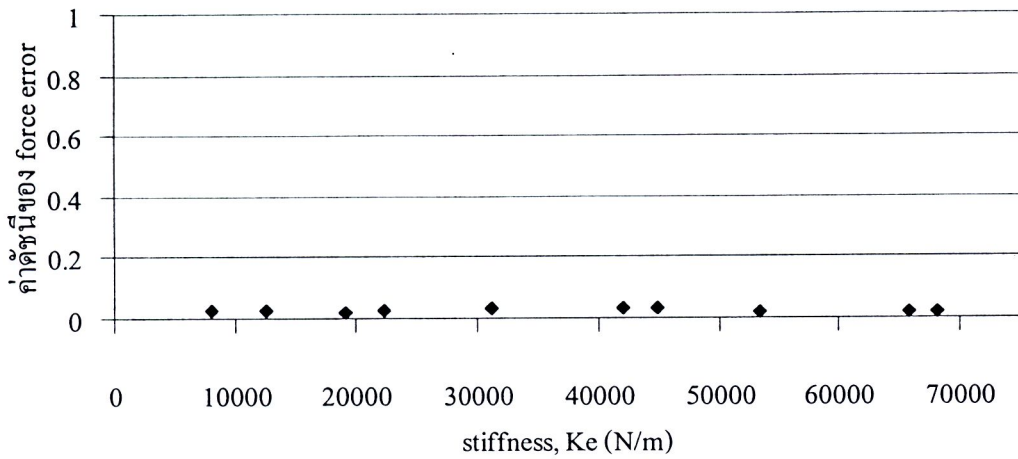
(ข)

รูป 4.32 กราฟแสดงดัชนีสมรรถนะของระบบเมื่อระบบไม่ใช้การควบคุม passivity (ก) ดัชนีสมรรถนะของการติดตามของสัญญาณแรงระหว่างแรงจากมือผู้ควบคุมและแรงปฏิกิริยาของ gripper ด้านสเลฟที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อม (ข) ดัชนีสมรรถนะของการติดตามของตำแหน่งการเคลื่อนที่ระหว่างแขนควบคุมการเคลื่อนที่ทางด้านมาสเตอร์และ gripper ด้านสเลฟ

รูป 4.32 (ก) แสดงดัชนีสมรรถนะของการติดตามของสัญญาณแรงระหว่างแรงจากมือผู้ควบคุม และแรงปฏิกิริยาของ gripper ทางด้านสเลฟที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าเมื่อทดสอบระบบกับสปริงตัวอย่างโดยไม่ใช้ตัวควบคุม passivity ในช่วงของค่าความแข็งของสปริงที่นำมาทดสอบตั้งแต่ $K_{e1} = 8061.7$ นิวตัน/เมตร เพิ่มขึ้นจนถึง $K_{e5} = 31117$ นิวตัน/เมตร ค่าดัชนีสมรรถนะ η_1 จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์และค่อนข้างคงที่โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0262 ซึ่งหมายถึงระบบมีสมรรถนะของการติดตามของสัญญาณแรงที่ดีในช่วงของความแข็งดังกล่าว และเมื่อทดสอบกับสปริงตัวอย่างที่มีค่าความแข็งมากขึ้นตั้งแต่ $K_{e6} = 41960$ นิวตัน/เมตร จนถึง $K_{e10} = 68180$ นิวตัน/เมตร ค่าดัชนีสมรรถนะ η_1 จะมีค่ามากขึ้นและไม่คงที่ ซึ่งหมายถึงระบบขาดเสถียรภาพและไม่มีสมรรถนะ สำหรับรูป 4.32 (ข) แสดงดัชนีสมรรถนะของการติดตามของสัญญาณการเคลื่อนที่ระหว่างเซนเซอร์ควบคุมการเคลื่อนที่ทางด้านมอเตอร์และ gripper ด้านสเลฟ ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าเมื่อทดสอบระบบกับสปริงตัวอย่างโดยไม่ใช้ตัวควบคุม passivity ในช่วงของค่าความแข็งตั้งแต่ $K_{e1} = 8061.7$ เพิ่มขึ้นจนถึง $K_{e10} = 68180$ นิวตัน/เมตร ค่าดัชนีสมรรถนะ η_2 จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์และค่อนข้างคงที่โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.023 ซึ่งหมายถึงระบบแฮปติกมีสมรรถนะของการติดตามของสัญญาณการเคลื่อนที่ที่ดี อย่างไรก็ตามการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าระบบแฮปติกที่ไม่มีการควบคุม passivity มีสมรรถนะของการติดตามของสัญญาณการเคลื่อนที่ที่ดีแต่สมรรถนะของการติดตามสัญญาณของแรงถูกจำกัดด้วยเสถียรภาพของระบบ ซึ่งเป็นผลกระทบมาจากค่าความแข็งของวัตถุหรือสิ่งแวดล้อมที่นำมาทดสอบ โดยระบบแฮปติกที่ได้ออกแบบนี้สามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพและมีสมรรถนะภายใต้ค่าความแข็งของวัตถุที่ไม่เกิน $K_{e6} = 41960$ นิวตัน/เมตร เมื่อไม่มีการควบคุม passivity

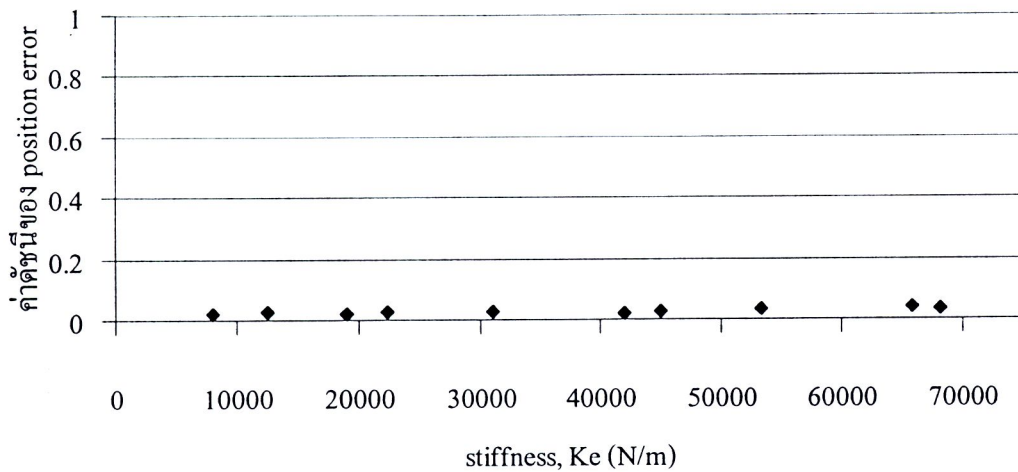
ต่อมาเป็นการทดสอบระบบแฮปติกกับสปริงตัวอย่างเมื่อระบบมีการควบคุม passivity พบว่าค่าดัชนีสมรรถนะของระบบสามารถแสดงได้ตามรูป 4.33

ค่าดัชนี $\eta_1 = \| \text{force error } (F_m - F_e) \|_2 / \| \text{force input } (F_e) \|_2$; on-PC



(ก)

ค่าดัชนี $\eta_2 = \| \text{position error } (X_m - X_s) \|_2 / \| \text{position input } (X_m) \|_2$; on-PC



(ข)

รูป 4.33 กราฟแสดงดัชนีสมรรถนะของระบบเมื่อระบบใช้การควบคุม passivity (ก) แสดงดัชนีสมรรถนะของการติดตามของสัญญาณแรงระหว่างแรงจากมือผู้ควบคุมและแรงปฏิกิริยาของ gripper ด้านสเลฟที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อม (ข) แสดงดัชนีสมรรถนะของการติดตามของตำแหน่งการเคลื่อนที่ระหว่างเซนควบคุมการเคลื่อนที่ทางด้านมอเตอร์และ gripper ด้านสเลฟ

รูป 4.33 (ก) แสดงดัชนีสมรรถนะของการติดตามของสัญญาณแรงระหว่างแรงจากมือผู้ควบคุม และแรงปฏิกิริยาของ gripper ทางด้านสเลฟที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าเมื่อระบบใช้การควบคุม passivity ทดสอบกับสปริงตัวอย่างในช่วงของค่าความแข็งตั้งแต่ $K_{e1} = 8061.7$ นิวตัน/เมตร เพิ่มขึ้นจนถึง $K_{e10} = 68180$ นิวตัน/เมตร ตามลำดับ ค่าดัชนีสมรรถนะ η_1 จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์และค่อนข้างคงที่โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.024 ซึ่งหมายถึงระบบมีสมรรถนะของการติดตามของสัญญาณแรงที่ดีตลอดช่วงของความแข็งของสปริงที่นำมาทดสอบ สำหรับรูป 4.33 (ข) แสดงดัชนีสมรรถนะของการติดตามของสัญญาณการเคลื่อนที่ระหว่างแขนควบคุมการเคลื่อนที่ทางด้านมอเตอร์และ gripper ด้านสเลฟ ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าค่า η_2 จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์และค่อนข้างคงที่โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.027 ซึ่งหมายถึงระบบมีสมรรถนะของการติดตามของสัญญาณการเคลื่อนที่ที่ดีตลอดช่วงของความแข็งของสปริงที่นำมาทดสอบ ดังนั้นเมื่อระบบแฮปติกมีการควบคุม passivity ตัวควบคุมจะช่วยปรับปรุงเสถียรภาพของระบบโดยสามารถขยายขอบเขตของเสถียรภาพที่เกิดจากผลกระทบของความแข็งของสปริงที่นำมาทดสอบและทำให้ระบบแฮปติกที่ได้ออกแบบนี้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพได้