บทที่ 3
การออกแบบและการสร้างอุปกรณ์ต้นแบบแฮปติกอินเตอร์เฟส

จากบทที่ผ่านมาได้ทราบถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และโครงสร้างที่ใช้ในการควบคุมระบบ สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงแนวทางการออกแบบและเลือกใช้อุปกรณ์ในส่วนต่าง ๆ เพื่อสร้างระบบแฮปติกอินเตอร์เฟส 1 องศาอิสระสำหรับการทดสอบ

3.1 การออกแบบอุปกรณ์แฮปติก

การพัฒนาระบบแฮปติกจากงานวิจัยที่ผ่านมา [1, 3, 16, 23] สามารถสรุปลักษณะเฉพาะที่จำเป็นต่อการออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์แฮปติกได้ดังนี้

3.1.1 ความสามารถในการขับกลับ (Back-drivability) คือความสามารถที่ผู้ควบคุมสามารถควบคุมแขนกลให้เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระโดยไม่ต้องออกแรงผลักดันมาก แขนกลที่มีความสามารถในการขับกลับที่ดีมีข้อดีคือ สามารถใช้โครงสร้างการควบคุมแบบ position error base ในการควบคุมระบบซึ่งใช้อุปกรณ์วัดตำแหน่งเพื่อวัดสัญญาณการเคลื่อนที่สำหรับควบคุมระบบเพียงอย่างเดียวโดยไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์วัดแรง (force sensor)

3.1.2 พื้นที่หรือบริเวณของการทำงาน คือพื้นที่ในการทำงานของอุปกรณ์แฮปติกควรมีขนาดที่เหมาะสมไม่มากหรือน้อยเกินไปจนอุปกรณ์แฮปติกไม่สามารถเข้าไปทำงานได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของการใช้งาน

3.1.3 ความหลวมของชุดอุปกรณ์ส่งผ่านกำลัง (Backlash) คือความหลวมของสกรู ชุดเฟืองทด หรือสายพาน ซึ่งเป็นอุปกรณ์ส่งผ่านกำลังจากอุปกรณ์ขับ หากกลไกของอุปกรณ์แฮปติกมีความหลวมของชุดอุปกรณ์ส่งผ่านกำลังก็จะทำให้เกิดพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งมีผลต่อความเสมือนจริงของการรับรู้ของแรงที่เกิดจากการสัมผัสและทำให้การออกแบบการควบคุมมีความซับซ้อน

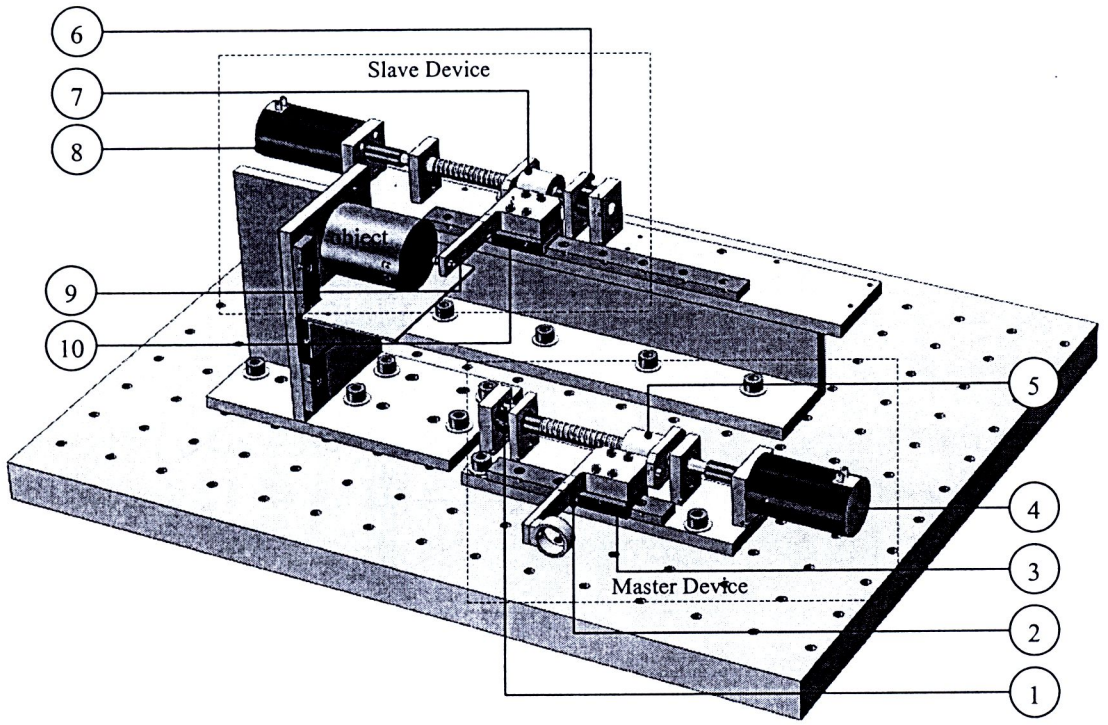
3.1.4 ความเฉื่อยของแขนกล (Inertia) โครงสร้างของอุปกรณ์แฮปติกควรออกแบบและสร้างให้มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา ถ้าหากโครงสร้างมีขนาดใหญ่ซึ่งมีความเฉื่อยมากก็จะทำให้การสร้างแรงเพื่อตอบสนองต่อผู้ควบคุมไม่ถูกต้องตามความเป็นจริง เนื่องจากแรงบางส่วนจะหายไปเพื่อชดเชยผลกระทบที่เกิดขึ้นจากความเฉื่อยนี้ นอกจากนั้นโครงสร้างของอุปกรณ์แฮปติกที่มีขนาดใหญ่ยังทำให้เกิดความเมื่อยล้าขึ้นกับผู้ควบคุมขณะทำการควบคุมอีกด้วย

3.1.5 ความแข็งแรง (Stiffness) ของส่วนประกอบต่าง ๆ ของโครงสร้างของอุปกรณ์แฮปติก เช่น ก้านต่อโยง ข้อต่อ และอุปกรณ์ส่งผ่านกำลังต้องมีความแข็งแรง หากไม่แข็งแรงเพียงพอจะทำให้เกิดการสั่น (vibration) ของโครงสร้างและส่งผลต่อความยากในการควบคุม

3.1.6 แรงเสียดทาน (Friction) คือความฝืดที่เกิดจากส่วนต่าง ๆ ที่มีการเชื่อมต่อกันของโครงสร้าง เช่น ข้อต่อและอุปกรณ์ส่งผ่านกำลังควรออกแบบหรือเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีความฝืดน้อย เนื่องจากความฝืดทำให้เกิด non-linear effect ทำให้มีความซับซ้อนในการควบคุม นอกจากนั้นความฝืดยังมีผลกระทบต่อการสร้างแรงให้เกิดขึ้นกับผู้ควบคุม เนื่องจากแรงบางส่วนต้องไปชดเชยให้กับความฝืดทำให้ความรู้สึกที่เกิดขึ้นไม่ถูกต้องตามความเป็นจริง

3.2 ชนิดของอุปกรณ์แฮปติก

สำหรับอุปกรณ์แฮปติกแล้วเราสามารถจำแนกประเภทตามหลักการทำงานได้สองชนิด คือ กลไกชนิดอิมพีแดนซ์ (Impedance-Type Devices) เป็นกลไกที่ผู้ใช้งานสามารถควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนกลได้อย่างอิสระมีความสามารถในการขับกลับสูงและมีความฝืดน้อย เนื่องจากกลไกชนิดนี้ใช้ตำแหน่งการเคลื่อนที่เป็นสัญญาณอินพุตเป็นหลัก ดังนั้นจึงมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา ด้วยเหตุนี้กลไกชนิดอิมพีแดนซ์จึงมีข้อเสียคือ การติดตั้งอุปกรณ์ขับของกลไกจะต้องมีขนาดเล็กจึงทำให้สามารถทำงานภายใต้แรงกระทำที่มีขนาดจำกัด สำหรับอีกชนิดหนึ่งคือ กลไกชนิดแอดมิตแตนซ์ (Admittance-Type Device) เป็นกลไกที่ผู้ใช้งานไม่สามารถควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนกลได้อย่างอิสระเนื่องจากมีอุปกรณ์ส่งผ่านกำลัง เช่น ชุดเฟืองทดหรือสกรูที่มีอัตราทดสูง ดังนั้นกลไกนี้จึงต้องใช้อุปกรณ์วัดแรงเพื่อวัดขนาดของแรงและใช้เป็นสัญญาณอินพุตในการควบคุมให้แขนกลเกิดการเคลื่อนที่ อย่างไรก็ตามกลไกชนิดนี้สามารถออกแบบให้มีขนาดใหญ่หรือเล็กได้ นอกจากนั้นยังสามารถทำงานภายใต้แรงกระทำที่มีขนาดมากกว่ากลไกชนิดอิมพีแดนซ์ ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์แฮปติกเป็นกลไกชนิดแอดมิตแตนซ์เนื่องจากสร้างได้ง่าย



รูป 3.1 อุปกรณ์ต้นแบบระบบแฮปติกอินเตอร์เฟสแบบ 1 องศาอิสระ

โดยที่

หมายเลข (1) คือ อุปกรณ์วัดมุมแบบ incremental encoder สำหรับด้านมาสเตอร์

หมายเลข (2) คือ แขนควบคุมการเคลื่อนที่ด้านมาสเตอร์

หมายเลข (3) คือ ชุดบังคับทิศทางการเคลื่อนที่ linear guide ด้านมาสเตอร์

หมายเลข (4) คือ อุปกรณ์ขับด้านมาสเตอร์ประเภทมอเตอร์กระแสตรง

หมายเลข (5) คือ precision ball screw ด้านมาสเตอร์

หมายเลข (6) คือ อุปกรณ์วัดมุมแบบ incremental encoder สำหรับด้านสเลฟ

หมายเลข (7) คือ precision ball screw ด้านสเลฟ

หมายเลข (8) คือ อุปกรณ์ขับด้านสเลฟประเภทมอเตอร์กระแสตรง

หมายเลข (9) คือ gripper ด้านสเลฟ

หมายเลข (10) คือ ชุดบังคับทิศทางการเคลื่อนที่ linear guide ด้านสเลฟ

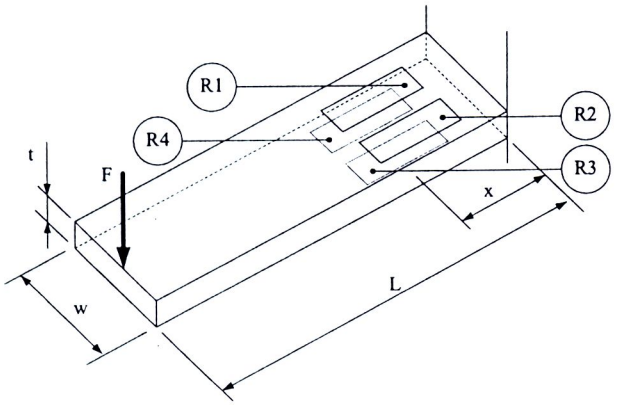
งานวิจัยนี้ได้ออกแบบอุปกรณ์แฮปติกด้านมาสเตอร์และสเลฟให้มีลักษณะเช่นเดียวกันแสดงดังรูป 3.1 โดยอุปกรณ์แฮปติกด้านมาสเตอร์ประกอบไปด้วยอุปกรณ์วัดมุม incremental encoder (1) ใช้เพื่อวัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนควบคุมการเคลื่อนที่ด้านมาสเตอร์ (2) สำหรับให้ผู้ใช้งานทำการควบคุม โดยติดสเตรนเกจ (strain gauge) เพื่อใช้ในการวัดแรงกระทำที่เกิดจากผู้ใช้งาน โดยที่แขนควบคุมการเคลื่อนที่ถูกติดตั้งให้ยึดติดกับ linear guide (3) เพื่อบังคับการเคลื่อนที่ให้อยู่ในแนวตรง และใช้อุปกรณ์ขับประเภทมอเตอร์กระแสตรง (4) ขับเพลาทำให้ precision ball-screw (5) ที่ถูกยึดติดกับแขนควบคุมการเคลื่อนที่ด้านมาสเตอร์เกิดการเคลื่อนที่ สำหรับอุปกรณ์แฮปติกด้านสเลฟประกอบไปด้วย อุปกรณ์วัดมุมแบบ incremental encoder (6) ใช้สำหรับวัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของ gripper ด้านสเลฟ (9) โดยติดสเตรนเกจเพื่อใช้ในการวัดแรงกระทำที่เกิดจากการสัมผัสกับวัตถุ โดยที่ gripper ถูกติดตั้งให้ยึดติดกับ linear guide (10) เพื่อบังคับการเคลื่อนที่ของ gripper ให้อยู่ในแนวตรงและใช้อุปกรณ์ขับประเภทมอเตอร์กระแสตรง (8) ขับเพลาทำให้ precision ball screw (7) ที่ถูกยึดติดกับ gripper ด้านสเลฟเกิดการเคลื่อนที่ โดยอุปกรณ์แฮปติกที่ได้ออกแบบนั้นประกอบด้วยอุปกรณ์ทางกลและอุปกรณ์ทางไฟฟ้าต่าง ๆ เพื่อใช้ในการเชื่อมต่อและควบคุมระบบโดยมีรายละเอียดของอุปกรณ์แฮปติกที่ได้ออกแบบและเลือกใช้งานดังนี้

3.3 การออกแบบอุปกรณ์วัดแรง

การออกแบบและสร้างอุปกรณ์แฮปติกนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องการวัดค่าสัญญาณต่าง ๆ ที่มีความละเอียดและแม่นยำเพื่อป้อนสัญญาณเหล่านั้นให้กับตัวควบคุมของระบบให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเพียงพอที่จะทำให้ผู้ควบคุมรับรู้ถึงการสัมผัสผ่านการควบคุมอุปกรณ์แฮปติกเสมือนได้สัมผัสกับวัตถุโดยตรง

3.3.1 การออกแบบ gripper ในลักษณะคานยื่น

งานวิจัยนี้ออกแบบ gripper เป็นลักษณะคานยื่นโดยติดตั้งสเตรนเกจเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการวัดความเครียดที่เกิดขึ้นกับวัสดุซึ่งมีความสัมพันธ์กับแรงกระทำแบบเชิงเส้น รูป 3.2 แสดงลักษณะของคานยื่นโดยวัสดุที่ใช้ในการออกแบบคือ Stainless Steel มีพารามิเตอร์ของการออกแบบคานยื่นตามตารางที่ 3.1



รูป 3.2 gripper ที่ออกแบบเป็นลักษณะคานยื่น

ตาราง 3.1 พารามิเตอร์ของการออกแบบคานยื่น

สัญลักษณ์	ขนาด	หน่วย
W (ความกว้าง)	15	mm
t (ความหนา)	4	mm
L(ความยาว)	65	mm
x (ตำแหน่ง strain gage)	12	mm
R (strain gage)	120	Ω

คานยื่นถูกออกแบบโดยต้องการให้มีความถี่ธรรมชาติสูงกว่าช่วงความถี่ของสัญญาณแรงที่ใช้ในการควบคุมระบบ จากการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติของคานยื่นที่ได้ออกแบบพบว่ามีค่าความถี่ธรรมชาติในโหมดที่ 1 เท่ากับ 661.48 เฮิรตซ์

โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่เกิดขึ้นกับวัสดุและแรงกระทำแสดงได้ดังสมการที่ (3.1)

$$\varepsilon = \frac{F(L-x)t}{2EI} \tag{3.1}$$

เมื่อ $I = \frac{1}{12} wt^3$

โดยที่

ε คือ ความเครียดที่ตำแหน่งที่ติดสเตรนเกจ

L คือ ความยาวของคาน

x คือ ระยะที่ติดสเตรนเกจเทียบกับจุดที่ถูกยึด

t คือ ความหนาของคาน

E คือ ค่าโมดูลัสของยัง

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดคาน

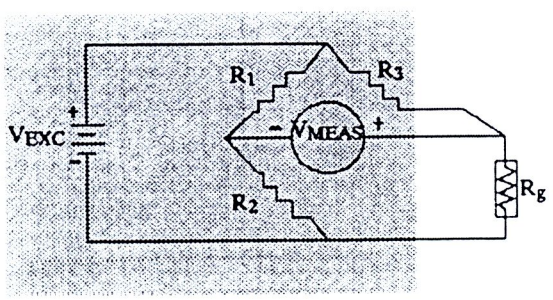
F คือ แรงกระทำที่ตำแหน่งปลายคาน

R คือ ความต้านทานของสเตรนเกจ

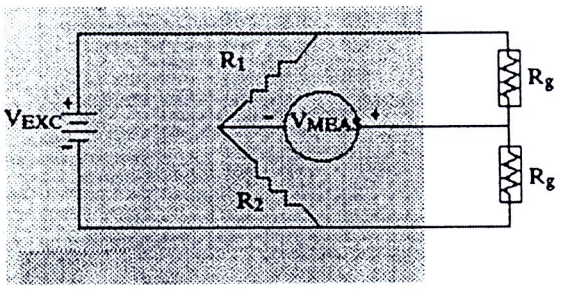
ความเครียดที่วัดได้จากสเตรนเกจถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าในสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่มากระทำไม่ว่าจะเป็นแรงกดหรือแรงดึง โดยใช้วงจรไฟฟ้าและวงจรขยายสัญญาณเพื่อให้ได้ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้งานควบคุมระบบ

3.3.2 การออกแบบวงจรไฟฟ้าและวงจรขยายสัญญาณ

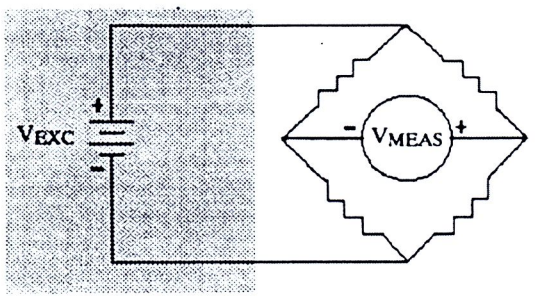
การติดตั้งสเตรนเกจโดยทั่วไปจะใช้วงจร Wheatstone bridge ซึ่งสามารถติดตั้งได้สามลักษณะคือ quarter bridge haft bridge และ full bridge แสดงดังรูป 3.3 (ก) - 3.3 (ค)



(ก) quarter bridge

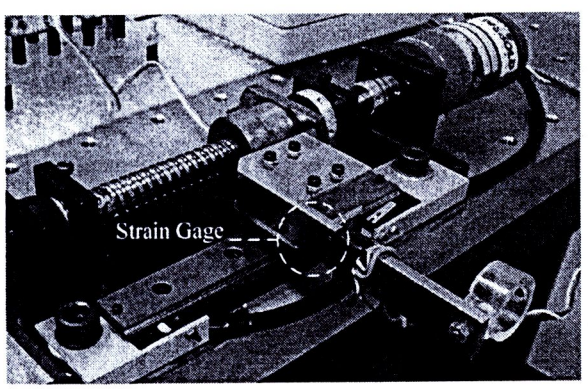


(ข) haft bridge



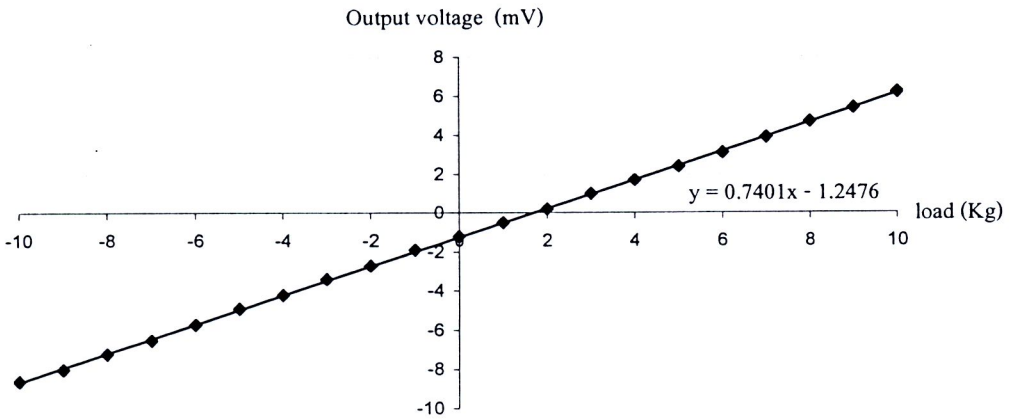
(ค) full bridge

รูป 3.3 วงจร Wheatstone bridge ในลักษณะต่าง ๆ



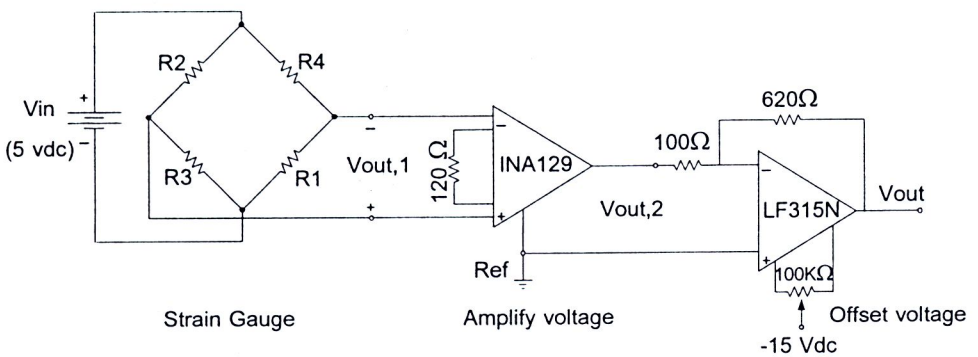
รูป 3.4 อุปกรณ์วัดแรง

การติดตั้งสเตรนเกจในงานวิจัยนี้ใช้สเตรนเกจชนิด KFG-5-120-C1-11 ยี่ห้อ KYOWA โดยใช้วงจร full bridge ในการติดตั้งแสดงดังรูป 3.4 เนื่องจากมีความไว (sensitivity) สูงที่สุด และสามารถลดผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่าย นอกจากนี้สเตรนเกจทั้งสี่ตัวมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature Coefficient) ที่เท่ากัน เมื่อถูกติดตั้งในบริเวณเดียวกันจึงลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวงจร quarter bridge และ haft bridge

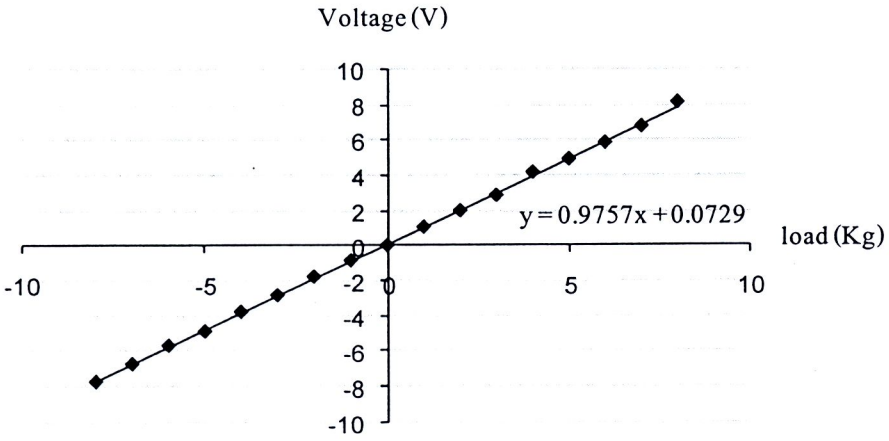


รูป 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลทดสอบและแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากวงจร Wheatstone bridge

สัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุตที่ได้จากวงจร full bridge มีขนาดของแรงดันไฟฟ้าในหน่วยมิลลิโวลต์ แสดงดังรูป 3.5 ซึ่งไม่เพียงพอที่จะนำสัญญาณไฟฟ้านี้ไปทำการควบคุมระบบได้โดยตรง ดังนั้นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจะถูกนำไปขยายสัญญาณเพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมโดยใช้วงจรขยายสัญญาณดังรูป 3.6



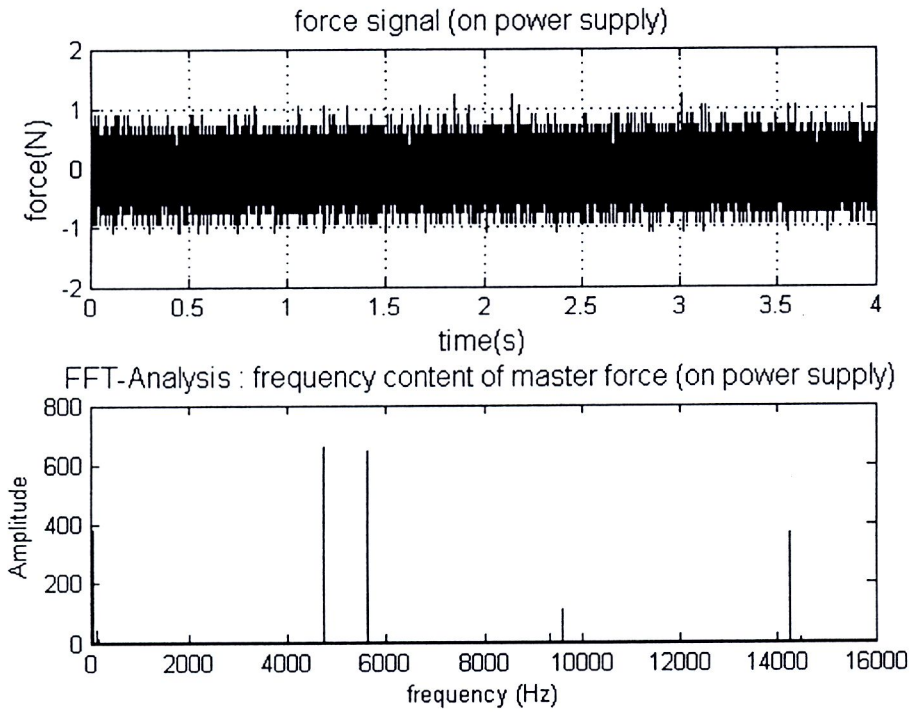
รูป 3.6 วงจรขยายและ Offset สัญญาณ



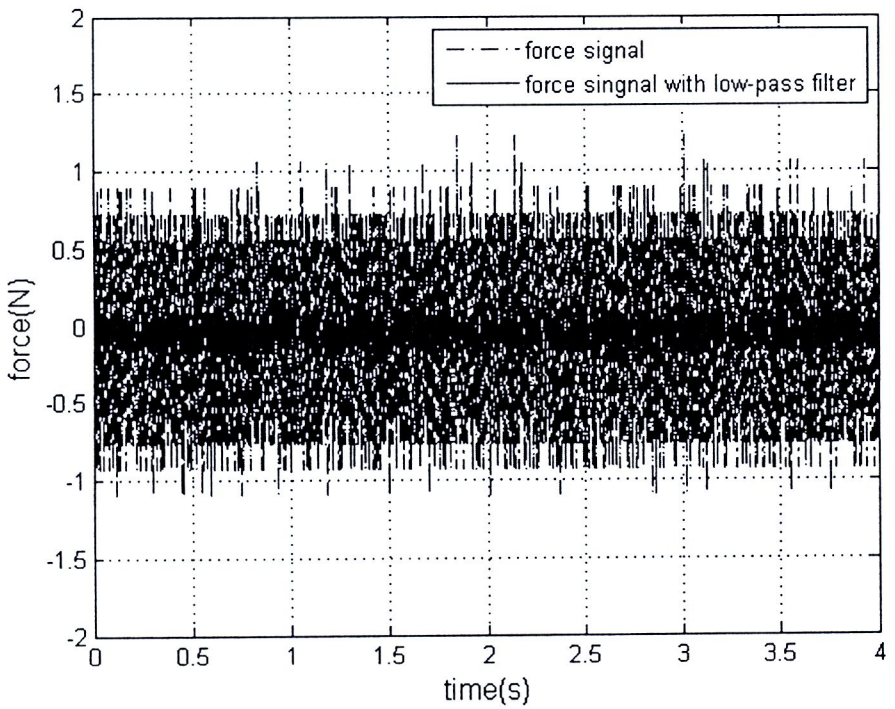
รูป 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลทดสอบและแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากวงจรขยายสัญญาณ

รูป 3.7 แสดงผลการทดสอบของความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำโดยใช้มวลทดสอบและแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุต โดยแสดงให้เห็นว่าขนาดของแรงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้า และยังหมายถึงความน่าเชื่อถือได้ที่จะนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้ามาใช้งานควบคุมระบบได้อย่างน้อยในช่วงของแรงกระทำตั้งแต่ -70 ถึง 70 นิวตัน

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติจะมีสัญญาณรบกวนจากหลาย ๆ แหล่งเข้ามาสู่ระบบ เช่น สัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟฟ้าและมอเตอร์เป็นต้น โดยสัญญาณแรงที่วัดได้หากมีสัญญาณรบกวนมาก ๆ ก็อาจทำให้ไม่สามารถใช้ควบคุมระบบได้ ดังนั้นต้องการลดผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณรบกวนซึ่งอยู่ในช่วงความถี่สูง สามารถวิเคราะห์ได้จาก FFT-Analysis โดยวัดสัญญาณด้วยเวลาในการ sampling เท่ากับ 0.00003 วินาที แสดงดังรูป 3.8 อย่างไรก็ตามในการควบคุมอุปกรณ์แฮปติกเป็นการควบคุมให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงความถี่ต่ำเนื่องจากการเคลื่อนไหวของมือผู้ควบคุมไม่สามารถเคลื่อนไหวได้เกิน 10 เฮิรตซ์ ซึ่งกล่าวไว้โดย Thurston L. Brooks [21] ดังนั้นจึงนำสัญญาณแรงที่วัดได้ผ่านตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน (low pass filter) ก่อนที่จะส่งให้กับหน่วยตัวควบคุม โดยออกแบบที่ cut-off frequency เท่ากับ 100 เฮิรตซ์ ในการกรองสัญญาณแรงเพื่อนำไปใช้ในการควบคุมในช่วงความถี่ต่ำกว่า 100 เฮิรตซ์ และลดผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณรบกวนในช่วงความถี่สูง



รูป 3.8 สัญญาณแรงที่มีสัญญาณรบกวนในช่วงความถี่สูง



รูป 3.9 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณแรงที่ผ่านการกรองสัญญาณรบกวน

รูป 3.9 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำสัญญาณแรงมาผ่านตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านจะทำให้ลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนได้ดีขึ้น นอกจากนั้น gripper ที่ถูกออกแบบเป็นลักษณะคานยื่นมีค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 661.48 เฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าสูงกว่าช่วงความถี่ของสัญญาณแรงที่นำมาใช้ควบคุมระบบคือช่วงความถี่ 0 ถึง 100 เฮิรตซ์ ดังนั้นพลวัต (dynamic) ของคานยื่นจะไม่มีผลกระทบต่อค่าของสัญญาณแรงที่วัดได้

3.4 อุปกรณ์วัดตำแหน่ง

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ incremental encoder ในการวัดการเคลื่อนที่ของ gripper ทั้งทางด้านมาสเตอร์และสเลฟคือ อุปกรณ์รุ่น E4P-300-237-HM ของบริษัท US digital ซึ่งมีขนาดเล็กและต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันต่ำขนาด 5 โวลต์ ถูกเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการวัดตำแหน่งการเคลื่อนที่สำหรับควบคุมระบบ นอกจากนี้ incremental encoder ยังมีความละเอียดสูงสามารถสร้างสัญญาณพัลส์ 1200 พัลส์ต่อการหมุนหนึ่งรอบของแกนเพลา precision ball screw ซึ่งมีระยะ pitch เท่ากับ 4 มิลลิเมตรให้ความละเอียดสูงสุด 3.33 ไมโครเมตร

3.5 อุปกรณ์ขับกระแส

ในการจ่ายกระแสให้กับอุปกรณ์ขับประเภทมอเตอร์ได้ใช้ตัวขับกระแสยี่ห้อ Copley model 4122Z ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ต้องการแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันขนาด 22 ถึง 90 โวลต์ สามารถขับกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 20 แอมป์ โดยทำหน้าที่ควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ซึ่งแปรผันตรงกับปริมาณแรงดันอินพุตด้วยอัตราส่วนเท่ากับ 20 แอมป์ต่อ 6 โวลต์ ทำให้สามารถควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ได้

3.6 อุปกรณ์ขับ (actuator)

ในการสร้างแรงเสมือนจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเลือกใช้อุปกรณ์ขับที่เหมาะสม เพื่อลดข้อบกพร่องต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นพื้นที่การทำงาน น้ำหนักและขนาดในการสร้างแรง ดังที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้นโดยความละเอียดของแรงที่ทำให้เกิดความรู้สึกถึงการสัมผัสได้นั้นจะขึ้นกับชนิดหรือประเภทของอุปกรณ์ที่นำมาใช้งาน เช่น ไฮดรอลิก นิวเมติก หรือมอเตอร์ โดยในงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถบอกคุณสมบัติของอุปกรณ์ขับที่ใช้งานด้านแฮปติกพอสังเขปได้ดังนี้

อุปกรณ์ประเภทนิวเมติก (**Pneumatic**) โดย L. Spirkovska ได้กล่าวถึงข้อดีของการใช้อุปกรณ์ประเภทนี้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่สะอาดเนื่องจากใช้อากาศอัดเป็นตัวสร้างแรง เมื่อมีการรั่วซึมของอากาศจะไม่เกิดอันตรายต่อผู้ใช้งานและไม่ทำให้พื้นที่ใช้งานสกปรก อย่างไรก็ตามการใช้งาน

อุปกรณ์นิวเมติกก็มีข้อเสียคือเป็นอุปกรณ์ที่มีน้ำหนักและต้องการพื้นที่ในการติดตั้งมาก นอกจากนั้นยังยากต่อการควบคุมตำแหน่งเนื่องจากอากาศสามารถอัดตัวได้และมีการรั่วซึม ถึงแม้ว่าอุปกรณ์ชนิดนี้จะสามารถสร้างแรงเสมือนให้เกิดขึ้นกับมือผู้ควบคุมได้หลายระดับ อย่างไรก็ตามอุปกรณ์นิวเมติกสามารถใช้งานได้ในช่วงความถี่ที่จำกัด ดังนั้นจึงไม่นิยมใช้งานกันมากนัก

อุปกรณ์ประเภทไฮดรอลิก (**Hydraulic**) เป็นอุปกรณ์อีกประเภทหนึ่งที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ และมีน้ำหนักมาก มีความสามารถในสร้างแรงได้มากเนื่องจากใช้ของไหลที่มีการอัดตัวได้น้อยกว่าอุปกรณ์ประเภทนิวเมติก ดังนั้นระบบจึงมีการตอบสนองที่รวดเร็ว สามารถใช้งานในช่วงความถี่สูงได้ อย่างไรก็ตามระบบยังมีปัญหาต่อการควบคุมตำแหน่งเนื่องจากอุปกรณ์ประเภทนี้ส่วนมากแรงที่สร้างขึ้นเกิดจากการอัดตัวของน้ำมันซึ่งความหนืดจะแปรผันตามอุณหภูมิที่เป็นสิ่งรบกวนจากสภาพแวดล้อมภายนอก นอกจากนั้นยังสร้างความสกปรกให้กับพื้นที่ใช้งานเนื่องจากการรั่วซึมของน้ำมันและอาจเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งานได้

อุปกรณ์ประเภทมอเตอร์ไฟฟ้า (electric motor) เป็นอุปกรณ์ที่มีความนิยมมากที่สุดในงานด้านแฮปติก [18] เนื่องจากสามารถควบคุมได้ง่าย งานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้อุปกรณ์ประเภทมอเตอร์กระแสตรงที่มีขนาดเล็กและมีความเฉื่อยต่ำ สามารถสร้างแรงบิดเพื่อสร้างแรงเสมือนให้เกิดขึ้นกับมือผู้ใช้งานได้เพียงพอต่อความต้องการ โดยใช้มอเตอร์กระแสตรงแบบ Brushed DC Permanent Magnet Motor - 32W, 24V ของยี่ห้อ hansen-motor เป็นอุปกรณ์ขับสามารถให้แรงบิดสูงสุด 0.212 นิวตัน-เมตร หรือสามารถสร้างแรงต้านให้กับมือผู้ควบคุมได้สูงสุดเท่ากับ 333 นิวตัน ซึ่งมากเพียงพอสำหรับการใช้งาน

3.7 dSpace System

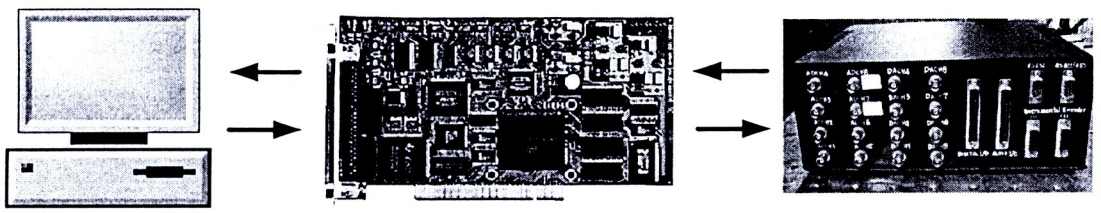
งานวิจัยนี้ใช้ระบบ dSpace ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของ gripper ระบบ dSpace จะรับส่งข้อมูลด้วยรูปแบบการใช้งาน Real–Time Interface (RTI) โดยประกอบด้วยส่วนของการ interface ต่าง ๆ ดังนี้

- 4 multiplexed inputs ขนาด 16-bit analog to digital converter (ADC), 4 inputs with independent 16-bit ADCs และ 8-output digital to analog converter (DAC)
- 2 incremental Encoders
- Onboard independent 64-bit floating point processor
- Onboard Slave DSP

- Onboard memory
- Other digital I/O capabilities

โดยระบบจะประกอบไปด้วยการทำงานร่วมกันของสามส่วนหลัก ๆ คือ

- DS1104 PCI dSpace board
- I/O breakout box
- โปรแกรม ControlDesk และ MATLAB/SIMULINK ที่ถูกติดตั้งไว้ใน host PC คอมพิวเตอร์

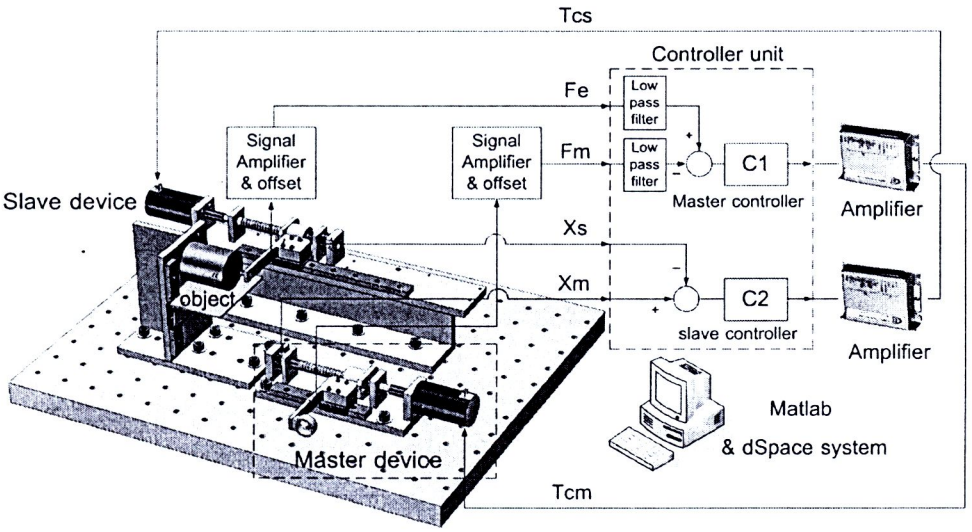


รูป 3.10 ระบบ dSpace สำหรับใช้ Interface เพื่อควบคุมอุปกรณ์ภายนอก

ระบบ dSpace แสดงดังรูป 3.10 มีรูปแบบการใช้งาน Real–Time Interface (RTI) โดยระบบจะทำให้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK สามารถสั่งงานการ์ดควบคุม PCI dSpace Board ที่ถูกติดตั้งเข้ากับ host PC คอมพิวเตอร์ให้ทำงานได้แบบเวลาจริงร่วมกับโปรแกรม ControlDesk โดยผู้ใช้สามารถเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมและสามารถรับหรือส่งสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมไปยังอุปกรณ์ภายนอกโดยใช้ SIMULINK Library ของ DS1104 PCI dSpace board ซึ่งจะทำหน้าที่รับหรือส่งสัญญาณจาก I/O Breakout Box ที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกต่าง ๆ เช่น สัญญาณควบคุมที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดแรงและสัญญาณควบคุมของตำแหน่งที่วัดได้จาก incremental encoder เป็นต้น หลังจากนั้นเมื่อ Build ซอฟต์แวร์ RTI เพื่อทำการคอมไพล์ไฟล์และดาวน์โหลดโค้ดลงไปยังโปรเซสเซอร์บนบอร์ดควบคุม จะทำให้บอร์ดควบคุมทำการควบคุมระบบแบบเวลาจริงตามที่กำหนดไว้ สำหรับในส่วนของการสังเกตค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปขณะควบคุมนั้นผู้ใช้สามารถใช้โปรแกรม ControlDesk ของ dSpace ในการสร้าง GUI (Graphical User Interface) ของผู้ใช้เพื่อการสังเกตค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปได้

3.8 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ

ในการเชื่อมต่อระบบจะมีการเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอกและอุปกรณ์ควบคุมที่สามารถแสดงได้ดังรูป 3.11



รูป 3.11 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ต้นแบบระบบแฮปติกอินเตอร์เฟส

การทำงานของระบบจะเริ่มพิจารณาจากตำแหน่งการเคลื่อนที่ของ gripper ด้านมาสเตอร์ที่ถูกวัดโดย incremental encoder ใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงในการควบคุมการเคลื่อนที่ของ gripper ด้านสเลฟ โดยสัญญาณตำแหน่งที่วัดได้เป็นสัญญาณดิจิทัลถูกเชื่อมต่อเข้ากับ I/O breakout box ของระบบ dSpace ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับส่งสัญญาณที่ทำงานร่วมกับคอมพิวเตอร์ประมวลผลเพื่อส่งสัญญาณแบบอนาล็อกในรูปแรงดันไฟฟ้าเพื่อใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ขับกระแสให้ส่งกระแสไฟฟ้าไปควบคุมมอเตอร์เพื่อขับเพลาทำให้ precision ball screws ที่ถูกยึดติดกับ gripper ด้านสเลฟเกิดการเคลื่อนที่ โดยสัญญาณตำแหน่งที่วัดได้จาก incremental encoder ด้านสเลฟซึ่งเป็นสัญญาณดิจิทัลเชื่อมต่อเข้ากับ I/O breakout box ใช้เป็นสัญญาณป้อนกลับเพื่อควบคุมให้ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของ gripper ด้านสเลฟให้มีการเคลื่อนที่ตามด้านมาสเตอร์ ขณะที่ gripper ด้านสเลฟเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับวัตถุ สัญญาณแรงซึ่งเป็นสัญญาณอนาล็อกจะถูกวัดได้จากอุปกรณ์วัดแรงและใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงจะถูกป้อนเข้าสู่ I/O breakout box ในส่วนของ ADC เพื่อให้คอมพิวเตอร์ประมวลผลและส่งสัญญาณอนาล็อกออกมาจากคอมพิวเตอร์ควบคุมในส่วนของ DAC ในรูปแรงดันไฟฟ้าเพื่อใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ขับกระแสเพื่อส่งกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ด้าน

มาสเตอร์เพื่อขับเพลาทำให้ precision ball screws ที่ถูกยึดติดกับ gripper ด้านมาสเตอร์เกิดการเคลื่อนที่ต้านการควบคุมจากมือผู้ควบคุมและเกิดแรงต้านสัมผัสเกิดขึ้นกับผู้ควบคุมในขณะที่ gripper ด้านสเลฟสัมผัสกับวัตถุ โดยสัญญาณแรงที่วัดได้จากผู้ควบคุมซึ่งเป็นสัญญาณอนาล็อกจะถูกใช้เป็นสัญญาณป้อนกลับและเชื่อมต่อเข้าสู่ I/O breakout box ในส่วนของ ADC เพื่อให้คอมพิวเตอร์ประมวลผลและควบคุมระบบทำให้สัญญาณแรงที่เกิดจากผู้ควบคุมมีขนาดเท่ากับแรงปฏิกิริยาที่ gripper ด้านสเลฟไปสัมผัสกับวัตถุ จึงทำให้ผู้ควบคุมรู้สึกเหมือนได้สัมผัสกับวัตถุนั้นจริง