



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง

การออกแบบอุปกรณ์แฮปติกสององศาอิสระชนิดกลไกแบบขนาน

Design of Parallel Mechanism Haptic Device for 2 Degree of Freedom

นามผู้วิจัย

นายสมโพธิ โดบรรเลง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์กรรมมนต์ ชูประเสริฐ, วศ.ค.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกู่, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่

เดือน

พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การออกแบบอุปกรณ์แฮปติกสององศาอิสระชนิดกลไกแบบขนาน

Design of Parallel Mechanism Haptic Device for 2 Degree of Freedom

โดย

นายสมโพธิ โตบรรเลง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สมโพธิ โทบรเลข 2555: การออกแบบอุปกรณ์แฮปติกสององศาอิสระชนิดกลไกแบบ
ขนาน ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์, Ph.D. 119 หน้า

ในงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบอุปกรณ์แฮปติกชนิดที่อุปกรณ์ติดอยู่กับกราวด์ (Grounded Device) ซึ่งอุปกรณ์ที่ออกแบบนี้เป็นชนิดกลไกห้าลิงก์ขนานแบบ (Five-Bars Parallel Link Mechanism) พื้นที่ทำงานเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 200×200 ตารางมิลลิเมตร สามารถรองรับแรงปฏิกิริยาโต้ตอบกับผู้ใช้งานในระดับ 7 นิวตันและสูงสุดไม่เกิน 30 นิวตัน ซึ่งในงานวิจัยได้แสดงผลการวิเคราะห์จลนศาสตร์ของอุปกรณ์ทั้งฟอร์เวิร์ด ไคเนเมติกส์ (Forward Kinematics) และอินเวิร์ส ไคเนเมติกส์ (Inverse Kinematics) รวมถึงวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ (Kinetics Analysis) และสร้างแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของอุปกรณ์แฮปติกที่ทำการออกแบบโดยใช้ซอฟต์แวร์ Simulink®/SimMechanics™ พร้อมทั้งสร้างแวดล้อมเสมือน (Virtual Environment) ลงในแบบจำลองอุปกรณ์แฮปติกที่สร้างขึ้นเพื่อนำไปวิเคราะห์ก่อนนำไปสร้างอุปกรณ์ต้นแบบในการจำลองสภาพแวดล้อมเสมือนกับอุปกรณ์แฮปติก ค่าทอร์กสูงสุดจากมอเตอร์ที่เลือกไว้จะเป็นตัวกำหนดจุดสิ้นสุดในการจำลอง

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Somphot Tobanleng 2012: Design of Parallel Mechanism Haptic Device for 2 Degree of Freedom. Master of Engineering (Mechanical Engineering),

Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering.

Thesis Advisor: Assistant Professor Taweedej Sirithanapipat, Ph.D. 119 pages.

This research is to demonstrate the results of a grounded type haptic device design and simulation with the virtual environment. The analysis of the five-bars parallel link haptic device both forward kinematics and inverse kinematics is discussed, as well as the kinetics. The haptic device is designed to cover the working area of 200x200 square millimeters with the interaction force about 7 N minimum and 30 N maximum.

The Simulink®/SimMechanics™ is used for the verification of the design and simulation of the virtual environments. The different stiffness in the virtual environment simulations are tested. The maximum torque provided from the selected motor actuators is included to terminate the simulation when the maximum torque is reached.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ ดร.กรรมมณฑ์ ชูประเสริฐ กรรมการที่ปรึกษาสาขาวิชาเอก ที่ได้คำปรึกษาในการเรียน
การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและ
มอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป และขอขอบคุณ คุณอนุศักดิ์
กาญจน์ หัวหน้าฝ่ายแม่พิมพ์ สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม
(RDIP) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้
คำแนะนำต่างๆ

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแต่คุณบิดา มารดา และ
อาจารย์จรัสศรี ชินวงศ์ ที่ได้อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

สมโพธิ โทบรณ
เมษายน 2555

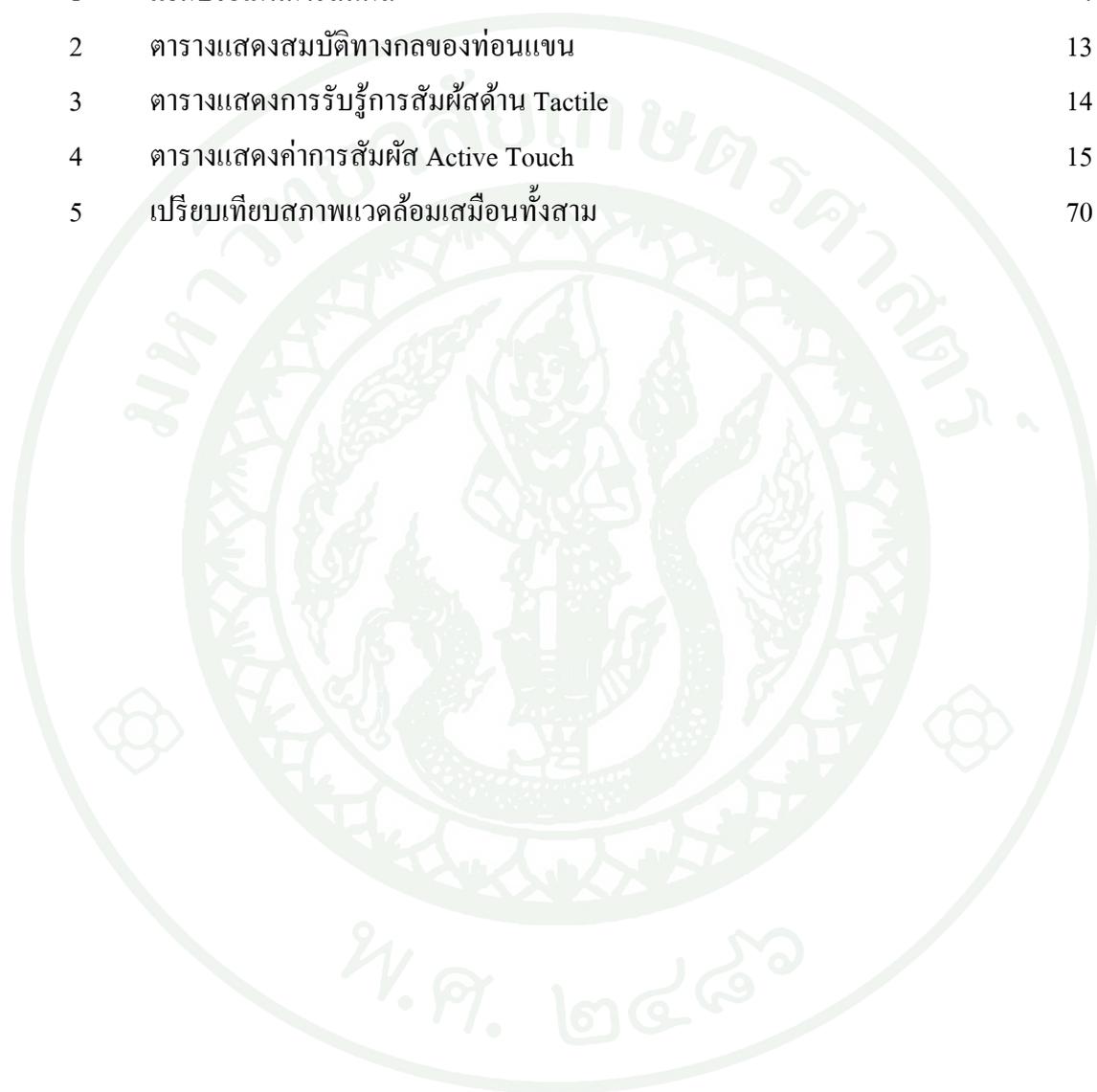
สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	34
อุปกรณ์	34
วิธีการ	34
ผลและวิจารณ์	74
ผล	74
วิจารณ์	80
สรุปและข้อเสนอแนะ	81
สรุป	81
ข้อเสนอแนะ	82
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	83
ภาคผนวก	85
ภาคผนวก ก แบบของชิ้นส่วนอุปกรณ์แฮปติกที่ทำการออกแบบ	86
ภาคผนวก ข คู่มือมอเตอร์และชุดขับที่เลือกใช้ในงานวิจัย	100
ภาคผนวก ค คู่มือที่เกี่ยวข้องของ CMOS Laser Mouse Sensor และ VCSEL	108
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	121

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แยกประเภทการสัมผัส	4
2	ตารางแสดงสมบัติทางกลของท่อนแขน	13
3	ตารางแสดงการรับรู้การสัมผัสด้าน Tactile	14
4	ตารางแสดงค่าการสัมผัส Active Touch	15
5	เปรียบเทียบสภาพแวดล้อมเสมือนทั้งสาม	70



สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ตัวอย่างการรับรู้การสัมผัสเกี่ยวกับน้ำหนักจากการยก	4
2	ตัวอย่างการรับรู้การสัมผัสเกี่ยวกับรูปทรงเฉพาะที่จากแตะ	5
3	ตัวอย่างการรับรู้การสัมผัสเกี่ยวกับรูปทรงโดยรวมจากการจับ	5
4	ตัวอย่างการรับรู้การสัมผัสเกี่ยวกับความอ่อนนุ่มจากการบีบ	5
5	ตัวอย่างการจำลองเสมือนจริง	7
6	รูปตัวอย่างแสดงการจำลองสภาพแวดล้อมเสมือนในการสัมผัสพื้นผิวไม้	7
7	แสดงความสัมพันธ์ของระบบแฮปติก	8
8	อวัยวะรับการสัมผัสที่อยู่ภายในผิวหนัง	10
9	อุปกรณ์แฮปติกชนิดที่ติดอยู่กับกราวด์ (Grounded Haptic Device); The PHANTOM [®] Omni [™] Device	18
10	อุปกรณ์แฮปติกชนิดที่ระบบกราวด์ติดอยู่ที่ร่างกาย (Body Ground System); The CyberGlove [®] II System	19
11	แสดงแกนและมวลมู่เล่ที่ถูกหมุน	20
12	iTorqu 1.0 โดย GRASP Laboratory ของ University of Pennsylvania, USA	20
13	ส่วนประกอบภายในของ The iTorqu 1.0	21
14	ตารางแสดงความคล้ายคลึงของวงจรไฟฟ้าทางกล (Electrical-Mechanical Equivalent)	22
15	แสดงการแปลงลาปลาซ (Laplace-Transformed) สำหรับตัวอย่างองค์ประกอบ ทางกลที่มักพบบ่อยครั้ง	23
16	อุปกรณ์แฮปติกแบบอิมพีแดนซ์ (Impedance Haptic Device)	23
17	อุปกรณ์แฮปติกแบบแอดมิตแตนซ์ (Admittance Haptic Device) The HapticMaster [™]	24
18	อุปกรณ์แฮปติก The Omega 7	25
19	แสดงแผนภาพบล็อกอัลกอริทึมของการถอดความการรับรู้ทางการสัมผัส (Haptic Rendering Algorithm)	27

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	แสดงอุปกรณ์แฮปติก PHANTOM™ Desktop™ Device ที่ใช้ในระบบ SensAble™ Dental Lab™ System	29
21	ขั้นตอนการทำงานทางทันตกรรมของระบบ SensAble™ Dental Lab™ System	30
22	แสดงหุ่นยนต์ของ The da Vinci Robot ซึ่งมี 4 แขน โดยที่แปดเป็นเครื่องมือในการจับ ยึด ยก ตัดและจีเนื้อเยื่อ 3 แขนส่วนอีกหนึ่งแขนเป็นกล้อง	31
23	แสดงการทำงานโดยทั่วไปของระบบ The da Vinci® Surgical System	32
24	แสดงส่วนประกอบหลักของระบบ The da Vinci® Surgical System ภาพ A แสดงคอนโซลสำหรับศัลยแพทย์ (Surgeon Console) ภาพ B แสดงอุปกรณ์ข้างผู้ป่วย (Patient-Side Cart) และ ภาพ C แสดงเครื่องมือของระบบสร้างภาพความละเอียดสูง 3 มิติ (High-Definition 3D Vision System)	33
25	แบบทางกลแบบคร่าวๆ	35
26	แผนภาพแสดงลักษณะทางโครงสร้างที่ออกแบบ	36
27	แผนภาพแสดงตำแหน่งและมุมที่ใช้ในการวิเคราะห์ฟอเวิร์ด ไคเนเมติกส์	37
28	แผนภาพแสดงสามเหลี่ยมคล้าย $\triangle R_3 A_2 R_5$ กับ $\triangle R_3 A_1 R_4$	38
29	แผนภาพแสดงสามเหลี่ยมคล้าย $\triangle R_5 A_2 R_p$ กับ $\triangle R_3 A_1 R_4$	39
30	แผนภาพแสดงมุมที่ใช้ในการวิเคราะห์อินเวอร์ส ไคเนเมติกส์	39
31	แผนภาพมุมใช้ในการวิเคราะห์ทางจลนพลศาสตร์	42
32	แบบจำลองกลไกห้าลิงค์แบบขนานที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการออกแบบความยาวลิงค์	45
33	แผนภาพแสดงตำแหน่งและการเคลื่อนที่ของข้อต่อและก้านของกลไกของแบบจำลอง	45
34	ภาพผลการวิเคราะห์ความเค้นของข้อต่อ	47
35	ภาพแสดงแบบข้อต่อและข้อต่อต้นแบบที่ได้	48
36	แผนภาพแสดง Torque-Motor Speed Characteristics ที่ 200 โวลต์	49
37	ภาพแสดงมอเตอร์และชุดขับที่เลือกใช้งานวิจัย	49
38	ส่วนประกอบของระบบออฟติคอลลมส์	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
39	ตัวอย่างภาพถ่ายที่ถ่ายได้จากแหล่งกำเนิดแสงทั้งจาก LED และเลเซอร์	51
40	แสดงภาพที่ถ่ายพื้นผิวแบบ Sequential Image	52
41	เมาส์ที่เลือกใช้ในงานวิจัย	53
42	แสดงโค้ดโปรแกรมที่ใช้ในการวัดระยะซึ่งเขียนโดย NI-LabVIEW	53
43	ภาพหน้าต่างของโปรแกรมแสดงการทำงานของอุปกรณ์แสปติกที่ทำการออกแบบ	54
44	แสดงโค้ดโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมและแสดงการทำงานของอุปกรณ์แสปติก	55
45	ภาพแบบของส่วนประกอบทั้งหมดของอุปกรณ์แสปติกที่ทำการออกแบบ	56
46	ภาพแสดงอุปกรณ์แสปติกต้นแบบที่สร้างขึ้นจากการออกแบบ	56
47	ตัวอย่าง Machine Environment Block	58
48	ตัวอย่าง Body Block	58
49	ตัวอย่าง Body Actuator Block	59
50	ตัวอย่าง Body Sensor Block	60
51	ตัวอย่าง Joint Block	61
52	ตัวอย่าง Joint Actuator Block	61
53	ตัวอย่าง Joint Sensor Block	62
54	แบบจำลองทางพลวัตของอุปกรณ์แสปติกและโค้ดของแบบจำลอง	63
55	แบบจำลองพลวัตของอุปกรณ์แสปติกต้นแบบและหน้าต่างแสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายสไตลัส ขณะทำการจำลอง	64
56	แผนภาพแสดงเส้นทางเดินของวงกลมรัศมี 50 เซนติเมตร	65
57	ภาพแสดงกราฟเส้นทางของปลายสไตลัส เมื่อเทียบกับเส้นทางที่กำหนดไว้	65
58	แผนภาพแบบจำลองสปริงที่ใช้ในการจำลองการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัตถุเสมือน	66
59	รูปแสดงชนิด รูปร่างและตำแหน่งของสภาพแวดล้อมเสมือนที่จำลองขึ้นทั้งสาม	67
60	แบบจำลองอุปกรณ์แสปติกต้นแบบขณะทำการจำลอง	67
61	แสดงค่าของแรงบิดแบบเรียลไทม์	68

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
62	แผนภาพแสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของปลาย สไตลัส เมื่อเคลื่อนที่ผ่านกำแพงเสมือน	69
63	กราฟแสดงแรงบิดเมื่อเคลื่อนที่ปลายสไตลัส เมื่อเคลื่อนที่ผ่านแวล้อมเสมือน	69
64	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะกระจัดกับแรงตอบสนองต่อแวล้อมเสมือน	70
65	แผนภาพแบบจำลองพลวัตที่ใช้ในการจำลองการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและความเร็วของผู้ใช้งาน	71
66	แผนภาพแสดงพลวัตปฏิกิริยาโต้ตอบระหว่างผู้ใช้งานกับอุปกรณ์แฮดติก	72
67	แบบจำลองอุปกรณ์แฮดติกต้นแบบ	73
68	แผนภาพแสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของปลาย สไตลัส เมื่อเคลื่อนที่ผ่านกำแพงเสมือน	74
69	แสดงการตำแหน่งของนิ้วมือผู้ใช้งานทางแกนตั้งโดยพลอตเทียบกับเวลา	75
70	กราฟแสดงตำแหน่งของปลายสไตลัสในแกนนอน โดยพลอต ตำแหน่งที่กำหนดเทียบกับตำแหน่งจริง	76
71	กราฟแสดงตำแหน่งของปลายสไตลัสในแกนตั้งโดยพลอต ตำแหน่งที่กำหนดเทียบกับตำแหน่งจริง	77
72	กราฟแสดงแรงที่ได้จากการคำนวณ (Computed Force) เทียบกับแรงปฏิกิริยาโต้ตอบกับนิ้วมือของผู้ใช้งาน (Reaction Force)	77
73	กราฟแสดงตำแหน่งในแกนนอนของนิ้วมือผู้ใช้งาน โดยพลอตเทียบกับตำแหน่งของปลายสไตลัส	78
74	กราฟแสดงตำแหน่งในแกนนอนของนิ้วมือผู้ใช้งาน โดยพลอตเทียบกับตำแหน่งของปลายสไตลัส	79
75	กราฟแสดงแรงปฏิกิริยาโต้ตอบกับนิ้วมือของผู้ใช้งาน	79
ภาพผนวกที่		
ก1	แบบของอุปกรณ์แฮดติกหมายเลข 1	87

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก2 แบบของอุปกรณ์แฮปติกหมายเลข 2	88
ก3 แบบของอุปกรณ์แฮปติกหมายเลข 3	89
ก4 แบบของอุปกรณ์แฮปติกหมายเลข 4	90
ก5 แบบของอุปกรณ์แฮปติกหมายเลข 5	91
ก6 แบบของอุปกรณ์แฮปติกหมายเลข 6	92
ก7 แบบของอุปกรณ์แฮปติกหมายเลข 7	93
ก8 แบบของอุปกรณ์แฮปติกหมายเลข 8	94
ก9 แบบของอุปกรณ์แฮปติกหมายเลข 9	95
ก10 แบบของอุปกรณ์แฮปติกหมายเลข 10	96
ก11 แบบของอุปกรณ์แฮปติกหมายเลข 11	97
ก12 แบบของอุปกรณ์แฮปติกหมายเลข 12	98
ก13 แบบของอุปกรณ์แฮปติกหมายเลข 13	99
ข1 คู่มือมอเตอร์และชุดขับเคลื่อนที่ 1	101
ข2 คู่มือมอเตอร์และชุดขับเคลื่อนที่ 2	102
ข3 คู่มือมอเตอร์และชุดขับเคลื่อนที่ 3	103
ข4 คู่มือมอเตอร์และชุดขับเคลื่อนที่ 4	104
ข5 คู่มือมอเตอร์และชุดขับเคลื่อนที่ 5	105
ข6 คู่มือมอเตอร์และชุดขับเคลื่อนที่ 6	106
ข7 คู่มือมอเตอร์และชุดขับเคลื่อนที่ 7	107
ค1 คู่มืออุปกรณ์ภายในของเลเซอร์เม้าส์หน้าที่ 1	109
ค2 คู่มืออุปกรณ์ภายในของเลเซอร์เม้าส์หน้าที่ 2	110
ค3 คู่มืออุปกรณ์ภายในของเลเซอร์เม้าส์หน้าที่ 3	111
ค4 คู่มืออุปกรณ์ภายในของเลเซอร์เม้าส์หน้าที่ 4	112
ค5 คู่มืออุปกรณ์ภายในของเลเซอร์เม้าส์หน้าที่ 5	113
ค6 คู่มืออุปกรณ์ภายในของเลเซอร์เม้าส์หน้าที่ 6	114
ค7 คู่มืออุปกรณ์ภายในของเลเซอร์เม้าส์หน้าที่ 7	115

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า	
ค8	คู่มืออุปกรณ์ภายในของเลเซอร์เม้าส์หน้าที่ 8	116
ค9	คู่มืออุปกรณ์ภายในของเลเซอร์เม้าส์หน้าที่ 9	117
ค10	คู่มืออุปกรณ์ภายในของเลเซอร์เม้าส์หน้าที่ 10	118



การออกแบบอุปกรณ์แฮปติกสององศาอิสระชนิดกลไกแบบขนาน

Design of Parallel Mechanism Haptic Device for 2 Degree of Freedom

คำนำ

อุปกรณ์แฮปติกมีความหลากหลายและแตกต่างกันออกไปตามการใช้งาน ดังนั้นหากจะกล่าวถึงอุปกรณ์แฮปติกจึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงจำนวนองศาอิสระ(Degree of Freedom), แบนด์วิดท์ (Bandwidth), ความละเอียด (Resolution) และอื่นๆ ซึ่งปัจจัยต่างๆ ต่างก็เกี่ยวเนื่องกันเช่น หากต้องการอุปกรณ์แฮปติกที่มีจำนวนองศาอิสระมากขึ้นนั้นก็หมายถึงความซับซ้อนของระบบทางกลและต้นทุนที่เพิ่มมากขึ้นตามเช่นกัน หรือหากต้องการความสมจริงหรือการตอบสนองของอุปกรณ์แฮปติกกับสิ่งแวดล้อมเสมือนให้รู้สึกสมจริง จำเป็นต้องใช้แบนด์วิดท์ที่สูงที่สุดเท่าที่อุปกรณ์ไฟฟ้าทางกลจะมีได้ เนื่องจากความถี่ของมือที่สามารถรู้สึกได้หลายร้อยถึงพันกว่ารอบต่อวินาที

ในงานวิจัยทำการออกแบบอุปกรณ์แฮปติกที่มุ่งหวังเพื่อให้อุปกรณ์สามารถรองรับปฏิกริยาตอบโต้ทางการสัมผัสของผู้ใช้งานต่อสภาพแวดล้อมเสมือน ได้อย่างสมจริงมากที่สุดภายใต้ข้อจำกัดของการออกแบบ และเพื่อให้อุปกรณ์แฮปติกที่ทำการออกแบบเอื้อต่อการนำไปวิจัยและพัฒนาต่อ ดังนั้นในการออกแบบจะใช้ซอฟต์แวร์ช่วยออกแบบและวิเคราะห์ในแต่ละขั้นตอน เพื่อให้ถูกต้องและสอดคล้องกับข้อจำกัดในการออกแบบ นอกจากนั้นยังสร้างและปรับแก้แบบจำลองอุปกรณ์แฮปติกต้นแบบ (Virtual Prototype) เพื่อนำไปใช้อำนวยความสะดวกในการออกแบบและพัฒนาได้เช่น หากต้องการปรับแก้เพื่อเพิ่มจำนวนองศาอิสระของอุปกรณ์แฮปติกก็สามารถนำแบบจำลองไปวิเคราะห์สมบัติทางกลหรือออกแบบชิ้นส่วนที่ทำการออกแบบเพิ่มเติมได้ หรือหากต้องการพัฒนาในส่วนของระบบควบคุมเพื่อให้อุปกรณ์ตอบสนองได้อย่างสมจริงมากยิ่งขึ้นก็สามารถนำเอาแบบจำลองที่สร้างขึ้นไปทดสอบ Control Algorithm Logic ก่อนนำไปทดสอบกับอุปกรณ์ต้นแบบจริง (Physical Prototype) เพื่อลดความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์และยังเอื้อแก่การพัฒนาระบบควบคุมเนื่องจากไม่ต้องพกพาอุปกรณ์ต้นแบบหรือกระทั่งทำสำเนาแบบจำลองอุปกรณ์แฮปติกสำหรับนักพัฒนาระบบควบคุมนำไปใช้งานได้ในคราวเดียวกันหลายๆ คนเพื่อลดเวลาและขั้นตอนในการทดสอบ นอกจากนั้นแบบจำลองอุปกรณ์แฮปติกต้นแบบยังสามารถนำไปปรับจูนอัลกอริทึมเพื่อทำการจำลองที่มีความเที่ยงตรงสูง (High-Fidelity)

วัตถุประสงค์

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ ออกแบบอุปกรณ์แฮปติกที่สามารถรองรับให้ผู้ใช้งานโดยใช้ นิ้วมือสัมผัสผ่าน Stylus ของอุปกรณ์เพื่อรับปฏิกริยาโต้ตอบทางการสัมผัสกับอุปกรณ์แฮปติก โดย อุปกรณ์แฮปติกเป็นแบบชนิดที่ติดอยู่กับกราวด์ (Grounded Device) มีพื้นที่ทำงานในระนาบสอง มิติขนาดเท่ากับ 200×200 ตารางมิลลิเมตร และสามารถรองรับแรงปฏิกริยาโต้ตอบที่ 7 นิวตันสูง ที่สุดอยู่ที่ 30 นิวตัน

ในการออกแบบจะสร้างแบบจำลองอุปกรณ์แฮปติกต้นแบบ สภาพแวดล้อมเสมือน (Virtual Environment) และทำการจำลองด้วย Simulink®/SimMechanic™ เพื่อศึกษาพฤติกรรมทาง กายภาพของอุปกรณ์ (Physical Behaviors) เช่นเพื่อตรวจสอบฟอร์เวิร์ด ไคเนเมติกส์ (Forward Kinematic), อินเวิร์ส ไคเนเมติกส์ (Inverse Kinematic) และเพื่อตรวจสอบซิงกูลาริตี (Singularity) ข้อผิดพลาดต่างๆ ของกลไก ซึ่งช่วยลดปัญหาในการสร้างอุปกรณ์ต้นแบบ ก่อนนำไปปรับแก้แบบ และสร้างเป็นอุปกรณ์แฮปติกต้นแบบ (Physical Prototype) เพื่อนำไปทำการปรับแก้แบบจำลอง อุปกรณ์แฮปติกต้นแบบที่สร้างขึ้นเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมต่อไป

การตรวจเอกสาร

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Srinivasan (2002) ผู้อำนวยการ Laboratory for Human and Machine Haptics: The Touch Lab แห่ง Massachusetts Institute of Technology ทำการศึกษา แนะนำและรวบรวมที่เกี่ยวกับการรับรู้ทางการสัมผัส อุปกรณ์แฮปติกและแวลลุ่มเสมือนไว้ใน “Haptic Interface” ซึ่งในการออกแบบอุปกรณ์แฮปติกในงานวิจัยนี้ใช้ข้อกำหนดทางการสัมผัสโดยอ้างอิงจากเอกสารฉบับนี้

Deniz (2006) ทำการศึกษาเรื่อง Design of Haptic Device for Micro Parts Handling ซึ่งทำการศึกษา ออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์แฮปติกให้เหมาะสมกับ สเลฟ แมนิพิวเลเตอร์ (Slave Manipulator) และอุปกรณ์หยิบจับสำหรับ Micro Parts Handling โดยเลือกใช้กลไกแบบห้าลิ่งค์แบบขนานที่สามารถเคลื่อนที่ได้ในระนาบสององศาอิสระออกแบบพื้นที่ทำงานเท่ากับ 100×100 ตารางมิลลิเมตร โดยการทดลองด้วยวิธีลองผิดลองถูก โดยในงานวิจัยทำการวิเคราะห์ฟอร์เวิร์ดไคเนเมติกส์, อินเวิร์ส ไคเนเมติกส์ รวมถึงทำการวิเคราะห์แรง และสุดท้ายออกแบบระบบควบคุมของอุปกรณ์ โดยในงานวิจัยวิเคราะห์แรงที่ปลายแมนิพิวเลเตอร์โดยใช้หลักสถิติศาสตร์และไม่ได้ทำการวิเคราะห์ความเค้นกับชิ้นงานที่ออกแบบ

Yu (2006) ทำการวิเคราะห์แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบจำลองพลศาสตร์ของกลไกห้าลิ่งค์แบบขนานที่สามารถเคลื่อนที่ได้ในระนาบสององศาอิสระห้าลิ่งค์แบบขนานโดยใช้วิธีการลากรางจ์ (Lagrangian Formulation) โดยในงานวิจัยได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์ระบบและออกแบบระบบควบคุม ในงานวิจัยแสดงผลการวิเคราะห์แบบจำลองพลศาสตร์ซึ่งมีความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้นสูง (Highly Nonlinear)

Yang (2010) ทำการวิเคราะห์แบบจำลองคณิตศาสตร์พลศาสตร์ของกลไก Spatial หกองศาอิสระ แบบขนานโดยใช้วิธีการของเคน (Kane Approach) โดยในงานวิจัยได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ไปสร้างแบบจำลองลงใน Simulink® และสร้างแบบจำลองกลไก Spatial หกองศาอิสระ แบบขนานภายใต้เงื่อนไขเดียวกันโดยใช้ SimMechanic™ เมื่อทำการจำลองการเคลื่อนที่ของแบบจำลองทั้งสองโดยในงานวิจัยเลือกใช้ตัวควบคุม PID ผลที่ได้มีความถูกต้อง คณะวิจัยจึงสรุปว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นได้ผลดีและมีความเหมาะสมกับกลไก Spatial หกองศาอิสระ แบบขนานและกลไกอื่นที่มีความซับซ้อน

ทฤษฎีและเหตุผล

การรับรู้ถึงการสัมผัสมีนัยถึงการรับรู้ทางแฮปติก “แฮปติก (haptic)” มาจากรากศัพท์กรีกของคำว่า “haptikos” ซึ่งหมายถึง “ความสามารถในการรับรู้ของการสัมผัส” การรับรู้ได้ถึงการสัมผัสมีสองประเภท คือ Kinesthesia และ Tactile กล่าวคือ Kinesthesia เป็นการสัมผัสที่สามารถสัมผัสได้ด้วยปลายอวัยวะด้วยกล้ามเนื้อ เส้นเอ็นและข้อต่อ ซึ่งมันสามารถจำลองได้ด้วยการเคลื่อนที่ของร่างกายและการป้อนกลับแรง (Force Feedback) หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการสัมผัสของแรงและการเคลื่อนที่ ส่วน Tactile เป็นการสัมผัสได้ด้วยผิวหนังหรือการรับรู้ได้จากปลายประสาทสัมผัสที่ผิวหนัง ตัวอย่างของการรับรู้สัมผัสแสดงไว้ตามภาพที่ 1 ถึงภาพที่ 5

ตารางที่ 1 แยกประเภทการสัมผัส

การรับรู้การสัมผัสแบบ Tactile	การรับรู้การสัมผัสแบบ Kinesthesia
ความหยาบของพื้นผิว	ขนาด
การสัมผัสที่อ่อน	รูปร่าง
อุณหภูมิ	น้ำหนัก
การกระจายความดันและความเปียก	การเคลื่อนที่เชิงเส้นและเชิงมุมในอวกาศ



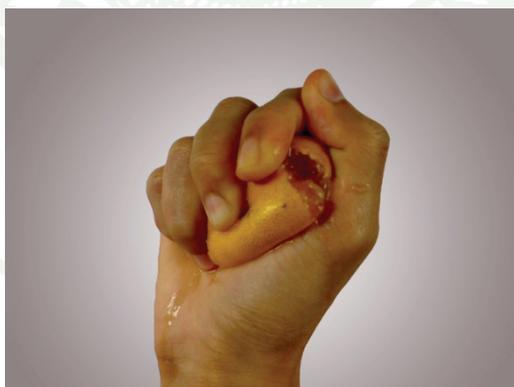
ภาพที่ 1 ตัวอย่างการรับรู้การสัมผัสเกี่ยวกับน้ำหนักจากการยก



ภาพที่ 2 ตัวอย่างการรับรู้การสัมผัสเกี่ยวกับรูปทรงเฉพาะที่จากแตะ



ภาพที่ 3 ตัวอย่างการรับรู้การสัมผัสเกี่ยวกับรูปทรงโดยรวมจากการจับ



ภาพที่ 4 ตัวอย่างการรับรู้การสัมผัสเกี่ยวกับความอ่อนนุ่มจากการบีบ

ระหว่างที่เกิดการสัมผัสกับวัตถุหรือสิ่งแวดล้อมต่างๆไปในชีวิตประจำวันนั้นจะทำให้มีแรงเกิดขึ้นบนผิว ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการรับรู้จะถูกรับรู้โดยประสาทรับรู้บนผิวหนัง ข้อต่อ กล้ามเนื้อ ยึดและกล้ามเนื้อไม่โดยตรงก็โดยอ้อมและจะถูกนำไปยังสมองโดยระบบประสาทสัมผัสซึ่งจะนำไปสู่การรับรู้ทางแสปติก กล้ามเนื้อ เส้นประสาท หรือศูนย์กลางที่มีผลหรือทำให้เกิดการเคลื่อนไหวจะได้รับคำสั่งที่ถูกถ่ายทอดมาจากสมองกระตุ้นกล้ามเนื้อซึ่งส่งผลต่อการเคลื่อนไหวของมือและแขนซึ่งทำให้เกิดข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการรับรู้การสัมผัส กล้ามเนื้อ เส้นประสาท หรือศูนย์กลางที่มีผลหรือทำให้เกิดการรับรู้นี้จะทำงานเป็นวงรอบอย่างต่อเนื่องซึ่งเกิดขึ้นทั้งระหว่างที่ทำการจับต้อง

เนื่องจากปัจจุบันนี้มีความต้องการในการสื่อสารทางการสัมผัสผ่านทางคอมพิวเตอร์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ เราจึงจำเป็นต้องสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการสื่อสารระหว่างผู้ใช้งานและคอมพิวเตอร์ (User Interface) ดังนั้นเราจึงอาจกล่าวถึงการรับรู้ทางการสัมผัสในนัยแห่งความเสมือนจริง (Virtual Reality) ได้ว่าการรับรู้ทางแสปติกที่เกิดขึ้นจากสิ่งแวดล้อมหรือวัตถุโดยทั่วไปนั้นขึ้นอยู่กับรับรู้ถึงสัญญาณการสัมผัสที่เกิดขึ้นจากสัญญาณทางกลเช่น แรง แรงบิด การเคลื่อนที่ รูปทรงหรือน้ำหนัก แต่ในทางกลับกันนั้นการรับรู้ทางแสปติกภายในแวดล้อมเสมือน (Virtual Environments) นั้นขึ้นอยู่กับรับรู้ถึงสัญญาณการสัมผัสที่เกิดขึ้นจากสัญญาณทางกลที่ถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ผ่านอุปกรณ์

เทคโนโลยีการสร้างความเป็นจริงเป็นเทคโนโลยีที่ทำให้ผู้ใช้งานสามารถสื่อสารกับสภาพแวดล้อมเสมือนที่ถูกจำลองขึ้นจากคอมพิวเตอร์ได้ โดยที่ส่วนใหญ่แวดล้อมเสมือนที่จำลองขึ้นมักพบในรูปแบบการเห็น (Visual Experience) ผ่านอุปกรณ์แสดงผลกราฟฟิก (Graphic Display) เช่นจอคอมพิวเตอร์ โทรทัศน์ หรือแม้กระทั่งจอในโรงภาพยนตร์ ส่วนในรูปแบบเสียง (Sound Experience) ผ่านอุปกรณ์แสดงผลของเสียง (Auditory Display) เช่นลำโพงหรือฮาร์ดไมคูลต่างๆ และสุดท้ายการสัมผัสผ่านอุปกรณ์แสดงผลทางการสัมผัส (Haptic Display)



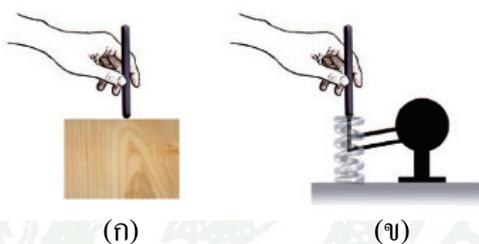
(ก)

(ข)

ภาพที่ 5 ตัวอย่างการจำลองเสมือนจริง

- (ก) ภาพยนตร์ สำหรับตัวอย่างแบบจำลองเสมือนจริงที่ไม่เป็นเรียลไทม์ (Non-Real Time)
 (ข) การผ่าตัดทางไกล สำหรับตัวอย่างแบบจำลองเสมือนจริงที่เป็นเรียลไทม์ (Real Time)

ที่มา: Intuitive Surgical, USA (n.d.)



(ก)

(ข)

ภาพที่ 6 รูปตัวอย่างแสดงการจำลองสภาพแวดล้อมเสมือนในการสัมผัสพื้นผิวไม้

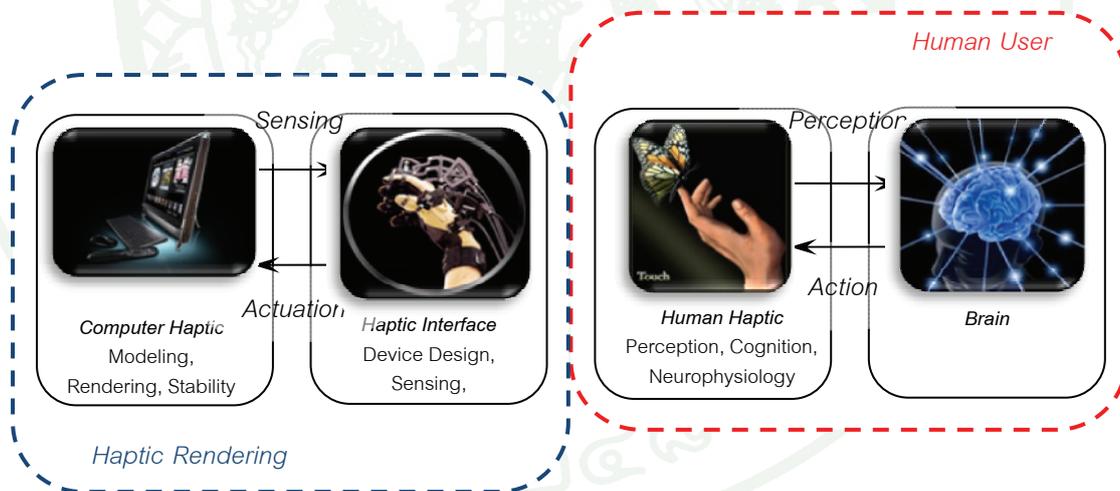
- (ก) พื้นผิวไม้จริง (ข) พื้นผิวไม้เสมือนที่จำลองขึ้นในอุปกรณ์แฮปติก

ที่มา: Kuchenbecker, Fiene and Niemeyer (2006)

การปฏิสัมพันธ์โต้ตอบทางแฮปติกระหว่างบุคคลกับคอมพิวเตอร์จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่จะสามารถแปลงการเคลื่อนที่ของบุคคลไปเป็นปริมาณที่สามารถอินพุตเข้าไปยังคอมพิวเตอร์ได้ และในขณะเดียวกันก็สามารถที่จะแปลงปริมาณที่ได้จากการคำนวณไปเป็นแรงหรือแรงบิดให้บุคคลรับรู้ได้เช่นกัน อุปกรณ์ชนิดนี้มีหลากหลายประเภทที่สร้างขึ้นเพื่อให้สามารถมีปฏิสัมพันธ์โต้ตอบด้านแฮปติกโดยผ่านทั้งมือหรือแขนหรืออาจทั้งร่างกาย โดยในที่นี้จะทำการพิจารณาเพียงประเภทที่ใช้งานด้วยมือ ซึ่งงานวิจัยนี้เราจะพิจารณาเพียงอุปกรณ์แฮปติกที่มีปฏิสัมพันธ์โต้ตอบกับมือเท่านั้น อุปกรณ์แฮปติกสามารถมีได้หลายองศาอิสระอุปกรณ์แฮปติกที่มีสามองศาอิสระจะ

สามารถเคลื่อนที่แบบเลื่อนได้ในสามมิติ ส่วนอุปกรณ์แฮปติกที่มีหกองศาอิสระจะสามารถเคลื่อนที่แบบเลื่อนและแบบหมุนได้ในสามมิติ อุปกรณ์แฮปติกแบบควบคุมด้วยมือ โดยทั่วไปจะมีทั้งแบบลิงค์ที่ต่อกันแบบอนุกรมหรือขนาน ซึ่งตำแหน่งของข้อต่อจะวัดจากเอนโคเดอร์และแรงบิดที่ได้เกิดจากมอเตอร์

ดังนั้นอุปกรณ์แฮปติกจึงเป็นอีกประเภทหนึ่งของอุปกรณ์เชื่อมต่อกับผู้ใช้งานที่ทำการอินเตอร์เฟซระหว่างผู้ใช้งานกับคอมพิวเตอร์ให้เกิดการสื่อสารทางการสัมผัสระหว่างกันที่สมมาตร และเกิดการรับส่งข้อมูลระหว่างกันเป็นไปในสองทิศทางเสมอ ดังภาพที่ 7 และระบบปฏิสัมพันธ์ทางการสัมผัสระหว่างคอมพิวเตอร์กับผู้ใช้งานหลักๆ จะประกอบไปด้วยในส่วนของความรู้สึกสัมผัสของมนุษย์ (Human Haptic) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการรับรู้และการจับต้องของผู้ใช้งานผ่านทาง การสัมผัส และในส่วนที่สองคือในส่วนอุปกรณ์แฮปติกนั่นเอง ในส่วนนี้จะเกี่ยวข้องกับการออกแบบ การสร้างและการใช้งานอุปกรณ์แฮปติก และในส่วนสุดท้ายก็คือในส่วนสุดท้ายก็คือคอมพิวเตอร์แฮปติกซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการลำดับขั้นตอนและโปรแกรมชุดคำสั่ง (Algorithm) และซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างและการจำลองการสัมผัสและการรับรู้สึกดต่อวัตถุเสมือนจริง



ภาพที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ของระบบแฮปติก

เพื่อที่จะทำการสร้างการรับรู้ของการสัมผัสกับวัตถุเสมือนจริง เราจำเป็นต้องสร้างแรงปฏิกิริยาของวัตถุเสมือนจริงที่กระทำบนผิวของผู้ใช้งาน เมื่อผู้ใช้งานใช้งานอุปกรณ์แฮปติก เซนเซอร์ตำแหน่งที่อยู่ในตัวอุปกรณ์แฮปติกจะส่งตำแหน่งที่ปลาย สไตลัส ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ แบบจำลองของวัตถุภายในคอมพิวเตอร์จะคำนวณแรงบิดและสั่งงานไปยังแอกชูเอ-

เตอร์ ที่อยู่ภายในอุปกรณ์แฮปติกซึ่งการทำงานเป็นแบบเรียลไทม์ ดังนั้นแรงปฏิกิริยาที่คำนวณได้ จะถูกส่งกลับมายังผู้ใช้งาน ซึ่งนำมาสู่การเกิดการรับรู้ทางการสัมผัสของวัตถุเสมือนจริง

1. การรู้สึกสัมผัสของมนุษย์ (Human Haptic)

เมื่อไรก็ตามที่เราสัมผัสกับวัตถุ แรงที่กระทำจะเกิดขึ้นบนผิวของเราทั้งแรงสุทธิที่เกิดขึ้น และการเคลื่อนที่ของแขนขาต่างๆ จะถูกส่งไปยังสมองในรูปแบบของข้อมูลที่เป็น Kinesthetic ซึ่งถูกส่งออกไปจากแหล่งกำเนิดที่หลากหลายเช่นปลายประสาทสัมผัสในข้อต่อ เอ็นยึดและกล้ามเนื้อ ซึ่งจะเป็นคุณสมบัติหลายอย่างของวัตถุเช่น รูปร่างที่มีขนาดใหญ่และความยืดหยุ่น ซึ่งต้องใช้การเคลื่อนที่ของมือและแขนสัมผัสในการตรวจสอบ นอกจากนี้การเกิดและการเปลี่ยนแปลงของการกระจายตัวของแรง (Force Distribution) ภายในพื้นที่ที่เกิดการสัมผัสบนผิวจะถูกส่งไปยังสมองในรูปแบบของข้อมูลที่เป็น Tactile โดยปลายประสาทสัมผัสหลายประเภทที่อยู่ภายในผิวเช่นความหยวบละเอียดของพื้นผิวและความลื่นของพื้นผิววัตถุ รูปร่างที่มีขนาดเล็กๆ และความอ่อนนุ่ม จะรู้สึกผ่านประสาทรับรู้ Tactile และนอกจากนั้นการรับรู้เกี่ยวกับอุณหภูมิของผิวซึ่งสัมพันธ์กับอุณหภูมิและสมบัติทางความร้อนของวัตถุยังสามารถรับรู้ผ่านปลายประสาทรับรู้ Tactile พิเศษอีกด้วย

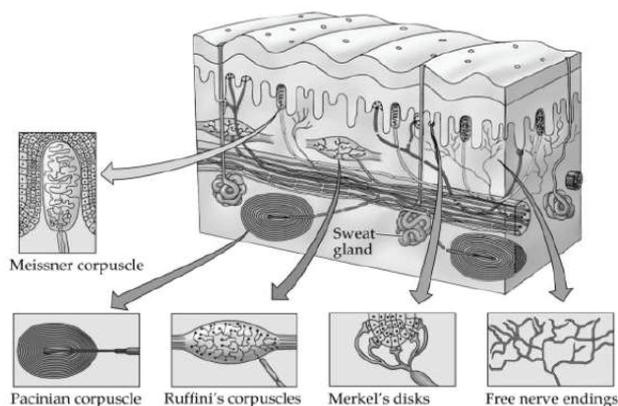
ระบบความรู้สึกสัมผัสของมนุษย์ (Human Haptic System) ประกอบด้วยระบบกล้ามเนื้อ เส้นประสาทและศูนย์กลางที่มีผลหรือทำให้เกิดการรับรู้ซึ่งทำให้เกิดการสำรวจหรือการจับต้องได้ และระบบการรับรู้ (Cognition System) ซึ่งสามารถเชื่อมต่อความรู้สึกจากการสัมผัส (Sensation) ไปจนถึงการสำเนียงในการสัมผัส (Perception)

ความรู้สึกจากการสัมผัสเกิดขึ้นจากส่วนของระบบการรับรู้ภายในร่างกายซึ่งมีชนิดของการสัมผัสแบบ Discriminative Touch (รวมถึงการสัมผัส ความดันและการสั่นสะเทือน) การสัมผัสแบบ Proprioception (รวมถึงมุมของข้อต่อ ความยาวของกล้ามเนื้อและอัตราการเปลี่ยนแปลงความยาวของกล้ามเนื้อและความตึงของเอ็นยึด) และการรับรู้ได้ถึงความเจ็บปวดและอุณหภูมิ (รวมถึงการคันและจี้จี้) การรับรู้สัมผัสแฮปติกหลักที่สำคัญคือสองอย่างแรก

ระบบการรับรู้ของร่างกายทางการสัมผัสแบบ Discriminative Touch เกิดขึ้นที่ประสาทรับรู้ 4 ประเภทที่อยู่ภายในผิวหนัง Glabrous Skin บนมือซึ่งประกอบด้วย Meissner's Corpuscles, Pacinian Corpuscles, Merkel's Disks และ Ruffini Endings ทั้ง Meissner's Corpuscles และ Pacinian Corpuscles เป็น Rapidly Adapting (RA) ซึ่งโดยมากจะตอบสนองถึงการเปลี่ยนแปลง

stimuli ในขณะที่ Merkel's disks และ Ruffini endings เป็น Slowly Adapting (SA) ซึ่งจะรับรู้ถึงความคงที่ของการกระตุ้นที่ปรากฏ ในขณะที่เราทราบถึงลักษณะทางกายวิภาคของประสาทรับรู้พวกนี้หากแต่เราเข้าใจน้อยมากถึงการรับรู้ทางจิตวิทยาที่เกี่ยวข้องกับความสัมพัทธ์ระหว่างตัวกระตุ้นกับการรับรู้และสภาพจิต (Psychophysical Perception)

Pacinian corpuscles ตอบสนองต่อการสั่นสะเทือนที่มีความถี่สูงๆ เช่นมันสามารถรับรู้ได้ถึง texture เมื่อนิ้วมือเคลื่อนที่ลื่นที่ลื่นไปบนพื้นผิว Meissner's corpuscles ไวต่อการสัมผัสต่อขอบที่แหลมคม ส่วน Ruffini endings ไวต่อการดึงของผิวและ Merkel's Disks ไวต่อขอบและความดัน Proprioception Modality (kinesthesia) เป็นส่วนหลักที่สำคัญสำหรับการสัมผัส แต่อย่างไรก็ตามเราเข้าใจเกี่ยวกับประสาทรับรู้ของมันน้อยเมื่อเทียบกับระบบการรับรู้ของร่างกายทางการสัมผัสแบบ Discriminative Touch ประสาทรับรู้มุมของข้อต่อ ทำงานร่วมกับ Ruffini Endings และ Pacinian Corpuscles อยู่ที่ข้อต่อซึ่งตอบสนองต่อแรงดันที่กระทำต่อประสาทรับรู้ Muscle Spindles ซึ่งบอกความยาวกล้ามเนื้อและอัตราการเปลี่ยนแปลงความยาวของกล้ามเนื้อ ซึ่งมันไม่เพียงแต่ส่งข้อมูลไปยังสมองเท่านั้นแต่มันยังสามารถรับคำสั่ง spindle ส่วน Golgi Tendon Organs จะตอบสนองต่อแรงดึงผิวภายในกล้ามเนื้ออีกด้วยซึ่งดูเหมือนว่าจะมีบทบาทต่อการควบคุมกล้ามเนื้อ ในอุปกรณ์แฮปติกจะทำงานโดยใช้หลักการที่สำคัญเหล่านี้ในการรับรู้การสัมผัส



ภาพที่ 8 อวัยวะรับการสัมผัสที่อยู่ภายในผิวหนัง

ที่มา: Kothari (2004)

เนื่องจากจำนวนองศาอิสระที่มีจำนวนมาก ความหลากหลายของระบบย่อยๆ ต่างๆ ของระบบรับรู้ทางการสัมผัส ปลายประสาทการรับรู้ที่แตกต่างกันกระจายตัวอยู่ด้วยกัน และ

ธรรมชาติของทั้งประสาทการรับรู้และสิ่งการที่เกี่ยวกับการสัมผัส ความสามารถและข้อจำกัดของความรู้สึกสัมผัสของมนุษย์ ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดในรายละเอียดที่มีอยู่อย่างมากมายในการออกแบบอุปกรณ์แฮปติก ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้จะสรุปรายละเอียดโดยย่อของผลความสามารถในการรับรู้ทางการสัมผัสของมนุษย์ทางจิตวิทยาที่เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งกระตุ้นกับความรู้สึกและสภาพจิตในสภาพแวดล้อมจริงในสองระดับคือ การรับรู้และควบคุมตัวแปรของการอินเตอร์เฟซและสองการสำเนียงของการสัมผัส แต่อย่างไรก็ตามมนุษย์สามารถรับรู้ได้ถึงความร้อน การจี้จี้ความเจ็บปวดและอื่นๆ ผ่านปลายประสาทการรับรู้ภายในผิว แต่ในงานวิจัยนี้จะเน้นในส่วนของการรับรู้และควบคุมตัวแปรของการอินเตอร์เฟซของมนุษย์เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบอุปกรณ์แฮปติกในงานวิจัยชิ้นนี้

2 การรับรู้และการควบคุมตัวแปรของการอินเตอร์เฟซ

2.1 ตำแหน่งและการเคลื่อนที่ของแขนขา

ผลการทดลองทางจิตวิทยาภาพถึงการสำเนียงของตำแหน่งและการเคลื่อนที่ของแขนพบว่ามนุษย์สามารถตรวจพบการหมุนของข้อต่อในหน่วยของอัตราส่วนระหว่างองศาที่หมุนไปต่อช่วงเวลาในหน่วยของวินาที แบนด์วิดท์ของระบบความสามารถในการรับรู้ของการเคลื่อนไหวอยู่ที่ประมาณ 20-30 Hz (Brook, 1990) โดยทั่วไปความไวในการรับรู้ได้ต่อการหมุนของข้อต่อที่อยู่ใกล้ศูนย์กลางการรับรู้จะสูงกว่าข้อต่อที่อยู่ไกลศูนย์กลางการรับรู้โดยที่ค่าความต่างที่สนใจ (Just Noticeable Difference; JND) อยู่ที่ประมาณ 2.5 องศาสำหรับข้อต่อที่นิ้วมือ 2 องศาสำหรับข้อต่อที่ข้อมือและข้อศอก และประมาณ 0.8 องศาที่ข้อต่อที่ใหญ่ (Tan, Srinivasan, Eberman and Cheng, 1994) จากผลการทดลองของความสามารถในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนของมนุษย์ โดยทั่วไปหากจากการจับเคลื่อนย้ายมวล สปริงและแดมเปอร์ที่มีสมบัติเฉพาะที่หลากหลาย (Brook, 1990; Jones and Hunter, 1992; Poulton, 1974; Sheriden, 1992) ได้ค่า Differential Threshold ที่วัดได้อยู่ที่ประมาณ 8% และพบว่า แบนด์วิดท์ในการเคลื่อนที่ของมือของมนุษย์ขึ้นกับลักษณะของการทดลอง กล่าวคือ สำหรับการให้สัญญาณฉับพลันจะอยู่ที่ประมาณ 1-2 Hz สำหรับการให้สัญญาณเป็นคาบจะอยู่ที่ประมาณ 2-5 Hz สำหรับการให้สัญญาณที่ทราบเส้นทาง การโคจรอยู่แล้วจะอยู่ที่เกือบ 5 Hz และสำหรับปฏิกริยาที่ไม่เจตนาต่อสิ่งกระตุ้นจะอยู่ที่ประมาณ 10 Hz

2.2 แรงสัทธของการสัมผัส

เมื่อเราทำการสัมผัสหรือกดวัตถุผ่านการเคลื่อนที่ของมือ แรงที่เกิดจากการสัมผัสจะถูกรับรู้ได้โดยระบบการรับรู้ทั้ง Tactile และ Kinesthetic แรงที่เกิดจากการสัมผัสทั้งหมดอาจเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุดเพียงหนึ่งเดียวที่พิจารณาทั้งสัญญาณประสาทในระบบการรับรู้และการควบคุมเงื่อนไขหรือสภาวะการสัมผัสผ่านระบบกล้ามเนื้อ เส้นประสาท หรือศูนย์กลางที่มีผลหรือทำให้เกิดการเคลื่อนไหว

JND สำหรับแรงที่เกิดจากการสัมผัสอยู่ที่ 5-15% ของค่าของแรงอ้างอิงที่ได้จากหลากหลายเงื่อนไขรวมถึงตัวแปรหลักๆอย่างขนาดของแรง ระบบกล้ามเนื้อและวิธีการทดลอง นำมาซึ่งการรับรู้ถึงการสัมผัสแบบ Kinesthetic (Jones, 1989; Pang, Tan, and Durlach, 1991; Tan et al., 1992) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องอีกชิ้นหนึ่งคือทำการสำรวจความสามารถของมนุษย์ในการจำแนกความแตกต่างของน้ำหนักของวัตถุ จากการวิจัยพบว่า JND มีค่ามากกว่าประมาณ 10% เล็กน้อย นอกจากนั้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจับและยกวัตถุโดยการใช้สองนิ้วหนีบจับ (Johansson and Westling, 1984) ยังแสดงค่าอัตราส่วนระหว่างแรงหนีบและแรงยกที่บุคคลจะควบคุมรักษาสภาพหนึ่งที่จะไม่ทำให้วัตถุไม่ลื่นไถล ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีค่าแรงหนีบน้อยกว่าแรงยกเสมอ ค่าของแรงที่มือยังคงสามารถควบคุมได้ที่มีค่ามากที่สุดที่สามารถกระทำได้ด้วยนิ้วมืออยู่ที่ประมาณ 100 นิวตัน และแรงที่สามารถสังเกตได้จากการมองเห็นอยู่ที่ประมาณ 0.04 นิวตันหรือประมาณ 1% หรือมากกว่า (Srinivasan and Chen, 1993; Tan, Srinivasan, Eberman and Cheng, 1994)

2.3 การสำเนียงของสภาวะการสัมผัสและสมบัติของวัตถุ (Perception of Contact Conditions and Object Properties)

ถึงแม้ว่าความรู้สึกรับรู้สัมผัส Tactile ของมนุษย์จะมีความหลากหลายเมื่อสัมผัสกับวัตถุ แต่แท้จริงแล้วเกิดจากการรวมสภาวะพื้นฐานเพียงสองสามอย่างได้แก่ความตึงของผิวหนังด้านข้าง การสั่นสะเทือน การเคลื่อนที่สัมผัสตามผิววัตถุและการแตงตั้งจากกับผิววัตถุ การสำเนียงทางการสัมผัสของมนุษย์ผ่านทางข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับ Tactile จะถูกถ่ายทอดโดยปลายประสาทสัมผัสที่ได้รับการกระตุ้นจากกลไกการกระตุ้นภายในผิวหนัง

การสำเนียงถึงความขรุขระของพื้นผิวสามารถหาได้อย่างเป็นเอกเทศ (เนื่องจากการรับรู้ทาง Tactile) และขึ้นอยู่กับความกว้างของร่อง แรงค์ที่ใช้ในการสัมผัสและอุณหภูมิแต่ไม่ขึ้นกับความเร็วที่ใช้ในการสำรวจ (Loomis and Lederman, 1986) ผลการวิจัยที่น่าสนใจในการสำเนียงของการลื่นไถล ความหยาบละเอียดของพื้นผิว รูปร่างและความหนืด ดังนี้ มนุษย์สามารถลูบเพื่อตรวจพบเมื่อเจอตุ่มเดี่ยวๆ ที่มีความสูงประมาณ 2 ไมโครเมตรที่อยู่บนแผ่นกระจกเรียบๆ ได้จากการตอบสนองของเส้นประสาทแบบ Rapidly Adapting Fiber ประเภท Meissner-type (LaMotte and Whitehouse, 1986; Srinivasan, Whitehouse and LaMotte, 1990) นอกเหนือจากนั้น มนุษย์สามารถลูบเพื่อตรวจพบตุ่มที่มีความสูงประมาณ 0.075 ไมโครเมตรที่อยู่บนแผ่นเรียบๆ เนื่องจากการตอบสนองของเส้นประสาท Pacinian Corpuscle (LaMotte and Srinivasan, 1991)

ตารางที่ 2 ตารางแสดงสมบัติทางกลของท่อนแขน

องศาอิสระ (Degree of Freedom)	
ไหล่	4 (shrug, flexion, abduction, rotation)
ข้อศอก	2 (flexion, pronation)
ข้อมือ	2 (flexion, pronation)
นิ้วมือแต่ละนิ้ว	4 (abduction+3 flexion)
Bandwidth ของระบบกล้ามเนื้อ เส้นประสาทและศูนย์กลางที่ทำให้เกิดการเคลื่อนไหว	
การให้สัญญาณจับปล้น (Unexpected Signal)	1-2 Hz
การให้สัญญาณเป็นคาบ (Periodic Signal)	2-5 Hz
ปฏิกิริยาที่ไม่เจตนาต่อสิ่งกระตุ้น (Reflex Action)	10 Hz
แรงที่กระทำต่อปลายนิ้วมือ	
แรงที่ใช้ในการหนีบจับ	1-10 N
แรงที่มือยังคงสามารถควบคุมได้	สามารถสูงสุดได้ถึง 100 N
ความละเอียดในการควบคุม	0.05 ถึง 0.5 N
ช่วงของแรงในการกำ	50-500 N

ที่มา: Brook (1990)

ตารางที่ 3 ตารางแสดงการรับรู้การสัมผัสด้าน Tactile

การรับรู้การสัมผัสด้าน tactile	
Indentation Threshold	
อยู่กับที่	20 ไมโครเมตร, 0.3 มิลลิวัตตันต่อตาราง มิลลิเมตร
10 Hz	10 ไมโครเมตร
250 Hz	0.1 ไมโครเมตร
การตรวจหาลักษณะเฉพาะ (Feature Detection)	
Texture	0.075 ไมโครเมตร
ตุ่มเด็ยวๆ	2 ไมโครเมตร
แรงต้งนากที่เกิดขึ้นเมื่อตรวจหาลักษณะเฉพาะ (Normal Force when Detecting Feature)	0.4-1.1 N (ทั่วไป) 0.3-4.5 N (ช่วง สังเกตการณ์)
ร้อนหรือเย็น	
อุณหภูมิน้อยที่สุดที่สามารถตรวจพบการเปลี่ยน (Detection Threshold for Temperature Change)	0.01°C/s
เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา (Reaction Time)	300-900 ms
การทนต่อความร้อนอย่างต่อเนื่อง (Persistence Hot)	มากกว่า 40°C (เกิดความรู้สึกเจ็บปวดเมื่อ อุณหภูมิมากกว่า 48°C)
การทนต่อความเย็นอย่างต่อเนื่อง (Persistence Cold)	น้อยกว่า 20°C (เกิดความรู้สึกเจ็บปวดเมื่อ อุณหภูมिन้อยกว่า 15°C)

ที่มา: Sherrick and Cholewiak (1986), Srinivasan (1995)

ตารางที่ 4 ตารางแสดงค่าการสัมผัสแบบแอกทีฟ ประกอบด้วย Tactile, Kinesthetic และระบบกล้ามเนื้อ เส้นประสาทและศูนย์กลางที่ทำให้เกิดการเคลื่อนไหว

ปัจจัยกำหนด (Parameter)	(JND)
ความยาว	10% หรือน้อยกว่า
ความเร็ว	10%
ความเร่ง	20%
แรง	7%
Compliance	8% สำหรับพื้นผิวแข็งเกร็ง เช่น คีย์เปียโน (Rigid Surface)
Compliance	3% สำหรับพื้นผิวที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้ เช่น ยาง (Deformable Surface)
ความหนืด	14%
มวล	21%
การตำหนึกลงถึงความแข็งเกร็ง (Rigidity Perception)	25 นิวตันต่อมิลลิเมตรหรือมากกว่า

ที่มา: Beauregard et al. (1995); Chen and Srinivasan (1998)

3. อุปกรณ์แฮปติก (Haptic Device)

เมื่อกล่าวถึงอุปกรณ์แฮปติกมักกล่าวถึง การออกแบบ การสร้างและการใช้งานของตัวเครื่อง เพื่อแทนที่หรือเพิ่มการสัมผัสของมนุษย์ นอกจากนั้นอุปกรณ์แฮปติกยังรวมไปถึงหุ่นยนต์อัตโนมัติหรือหุ่นยนต์ควบคุมทางไกลอีกด้วย และในงานวิจัยนี้จะเน้นที่อุปกรณ์แฮปติกที่อินเตอร์เฟซกับสภาพแวดล้อมเสมือน

อุปกรณ์แฮปติก คืออุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบของชิ้นส่วนทางกลซึ่งมีสัมผัสทางกายภาพกับร่างกายหรือชิ้นส่วนของร่างกายของผู้ใช้งาน ใช้สำหรับการแลกเปลี่ยนข้อมูลกับระบบประสาทของมนุษย์ ในงานที่ต้องการใช้อุปกรณ์แฮปติกจะเป็นงานที่ผู้ใช้งานต้องการถ่ายทอดกิริยาหรือการทำงานของระบบกล้ามเนื้อและประสาทสัมผัสที่ต้องการ โดย การอินเตอร์เฟซทางกายภาพและในทางกลับกันก็ยังแสดงข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการรับรู้สัมผัสทาง Tactile ไปยังผู้ใช้งานโดยการ

จำลองระบบการรับรู้สัมผัสทาง Tactile และ Kinesthesia ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วจึงอาจมองได้ว่า อุปกรณ์แฮปติกมีการทำงานพื้นฐานในสองส่วนด้วยกัน ซึ่งหน้าที่แรกคือวัดตำแหน่งและแรงที่เกิดจากการสัมผัส (เทียบกับเวลา) ของมือของผู้ใช้งาน (และหรือส่วนใดส่วนหนึ่งของร่างกาย) และหน้าที่ที่สองคือแสดงตำแหน่งและแรงที่เกิดจากการสัมผัส (หรือการกระจายตัวของระยะทางและระยะเวลาช่วงขณะนั้นๆ) ไปยังผู้ใช้งาน ในจำนวนตัวแปรที่เป็นตำแหน่ง (หรือ Kinematics) และแรงที่เกิดจากการสัมผัสที่กล่าวมานี้จะขึ้นอยู่กับการออกแบบอุปกรณ์และการออกแบบซอฟต์แวร์ การเลือกตัวแปรจะเลือกตัวแปรที่เป็นตัวแปรที่แสดงการทำงานของระบบกล้ามเนื้อและประสาทที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ (กล่าวคือเพื่อที่จะป้อนข้อมูลเข้าสู่คอมพิวเตอร์) และเป็นตัวแปรที่แสดงการรับรู้สัมผัส (กล่าวคือเพื่อที่จะป้อนข้อมูลเข้าสู่ผู้ใช้งาน) ในปัจจุบันส่วนใหญ่อุปกรณ์แฮปติกที่ตอบสนองต่อแรง (Force-Reflecting) จะรับรู้ตำแหน่งจากปลายเมนิพิวเลเตอร์และแสดงแรงมายังผู้ใช้งาน

ความสามารถและข้อจำกัดของมนุษย์จะเป็นข้อกำหนดของสมรรถนะของอุปกรณ์แฮปติกบ่อยครั้งที่เราจะทำการจำลองการปฏิสัมพันธ์ทางแฮปติกกับสภาพแวดล้อมเสมือนซึ่งถูกออกแบบเพื่อจำลองสภาพแวดล้อมจริง ลักษณะที่สำคัญของอุปกรณ์แฮปติกที่เป็นตอบสนองต่อแรงจะเป็นดังนี้

ก. มีความเฉื่อยและความเสียดทานน้อย และไม่มีข้อจำกัดในการเคลื่อนที่เนื่องจาก ไคเนเมติกส์ (kinematic) ของอุปกรณ์ดังนั้น อุปกรณ์แฮปติกจะเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระและทำให้รู้สึกอิสระ

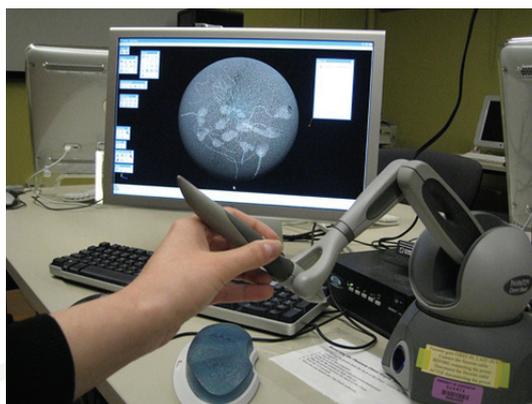
ข. ช่วงการวัด, ความละเอียด และ แบนด์วิดท์ ทั้งในรูปของการวัดตำแหน่งและการ force-reflecting จะต้องเหมาะสมกับงานที่อุปกรณ์แฮปติกถูกใช้งานอยู่ (ก) ผู้ใช้งานจะต้องไม่สามารถเคลื่อนที่ปลายอุปกรณ์ ผ่านวัตถุแข็งเกร็ง ได้ภายใต้แรงที่เกินช่วงของแรง (Force Range) ของอุปกรณ์แฮปติก (ข) ผู้ใช้งานจะต้องไม่รู้สึกลถึงการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการสั่นสะเทือนที่ไม่ได้ตั้งใจให้เกิดขึ้น เช่น การสั่นสะเทือนเนื่องจาก ตำแหน่งที่ไม่ได้อยู่ในพื้นที่ทำงานหรือที่อัตรา Servo Rate ต่ำๆ และ (ค) ผู้ใช้งานจะต้องไม่รู้สึกรึ้นๆ เมื่อเจอวัตถุเสมือนแข็งๆ ที่เกิดจากโครงสร้างที่คุณภาพต่ำและ Servo Stiffness เงื่อนไขเหล่านี้จะทำให้เป็นที่น่าพอใจนั้นยากเนื่องจาก ความไวต่อการรับรู้ที่ค่อนข้างดีเยี่ยมและแบนด์วิดท์ ของการรับรู้สัมผัส tactile ของมนุษย์อยู่ที่ประมาณ 1 kHz

ค. ในเรื่องของกายศาสตร์ (หมายถึงศาสตร์แห่งการออกแบบอุปกรณ์หรือเครื่องใช้ใดๆ ที่เมื่อนำมาใช้แล้วจะก่อให้เกิดความสะดวกสบายอย่างสมบูรณ์ต่อร่างกายมนุษย์) และความสะดวกสบายในการทำให้ผู้ใช้งานรู้สึกสบายเมื่อสวมใส่ การออกแบบอุปกรณ์แฮปติกเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างมากเนื่องจากความเจ็บปวดหรือการที่รู้สึกเมื่อยล้าจะเข้ามาแทนที่การรับรู้สัมผัสทั้งหมด

3.1 ประเภทของอุปกรณ์แฮปติก

3.1.1 แบ่งตามโครงสร้างการกราวด์ทางกล (Mechanical Grounding Configuration)

วิธีที่ใช้ในการแยกประเภทหรือความแตกต่างของอุปกรณ์แฮปติกมีหลายวิธีแต่ที่นิยมมีสามวิธีคือวิธีที่หนึ่งแบ่งตามโครงสร้างในการกราวด์ทางกล (Mechanical Grounding Configuration) ซึ่งสามารถแบ่งอุปกรณ์แฮปติกออกได้ 3 ประเภท โดยที่ประเภทแรกเป็นอุปกรณ์ที่ติดอยู่กับกราวด์ (Grounded Device) เป็นประเภทหนึ่งที่ตั้งอยู่นิ่งๆ บน โต๊ะ พื้นหรือวัตถุที่นิ่งอยู่กับที่ โดยทั่วไปโครงสร้างของอุปกรณ์แฮปติกประเภทนี้จะเป็นแบบลิ่งคัลลท์กับข้อต่อแบบเลื่อนและหรือข้อต่อแบบหมุน ดังนั้นอุปกรณ์ประเภทนี้จะมีแอกชูเอเตอร์หรือเบรกเพื่อคอยกำเนิดแรงบิดและหรือแรงระหว่างผู้ใช้งานและส่วนที่ติดอยู่กับกราวด์ ความสามารถในการสร้างการรับรู้ถึงการสัมผัสด้วยความซับซ้อนทางกลที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับแบบอื่นๆ อุปกรณ์แฮปติกที่ติดอยู่กับกราวด์จึงเป็นอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในทางการค้าอย่างกว้างขวางที่สุด บริษัทที่ผลิตอุปกรณ์และออกแบบระบบแฮปติก เช่น SensAble Technology, MPB Technology และ FCS Control Technology เป็นต้น แต่เป็นที่น่าเสียดายที่อุปกรณ์แฮปติกประเภทนี้ยังเผชิญกับข้อจำกัดในเรื่องความจำกัดในพื้นที่ใช้งานและความต้องการที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในการลดผลกระทบจากความเฉื่อยและความเสียดทานต่อความแม่นยำในการทำให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างอิสระภายในพื้นที่อิสระ ตัวอย่างของอุปกรณ์ประเภทนี้ได้แก่ The PHANTOM[®] Omni[™] Device ของบริษัท SensAble Technology ตามภาพที่ 9 สามารถเคลื่อนที่ได้ในสามมิติโดยที่มีพื้นที่ทำงานประมาณ 160×120×170 ในหน่วยมิลลิเมตร สามารถรองรับแรงได้มากที่สุด 3.3 นิวตัน และสามารถรองรับได้ต่อเนื่อง 24 ชั่วโมงที่ 0.88 นิวตัน



ภาพที่ 9 อุปกรณ์แฮปติกชนิดที่ติดอยู่กับกราวด์ (Grounded Haptic Device); The PHANTOM[®] Omni[™] Device

ที่มา: SensAble Technology, London, UK (n.d.)

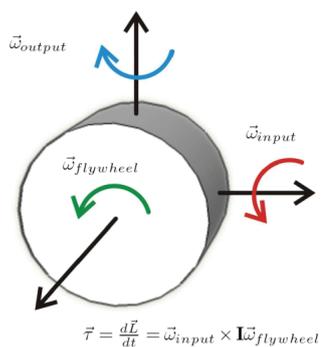
ประเภทที่สองคือ อุปกรณ์แฮปติกซึ่งเป็นระบบกราวด์ติดอยู่ที่ร่างกาย (Body Ground System) ซึ่งอุปกรณ์จะยึดติดกับส่วนของร่างกายของผู้ใช้งานมากกว่าวัตถุที่ไม่เคลื่อนที่ อุปกรณ์ชนิดนี้จะใช้ส่วนที่ติดอยู่กับร่างกายหรือส่วนของร่างกายทำหน้าที่เป็นจุดของการจัดใช้สำหรับเกิดแรงหรือแรงบิดที่เท่ากับและมีทิศทางตรงกันข้ามกับอีกส่วนหนึ่งที่สวมใส่ร่างกายหรือส่วนของร่างกายอยู่ ตัวอย่างของอุปกรณ์แฮปติกประเภทนี้ได้แก่ The CyberGlove[®] II System ซึ่งเป็นของ Immersion Technologies ตามภาพที่ 10 การออกแบบอุปกรณ์นี้ใช้ประโยชน์จากความจริงที่ว่ากลไกการรับรู้ของปลายเส้นประสาทที่ปลายนิ้วมีความไวต่อสิ่งกระตุ้นสามารถรับรู้การเคลื่อนที่ได้มากที่สุด โดย The CyberGlove[®] II System สามารถรับรู้การเคลื่อนไหวเชิงมุมของข้อต่อได้อย่างแม่นยำและมากถึง 22 ข้อต่อจากเซ็นเซอร์วัดการโค้งงอที่ติดอยู่ถึงสามเซ็นเซอร์ต่อนิ้ว สี่เซ็นเซอร์วัดการยืดหดตัวของนิ้ว หนึ่งเซ็นเซอร์วัดความโค้งงอของฝ่ามือและอีกหนึ่งเซ็นเซอร์เพื่อวัดตำแหน่งการโค้งงอ อุปกรณ์ที่กล่าวมานั้นโดยทั่วไปจะออกแบบมาเพื่อให้พกพาได้สะดวกมากกว่าอุปกรณ์แฮปติกแบบที่ติดอยู่กับกราวด์ แต่อุปกรณ์ประเภทนี้ยังเป็นความท้าทายในการออกแบบเนื่องจากยังมีเป้าหมายในการออกแบบในเรื่องความทนทาน น้ำหนักและทางกายศาสตร์ที่ค่อนข้างที่จะถูกจำกัด



ภาพที่ 10 อุปกรณ์แฮปติกชนิดที่ระบบกราวด์ติดอยู่ที่ร่างกาย (Body Ground System); The CyberGlove[®] II System

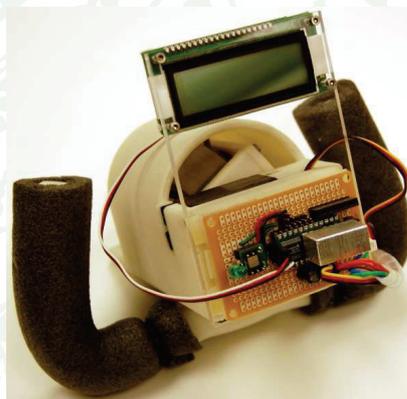
ที่มา: Immersion Technologies, California, USA (n.d.)

สุดท้ายอุปกรณ์แฮปติกประเภทที่สามเป็นแบบอุปกรณ์ที่ไม่ติดอยู่กับกราวด์ (Mechanically Unrounded Device) มักจะใช้โมเมนตัมเชิงมุมหรือ โมเมนตัมเชิงเส้นเพื่อที่จะสร้างกราวด์ในตอนเริ่มต้น (Initial Ground) อุปกรณ์ชนิดนี้ไม่จำเป็นต้องติดกับโต๊ะหรือส่วนของร่างกายเพื่อเป็นแหล่งกำเนิดการะปฏิสัมพันธ์ (Interaction Load) ตัวอย่างของอุปกรณ์ชนิดนี้ที่พบอย่างแพร่หลายได้แก่ โทรศัพท์มือถือหรือคอนโทรลเลอร์ของวิดีโอเกมส์สมัยใหม่ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ iTorqU 1.0 โดย GRASP Laboratory ของ University of Pennsylvania, USA เป็นตัวอย่างของอุปกรณ์แฮปติกแบบที่ไม่ติดอยู่กับกราวด์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์แฮปติกแบบป้อนกลับแรงโดยตรงแบบที่ไม่ติดอยู่กับกราวด์ (Ungrounded Directed Force-Feedback) โดยในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา มีกลุ่มนักวิจัยหลายกลุ่มที่ค้นพบวิธีการใหม่ที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์แฮปติกป้อนกลับแรงโดยตรงแบบที่ไม่ติดอยู่กับกราวด์หลายวิธีด้วยกัน เช่น ด้วยหลักการพ่นอากาศ (Air Jet) และด้วยหลักการแกว่งกลับไปกลับมาของรูปทรงที่ไม่สมมาตร (Asymmetric Oscillation) แต่ The iTorqU 1.0 ตามภาพที่ 12 ใช้หลักการของมวลและความเฉื่อยในการสร้างการป้อนกลับแรงบิดแบบที่ไม่ติดอยู่กับกราวด์ (Ungrounded Torque-Feedback) โดยที่แรงบิดเกิดจากอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเชิงมุมซึ่งปริมาณและทิศทางสามารถคำนวณหาได้จากผลคูณทางเวกเตอร์ของความเร็วเชิงมุมที่ถูกป้อนเข้ามา (Angular Velocity of Input) กับ โมเมนตัมเชิงมุมของตัวมู่เล่ (Angular Momentum of Flywheel) ตามภาพที่ 11 โดยที่ ω_{input} เป็นความเร็วเชิงมุมที่ถูกป้อนเข้ามา (Angular Velocity of Input) $\omega_{FlyWheel}$ เป็นความเร็วเชิงมุมของมู่เล่ (Angular Velocity of Flywheel) และ ω_{output} เป็นความเร็วเชิงมุมที่ถูกสร้างขึ้นออกมา (Angular Velocity of Output)



ภาพที่ 11 แสดงแกนและมวลมู่เฒ่ที่ถูกหมุน

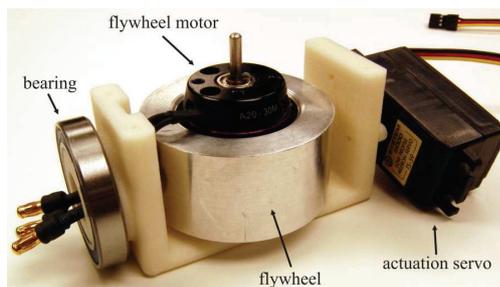
ที่มา: Winfree et al. (2009)



ภาพที่ 12 iTorqU 1.0 โดย GRASP Laboratory ของ University of Pennsylvania, USA

ที่มา: Winfree et al. (2009)

โดยที่ iTorqU 1.0 จะประกอบด้วยมู่เฒ่ที่ทำจากเหล็กกล้า ซึ่งประกอบอยู่ในวงแหวนสำหรับยึดมู่เฒ่และถูกขับโดยตรงให้หมุนด้วย เซอร์โว มอเตอร์ ริงด้วยความเร็วรอบที่ 9000 รอบต่อนาที ซึ่งควบคุมตำแหน่งแบบ Local Closed Loop Position Control ตามภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ส่วนประกอบภายในของ The iTorqU 1.0

ที่มา: Winfree et al. (2009)

3.1.2 แบ่งตามพฤติกรรมทางพลศาสตร์ (Robot's Dynamics Behavior)

การแบ่งแยกประเภทของอุปกรณ์แฮปติกอีกวิธีหนึ่งคือการแบ่งตามความแตกต่างในพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของอุปกรณ์ (Robot's Dynamics Behavior) โดยการมองว่าอุปกรณ์แฮปติกก็เป็นเครื่องมือกลอัตโนมัติชนิดหนึ่งเช่นกัน ดังนั้นจึงสามารถแบ่งอุปกรณ์แฮปติกออกได้เป็นสองประเภทได้แก่ อุปกรณ์แฮปติกแบบอิมพีแดนซ์ (Impedance Haptic Device) และ อุปกรณ์แฮปติกแบบแอดมิทแตนซ์ (Admittance Haptic Device)

การเกิดปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมนั้นจะทำให้เกิดการรู้สึกและการทำงานของระบบกล้ามเนื้อและการประสาทรับรู้ถึงการสัมผัสหรือทั้งสองอย่าง ซึ่งการเกิดปฏิสัมพันธ์ทางกล (Mechanical Interaction) กับสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นพฤติกรรมขั้นพื้นฐานที่สำคัญมากสำหรับเครื่องมือกลอัตโนมัติและพลศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิสัมพันธ์ทางกลนั้นจะถูกอธิบายลักษณะด้วยความต้านทานทางกล (Mechanical Impedance) ซึ่งสามารถนิยามได้ว่า “ความต้านทานทางกล (Mechanical Impedance)” (โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานแฮปติก) คือการหาค่าปริมาณที่ต้านทานการเคลื่อนที่ของโครงสร้างทางกลเมื่อถูกแรงกระทำ ซึ่งได้จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความเร็วที่กระทำกับระบบทางกล ความต้านทานทางกลที่จุดใดๆ บนโครงสร้างทางกลคืออัตราส่วนของแรงที่กระทำที่จุดนั้นๆ ต่อความเร็วที่เกิดขึ้นที่จุดนั้น และในทางกลับกัน “ความสามารถในการเคลื่อนที่ (Mechanical Admittance/Mobility)” เป็นส่วนกลับของความต้านทานทางกลซึ่งเป็นการโต้ตอบทางตัวเลขของพลศาสตร์จากแรงไปเป็นการเคลื่อนที่ ซึ่งหลักการของความต้านทานหรืออิมพีแดนซ์นั้นสามารถเปรียบเทียบและอธิบายระบบทางกลได้กับระบบทางไฟฟ้าได้ เป็นความคล้ายคลึงของวงจรไฟฟ้าทางกล (Electrical-Mechanical Equivalent)

ในวงจรไฟฟ้าความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นตัวแปร Effort Variable; $E(s)$ และกระแสไฟฟ้าเป็นตัวแปร Flow Variable; $I(s)$ ส่วนในระบบทางกลความเร็วเป็นตัวแปร Effort Variable; $V(s)$ และแรงเป็น Flow Variable; $F(s)$ จาก (Fairlie-Clarke, 1999) เป็นผลทำให้เกิดความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทาน R กับแดมเปอร์ B ความเหนียว L ค่าสปริง K และระหว่างความสามารถในการจุกระแสไฟฟ้า C กับมวล M ซึ่งจากความคล้ายคลึงของระบบไฟฟ้าทางกล

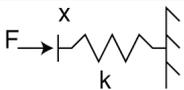
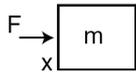
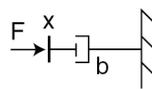
Current Source: $I(s)$	Force Source: $F(s)$	$F = I$
Voltage Source: $E(s)$	Velocity Source: $V(s)$	$V = E$
Resistor: G	Damper: B	$B = G$
Inductor: $1/sL$	Spring: K/s	$K = 1/L$
Capacitor: sC	Mass: sM	$M = C$

ภาพที่ 14 แสดงความคล้ายคลึงของวงจรไฟฟ้าทางกล (Electrical-Mechanical Equivalent)

ที่มา: Fairlie and Clarke (1999)

หรืออาจกล่าวอย่างง่าย ๆ ได้ว่าเป็นการอธิบายแวดล้อมเสมือน (Virtual Environment) ที่มีข้อมูลที่ถูกรับเข้าสู่อุปกรณ์และข้อมูลที่ออกมาจากระบบ หากเป็นความสามารถในการเคลื่อนที่ ข้อมูลที่ถูกรับเข้าสู่อุปกรณ์จะเป็นข้อมูลที่เกี่ยวกับแรงและข้อมูลที่ออกมาจากระบบจะเป็นข้อมูลที่เกี่ยวกับตำแหน่งหรือความเร็ว ดังนั้นอุปกรณ์ที่เป็นอุปกรณ์แอตมิทแตนซ์จะสามารถรับรู้แรงที่ถูกรับเข้ามายังอุปกรณ์และรองรับปริมาณการเคลื่อนที่ที่ถูกส่งออกมาจากแวดล้อมเสมือน ดังนั้นอุปกรณ์ที่เป็นอิมพีแดนซ์จึงจะสามารถรับรู้การเคลื่อนที่ที่ถูกรับเข้ามายังอุปกรณ์และกีดขวางการเคลื่อนที่ด้วยแรงที่คำนวณได้จากแวดล้อมเสมือน

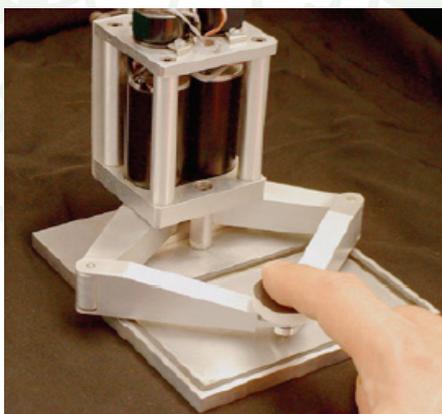
ตัวอย่างของหลักการนี้คือสปริงเสมือน (Virtual Spring) ซึ่งสามารถอธิบายแทนสปริงได้ด้วยกฎของฮุก (Hook's Law) กล่าวคือ $F = -kx$ หากป้อนข้อมูลที่เป็นการกระตุ้นที่เกิดขึ้นกับสปริงให้กับสปริงเสมือน; x และปริมาณที่ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับแรงถูกส่งออกมาจากสปริงเสมือนจะถูกจัดว่าเป็นระบบอิมพีแดนซ์ ในทางกลับกันหากป้อนข้อมูลที่เป็นแรงที่กระทำต่อสปริงให้กับสปริงเสมือน; F และปริมาณที่ข้อมูลที่เป็นระยะการกระตุ้นถูกส่งออกมาจากสปริงเสมือนจะถูกจัดว่าเป็นระบบแอตมิทแตนซ์

แวดล้อมเสมือน (Virtual Environment)	อิมพีแดนซ์ (Impedance); F/\dot{x}	แอดมิทแตนซ์ (Admittance); \dot{x}/F
	k/s	s/k
	ms	$1/ms$
	b	$1/b$

ภาพที่ 15 แสดงการแปลงลาปลาซ (Laplace-Transformed) สำหรับตัวอย่างองค์ประกอบทางกลที่มักพบบ่อยครั้ง

ที่มา: Fairlie and Clarke (1999)

ส่วนมากอุปกรณ์แฮปติกทั่วไปและแบบตั้งโต๊ะจะเป็นอุปกรณ์แฮปติกแบบอิมพีแดนซ์ Pantograph 2 Degree of Freedom ของ McGill Haptic Lab เป็นตัวอย่างหนึ่งของอุปกรณ์แฮปติกแบบอิมพีแดนซ์ มีสององศาอิสระโดยใช้ DC Brushless Motor สองตัวเป็นแอกชูเอเตอร์ สำหรับป้อนกลับแรงผ่านกลไกทางกลและมีเอนโค้ดเดอร์คอยรับรู้ตำแหน่งและความเร็วมีกลไกกำลังขับเคลื่อนที่ในระนาบตามภาพที่ 16



ภาพที่ 16 อุปกรณ์แฮปติกแบบอิมพีแดนซ์ (Impedance Haptic Device)

ที่มา: McGill Haptic Lab, USA (n.d.)

อุปกรณ์แฮปติกแบบแอดมิตแตนซ์ถูกใช้มากในอุตสาหกรรมการจำลองการบินเมื่อหลายปีก่อนและตัวอย่างของอุปกรณ์แฮปติกแบบแอดมิตแตนซ์ที่นำมาเสนอในงานวิจัยนี้เป็นที่ทราบกันดีภายใต้ชื่อ HapticMaster™ บริษัท MOOG FCS Control System, Netherland เป็นอุปกรณ์แฮปติกที่ควบคุมแรง (Force-Controlled Haptic Interface) มีสามองศาอิสระ สร้างขึ้นมาเพื่อให้ผู้ใช้งานโต้ตอบการรู้สึกสัมผัสกับน้ำหนักหรือแรงที่จำลองขึ้น ซึ่งถูกพบในหลายๆการใช้งาน



ภาพที่ 17 อุปกรณ์แฮปติกแบบแอดมิตแตนซ์ (Admittance Haptic Device) The HapticMaster™

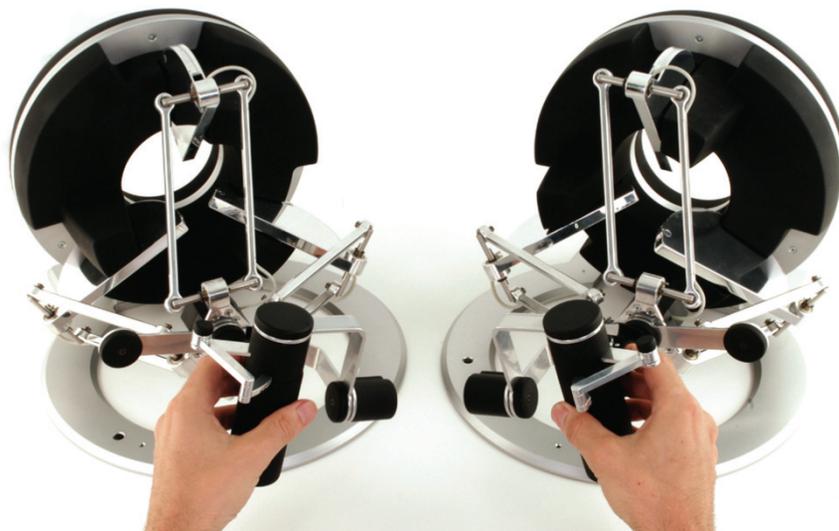
ที่มา: MOOG FCS Control System, Netherland (n.d.)

3.1.3 แบ่งตามจำนวนองศาอิสระทางกล (Number of Mechanical Degree of Freedom)

จำนวนองศาอิสระ (Degree of Freedom) ถูกนิยามว่าเป็นจำนวนที่น้อยที่สุดของพิกัดอิสระที่จำเป็นต้องใช้ในการอธิบายตำแหน่งของระบบ หรืออาจกล่าวได้ว่าจำนวนที่น้อยที่สุดของข้อต่ออิสระที่จำเป็นต้องใช้ในการอธิบายตำแหน่งของลิงค์ ในระบบกล้ามเนื้อและโครงกระดูกของมนุษย์เมื่อเกิดการเคลื่อนที่จะมีกระดูกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ประมาณ 148 ชิ้นถูกเชื่อมต่อโดยข้อต่อหลากหลายประเภทซึ่งสามารถประมาณจำนวนองศาอิสระได้ประมาณ 224

องศาอิสระ (Zatsiorsky, 1998) ในสายงานของการควบคุมจะใช้ในการจัดระบบในการดำเนินการที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ตามจำนวนองศาอิสระเช่น อนุภาคเคลื่อนที่อิสระในอวกาศ (space) จะมี 3 องศาอิสระในขณะที่วัตถุแข็งเกร็งเคลื่อนที่อิสระภายในอวกาศจะมี 6 องศาอิสระคือ 3 องศาอิสระจากการเคลื่อนที่และอีก 3 องศาอิสระจากการหมุน ในระบบกลไกที่ประกอบด้วยวัตถุแข็งเกร็งจำนวน n ชิ้นจะสามารถมีจำนวนองศาอิสระมากที่สุด $6n$ องศาอิสระแต่โดยทั่วไปจำนวนองศาอิสระจริงที่เกิดขึ้นจะมีน้อยกว่าเนื่องจากข้อจำกัดทางโครงสร้าง (Structural Constraint)

นอกจากเราจะแบ่งอุปกรณ์แฮปติกตามโครงสร้างในการกรวดทางกลและพฤติกรรมทางพลศาสตร์แล้วเรายังสามารถแบ่งอุปกรณ์แฮปติกตามจำนวนองศาอิสระของการเคลื่อนที่หรือแหล่งกำเนิดแรงที่ตัวเครื่องของอุปกรณ์ กล่าวคือจำนวนมิติที่เครื่องสามารถเคลื่อนที่หรือแลกเปลี่ยนแรงกับผู้ใช้งานได้อีกด้วย เช่น The HapticMaster™ ของบริษัท MOOG FCS Control System, Netherland ตามภาพที่ 17 มี 3 องศาอิสระ โดยที่สองในสามองศาอิสระเป็นข้อต่อแบบเลื่อนหรือ The CyberGlove® II System ซึ่งเป็นของ Immersion Technologies ตามภาพที่ 10 เป็นอุปกรณ์แฮปติกแบบสวมมือมีองศาอิสระถึง 22 องศาอิสระ หรือ Omega 7 ซึ่งเป็นของ Force Dimension™ ซึ่งมี 6 องศาอิสระ โดยมีโครงสร้างกลไกแบบขนานสามารถเคลื่อนที่ได้ในสามมิติ กล่าวคือในระนาบเส้นผ่านศูนย์กลาง 160 มิลลิเมตร สูง 110 มิลลิเมตรและสามารถหมุนได้อย่างอิสระที่ $240 \times 140 \times 240$ องศาตามภาพที่ 18



ภาพที่ 18 อุปกรณ์แฮปติก The Omega 7

ที่มา: Force Dimension™ LLC , Switzerland (n.d.)

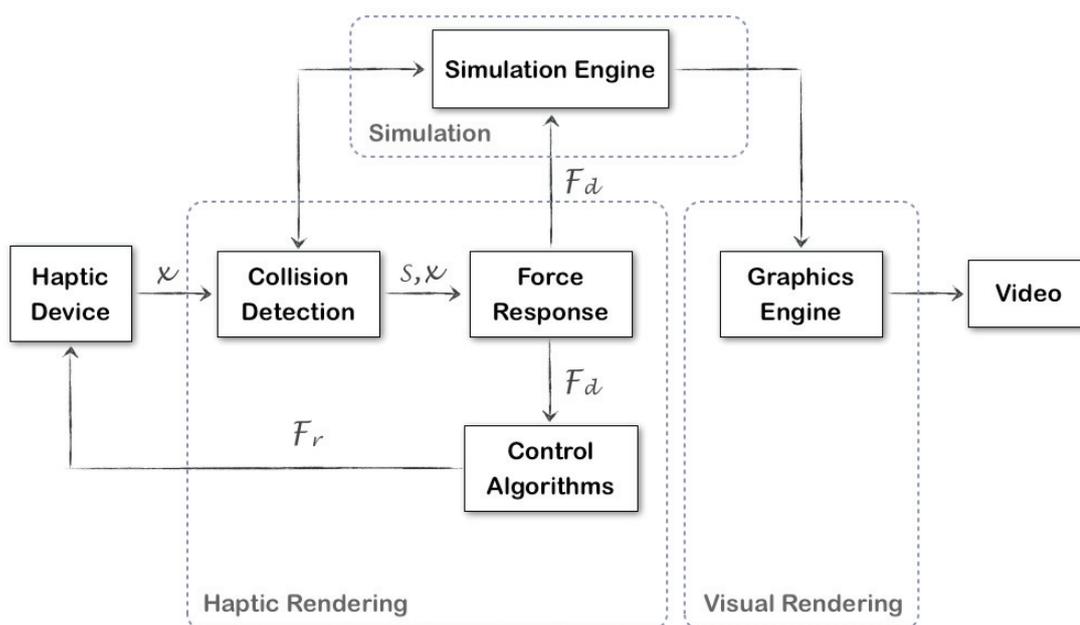
4. คอมพิวเตอร์แฮปติก (Computer Haptic)

ตามที่ได้กล่าวเกริ่นนำในตอนต้นแล้วว่า ระบบปฏิสัมพันธ์ทางการสัมผัสระหว่างคอมพิวเตอร์กับผู้ใช้งานหลักๆ จะประกอบไปด้วยความรู้สึกลสัมผัสของมนุษย์และอุปกรณ์แฮปติกที่ได้กล่าวไปแล้วนั้นและในส่วนสุดท้ายก็คือคอมพิวเตอร์แฮปติกซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการออกแบบลำดับขั้นตอนและอัลกอริทึมและซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างและการจำลองการสัมผัสและการรับรู้สึกลต่อวัตถุเสมือนจริง

การถอดความการรับรู้ทางการสัมผัส (Haptic Rendering) ถูกนำมาใช้เพื่อที่จะทำให้ผู้ใช้งานสามารถรู้สึกถึงปริมาณที่ถูกคำนวณที่เกี่ยวข้องกับการจำลองการสัมผัสและการรับรู้สึกลต่อวัตถุเสมือนจริง ซึ่งจำเป็นต้องออกแบบลำดับขั้นตอนและโปรแกรมชุดคำสั่งเพื่อให้สามารถทำให้อุปกรณ์แฮปติกสามารถแสดงค่าของแรงหรือแรงบิดตรงกับที่คำนวณได้จากการโต้ตอบกับแวดล้อมเสมือน โดยทั่วไปการถอดความการรับรู้ทางการสัมผัส (Haptic Rendering) จะใช้งานร่วมกับการถอดความการรับรู้ทางกราฟิก (Graphical Rendering) อาจกล่าวได้ว่าเป็น การอินเตอร์เฟซทางการมองเห็นและทางการสัมผัส (Visual/Haptic Interface) แต่การถอดความการรับรู้ทางการสัมผัส (Haptic Rendering) ต่างกับการถอดความการรับรู้ทางกราฟิก (Graphical Rendering) ที่การถอดความการรับรู้ทางกราฟิกสามารถทำการปรับเปลี่ยนข้อมูล (update) ทางกราฟิกเพียง 30 ภาพต่อวินาทีหรือน้อยกว่าก็เพียงพอต่อการตอบสนองในการมองเห็น หากแต่การถอดความการรับรู้ทางการสัมผัส (Haptic Rendering) จะต้องทำการปรับเปลี่ยนข้อมูลในอัตราที่เข้าใกล้พันรอบต่อวินาที เพื่อให้สามารถแสดงความรู้สึกที่ถูกต้องต่อมือ

การออกแบบชุดคำสั่งของการถอดความการรับรู้ทางการสัมผัสเพื่อคำนวณแรงที่เกิดจากการปฏิสัมพันธ์ระหว่างปลายอุปกรณ์แฮปติก ภายในแวดล้อมเสมือนจริงกับวัตถุเสมือนจริงได้อย่างถูกต้อง ยิ่งไปกว่านั้นการออกแบบชุดคำสั่งการถอดความการรับรู้ทางการสัมผัสจะต้องสร้างความมั่นใจด้วยว่าอุปกรณ์แฮปติกสามารถแสดงแรงที่ถูกต้องต่อผู้ใช้งาน

องค์ประกอบที่หลากหลายประกอบรวมกันเป็นอัลกอริทึมของการถอดความการรับรู้ทางการสัมผัส (Haptic Rendering Algorithm) โดยทั่วไป ซึ่งเราสามารถแสดงเป็นแผนภาพบล็อกได้เป็นสามกลุ่มด้วยกัน ดังภาพที่ 19 แสดงแผนภาพบล็อกประกอบ



ภาพที่ 19 แสดงแผนภาพบล็อกอัลกอริทึมของการถอดความการรับรู้ทางการสัมผัส (Haptic Rendering Algorithm)

ที่มา: Salisbury, Conti and Barbagli (2004)

อัลกอริทึมในการตรวจสอบการชน (Collision Detection Algorithm) ใช้ในการตรวจสอบการเกิดการชนระหว่างวัตถุเสมือนจริงกับอวตาร ในเวดล้อมเสมือนจริงและให้ข้อมูลที่เกิดขึ้นที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งการเกิดและเวลาที่เกิดขึ้นและขอบเขตการเกิดการชนอื่นๆ เช่น ความรู้สึกร่องการทะลุผ่านวัตถุเสมือนจริง พื้นที่ที่เกิดการสัมผัสและอื่นๆ

อัลกอริทึมที่ใช้ในการตอบสนองแรง (Force Response Algorithm) ใช้คำนวณแรงที่เกิดจากการปฏิสัมพันธ์ระหว่างอวตารกับวัตถุเสมือนจริงเมื่อตรวจพบการเกิดการชน แรงที่ได้จากการคำนวณนี้จะประมาณให้ใกล้เคียงกับแรงที่เกิดขึ้นจากการสัมผัสให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งปกติจะเกิดขึ้นระหว่างการสัมผัสกับวัตถุจริง โดยทั่วไปอัลกอริทึมที่ใช้ในการตอบสนองแรงจะทำงานอยู่กับตำแหน่งของอวตารตำแหน่งของวัตถุทั้งหมดภายในเวดล้อมเสมือนและสถานะของการชนระหว่างอวตารกับวัตถุเสมือนจริง โดยทั่วไปอัลกอริทึมที่ใช้ในการตอบสนองแรงจะส่งคืนค่าของเวกเตอร์แรงและแรงบิดที่ถูกกระทำที่อุปกรณ์แฮปติก

เราอาจกล่าวได้ว่าข้อจำกัดทางฮาร์ดแวร์จะขัดขวางการโต้ตอบแรงที่แท้จริงที่ได้จากการคำนวณโดยอัลกอริทึมในการตอบสนองแรงไปยังผู้ใช้งาน ในส่วนของคอนโทรลอัลกอริทึม (Control Algorithm) จะคอยควบคุมให้อุปกรณ์แฮปติกทำงานให้เกิดค่าความผิดพลาดของแรงระหว่างแรงที่คำนวณได้กับแรงที่สามารถทำให้เกิดขึ้นจริงให้น้อยที่สุด เวกเตอร์ของแรงหรือแรงบิดที่ต้องการ (Desired Force/Torque) ที่ถูกคำนวณจากอัลกอริทึมที่ใช้ในการตอบสนองแรงจะถูกป้อนเข้าไปยังคอนโทรลอัลกอริทึม และคอนโทรลอัลกอริทึมจะคืนค่าเวกเตอร์ของแรงหรือแรงบิดที่เกิดขึ้นจริงที่ถูกสั่งงาน (Commanded Force/Torque) ไปยังอุปกรณ์แฮปติก โดยทั่วไปวงจรปิดของการรับรู้ทางการสัมผัสจะประกอบด้วยลำดับเหตุการณ์ดังต่อไปนี้

4.1 คอนโทรลอัลกอริทึมระดับต่ำ (Low-Level Control Algorithm) จะสุ่มตัวอย่างตำแหน่งของเซ็นเซอร์ที่ติดอยู่ที่ข้อต่อของอุปกรณ์แฮปติก คอนโทรลอัลกอริทึมนี้จะรวมเอาข้อมูล queen ได้จากแต่ละเซ็นเซอร์เพื่อหาตำแหน่งของส่วนประกอบหลักของอุปกรณ์แฮปติกในระบะพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian Space) กล่าวคือตำแหน่งของอวตารในเวดล้อมเสมือนจริง

4.2 อัลกอริทึมในการตรวจสอบการชน (Collision Detection Algorithm) ใช้ข้อมูลของตำแหน่งในการหาการเกิดการชนระหว่างวัตถุเสมือนจริงกับ avatar และรายงานผลระดับของการชน (ระดับการทะลุผ่าน)

4.3 อัลกอริทึมที่ใช้ในการตอบสนองแรง (Force Response Algorithm) จะคำนวณแรงที่เกี่ยวข้องที่เกิดจากการชนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการปฏิสัมพันธ์ระหว่าง avatar กับวัตถุเสมือนจริง

4.4 อัลกอริทึมที่ใช้ในการตอบสนองแรง (Force Response Algorithm) จะส่งข้อมูลเกี่ยวกับแรงไปยังคอนโทรลอัลกอริทึม (Control Algorithm)

หลังจากนั้นเครื่องจำลองเวดล้อมเสมือนจริง (Simulation Engine) จะใช้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับแรงเดียวกันนั้นไปคำนวณหาผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อวัตถุเสมือนจริงในเวดล้อมเสมือนจริง ถึงแม้ว่าจะไม่มีกฎที่ตายตัวเกี่ยวกับความถี่ที่จะต้องเป็นเท่าไรที่อัลกอริทึมจะต้องคำนวณซ้ำๆ แต่ทั่วไปมักจะใช้เซอร์โวเรท (Servo Rate) ที่ 1 kHz. หรืออาจเพิ่มขึ้นได้หากต้องการการรับรู้สัมผัสกับพื้นผิว ลอนๆ หรือรับรู้สัมผัสความหยาบละเอียดของพื้นผิว

5 การนำอุปกรณ์แฮปติกไปประยุกต์ใช้ในสายงานต่างๆ

ตัวอย่างการนำไปประยุกต์ใช้ของอุปกรณ์แฮปติกโดยตัวอย่างแรกเป็นอุปกรณ์แฮปติกของ PHANTOM™ Desktop™ Device ที่ถูกนำไปใช้ในงานทันตกรรมโดยยกตัวอย่างของ The SensAble™ Dental Lab™ System และตัวอย่างที่สองเป็นอุปกรณ์แฮปติกที่อยู่ในระบบการผ่าตัดโดยยกตัวอย่างของ The da Vinci® Surgical System

5.1 The SensAble™ Dental Lab™ System



ภาพที่ 20 แสดงอุปกรณ์แฮปติก PHANTOM™ Desktop™ Device ที่ใช้ในระบบ SensAble™ Dental Lab™ System

ที่มา: SensAble Technologies, USA (n.d.)

The SensAble™ Dental Lab™ System เป็นระบบที่อำนวยความสะดวกสำหรับงานทางทันตกรรมในการสแกน ออกแบบ และแสดงข้อมูลที่ได้จากจอมอนิเตอร์ที่เป็น 3 มิติ สำหรับการทำโครงเหล็ก ฟันปลอมและที่ยึดฟันปลอม โดยรวมเอาระบบแฮปติกเข้าไว้ด้วยกันกับระบบการจำลองในรูปแบบดิจิทัล 3 มิติ เพื่อเป็นอีกหนึ่งช่องทางสำหรับการสำรวจในช่องปาก เพิ่มความสะดวกในการออกแบบและเพิ่มทักษะการเว้าซ์อัฟ โดยใช้อุปกรณ์แฮปติกอินเตอร์เฟส 3 มิติของ PHANTOM™ Desktop™ Device ซึ่งทำให้การทำงานเป็นไปอย่างเป็นธรรมชาติและเป็นไปตามสัญชาตญาณ ซึ่งเอื้อต่อการใช้ทักษะศิลป์ในโลกดิจิทัล

ซึ่งอาจกล่าวถึงประโยชน์ของระบบ The SensAble™ Dental Lab™ System อย่างสั้นๆ ได้ดังนี้

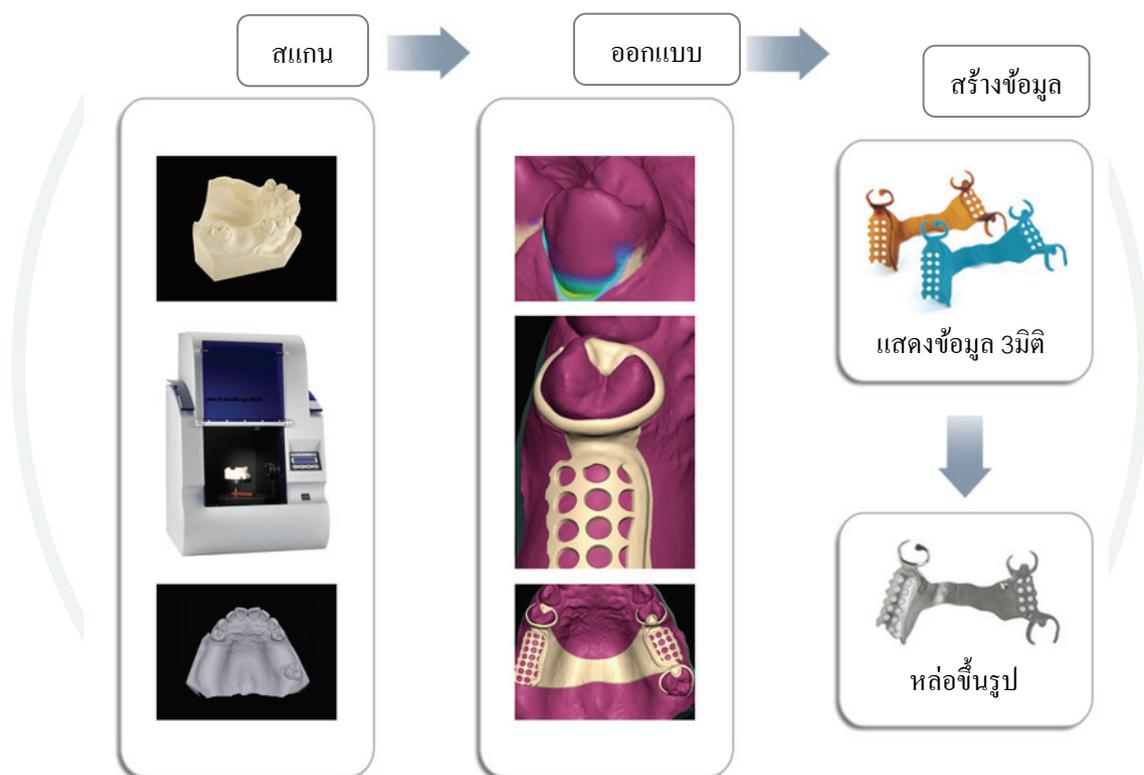
5.1.1 สามารถออกแบบโครงเหล็ก ฟันปลอมและที่ยึดฟันปลอมได้หลากหลายด้วยระบบเดียว

5.1.2 เพิ่มความสามารถในการผลิต

5.1.3 สามารถเรียนรู้การใช้งานระบบแอปพลิเคชันได้อย่างรวดเร็ว

5.1.4 เพิ่มทักษะในห้องปฏิบัติการ กระบวนการและเพิ่มความรู้และวิธีการ

5.1.5 ลดการใช้วัสดุคืบจากการใช้ระบบการจำลองด้วยงานดิจิทัล 3 มิติ



ภาพที่ 21 ขั้นตอนการทำงานทางทันตกรรมของระบบ SensAble™ Dental Lab™ System

ที่มา: SensAble Technologies, USA (n.d.)

5.2 The da Vinci[®] Surgical System

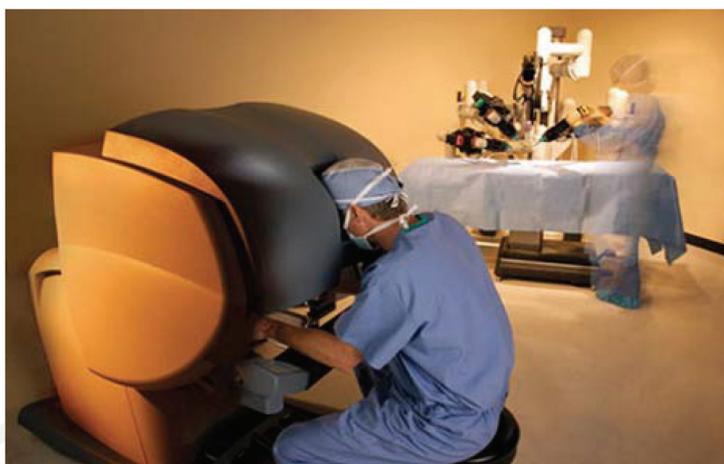
The da Vinci[®] Surgical System เป็นอีกหนึ่งตัวอย่างของเทคนิคการผ่าตัดสมัยใหม่ซึ่งใช้อุปกรณ์แฮปติกเป็นเครื่องมือในการสร้างหรือถ่ายทอดความรู้สึกสัมผัสกับอวัยวะเสมือนจริงหรือส่วนของร่างกายเสมือนจริง (เช่นเนื้อเยื่อจำลองหรือกล้ามเนื้อจำลอง) ที่ถูกสร้างหรือจำลองขึ้นที่เวลาจริง

ในวันที่ 11 เดือนกรกฎาคม 2543 องค์กร US Food and Drug Administration (FDA) รับรองระบบหุ่นยนต์ผ่าตัด The da Vinci[®] Surgical System ให้สามารถใช้ได้ในห้องผ่าตัดในประเทศสหรัฐอเมริกา The da Vinci[®] Surgical System ถูกพัฒนาโดยบริษัท Intuitive Surgical



ภาพที่ 22 แสดงหุ่นยนต์ของ The da Vinci Robot ซึ่งมี 4 แขนโดยที่เป็นเครื่องมือในการจับยึด ขกตัดและจีเนื้อเยื่อ 3 แขนส่วนอีกหนึ่งแขนเป็นกล้อง

ที่มา: Intuitive Surgical, USA (n.d.)



ภาพที่ 23 แสดงการทำงานโดยทั่วไปของระบบ The da Vinci[®] Surgical System

ที่มา: Intuitive Surgical, USA (n.d.)

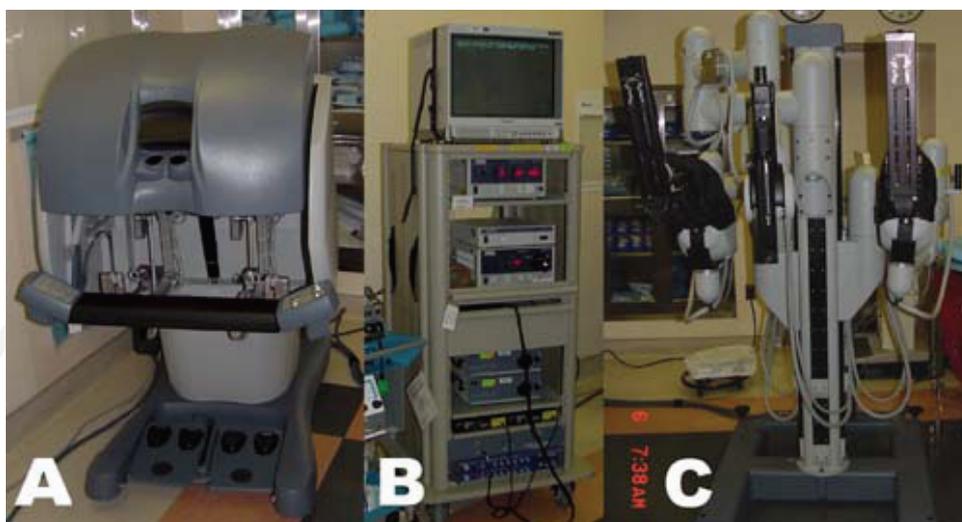
The da Vinci[®] Surgical System ประกอบด้วย 3 ส่วนประกอบหลักๆ คือ คอนโซลสำหรับศัลยแพทย์ (Surgeon Console) อุปกรณ์ข้างผู้ป่วย (Patient-Side Cart) และระบบสร้างภาพความละเอียดสูง 3 มิติ (High-Definition 3D Vision System) โดยจะอธิบายในแต่ละส่วนอย่างย่อ พร้อมทั้งแสดงภาพประกอบดังต่อไปนี้

5.2.1 คอนโซลสำหรับศัลยแพทย์ (Surgeon Console) เป็นคอนโซลสำหรับให้ศัลยแพทย์ใช้สำหรับการผ่าตัดซึ่งตัวคอนโซลจะอยู่ห่างจากเตียงผ่าตัดอยู่หลายฟุต โดยที่ศัลยแพทย์จะมองการผ่าตัดผ่านภาพขยาย 3 มิติที่เวลาที่เกิดขึ้นจริงในขณะที่ทำการผ่าตัดและอุปกรณ์ผ่าตัดสามารถเคลื่อนที่และหมุนได้อย่างอิสระในพื้นที่สำหรับการผ่าตัดหนึ่งลูกบาศก์ฟุต

5.2.2 อุปกรณ์ข้างผู้ป่วย (Patient-Side Cart) ส่วนประกอบนี้ของระบบจะประกอบไปด้วยหุ่นยนต์ผ่าตัดที่มีแขนสำหรับอุปกรณ์ผ่าตัดสองถึงสามแขนและอีกหนึ่งแขนสำหรับกล้องและอุปกรณ์เสริมต่างๆ

5.2.3 ระบบสร้างภาพความละเอียดสูง 3 มิติ (High-Definition 3D Vision System) กล้องและเอ็นโดสโคป ซึ่งเป็นเครื่องมือแพทย์มีลักษณะเป็นท่อยาวใช้สำหรับการผ่าตัดสามารถให้

ภาพสามมิติ และเนื่องจากเป็นภาพขยายใหญ่ที่มีความละเอียดสูงแสดงภายในของผู้ป่วยทำให้ ศัลยแพทย์เห็นส่วนที่สำคัญได้อย่างละเอียดจึงทำให้ได้เปรียบเหนือการผ่าตัดแบบทั่วไป



ภาพที่ 24 แสดงส่วนประกอบหลักของระบบ The da Vinci[®] Surgical System โดยที่ภาพ A แสดง คอนโซลสำหรับศัลยแพทย์ (Surgeon Console) ภาพ B แสดงอุปกรณ์ข้างผู้ป่วย (Patient-Side Cart) และภาพ C แสดงเครื่องมือของระบบสร้างภาพความละเอียดสูง 3 มิติ (High-Definition 3D Vision System)

ที่มา: Intuitive Surgical, USA (n.d.)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. คอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ
2. เซอร์โวมอเตอร์ Yaskawa รุ่น SGMAH-08AAA41
3. ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ Yaskawa รุ่น SGDH-08AE-S
4. ก้านไม้กอล์ฟแกรไฟต์
5. เลเซอร์มี้าส์สำหรับนำมาทำเซ็นเซอร์
6. คลັบลูกปืนของ SKFTM รุ่น 625-2Z
7. คลັบลูกปืนของ SKFTM รุ่น NJ 202 ECP
8. กระจกเพลลา
9. อลูมิเนียมสำหรับประกอบโต๊ะอุปกรณ์แฮปติก

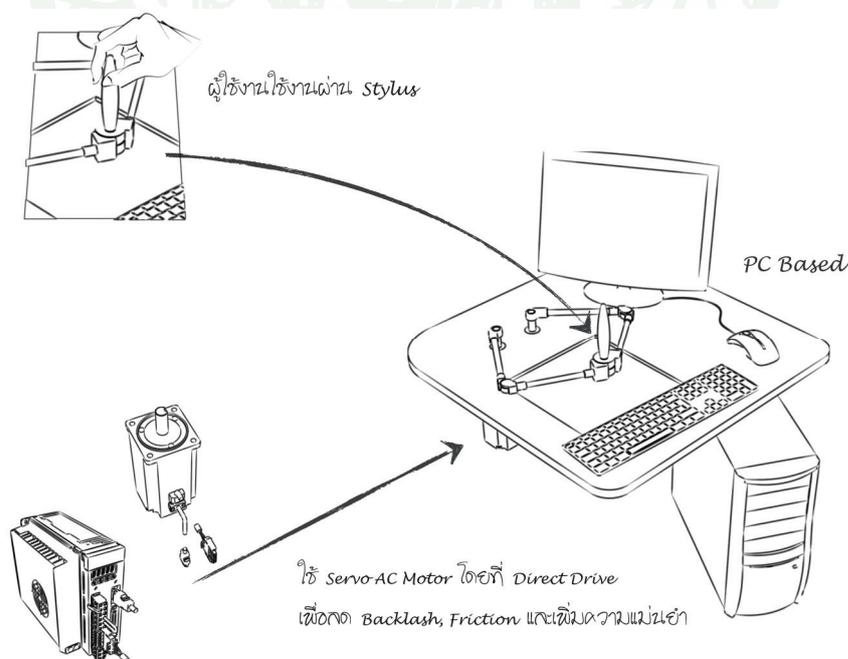
วิธีการ

1. ข้อกำหนดและหลักการในการออกแบบอุปกรณ์แฮปติก

อุปกรณ์แฮปติกเป็นแบบอุปกรณ์ชนิดตั้งโต๊ะ สามารถเคลื่อนที่ได้ในระนาบสององศาอิสระโดยกำหนดให้มีพื้นที่ทำงานเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งมีขนาดเท่ากับ 200×200 ตารางมิลลิเมตร สามารถรองรับปฏิริยาโต้ตอบทางการสัมผัส (การเคลื่อนที่และแรงปฏิริยาโต้ตอบ) ระหว่างผู้ใช้งานกับสภาพแวดล้อมเสมือน โดยผ่านสไตลัส โดยขนาดของแรงที่สามารถตอบโต้ได้อย่างต่อเนื่องประมาณ 7 นิวตันและสูงสุดไม่เกิน 30 นิวตัน (จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์แฮปติกที่รวบรวมโดย Prof. Steinbuch กำหนดให้ Comfortable Force ของนิ้วมือหนึ่งนิ้วอยู่ที่ 7 นิวตัน)

จากการตรวจเอกสารพบว่าอุปกรณ์แฮปติกนั้นหากพิจารณาจากกลไกพลศาสตร์นั้นหลากหลาย ในงานวิจัยเลือกออกแบบให้อุปกรณ์เป็นชนิดกลไกห้าลิงค์แบบขนาน เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างราบรื่น มีความแข็งแรงและสมบัติทางพลศาสตร์ที่ดีและมีชิ้นส่วนที่เกิดการเคลื่อนที่ (Moving Mass) ไม่มากนัก นอกจากนี้ยังสามารถทำให้ตำแหน่งมีความแม่นยำสูงได้อีกด้วย

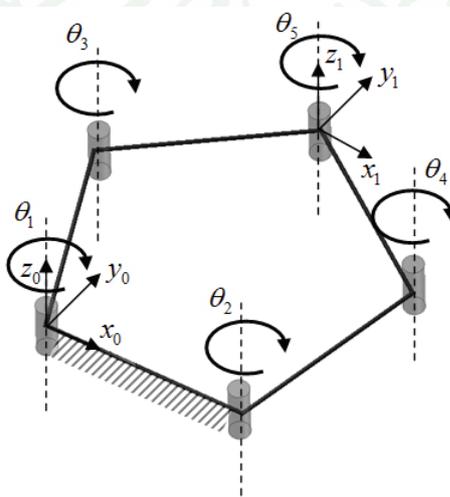
การออกแบบทางกลของอุปกรณ์แฮปติกพยายามออกแบบให้ชิ้นส่วนที่เกิดการเคลื่อนที่ (Moving Mass) ของอุปกรณ์แฮปติกมีความถี่และความเสียดทานต่ำ และเพื่อให้อุปกรณ์ทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้และสามารถรองรับปฏิกิริยาตอบโต้ทางการสัมผัสของผู้ใช้งานต่อสภาพแวดล้อมเสมือนได้อย่างสมจริง ดังนั้นการออกแบบจึงต้องคำนึงถึงการออกแบบระบบควบคุมที่เหมาะสม เสถียรภาพของระบบความถูกต้องและแม่นยำของเส้นทางการเคลื่อนที่ของ แมคานิคัลแอสเซมบลี จึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ระบบและออกแบบระบบควบคุม เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกลไกห้ำลิ่งค์แบบขนานที่ออกแบบในงานวิจัยมีความซับซ้อนและมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง (Highly Nonlinear) ดังนั้นในงานวิจัยจึงสร้างแบบจำลองต้นแบบ (Virtual Prototype) ด้วย Simulink®/SimMechanic™ ซึ่งมีข้อดีหลายข้อด้วยกัน เช่น สามารถสร้างแบบจำลอง (Model) และจำลองทางพลศาสตร์ (Simulation of Mechanical System) ของแบบจำลองอุปกรณ์ต้นแบบที่สร้างขึ้น นอกจากนั้น SimMechanic™ ยังสามารถสร้างแบบจำลองอุปกรณ์ทางกลอื่นๆ ร่วมด้วยได้ เช่น เซอร์โวมอเตอร์ ไฮดรอลิก เป็นต้น จำลองการเคลื่อนที่และสร้างภาพจำลองการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ (Machine Visualization) และวิเคราะห์ผลที่จำลองได้โดยตรงโดยไม่ต้องหาแบบจำลองพลวัตโดยสามารถวิเคราะห์ระบบและทดสอบอัลกอริทึมที่จะนำไปใช้ในระบบควบคุมกับอุปกรณ์แฮปติกต้นแบบร่วมกันใน Simulink Environment ซึ่งจะใช้เวลาในการออกแบบระบบควบคุมสั้นลงและสะดวกแก่การออกแบบระบบควบคุมให้เหมาะสมและเป็นไปตามที่ออกแบบได้ดียิ่งขึ้น



ภาพที่ 25 แบบทางกลแบบคร่าวๆ

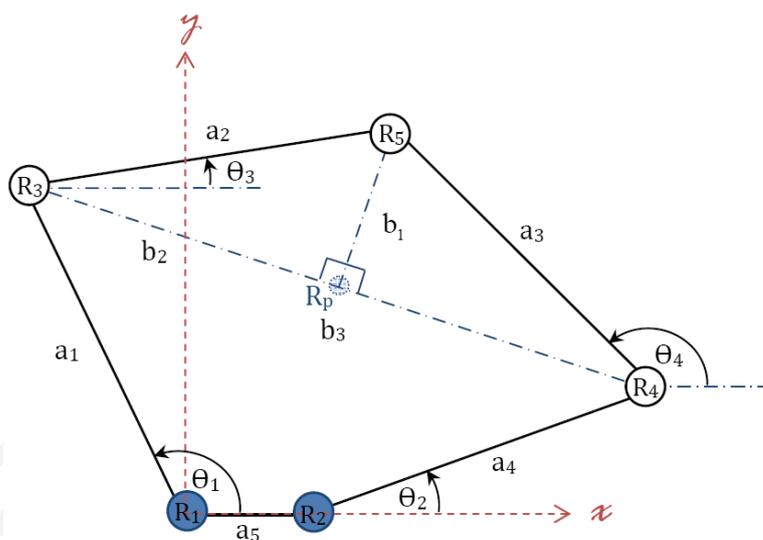
2. การออกแบบอุปกรณ์แฮปติก

กลไกของอุปกรณ์แฮปติกมีลักษณะลิงก์ที่ต่อกันห้าลิงก์แบบขนานเป็นอันประกอบด้วยข้อต่อหมุนทั้งห้าอัน โดยที่ข้อต่อสองข้อต่อ (θ_1 และ θ_2) ที่ติดอยู่กับกราวด์ลิงก์จะติดมอเตอร์ขับไว้ ซึ่งสามารถวัดตำแหน่งของข้อต่อและสามารถสร้างแรงบิดขับเคลื่อนข้อต่อทั้งสองนี้ได้ โดยผู้ใช้สามารถเคลื่อนปลายสไตลัส (ตำแหน่งที่ติดกับ θ_5) ในระนาบสองมิติภายในพื้นที่ทำงาน ในขณะที่ผู้ใช้อีกยังสามารถใช้แรงที่มีขนาดและทิศทางใดๆ กระทำที่ปลายสไตลัสได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์เพื่อหาสมการฟอร์เวิร์ด ไคเนเมติกส์ และ อินเวิร์ส ไคเนเมติกส์ ของกลไกของอุปกรณ์ก่อนและพิสูจน์สมการที่ได้



ภาพที่ 26 แผนภาพแสดงลักษณะทางโครงสร้างที่ออกแบบ

2.1 การวิเคราะห์ฟอร์เวิร์ด ไคเนเมติกส์



ภาพที่ 27 แผนภาพแสดงตำแหน่งและมุมที่ใช้ในการวิเคราะห์ฟอว์เวิร์ด ไคเนเมติกส์

เมื่อทำการวิเคราะห์ฟอว์เวิร์ด ไคเนเมติกส์ จะได้ตำแหน่งของปลายเมนิฟิวเลเตอร์ (ในแผนภาพเป็น R_3) โดยที่เป็นฟังก์ชันของมุมทั้งสองของข้อต่อที่จะทำการคิดแอกชูเอเตอร์ซึ่งจะได้ตำแหน่ง $R_3(x_3, y_3)$

$$x_3 = f(\theta_1, \theta_2, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5) \text{ และ } y_3 = f(\theta_1, \theta_2, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5)$$

จากการกำหนดให้จุดกำเนิดอยู่ที่ข้อต่อที่หนึ่งและตำแหน่งของข้อต่อและขนาดของลิงค์ต่าง ๆ เป็นไปตามรูปที่ 27 และ สร้างรูปสามเหลี่ยมมุมฉากจากการฉายตำแหน่ง R_5 (ในแผนภาพเป็น b_1) ลงบนเส้นที่ลากเชื่อมต่อระหว่าง R_3 และ R_4 (ตามรูปที่ 27 คือ b_3) จากแผนภาพจะได้

$$R_3(x_3, y_3) = [a_1 \cos \theta_1 \quad a_1 \sin \theta_1]^T \quad (1)$$

$$R_4(x_4, y_4) = [a_4 \cos \theta_2 + a_5 \quad a_4 \sin \theta_2]^T \quad (2)$$

หา b_2 จาก $\triangle R_3 R_5 R_p$ และ $\triangle R_4 R_5 R_p$ จะได้ความสัมพันธ์

$$a_2^2 = b_1^2 + b_2^2 \text{ และ } a_3^2 = b_1^2 + (b_3 - b_2)^2$$

จะได้

$$b_2 = \frac{a_2^2 - a_3^2 + b_3^2}{2b_3} \quad (3)$$

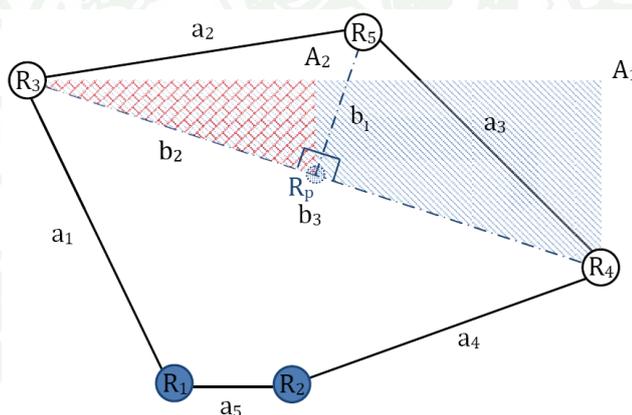
ซึ่งขนาดของ b_3 มีค่าเท่ากับ

$$b_3 = \sqrt{(x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2} \quad (4)$$

และหาค่า b_1

$$b_1 = \sqrt{a_2^2 - b_2^2} \quad (5)$$

หา $R_p(x_p, y_p)$ จากสามเหลี่ยมคล้าย $\triangle R_3 A_2 R_p$ กับ $\triangle R_3 A_1 R_4$ ดังรูปที่ 28



ภาพที่ 28 แผนภาพแสดงสามเหลี่ยมคล้าย $\triangle R_3 A_2 R_5$ กับ $\triangle R_3 A_1 R_4$

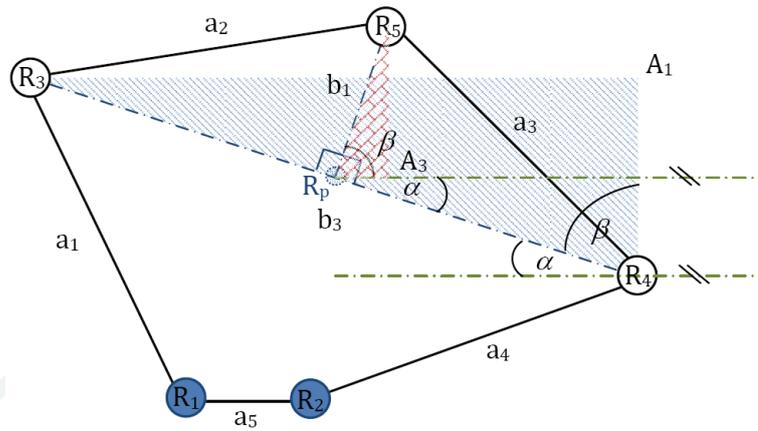
จากสัดส่วนด้านตามเรขาคณิตจะให้ความสัมพันธ์เป็น

$$x_p = x_3 + \frac{b_2}{b_3} |x_4 - x_3| \quad (6)$$

$$y_p = y_3 + \frac{b_2}{b_3} |y_4 - y_3| \quad \text{ถ้า } y_p \geq y_3$$

$$y_p = y_3 - \frac{b_2}{b_3} |y_4 - y_3| \quad \text{ถ้า } y_p < y_3 \quad (7)$$

หา $R_5(x_5, y_5)$ จากสามเหลี่ยมคล้าย $\triangle R_5 A_3 R_p$ กับ $\triangle R_3 A_1 R_4$ ดังรูปที่ 29



ภาพที่ 29 แผนภาพแสดงสามเหลี่ยมคล้าย $\Delta R_5 A_2 R_p$ กับ $\Delta R_3 A_1 R_4$

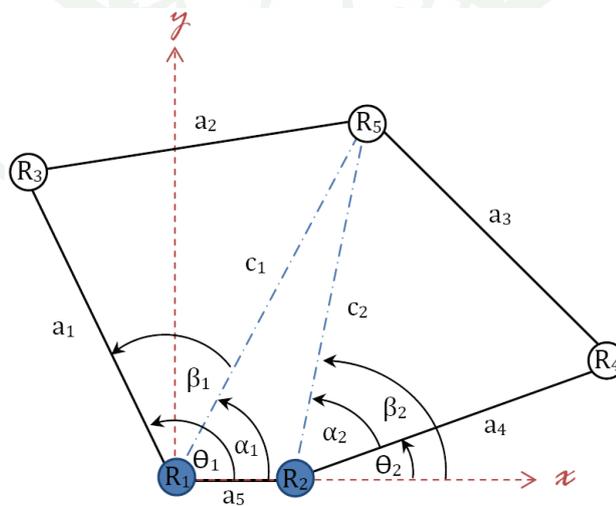
จากสัดส่วนด้านตามเรขาคณิตจะให้ความสัมพันธ์เป็น

$$x_5 = x_p + \frac{b_1}{b_3} |y_4 - y_3| \quad \text{ถ้า } x_5 \geq x_p$$

$$x_5 = x_p - \frac{b_1}{b_3} |y_4 - y_3| \quad \text{เมื่อ } x_5 < x_p \quad (8)$$

$$y_5 = y_p + \frac{b_1}{b_3} |x_4 - x_3| \quad (9)$$

2.2 การวิเคราะห์สมการอินเวอร์ส ไคเนเมติกส์



ภาพที่ 30 แผนภาพแสดงมุมที่ใช้ในการวิเคราะห์อินเวอร์ส ไคเนเมติกส์

ทำการวิเคราะห์อินเวอร์ส โคเนเมติกส์เพื่อควบคุมมุมในการหมุนของมอเตอร์ทั้งสอง (มุม θ_1 และ θ_2) โดยสร้างรูปสามเหลี่ยมซึ่งลากเชื่อมต่อระหว่างข้อต่อ R_1 กับ R_5 และ R_2 กับ R_5 ตามรูปที่ 30 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างมุมต่างๆดังต่อไปนี้

$$\theta_1 = \alpha_1 + \beta_1 \quad (10)$$

$$\theta_2 = \beta_2 - \alpha_2 \quad (11)$$

สมมุติฐานในการออกแบบ กำหนดให้ความยาวลิงก์ทั้งห้ามีขนาดเท่ากัน ซึ่งในที่นี้ กำหนดให้เท่ากับ l ดังนั้นจะได้ว่า $a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = l$ และให้ a_5 เป็นระยะห่างระหว่างมอเตอร์ทั้งสอง ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ จึงสามารถหาได้ดังต่อไปนี้

หา β_1

$$a_2^2 = a_1^2 + c_1^2 - 2a_1c_1 \cos \beta_1$$

จะได้ว่า

$$\beta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{a_1^2 - a_2^2 + c_1^2}{2a_1c_1} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{c_1}{2l} \right) \quad (12)$$

$$c_1 = \sqrt{x_5^2 + y_5^2}$$

แทนค่า c_1 ในสมการที่ (12) จะได้

$$\beta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{x_5^2 + y_5^2}}{2l} \right)$$

หา α_1 จาก

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left(\frac{y_3}{x_3} \right) \quad \text{เมื่อ } ; x_3 > 0$$

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{2} \quad \text{เมื่อ } ; x_3 = 0$$

$$\alpha_1 = \pi + \tan^{-1}\left(\frac{y_3}{x_3}\right) \quad \text{เมื่อ } ; x_3 < 0 \quad (13)$$

กำหนดให้มุม α_1 และ β_1 มีค่าเดียว

หา α_2

$$a_3^2 = a_4^2 + c_2^2 - 2a_4c_2 \cos \alpha_2$$

จะได้ว่า

$$\alpha_2 = \cos^{-1}\left(\frac{a_4^2 - a_3^2 + c_2^2}{2a_4c_2}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{c_2}{2l}\right) \quad (14)$$

$$c_2 = \sqrt{(x_5 - a_5)^2 + y_5^2}$$

แทนค่า c_2 ในสมการที่ (14) จะได้

$$\alpha_5 = \cos^{-1}\left(\frac{\sqrt{(x_5 - a_5)^2 + y_5^2}}{2l}\right)$$

หา β_2 จาก

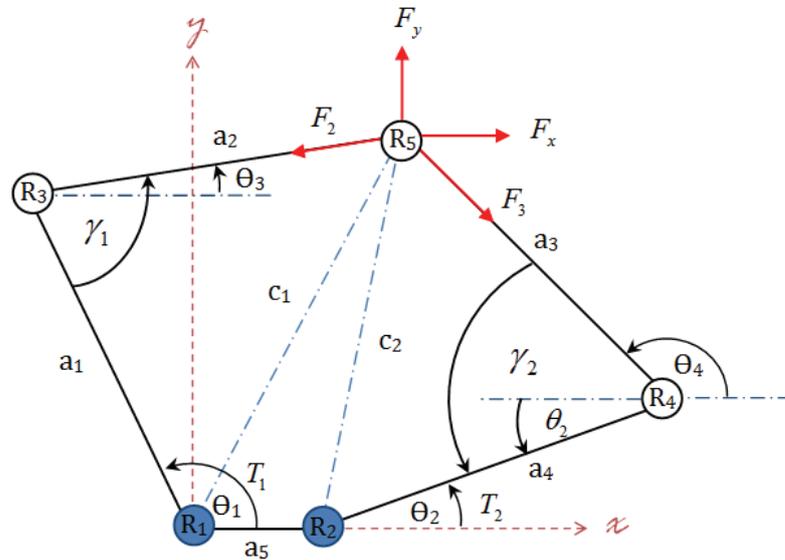
$$\beta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{y_3}{x_3 - a_5}\right) \quad \text{เมื่อ } ; x_3 > a_5$$

$$\beta_2 = \frac{\pi}{2} \quad \text{เมื่อ } ; x_3 = a_5$$

$$\beta_2 = \pi + \tan^{-1}\left(\frac{y_3}{x_3 - a_5}\right) \quad \text{เมื่อ } ; x_3 < a_5 \quad (15)$$

กำหนดให้มุม α_1 และ β_1 มีค่าเดียว

2.3 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์



ภาพที่ 31 แผนภาพมุมใช้ในการวิเคราะห์ทางจลนพลศาสตร์

ทำการวิเคราะห์แรงเพื่อใช้ในการออกแบบทางกลชิ้นส่วนบางชิ้น และใช้ในการประกอบการเลือกขนาดของมอเตอร์ จากภาพจะได้ว่า

$$\gamma_1 = \pi - \theta_1 + \theta_3 = \cos^{-1} \left(\frac{a_1^2 + a_2^2 - c_1^2}{2a_1a_2} \right)$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$\theta_3 = \theta_1 - \pi = \cos^{-1} \left(\frac{a_1^2 + a_2^2 - c_1^2}{2a_1a_2} \right)$$

ในทางกลับกันจะได้ว่า

$$\gamma_2 = \pi - \theta_4 + \theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{a_3^2 + a_4^2 - c_2^2}{2a_3a_4} \right)$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$\theta_4 = \pi + \theta_5 - \cos^{-1}\left(\frac{a_3^2 + a_4^2 - c_2^2}{2a_3a_4}\right)$$

จากสภาพสมดุล

$$\sum F = 0:$$

$$F_x + F_3 \cos(\pi - \theta_4) = F_2 \cos \theta_3$$

$$F_x - F_3 \cos \theta_4 = F_2 \cos \theta_3$$

$$F_y = F_3 \sin(\pi - \theta_4) + F_2 \sin \theta_3$$

$$= F_3 \sin \theta_2 + F_2 \sin \theta_3$$

จากสมการที่ (18)

$$F_2 = \frac{F_x - F_3 \cos \theta_4}{\cos \theta_3}$$

นำสมการที่ (20) ไปแทนลงในสมการที่ (18) จะได้

$$\begin{aligned} F_y &= F_3 \sin \theta_2 + \left[\frac{F_x - F_3 \cos \theta_4}{\cos \theta_3} \right] \sin \theta_3 \\ &= F_3 \sin \theta_2 + (F_x - F_3 \cos \theta_4) \tan \theta_3 \end{aligned}$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$F_3 = \frac{F_y - F_x \tan \theta_3}{\sin \theta_2 - \cos \theta_4 \tan \theta_3} \quad (21)$$

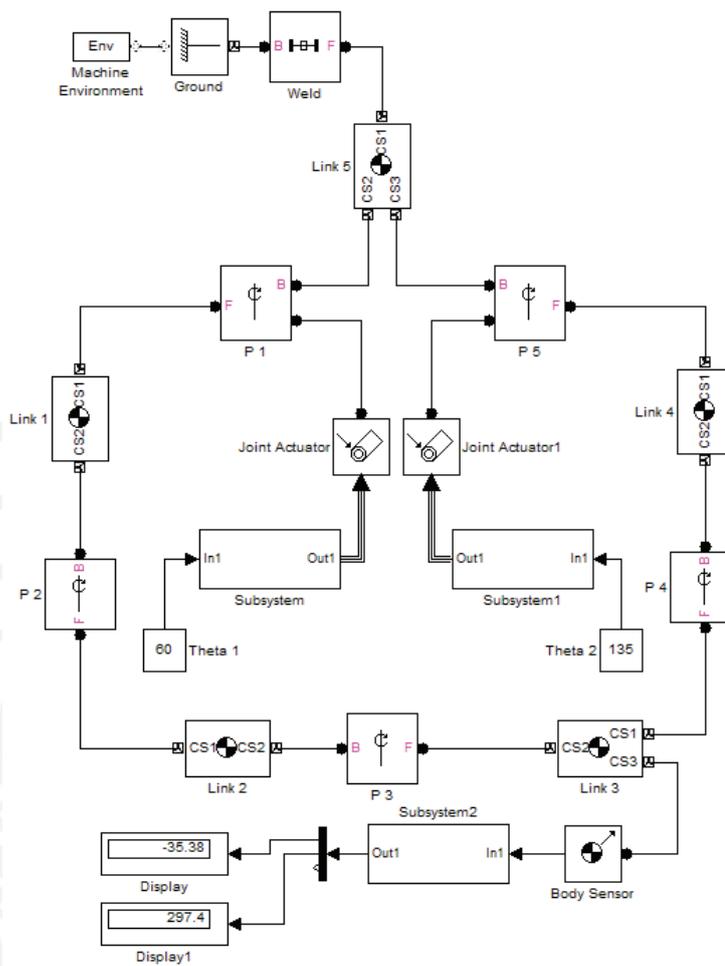
จากรูปที่ 5 จะสามารถหาแรงบิดได้จาก

$$T_1 = F_2 a_1 \sin(\theta_1 - \theta_3) \quad (22)$$

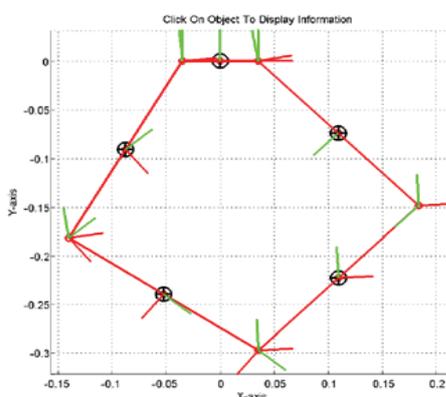
$$T_2 = F_3 a_4 \sin(\theta_4 - \theta_2) \quad (23)$$

2.4 ออกแบบความยาวและวัสดุของก้านอุปกรณ์แฮปติก

หลังการวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์แล้ว ต่อไปจึงทำการออกแบบความยาวของลิงค์ทั้งสี่ โดยใช้ซอฟต์แวร์ Simulink®/SimMechanic™ ช่วยในการออกแบบโดยจำลองกลไกห้าลิงค์แบบขนาน เพื่อให้อุปกรณ์แฮปติกสามารถเคลื่อนที่ได้ครอบคลุมพื้นที่ทำงานตามข้อกำหนดในการออกแบบ ซึ่งมีพื้นที่ทำงานเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสในระนาบเท่ากับ 200×200 ตารางมิลลิเมตร โดยแบบจำลองที่ได้ แสดงไว้ดังภาพที่ 32 เมื่อทำการจำลองจะสามารถตรวจสอบตำแหน่งของปลายแมนิพูเลเตอร์ ได้ พร้อมกับแสดงแผนภาพแสดงตำแหน่งและการเคลื่อนที่ของข้อต่อและก้านของกลไก ดังภาพที่ 33 หลังจากการจำลองสามารถออกแบบให้ลิงค์มีความยาวเท่ากับ 210 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถทำให้ใช้งานได้ครอบคลุมพื้นที่ทำงานตามข้อกำหนดในการออกแบบและเหมาะสมกับขนาดของอุปกรณ์แฮปติกต้นแบบ



ภาพที่ 32 แบบจำลองกลไกห้าดีกรีแบบขนานที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการออกแบบความยาวลิงค์



ภาพที่ 33 แผนภาพแสดงตำแหน่งและการเคลื่อนที่ของข้อต่อและก้านของกลไกของแบบจำลอง

การออกแบบแขนของอุปกรณ์แฮปติก โดยเลือกแขนเป็นรูปทรงกระบอกที่เป็นคาร์บอนแกรไฟต์ เป็นวัสดุ เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและสามารถรับความเค้นได้ดี เพราะลึกลงเป็นชิ้นส่วนหนึ่งที่อยู่ในส่วนที่เกิดการเคลื่อนที่ ดังนั้นจึงควรออกแบบให้มีมวลน้อยที่สุดเพื่อลดความเฉื่อยและโมเมนต์ความเฉื่อย ดังนั้นจึงเลือกใช้ก้านไม้กอล์ฟเนื่องจากมีวัสดุเป็นก้านคาร์บอนแกรไฟต์ และเป็นทรงกระบอกกลาง

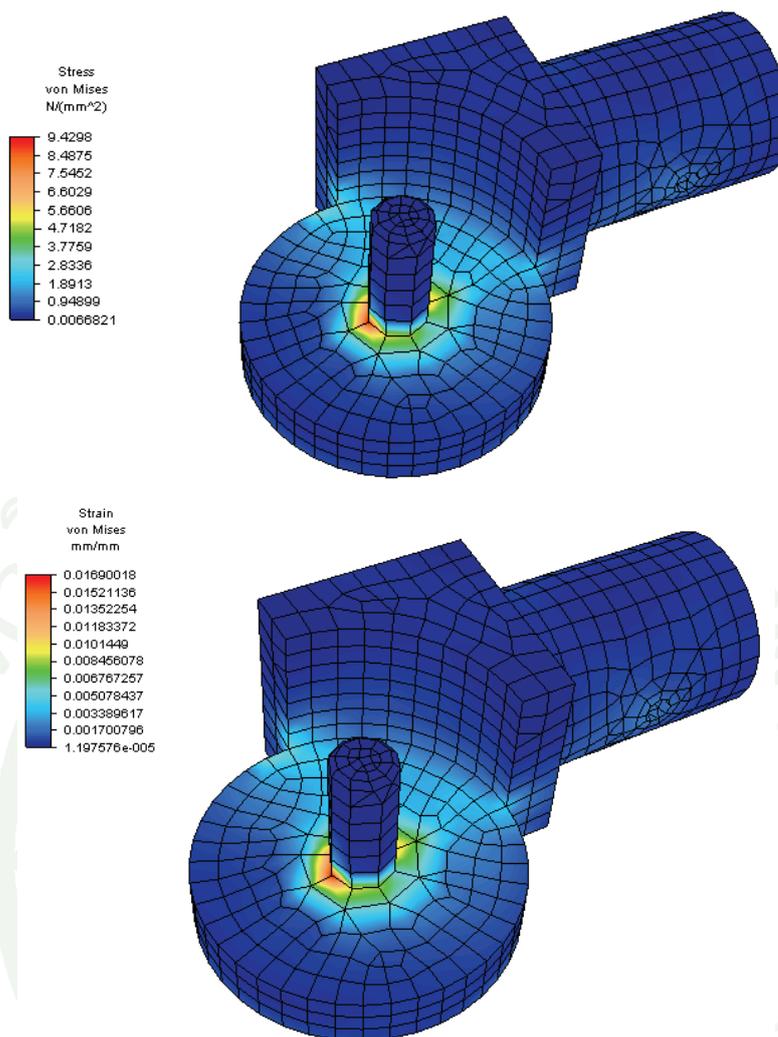
2.5 ออกแบบและสร้างข้อต่อของอุปกรณ์แฮปติก

ก่อนทำการสร้างแบบจำลองอุปกรณ์แฮปติก ในการจำลองพลศาสตร์ของแบบจำลองในสามมิติ เราจำเป็นต้องหาข้อจำกัดที่ใช้ในการจำลองเพื่อให้แบบจำลองเสมือนจริงมากที่สุดซึ่งหนึ่งในข้อจำกัดที่สำคัญคือความสามารถในการเคลื่อนที่เชิงมุมของข้อต่อจริง ดังนั้นเราจึงทำการออกแบบและสร้างข้อต่อจริงขึ้น

ในการออกแบบข้อต่อนั้นเราทำการออกแบบข้อต่อโดยใช้ซอฟต์แวร์ CAD ทั่วไปโดยวัสดุที่ใช้เป็น Polyethylene ซึ่งเป็นพลาสติกซึ่งเป็นวัสดุที่เบาและมีสมบัติทางกลที่ดี สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างกันต่ำ ง่ายแก่การขึ้นรูปซึ่งเหมาะสำหรับนำมาผลิตขึ้นรูปเป็นข้อต่อ จากนั้นทำการวิเคราะห์ความเค้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ด้วยโปรแกรม ANSYS ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์เป็นดังตารางที่ 1 และรูปที่ 34 ซึ่งจะพบว่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นประมาณ 9.43 MPa แต่ Tensile Yield Strength ของ Polyethylene มีค่าสูงถึง 770 MPa ดังนั้นแสดงว่าวัสดุสามารถรับความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นได้

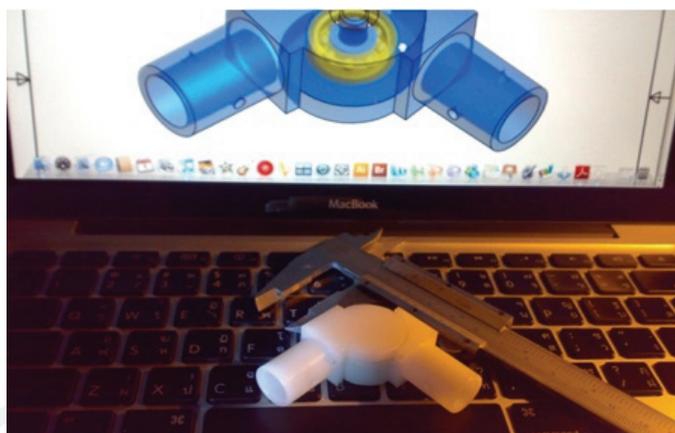
ตารางที่ 1: ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียด

	น้อยที่สุด	มากที่สุด
ความเค้น	0.0067 MPa	9.4298 MPa
ความเครียด	1.1976e-5 mm/mm	0.0169 mm/mm
Safety Factor	4.8635	6082



ภาพที่ 34 ภาพผลการวิเคราะห์ความเค้นของข้อต่อ

ข้อต่อใส่ตลับลูกปืนแบบ Deep Groove Ball Bearing ของ SKF™ รุ่น 625-2Z ได้ข้อต่อ
ต้นแบบที่สามารถกวาดทำมุมประมาณ 175 องศา ดังภาพที่ 35



ภาพที่ 35 ภาพแสดงแบบข้อต่อและข้อต่อต้นแบบที่ได้

2.6 การเลือกชิ้นส่วนประกอบของอุปกรณ์แฮปติก

2.6.1 การเลือกมอเตอร์

เนื่องจากการออกแบบอุปกรณ์แฮปติกในงานวิจัยมุ่งเน้นให้มีความเสียดทานและความเที่ยงต่ำ ในงานวิจัยจึงเลือกมอเตอร์แบบ AC Servo Brushless Motor เนื่องจากให้แรงบิดและประสิทธิภาพสูง การสิ้นเปลืองและความถี่รอบถึงสัญญาณรบกวนต่ำ และเนื่องจากเป็นเซอร์โวมอเตอร์ ดังนั้นมันจึงสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ด้วยระบบควบคุมภายใน ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับงานที่รับภาระแบบแปรผัน (Variable Load) เช่น อุปกรณ์แฮปติกในงานวิจัย

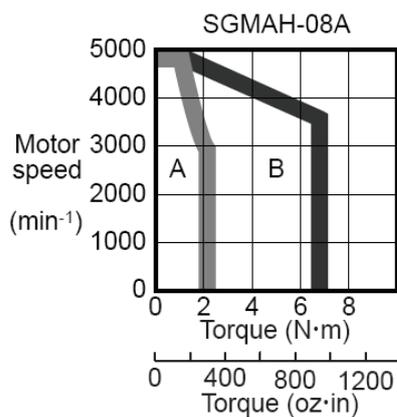
หลังจากสมการที่ (22) จะพบว่าแรงบิด $T_1 = F_2 a_1 \sin(\theta_1 - \theta_3)$ และมีค่ามากที่สุดเมื่อ $\theta_1 - \theta_3 = 90^\circ$ ซึ่งจะทำให้

$$T_1 = F_2 a_1$$

และเนื่องจากนิยามของแรงที่เริ่มทำให้เกิดแรงซึ่ง Uncomfortable ของนิ้วมือหนึ่งนิ้วจะเกิดขึ้นเมื่อมีแรงกระทำกับนิ้วที่ 7 N และมากที่สุดอยู่ที่ 30-50 N ดังนั้นจะได้ว่า ที่ความยาวลิ้งค์เท่ากับ 210 มิลลิเมตรและแรงสูงสุดที่ออกแบบไว้ที่ 30 N

$$T_{\max} = F_2 a_1 = 30 \text{ N} \times 210 \text{ mm} = 6.3 \text{ N} \cdot \text{m}$$

เลือกใช้ AC Servo Motor ของ Yaskawa รุ่น SGMAH-08AAA41 และ ชุดขับ รุ่น SGD8-08AE-S ขนาด 750 วัตต์ 3000 รอบต่อนาทีซึ่งจากคู่มือจะพบว่าสามารถรองรับได้ตามข้อกำหนดของการออกแบบ



ภาพที่ 36 แผนภาพแสดง Torque-Motor Speed Characteristics ที่ 200 โวลต์

ที่มา: Yaskawa Electric Corporation (n.d.)

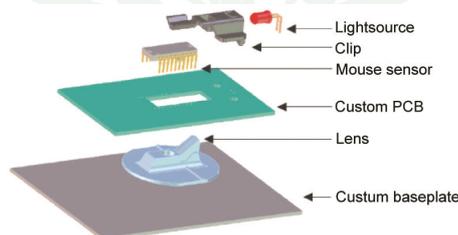


ภาพที่ 37 ภาพแสดงมอเตอร์และชุดขับที่เลือกใช้ในงานวิจัย

2.6.2 การเลือกเซนเซอร์

ออปติคอลลเซ็นเซอร์ (Optical Sensor) มีข้อดีหลายข้อโดยหลักๆ ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบคือ ตัวเซ็นเซอร์เองมีขนาดเล็กและมีความเหนียวน้อยมากและเนื่องจากใช้หลักการของแสง ดังนั้นการทำงานจึงไม่จำเป็นต้องเกิดการสัมผัสทำให้ไม่เกิดปัญหาเรื่องของความเสียหาย โดยมีข้อเสียคือเซ็นเซอร์ประเภทนี้มักมีราคาสูง แต่เนื่องจากปัจจุบันเทคโนโลยีนี้ถูกนำมาใช้กับอุปกรณ์สำหรับอินเตอร์เฟซระหว่างคอมพิวเตอร์กับผู้ใช้งาน (Human Interface Device) เช่น ออปติคอลลเมาส์ (Optical Mouse) โดยใช้หลักการและอุปกรณ์เดียวกัน และเนื่องจากปัจจุบัน ออปติคอลลเมาส์ และ เลเซอร์เมาส์ (Laser Mouse) มีราคาต่ำกว่า ออปติคอลลเมาส์ มากแต่เนื่องจากไม่ได้ออกแบบมาเพื่อใช้เป็นเซ็นเซอร์วัดระยะ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องเขียนโปรแกรมขึ้นมา Acquire ข้อมูลจากเมาส์เพื่อนำมาเปลี่ยนเป็นตำแหน่งที่แท้จริง และนำไปติดไว้กับปลายสไตลัส เพื่อใช้ในการบอกตำแหน่งของปลายสไตลัส ของอุปกรณ์แฮปติกเพื่อส่งตำแหน่งต่อไปยังคอมพิวเตอร์แฮปติก เพื่อใช้ในการแสดงการมองเห็นและแฮปติก (Visual/Haptic Rendering) ต่อไป

ภายในเมาส์ประกอบไปด้วย 3 ส่วนด้วยกันได้แก่ ระบบกำเนิดแสง (Optical System), เซ็นเซอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) โดยระบบระบบกำเนิดแสงหลักๆ จะประกอบไปด้วย เลนส์ แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์และเซนเซอร์ ประกอบเข้าด้วยกันตามภาพที่ 38

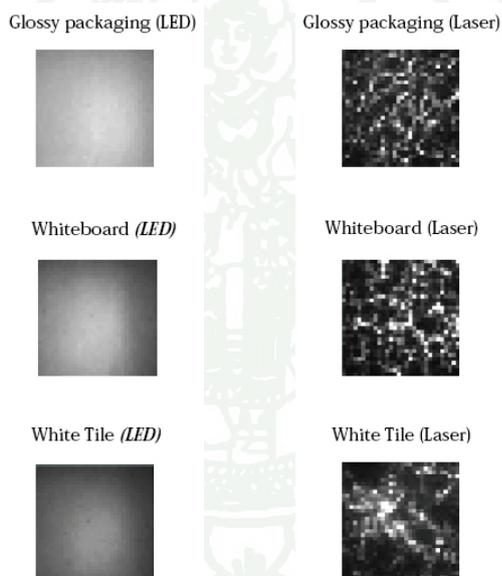


ภาพที่ 38 ส่วนประกอบของระบบออปติคอลลเมาส์

ที่มา: Kamphuis (2007)

จากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ VCSLE เซนเซอร์จะถ่ายภาพด้วยเกรย์สเกล (gray scale) ขนาด 16x16 พิกเซลรายละเอียดของภาพจะขึ้นอยู่กับขนาดของภาพ คุณภาพของเลนส์และแหล่งกำเนิดแสง (ในบางพื้นผิวที่โปร่งใสหรือพื้นผิวที่สะท้อนแสงได้ดีภาพที่ถ่ายได้จากแสงที่เกิดจากการสะท้อนของแสง LED จะเบลอในขณะที่ภาพที่ถ่ายได้จากแสงเลเซอร์จะสามารถแยกแยะรายละเอียดได้ ซึ่งจะทำให้สามารถตรวจจับการเคลื่อนไหวได้)

ในภาพที่ 39 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายที่ถ่ายได้จากแหล่งกำเนิดแสงทั้งจาก LED และเลเซอร์ซึ่งชัดเจนว่าภาพที่ถ่ายได้จากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ให้รายละเอียดของภาพได้ดีกว่า ส่วนความแม่นยำในการวัดระยะการเคลื่อนที่นั้นหลักๆ ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างเลนส์และพื้นผิว เนื่องจากส่งผลต่อขนาดของภาพที่ถ่ายได้

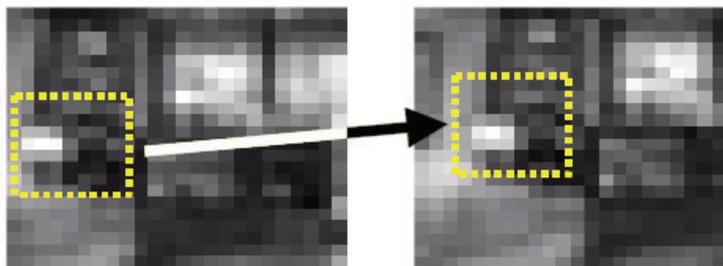


ภาพที่ 39 ตัวอย่างภาพถ่ายที่ถ่ายได้จากแหล่งกำเนิดแสงทั้งจาก LED และเลเซอร์

ที่มา: Kamphuis (2007)

เซนเซอร์ของเมาส์จะประกอบไปด้วย Image Acquisition System (IAS), Digital Signal Processor (DSP) และ Serial Port Communication ซึ่งทำหน้าที่ในการควบคุมระบบระบบกำเนิดแสงทั้งระบบ IAS จะทำหน้าที่ถ่ายภาพและแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและสัญญาณภาพถ่ายนี้จะถูกประมวลผลด้วย DSP ซึ่ง DSP จะวัดระยะการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจากภาพถ่ายของพื้นผิวที่ถูกถ่ายอย่างต่อเนื่องดังภาพที่ 40 จากตำแหน่งของจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งสองภาพจะสามารถ

นำไปคำนวณหาระยะที่เคลื่อนที่ได้ ซึ่งสามารถบอกได้ทั้งปริมาณการเคลื่อนที่และทิศทางที่เคลื่อนที่



ภาพที่ 40 แสดงภาพที่ถ่ายพื้นผิวแบบ Sequential Image

ที่มา: Kamphuis (2007)

ส่วนที่สองของเม้าส์เซนเซอร์ที่จะกล่าวถึงคือไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งภายใน EEPROM ประกอบไปด้วย Firmware และ โปรแกรมของเม้าส์เซนเซอร์ หน่วยความจำ (RAM), Internal Timer และ USB หากเม้าส์เกิดการเคลื่อนที่หรือมีการกดปุ่มเม้าส์จะส่งสัญญาณ 4 ไบต์ ขนาด 8 บิตต่อชุดคำสั่งไปยังคอมพิวเตอร์ โดยไบต์แรกจะเป็นสัญญาณสำหรับปุ่มกด ไบต์ที่สองและสามเป็นสัญญาณระยะที่เกิดการการเปลี่ยนตำแหน่งของเม้าส์ในแกนนอนและตั้งตามลำดับ โดยส่งสัญญาณเป็น Signed Byte Format (-128 ถึง 127) โดยในงานวิจัยได้ใช้ NI-LabVIEW ในการโปรแกรมเพื่อ Acquire สัญญาณและคำนวณตำแหน่งของออฟติคัลเซ็นเซอร์

2.6.3 การสร้าง VISA RAW Device Driver

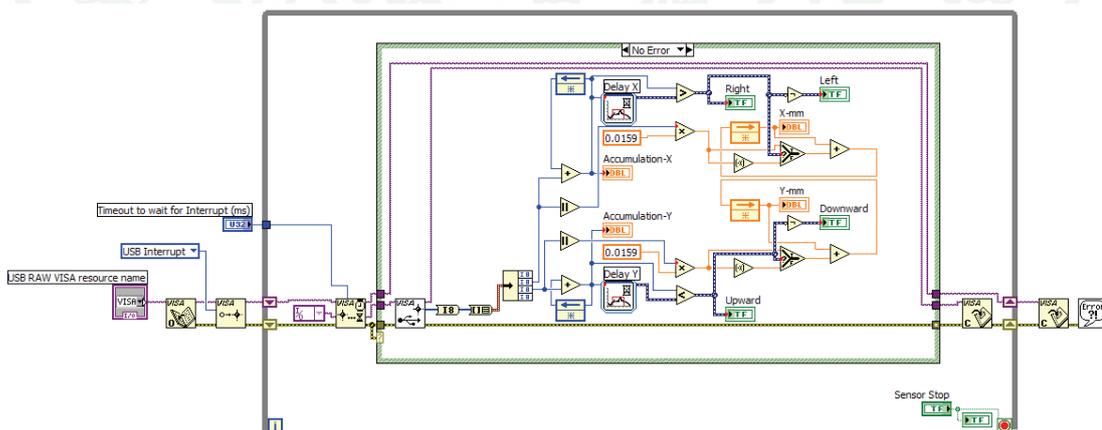
ในงานวิจัยใช้ National Instrument LabVIEW เขียนโปรแกรมในการ Acquire สัญญาณข้อมูลจากเม้าส์นำไปแปลงเป็นตำแหน่งที่แท้จริงในหน่วยของมิลลิเมตร เนื่องจากเม้าส์จะส่งข้อมูลความยาวขนาด 4 ไบต์ไปยัง Host ผ่าน USB และเพื่อที่จะเข้าถึงข้อมูลจำเป็นต้องใช้ NI-VISA RAW Driver สร้าง Driver สำหรับเม้าส์ที่เราต้องการใช้เป็นเซ็นเซอร์ NI-VISA เป็น High-Level API ที่ใช้ในการสื่อสารผ่าน Instrumentation Buses และ USB ซึ่งเป็น Message-Based Communication bus ดังนั้น PC และอุปกรณ์ USB ทำการสื่อสารโดยการส่งคำสั่งและข้อมูลผ่าน Bus เป็นตัวอักษรหรือข้อมูลไบนารีอุปกรณ์ USB แต่ละชิ้นจะมีชุดคำสั่งของไครของมันโดยในงานวิจัยเลือกใช้เม้าส์ซึ่งมีแหล่งกำเนิดแสงเป็นเลเซอร์ของ COMAT



ภาพที่ 41 เม้าส์ที่เลือกใช้ในงานวิจัย

2.6.4 การเขียน โปรแกรมสำหรับเซนเซอร์

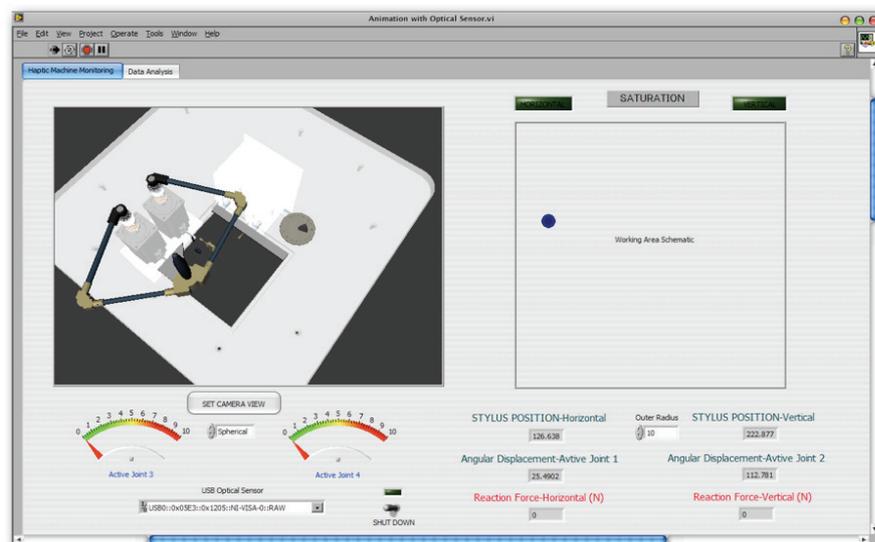
หลังจากที่ทำการสร้าง VISA RAW Device Driver เรียบร้อยแล้ว ทำการเขียนซอฟต์แวร์เพื่อ Acquire ข้อมูลจากเซนเซอร์เพื่อนำไปคำนวณเป็นตำแหน่งที่แท้จริงในหน่วยของมิลลิเมตรซึ่งขึ้นอยู่กับความละเอียดของเม้าส์แต่ละอันซึ่งเม้าส์ที่ใช้ในงานวิจัยมีความละเอียดเท่ากับ 1800 DPI ซึ่งโปรแกรมที่เขียนได้เป็นไปตามภาพที่ 42



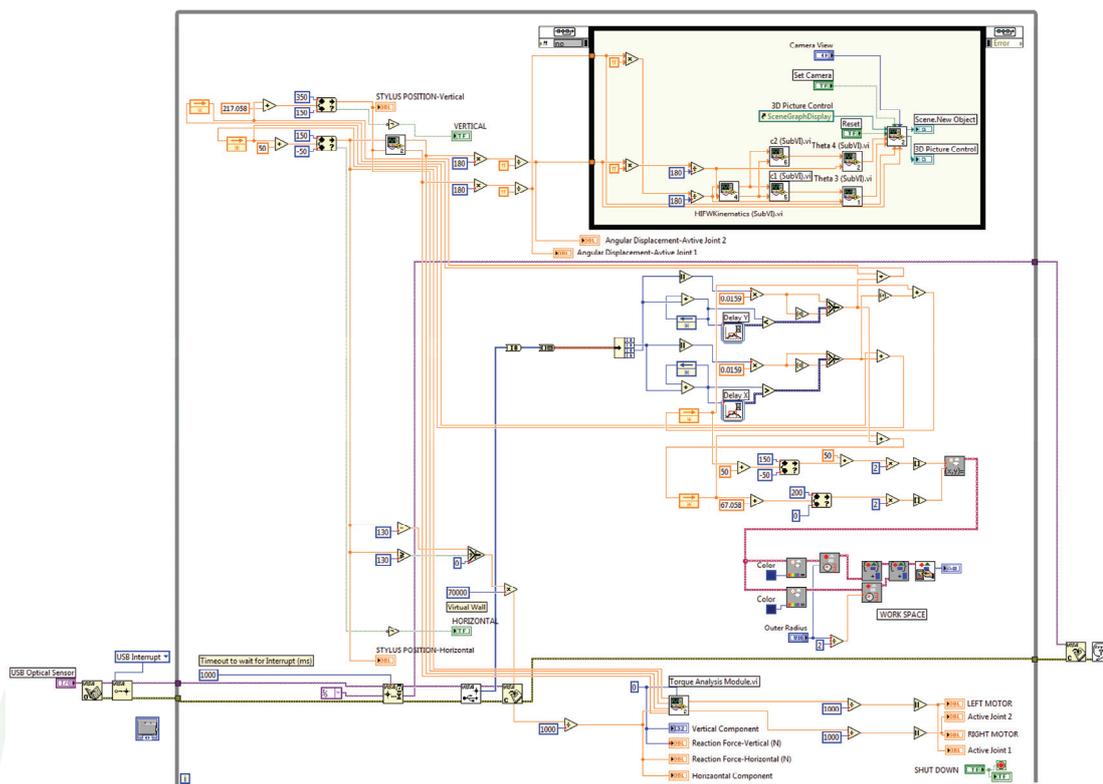
ภาพที่ 42 แสดงโค้ด โปรแกรมที่ใช้ในการวัดระยะซึ่งเขียนโดย NI-LabVIEW

2.7 การเขียนโปรแกรมที่ใช้ในการแสดงผลการทำงานของอุปกรณ์แฮปติกที่ทำการ ออกแบบด้วยโปรแกรม NI-LabVIEW

ในงานวิจัยใช้ NI-LabVIEW สำหรับเขียนโปรแกรมสำหรับแสดงผลการทำงานของ
อุปกรณ์แฮปติกที่ทำการออกแบบโดยการแสดงการทำงานของอุปกรณ์ที่ทำการออกแบบตามภาพที่
43 ซึ่งประกอบด้วยสองส่วนคือส่วนสำหรับแสดงกราฟิกของอุปกรณ์แฮปติกที่ทำการออกแบบและ
สภาพแวดล้อมเสมือนที่ทำการจำลองขึ้น (Visual Display) และส่วนที่สองคือส่วนที่ใช้ในการแสดง
ข้อมูลของอุปกรณ์ที่เวลาจริง (Real Time) เช่น ตำแหน่งของสไตล์สที่วัดได้จากเซนเซอร์ การ
กระจัดเชิงมุมและแรงบิดของมอเตอร์ทั้งสอง และแรงปฏิกิริยาโต้ตอบของอุปกรณ์ที่ได้จากการ
คำนวณ เป็นต้น



ภาพที่ 43 ภาพหน้าต่างของโปรแกรมแสดงผลการทำงานของอุปกรณ์แฮปติกที่ทำการออกแบบ



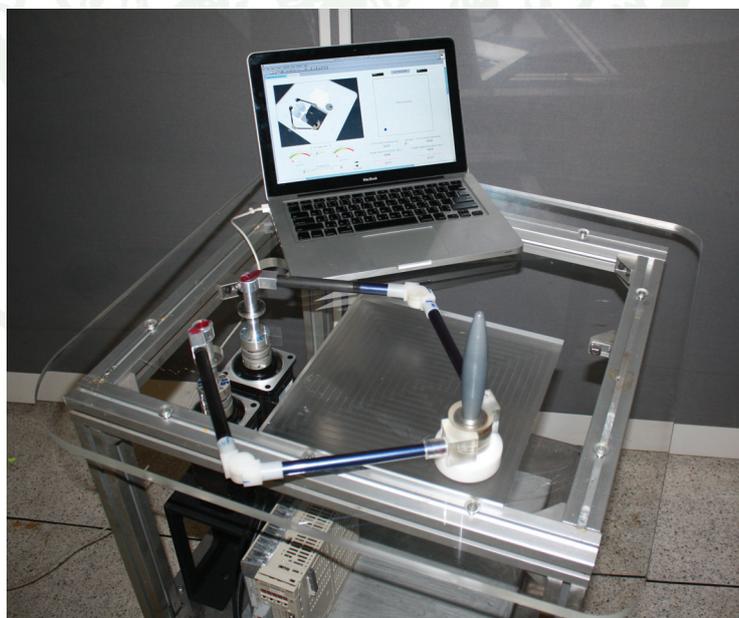
ภาพที่ 44 แสดงโค้ดโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมและแสดงการทำงานของอุปกรณ์แฮดติก

2.8 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์แฮดติกต้นแบบ (Physical Prototype)

เมื่อได้ส่วนประกอบที่สำคัญของอุปกรณ์แฮดติกต้นแบบแล้วนำเอามาทำการออกแบบชิ้นส่วนอื่นๆ ด้วย CAD เช่น สไตลัส หรือเพลทเป็นต้น ซึ่งจะได้แบบตามภาพที่ 45 และสร้างประกอบอุปกรณ์ต้นแบบได้ตามภาพที่ 46



ภาพที่ 45 ภาพแบบของส่วนประกอบทั้งหมดของอุปกรณ์แฮดติกที่ทำการออกแบบ



ภาพที่ 46 ภาพแสดงอุปกรณ์แฮดติกต้นแบบที่สร้างขึ้นจากการออกแบบ

3 การสร้างแบบจำลองอุปกรณ์แฮปติกต้นแบบ (Virtual Prototyping)

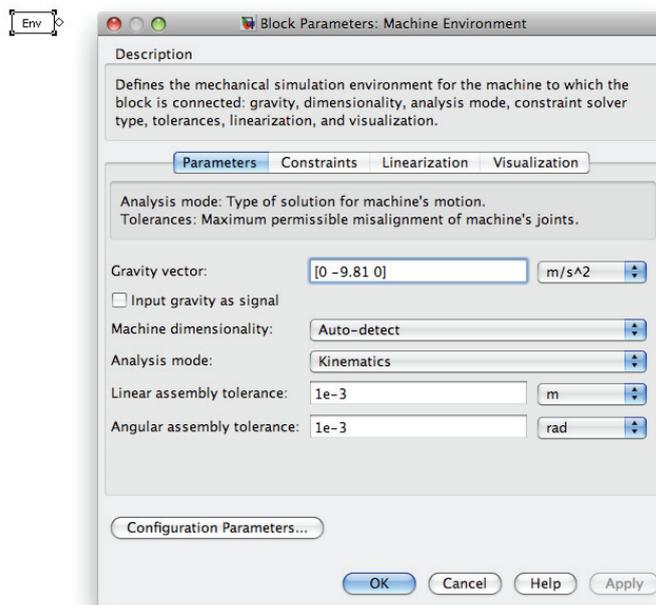
สร้างแบบจำลองอุปกรณ์แฮปติกต้นแบบ (Virtual Prototyping) และทำการจำลองพลวัตระบบทางกลของอุปกรณ์แฮปติกที่ทำการออกแบบโดยในงานวิจัยเลือกใช้ซอฟต์แวร์ MATLAB Simulink® และใช้ Simulink®/SimMechanic™ เนื่องจากมีความสามารถทั้งในการจำลองระบบทางกลโดยตรงโดยไม่จำเป็นต้องหาแบบจำลองระบบทางกลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ที่ทำการออกแบบ และสร้างภาพจำลองการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ (Machine Visualization) เพื่อตรวจสอบเชิงคุณภาพที่ดี ข้อจำกัดทางกลและข้อผิดพลาดต่างๆ ของกลไก เพื่อลดปัญหาในการสร้างอุปกรณ์ต้นแบบ (Physical Prototype) เพื่อช่วยลดต้นทุนในการพัฒนาอุปกรณ์รวมถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ทำการออกแบบ

ในส่วนของการสร้างแบบจำลองอุปกรณ์แฮปติกต้นแบบนี้แบ่งออกเป็นสองส่วนคือส่วนที่เป็นการสร้างแบบจำลองอุปกรณ์แฮปติกต้นแบบ (Virtual Prototyping) และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองรวมไปถึงการปรับแก้แบบจำลองเพื่อให้มีสมบัติทางกลเสมือนจริงมากที่สุดกับส่วนที่สองคือส่วนของการสร้างสภาพแวดล้อมเสมือน และ ทำการจำลอง แบบจำลองอุปกรณ์แฮปติกต้นแบบขณะทำการสัมผัสกับสภาพแวดล้อมเสมือนเพื่อออกแบบรูปร่างและลักษณะของสภาพแวดล้อมเสมือนพร้อมทั้งปรับแก้แบบจำลองอุปกรณ์แฮปติกต้นแบบเพิ่มเติม

3.1 การสร้างแบบจำลองพลวัตของอุปกรณ์แฮปติก (Dynamic Modeling of Haptic Manipulator)

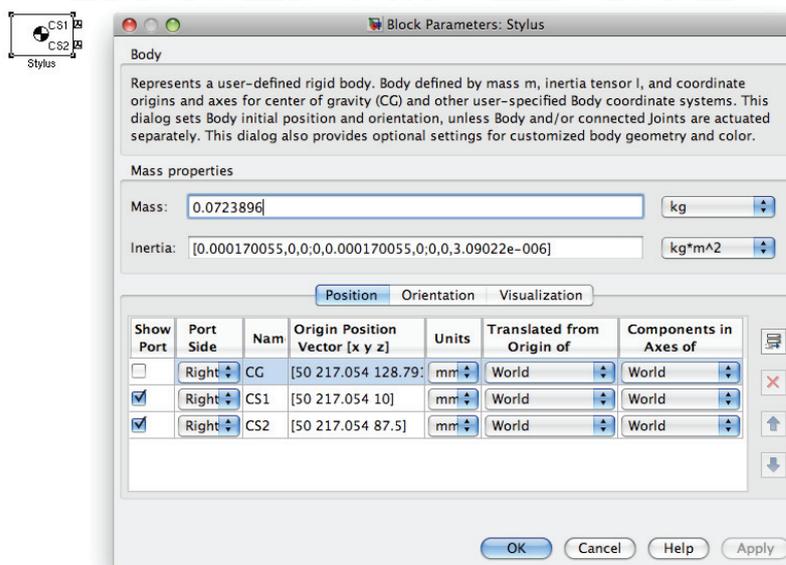
ในงานวิจัยสร้างแบบจำลองพลวัตของอุปกรณ์แฮปติกที่ทำการออกแบบ จากการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ด้วยซอฟต์แวร์ Simulink®/SimMechanic™ โดยจะยกตัวอย่าง Block Environment หลักๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองอุปกรณ์แฮปติกและวิธีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการจำลองเช่น

ทำการกำหนด Mechanical Simulation Environment ของแบบจำลองของอุปกรณ์ เช่น การกำหนดความโน้มถ่วง โหมดที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Analysis Mode) ค่าาคาดเคลื่อน (Tolerance) การประมาณเชิงเส้น (Linearization) หรือรูปร่างภาพเคลื่อนไหวของอุปกรณ์ต้นแบบ (Visualization) โดยใส่ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการลงใน Machine Environment Block



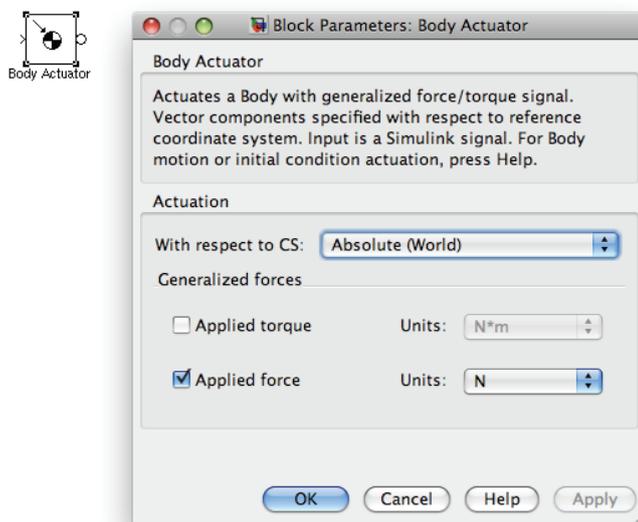
ภาพที่ 47 ตัวอย่าง Machine Environment Block

จำลองชิ้นส่วนของอุปกรณ์แสปติกตันแบบด้วย Body Block ซึ่งเป็นวัตถุแข็งเกร็งโดยกำหนดตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลและทิศทางการหมุนเทียบกับระบบพิกัดอ้างอิง รวมถึงมวลและเทนเซอร์แสดงความเฉื่อย (Inertia Tensor) ลงในหน้าต่าง Block Environment ตามภาพที่ 48



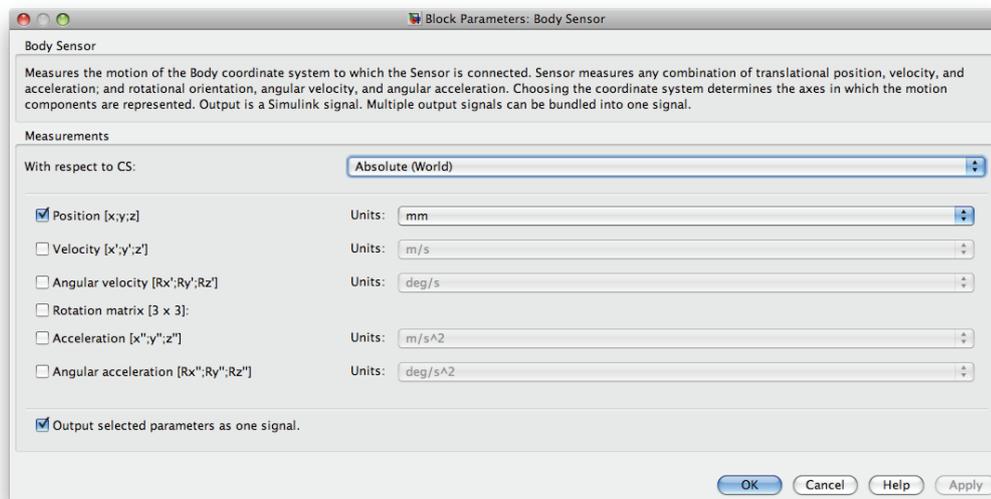
ภาพที่ 48 ตัวอย่าง Body Block

เราสามารถเคลื่อนที่วัตถุใน Simulink®/SimMechanic™ ด้วย Body Actuator โดยเชื่อมต่อสัญญาณโดยสามารถเลือกใส่ได้ทั้งที่เป็นแรงหรือแรงบิด



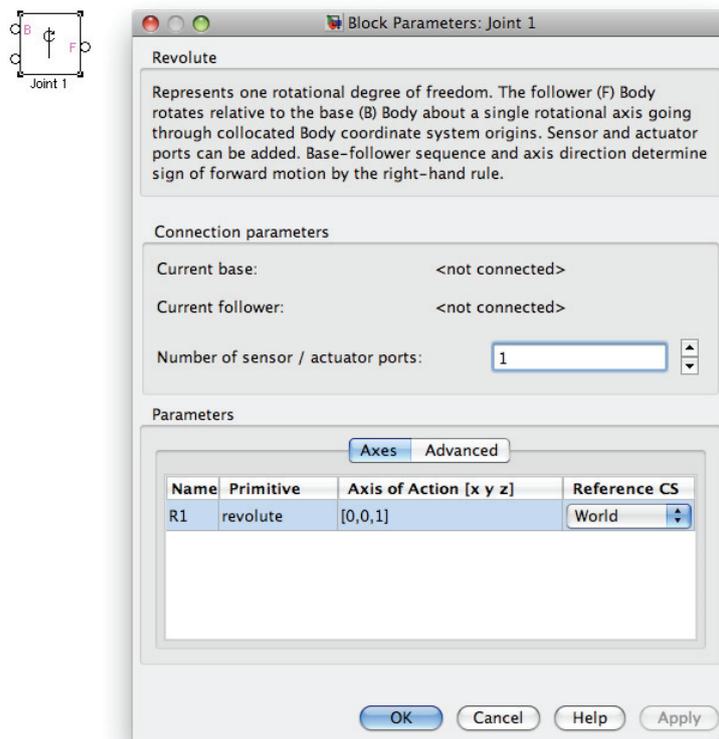
ภาพที่ 49 ตัวอย่าง Body Actuator Block

เราสามารถวัดการเคลื่อนที่ของวัตถุใน Simulink®/SimMechanic™ ด้วย Body Sensor โดยเชื่อมต่อเข้ากับ Body Block ที่ต้องการอยากทราบการเคลื่อนที่ โดยสามารถวัดการเคลื่อนที่ได้ทั้งตำแหน่ง ความเร็ว ความเร่ง ทั้งเชิงเส้นและเชิงมุม



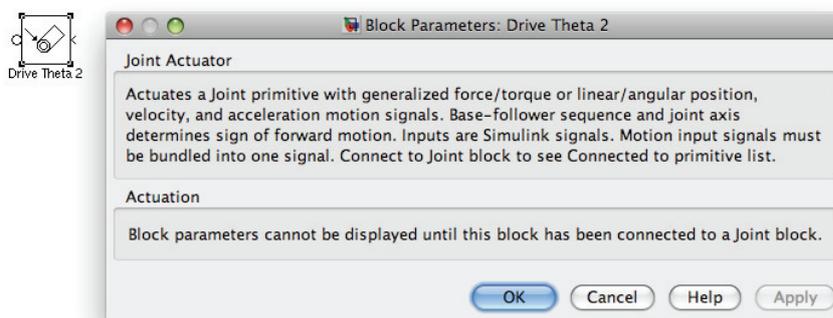
ภาพที่ 50 ตัวอย่าง Body Sensor Block

จากนั้นกำหนดองศาอิสระ (Degree Of Freedom) ด้วยการเชื่อมต่อข้อต่อชนิดต่างๆ เข้ากับชิ้นส่วนของอุปกรณ์และกำหนดตัวแปรลงในหน้าต่าง Block Environment โดยอุปกรณ์แอสปติกที่ออกแบบเป็นกลไกหาลึกลับแบบขนานดั่งนั้นในแบบจำลองจึงใช้ข้อต่อแบบหมุน (Revolute Joint) เท่านั้น โดยเชื่อมต่อวัตถุทั้งสองเข้ากับพอร์ตทั้งสองโดยด้านหนึ่งเป็น Base และอีกด้านหนึ่งเป็น Follower นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดแกนในการหมุนได้จากการกำหนดค่า Axis of Action ตามภาพที่ 51



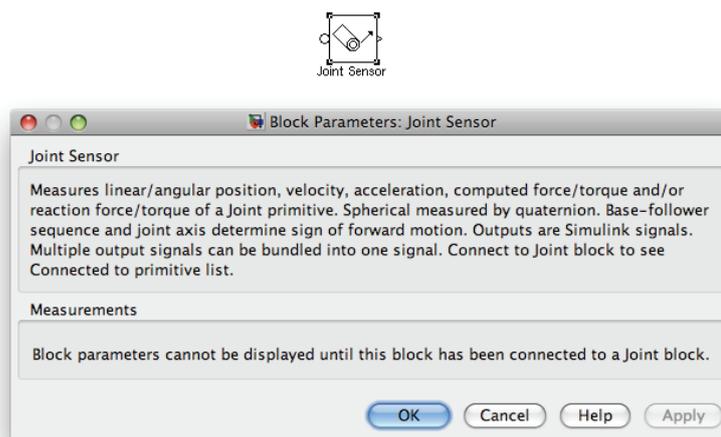
ภาพที่ 51 ตัวอย่าง Joint Block

เราสามารถเคลื่อนที่ข้อต่อใน Simulink®/SimMechanics™ ด้วย Joint Actuator โดยเชื่อมต่อสัญญาณ Simulink® โดยสามารถเลือกใส่ได้ทั้งที่เป็นตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่ง ทั้งเชิงเส้นและเชิงมุม แรงหรือแรงบิด



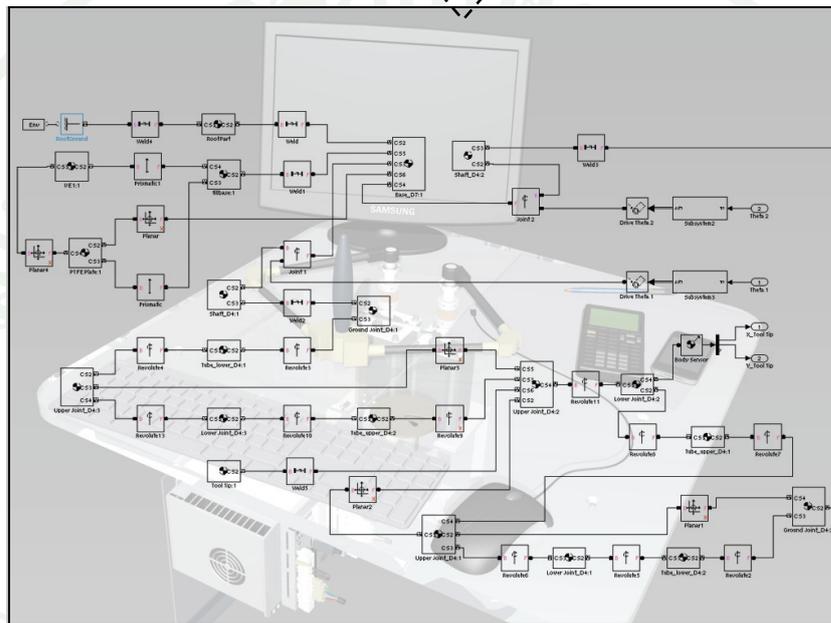
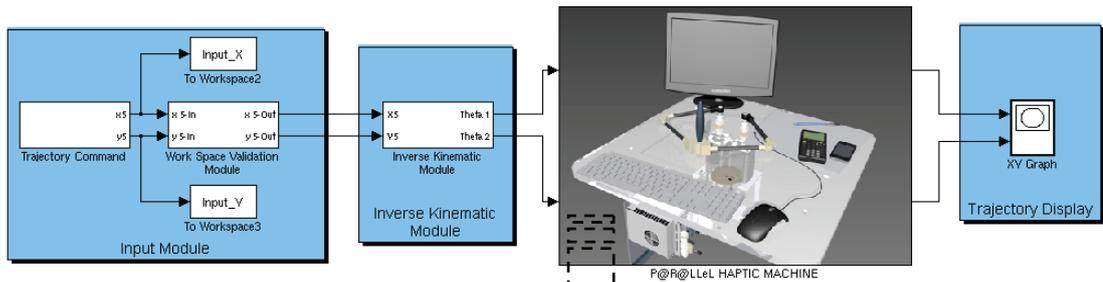
ภาพที่ 52 ตัวอย่าง Joint Actuator Block

สุดท้ายเราสามารถวัดตำแหน่งและการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนหรือข้อต่อของแบบจำลองของอุปกรณ์ได้โดยการเชื่อมต่อ Sensor Block เข้ากับชิ้นส่วนของอุปกรณ์หรือข้อต่อ โดยสามารถวัดได้ทั้งที่เป็นตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่ง ทั้งเชิงเส้นและเชิงมุม แรงหรือแรงบิดที่ได้จากการคำนวณโดยส่งสัญญาณที่วัดได้ออกไปเป็นสัญญาณ Simulink ตามภาพที่ 53

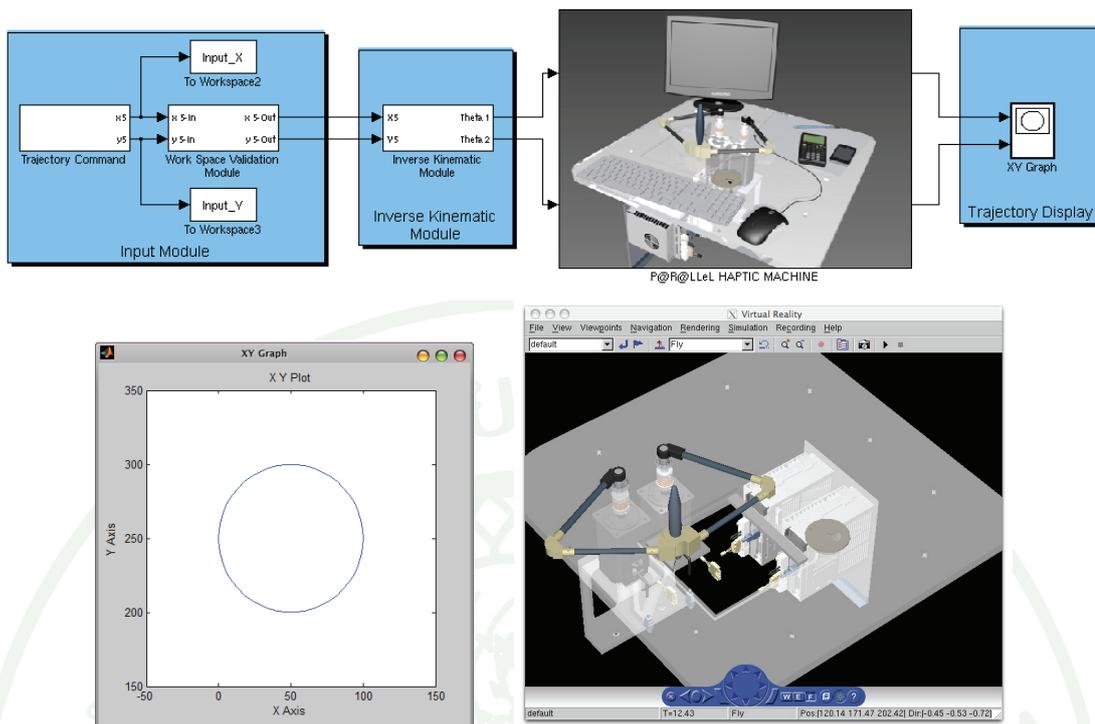


ภาพที่ 53 ตัวอย่าง Joint Sensor Block

จากนั้นนำข้อจำกัดและพารามิเตอร์อื่นที่เกี่ยวข้องของอุปกรณ์แฮปติกที่ได้มาจำลองลงในแบบจำลองด้วย SimMechanic™ โดยใช้ความยาวลิงก์ทุกลิงก์ตามที่ได้จากการออกแบบไว้เท่ากับ 210 มิลลิเมตรและความยาวลิงค์ a_5 มีค่าเท่ากับระยะห่างของมอเตอร์ทั้งสองซึ่งมีค่าเท่ากับ 100 มิลลิเมตร นอกจากนี้ใช้มุมของข้อต่อที่สามารถกวาดได้จริงที่ได้จากการวัดจากข้อต่อจริง ซึ่งมีค่าประมาณจากการวัดมุมตั้งแต่ $5^\circ - 173^\circ$ รวมถึงโค้ดสมการอินเวิร์ส ไคเนเมติกส์ ที่ได้จากการวิเคราะห์ลงในแบบจำลองด้วย



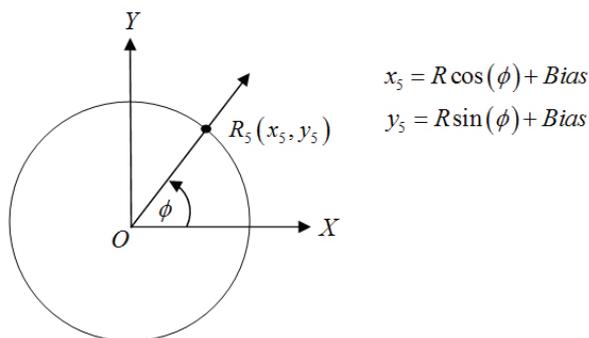
ภาพที่ 54 แบบจำลองทางพลวัตของอุปกรณ์แฮปติกและโค้ดของแบบจำลอง



ภาพที่ 55 แบบจำลองพลวัตของอุปกรณ์แฮปติกต้นแบบและหน้าต่างแสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายสไตส์ลัส ขณะทำการจำลอง

3.2 ผลการตรวจสอบความเป็นจริงของตำแหน่งของแบบจำลอง (Kinematics Model Verification)

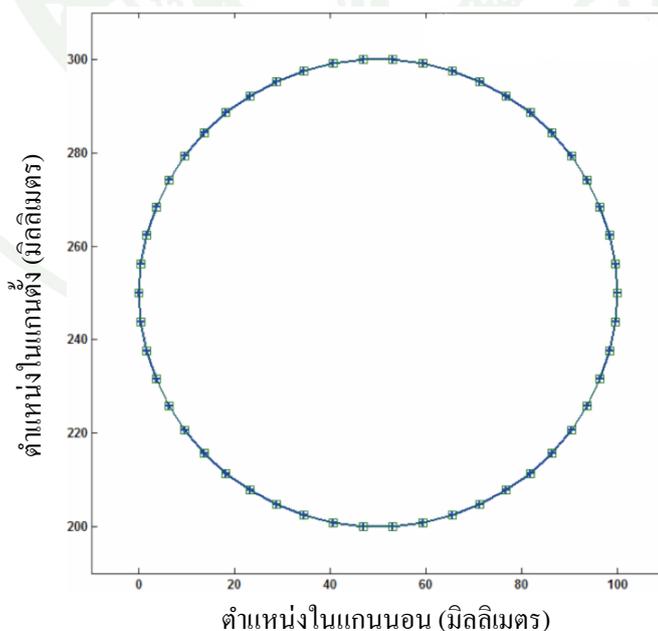
ตรวจสอบความเป็นจริงของพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของแบบจำลองของอุปกรณ์แฮปติกโดยทำการโปรแกรมให้ปลายสไตส์ลัสของแบบจำลองอุปกรณ์หรือข้อต่อที่ $R_5(x_5, y_5)$ เดินทางเป็นวงกลมรัศมีขนาด 50 เซนติเมตร โดย Bias เพื่อให้จุดศูนย์กลางวงกลมไปอยู่ในตำแหน่ง (50,250) เพื่อหลีกเลี่ยงเส้นทางที่จะออกนอกพื้นที่ทำงาน ดังภาพที่ 56



ภาพที่ 56 แผนภาพแสดงเส้นทางเดินของวงกลมรัศมี 50 เซนติเมตร

จำลองเส้นทางการเดินทางของสไตลัส และ พลอตเส้นทางที่ปลายสไตลัสของ อุปกรณ์แฮปติกที่ออกแบบเคลื่อนที่ได้จริงเทียบกับคำสั่งที่อินพุตเข้าไป ได้ผลตามภาพที่ 57 ซึ่งเส้นที่มีเครื่องหมายขีดตั้งฉากกับเส้นสัมผัสวงกลม (เส้นสีน้ำเงิน) เป็นเส้นทางการเดินที่อินพุตเข้าไป และเส้นที่มีเครื่องหมายสี่เหลี่ยมจัตุรัส (เส้นสีเขียว) เป็นเส้นทางที่ปลายสไตลัสของอุปกรณ์เคลื่อนที่ได้จริง จะสังเกตพบว่าเส้นทั้งสองทับกันสนิทพอดี นั่นแสดงว่าแบบจำลองของอุปกรณ์แฮปติก (Virtual Prototype) ที่ได้ออกแบบสามารถเคลื่อนที่ได้ตำแหน่งตรงตามที่ต้องการได้

- เส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายอุปกรณ์ที่กำหนด
- เส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายอุปกรณ์ที่เคลื่อนที่ได้จริง

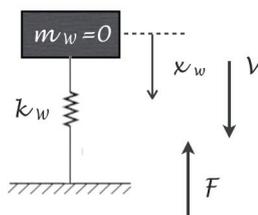


ภาพที่ 57 ภาพแสดงกราฟเส้นทางของปลายสไตลัส เมื่อเทียบกับเส้นทางที่กำหนดไว้

3.3 การสร้างแบบจำลองพลวัตของสภาพแวดล้อมเสมือน (Dynamic Modeling of Virtual Environment)

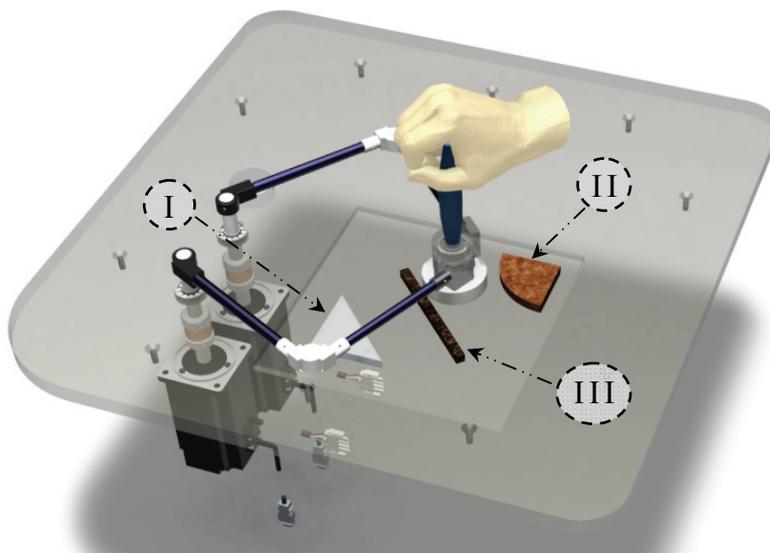
การสร้างสภาพแวดล้อมเสมือนขึ้นในแบบจำลองอุปกรณ์แฮปติกเพื่อให้ผู้ใช้งานเมื่อใช้งานอุปกรณ์แฮปติกแล้ว อุปกรณ์สามารถที่จะเกิดปฏิกิริยาโต้ตอบทางการสัมผัสขึ้นรู้สึกราวกับผู้ใช้สัมผัสกับสิ่งนั้นจริง ๆ

โดยในงานวิจัยทำการจำลองการสัมผัสเฉพาะในส่วนของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัตถุเสมือนจริงเท่านั้น การจำลองสภาพแวดล้อมเสมือนได้ใช้แบบจำลองสปริงในการจำลองการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัตถุเสมือน (ระยะกระจัดที่เปลี่ยนแปลง) เพื่อหาแรงที่ปฏิกิริยาโต้ตอบซึ่งสปริงเป็นสปริงเชิงเส้นมีพฤติกรรมเป็นไปตามกฎของฮุก (Hook's Law; $\vec{F} = -k\vec{x}$) ตามภาพที่ 58

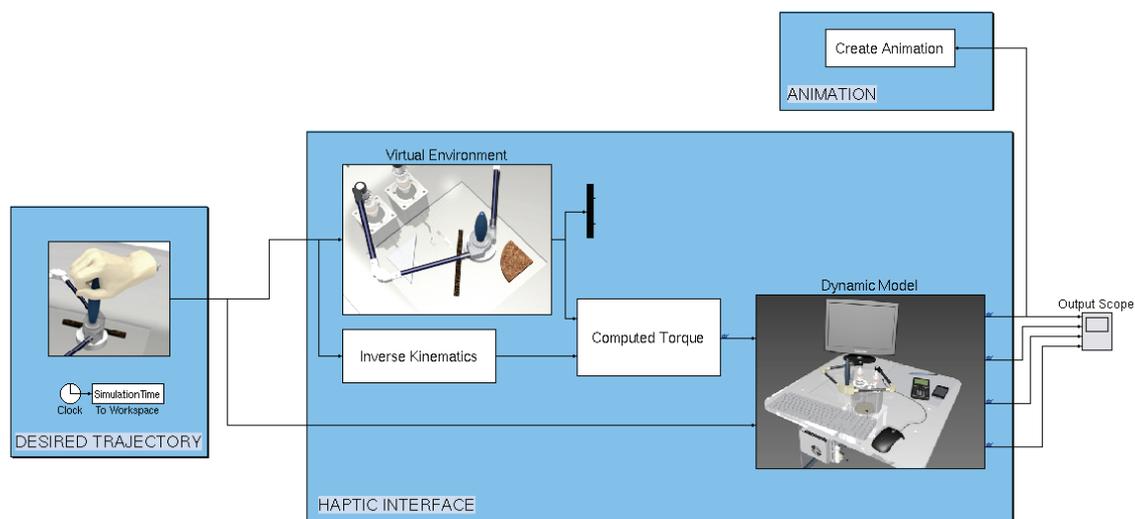


ภาพที่ 58 แผนภาพแบบจำลองสปริงที่ใช้ในการจำลองการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัตถุเสมือน

โดยทำการสร้างสภาพแวดล้อมเสมือนใน 3 ลักษณะคือ และสภาพแวดล้อมแรกมีค่าความแข็ง (stiffness) น้อย ๆ (จำลองให้วัตถุเสมือนมีรูปร่างเป็นสามเหลี่ยม; บริเวณ I) และมีค่ามาก (จำลองให้วัตถุเสมือนมีรูปร่างเป็นหนึ่งในสี่ของวงกลม; บริเวณ II) และสุดท้ายสภาพแวดล้อมที่มีค่าความแข็งสูงมาก ๆ จุดประสงค์เพื่อจำลองเป็นกำแพงเสมือน (Virtual Wall) (จำลองให้กำแพงเสมือน มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า; บริเวณ III) โดยตำแหน่งของสภาพแวดล้อมทั้งสามอยู่ในพื้นที่ทำงานของอุปกรณ์แฮปติกในตำแหน่งตามภาพที่ 59



ภาพที่ 59 รูปแสดงชนิด รูปร่างและตำแหน่งของสภาพแวดล้อมเสมือนที่จำลองขึ้นทั้งสาม

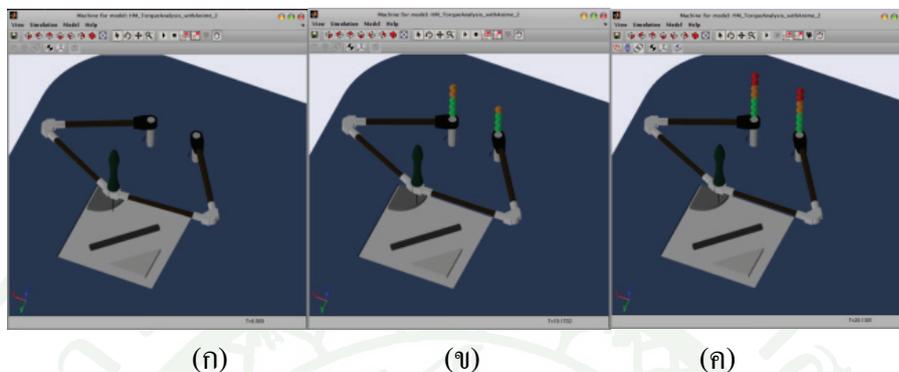


ภาพที่ 60 แบบจำลองอุปกรณ์แฮปติกต้นแบบขณะทำการจำลอง

3.4 การตรวจสอบความเป็นจริงของแวดล้อมเสมือน (Virtual Environment)

ก่อนที่จะทำการจำลองต้องทำการปรับแก้แบบจำลองอุปกรณ์แฮปติกต้นแบบ (Virtual Prototype) ด้วยการเพิ่มความหนืดที่เกิดจากโรเตอร์ของมอเตอร์และแรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์สามารถสร้างได้เข้าไปในแบบจำลองด้วย จากนั้นจำลองเส้นทางเดินของปลายสไตล์สผ่านสภาพแวดล้อม

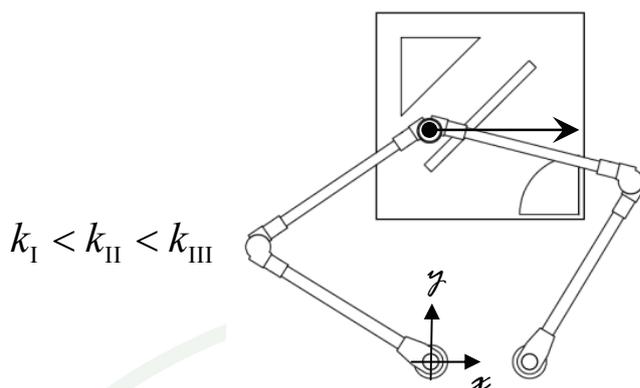
เสมือนทั้งสามที่สร้างขึ้นและแสดงผลของแรงปฏิกิริยาโต้ตอบที่ปลายสไตลัส ซึ่งในขณะที่ทำการจำลองแบบจำลองสามารถแสดงช่วงของแรงบิดแบบเรียลไทม์ และแบบจำลองจะหยุดจำลอง หากแรงบิดเกิน 7.14 นิวตันเมตรซึ่งเป็นค่าแรงบิดสูงสุดที่แสดงไว้ดังภาพที่ 61



ภาพที่ 61 แสดงค่าของแรงบิดแบบเรียลไทม์โดยรูป (ก) ยังไม่สัมผัสภาพเวกเตอร์เสมือนและรูป (ค) แสดงแรงบิดที่สูงที่สุดที่มอเตอร์สามารถให้ได้ก่อนหยุดจำลองการเคลื่อนที่

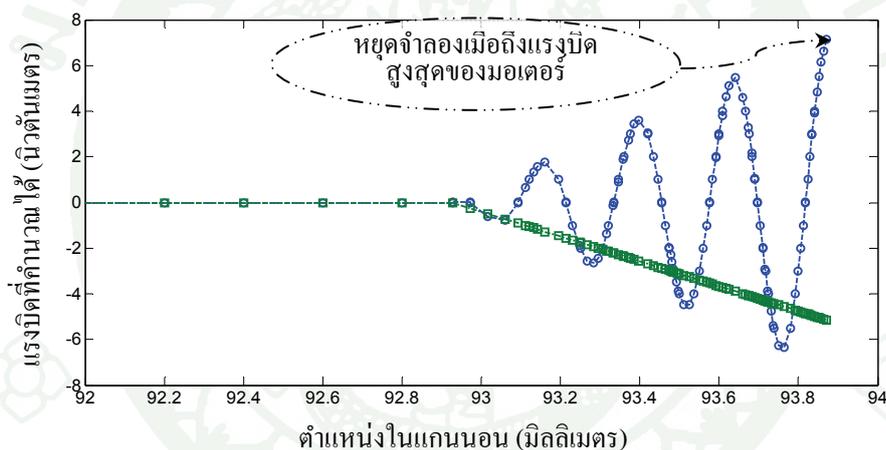
3.5 ผลการตรวจสอบความเป็นจริงของแรงปฏิกิริยาต่อกำแพงเสมือนจริง (Virtual Wall)

ทดสอบกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายสไตลัสผ่านวัตถุเสมือนที่เป็นกำแพงเสมือน โดยได้กำหนดค่า k ไว้ที่ 50,000 N/m ได้ผลตามภาพ โดยจำลองเส้นทางการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงขนานกับแกนอนที่ตำแหน่ง $y = 300$ ตามภาพที่ 62 ซึ่งปลายสไตลัส สามารถเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปภายในกำแพงเสมือนได้ประมาณ 0.94 มิลลิเมตร ก่อนที่จะเกิดแรงบิดที่สูงที่สุดที่มอเตอร์สามารถสร้างได้และกำหนดให้หยุดจำลอง ได้ผลของแรงบิดดังภาพที่ 63



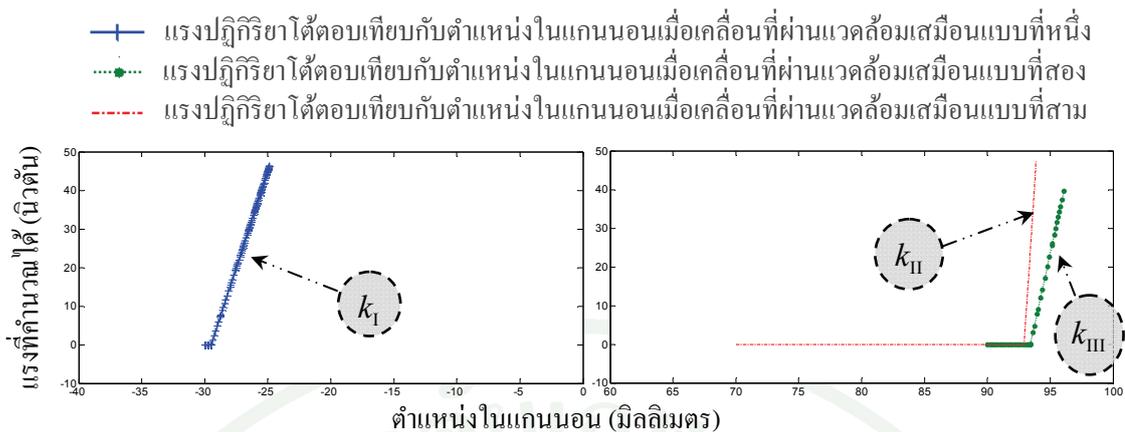
ภาพที่ 62 แผนภาพแสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของปลาย สไตส์ลัส เมื่อเคลื่อนที่ผ่านกำแพงเสมือน

- แรงบิดที่คำนวณที่มอเตอร์ที่ตัวที่หนึ่ง ได้เทียบกับระยะที่กำแพงเสมือนถูกกด
- แรงบิดที่คำนวณที่มอเตอร์ที่ตัวที่สอง ได้เทียบกับระยะที่กำแพงเสมือนถูกกด



ภาพที่ 63 กราฟแสดงแรงบิดเมื่อเคลื่อนที่ปลาย สไตส์ลัส เมื่อเคลื่อนที่ผ่านแวกด์ล้อมเสมือน

นำแรงปฏิกิริยาที่ได้จากการจำลองผ่านสภาพแวกด์ล้อมเสมือนทั้งสามมาพลอตเทียบกับระยะกระจัดเพื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของสภาพแวกด์ล้อมเสมือนทั้งสามกล่าวคือความชันที่ได้จะเป็นค่าของความแข็ง ได้ผลตามรูปที่ 64



ภาพที่ 64 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะกระจัดกับแรงตอบสนองต่อแวลลุ่มเสมือน

จากกราฟตามภาพที่ 64 ที่ได้จะพบว่าค่าความชันของกราฟของความสัมพันธ์ในแต่ละสภาพแวลลุ่มเสมือนจริงสอดคล้องกับค่าความแข็ง ที่ทำการจำลองไว้ในแต่ละสภาพแวลลุ่มเสมือนโดยสรุปในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบสภาพแวลลุ่มเสมือนทั้งสาม

บริเวณ	ค่าความแข็ง	ระยะกระจัด (มิลลิเมตร)
I	$k_1 = 10000 \text{ N/m}$	5.14
II	$k_2 = 20000 \text{ N/m}$	2.66
III	$k_3 = 50000 \text{ N/m}$	0.94

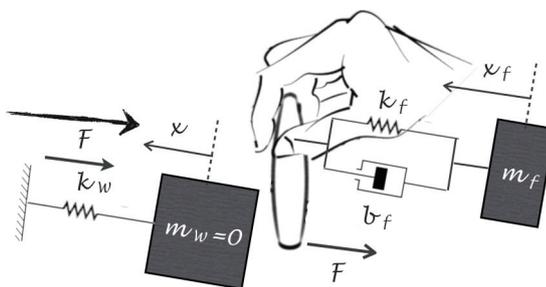
จากการสร้างแวลลุ่มเสมือนและจำลองการเคลื่อนที่ของปลายสไตลัส ผ่านแวลลุ่มเสมือนโดยกำหนดให้ปลายสไตลัสเคลื่อนที่สัมผัสผ่านแวลลุ่มเสมือนทั้งสามที่ค่าความแข็งที่แตกต่างกัน แรงปฏิกิริยาโต้ตอบที่ปลายสไตลัสที่ได้และเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของสภาพแวลลุ่มเสมือน (ระยะกระจัด) เป็นไปอย่างสอดคล้องกัน ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าแวลลุ่มเสมือนที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้ในอุปกรณ์ต้นแบบที่จะสร้างขึ้นได้โดยไม่เสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ต้นแบบ

3.6 การสร้างแบบจำลองพลวัตปฏิกิริยาโต้ตอบแฮปติกเมื่อผู้ใช้งานสัมผัสกำแพงเสมือน (Dynamic Modeling of Virtual Wall Contacting)

หนึ่งในจุดประสงค์ของงานวิจัยชิ้นนี้คือการออกแบบอุปกรณ์แฮปติกให้สามารถสร้างการโต้ตอบทางการสัมผัสกับแวดล้อมเสมือนที่จำลองขึ้นได้เหมือนจริง กล่าวคืออุปกรณ์ที่สร้างขึ้นควรตอบสนองต่อความรู้สึกของการสัมผัสของผู้ใช้งานได้ไม่ผิดเพี้ยนไปจากผู้ใช้งานสัมผัสกับแวดล้อมเสมือนนั้นจริงแต่เนื่องจากทั้งอุปกรณ์และผู้ใช้งานเองต่างก็มีความเป็นพลวัต ดังนั้นเมื่อผู้ใช้งานสัมผัสกับแวดล้อมเสมือนผ่านอุปกรณ์แฮปติกจึงได้รับความรู้สึกที่ผิดเพี้ยนไปจากที่จำลองไว้ การจำลองปฏิกิริยาโต้ตอบแฮปติกของผู้ใช้งานกับกำแพงเสมือนเพื่อวิเคราะห์และควบคุมจึงมีความจำเป็นต่อการออกแบบ

ในงานวิจัยเรื่องการจำลองพลวัตของนิ้วมือของผู้ใช้งาน (ระยะและความเร็วที่เกิดการเปลี่ยนแปลง) โดยใช้แบบจำลองมวล สปริงและแดมเปอร์ ตามภาพที่ 65 โดยสร้างแบบจำลองพลวัตด้วยซอฟต์แวร์ Simulink®/SimMechanic™

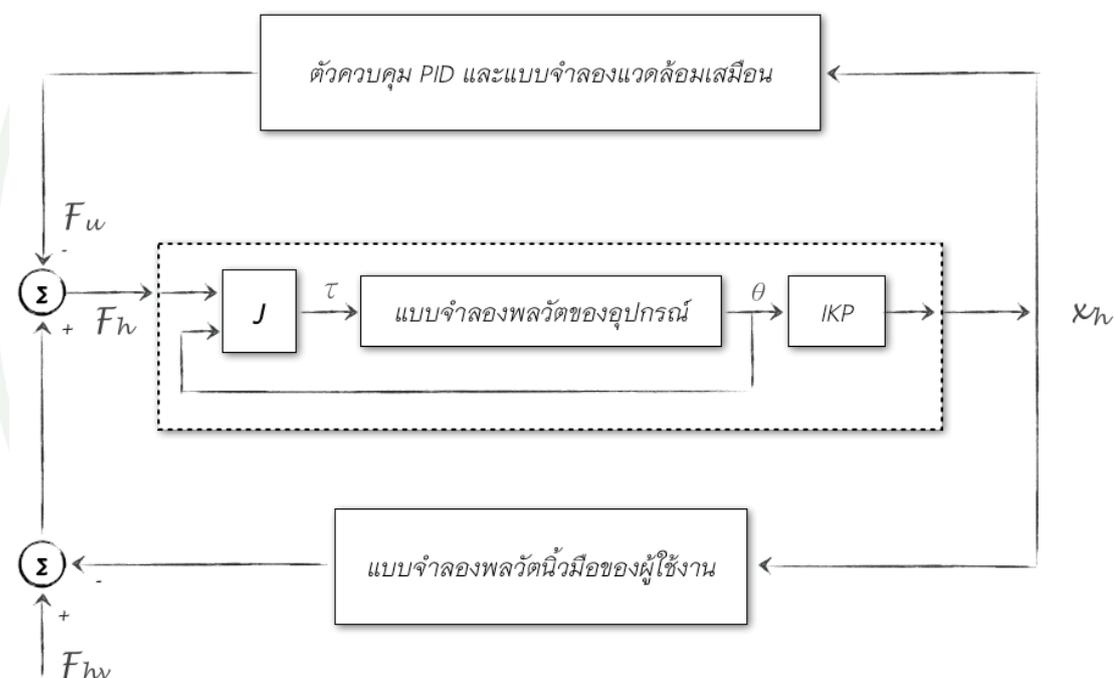
ในงานวิจัยเลือกใช้ปริมาณทางกายภาพที่เกี่ยวข้องกับมือและนิ้วมือของผู้ใช้งานให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด ซึ่งเลือกใช้ข้อมูลที่เคยตีพิมพ์จากงานวิจัยก่อนหน้า ของ Lawrence (Lawrence, 1993) โดยใช้ค่าความเฉื่อยของมือผู้ใช้งาน (m_f) มีค่าเท่ากับ 17.5 กิโลกรัม ค่า b_f มีค่าเท่ากับ 175 นิวตัน วินาทีต่อเมตร และค่าความแข็งของนิ้วมือผู้ใช้งาน (k_f) มีค่าเท่ากับ 175 นิวตันต่อเมตร



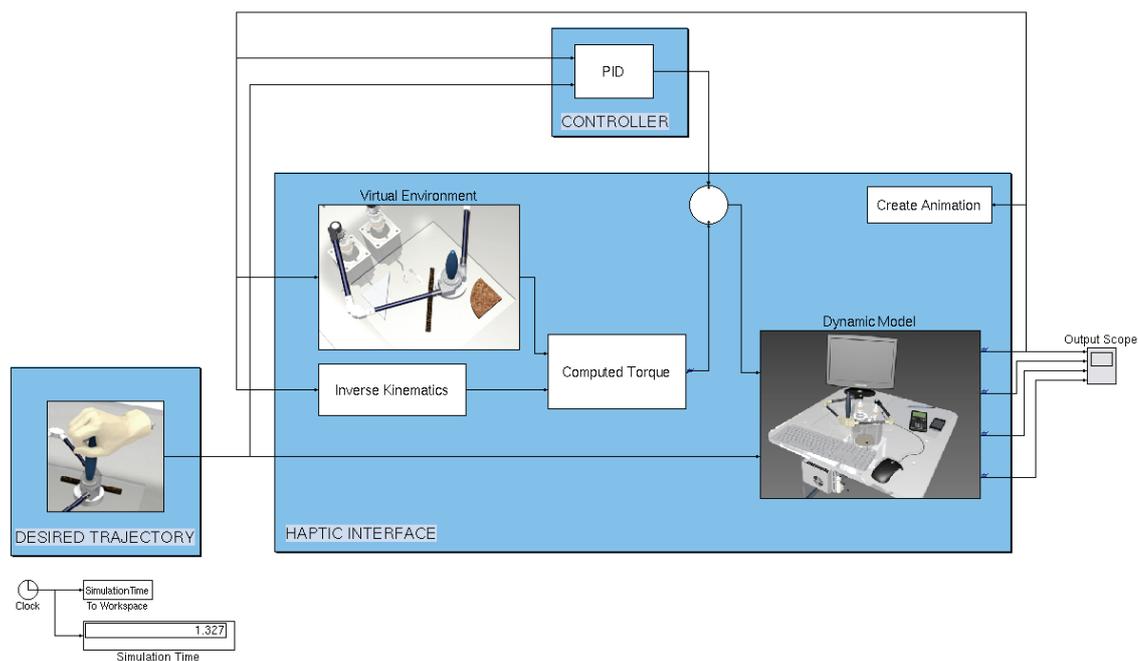
ภาพที่ 65 แผนภาพแบบจำลองพลวัตที่ใช้ในการจำลองการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและความเร็วของผู้ใช้งาน

ในแบบจำลองพลวัตปฏิกิริยาโต้ตอบของอุปกรณ์แฮปติกเลือกใช้ตัวควบคุม PID ในแบบจำลองเพื่อควบคุมตำแหน่งของปลายสไตล์กัส โดยในงานวิจัยได้ใช้วิธีการลองผิดลองถูกหาค่าเกณฑ์ PID สำหรับตัวควบคุมและสังเกตผลตอบสนองสัญญาณ

และส่วนสุดท้ายสำหรับการออกแบบอุปกรณ์แฮปติกในงานวิจัย ทำการจำลองแบบจำลองพลวัตปฏิกิริยาแฮปติก ระหว่างนี้ของผู้ใช้งานกับอุปกรณ์แฮปติกโดยใช้ซอฟต์แวร์ MATLAB/Simulink® ขณะทำการสัมผัสกับสภาพแวดล้อมเสมือนทั้งแบบ Open loop และ Closed loop ซึ่งแสดงไว้ในแผนภาพที่ 66 ได้แบบจำลองตามภาพที่ 67



ภาพที่ 66 แผนภาพแสดงพลวัตปฏิกิริยาโต้ตอบระหว่างผู้ใช้งานกับอุปกรณ์แฮปติก

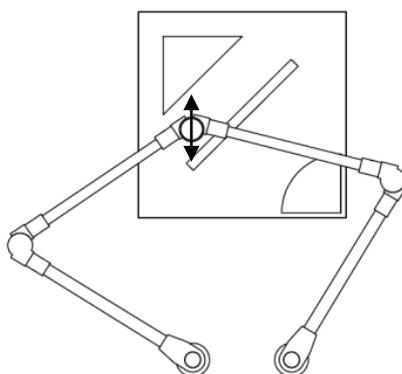


ภาพที่ 67 ภาพแสดงการจำลองพลวัตปฏิบัติการแฮปติก ระหว่างนิ้วของผู้ใช้งานกับอุปกรณ์แฮปติก

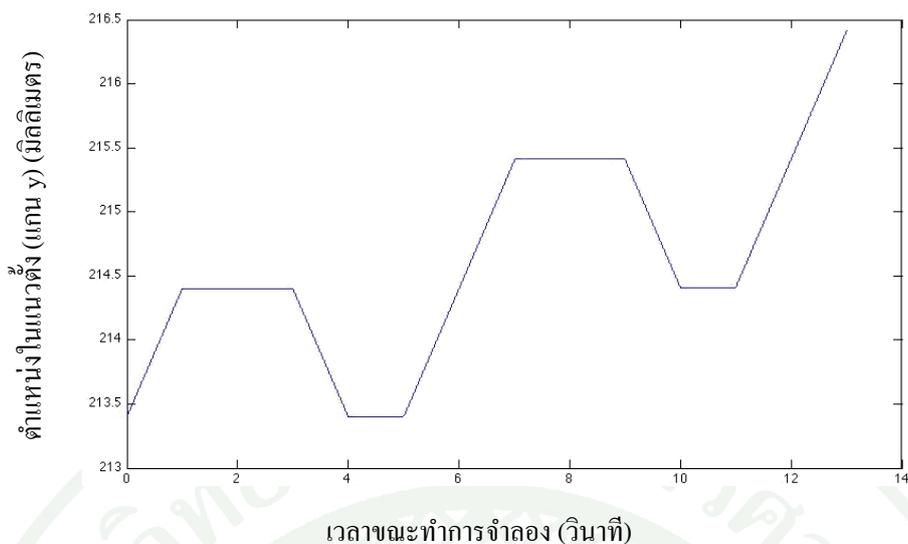
ผลและวิจารณ์

ผล

ในการจำลองเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิ้วมือของผู้ใช้งานในงานวิจัย จำลองให้ผู้ใช้งานเคลื่อนที่ปลายสไตลัสขึ้นลงตามแกนตั้งหรือแกน y โดยจำลองให้เคลื่อนที่สัมผัสกับกำแพงเสมือน โดยเริ่มจากตำแหน่งที่ไม่ได้สัมผัสกับสภาพแวดล้อมเสมือนใดๆ จากนั้นผู้ใช้งานเพิ่มตำแหน่งทางแกนตั้ง (ดันขึ้น) แล้วหยุดนิ่ง จากนั้นลดตำแหน่งทางแกนตั้ง (ดันลง) แล้วหยุดนิ่ง โดยรอบการเคลื่อนที่ของนิ้วมือผู้ใช้งานในรอบนี้ ปลายสไตลัสยังไม่สัมผัสกับกำแพงเสมือน จากนั้น ผู้ใช้งานเริ่มการเคลื่อนที่นิ้วมือของผู้ใช้งานในรอบที่สอง โดยผู้ใช้งานเพิ่มตำแหน่งทางแกนตั้ง (ดันขึ้น) แล้วหยุดนิ่ง จากนั้นลดตำแหน่งทางแกนตั้ง (ดันลง) แล้วหยุดนิ่ง โดยรอบการเคลื่อนที่ของนิ้วมือผู้ใช้งานในรอบนี้ ปลายสไตลัสจะสัมผัสกับกำแพงเสมือนเพียงเล็กน้อยแล้วเคลื่อนที่ออกจากกำแพงเสมือน จากนั้น ผู้ใช้งานเริ่มการเคลื่อนที่นิ้วมือของผู้ใช้งานในรอบที่สาม ซึ่งเป็นรอบการเคลื่อนที่รอบสุดท้าย โดยผู้ใช้งานเพิ่มตำแหน่งทางแกนตั้ง (ดันขึ้น) จนกระทั่งหยุดการจำลอง โดยรอบการเคลื่อนที่ของนิ้วมือผู้ใช้งานในรอบนี้ ปลายสไตลัสจะสัมผัสกับกำแพงเสมือนจนกระทั่งแรงบิดที่คำนวณได้ที่มอเตอร์เกินกว่า 7.14 นิวตันเมตร โดยตำแหน่งในแกนตั้งของการเคลื่อนที่ของนิ้วมือผู้ใช้งานแสดงไว้ตามภาพที่ 69



ภาพที่ 68 แผนภาพแสดงวิธีการเคลื่อนที่ของปลาย สไตลัส



ภาพที่ 69 แสดงตำแหน่งของนิ้วมือผู้ใช้งานทางแกนตั้งโดยพลอตเทียบกับเวลา

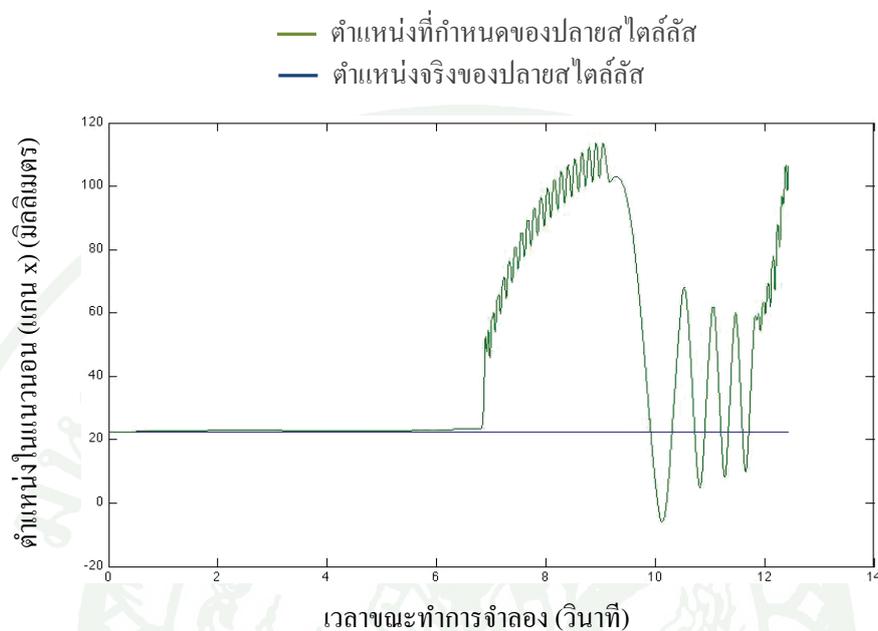
1. ผลการจำลองของแบบจำลองอุปกรณ์ต้นแบบ แบบไม่มีตัวควบคุม (Virtual Prototype Simulation without Controller)

จากผลการจำลองแบบจำลองพลวัตปฏิบัติการแฮปติก ระหว่างนิ้วของผู้ใช้งานกับอุปกรณ์แฮปติก โดยไม่มีตัวควบคุม PID จะพบว่าขณะที่ปลายสไตลัสยังไม่สัมผัสกำแพงเสมือน ตำแหน่งของปลายสไตลัสยังคงเคลื่อนที่ตามทีอินพุตทั้งในแนวตั้ง (แกน y) และแนวนอน (แกน x) โดยที่มีค่าคลาดเคลื่อนในแนวตั้งเกิดขึ้นเพียง 1 มิลลิเมตรเท่านั้นและปลายสไตลัสสั้นน้อยมากจนไม่สามารถสังเกตเห็นได้จากกราฟที่พลอตในอัตราส่วนตามภาพที่ 70 และภาพที่ 71

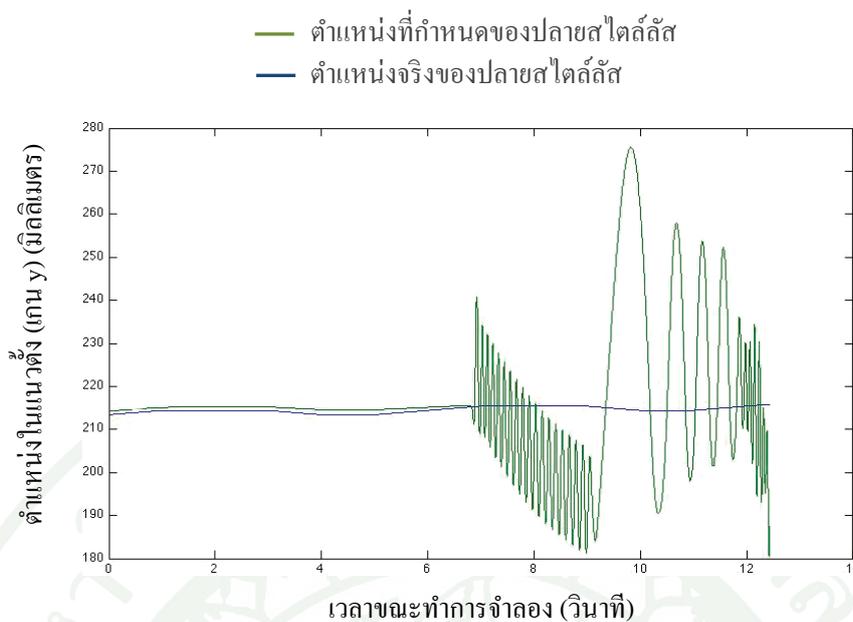
ในขณะที่ปลายสไตลัสเคลื่อนที่สัมผัสกับกำแพงเสมือนปลายสไตลัสเคลื่อนที่ออกจากนิ้วมือของผู้ใช้งานด้วยขนาดค่าคลาดเคลื่อนที่มากที่สุดประมาณ 90 มิลลิเมตรทั้งแนวตั้งและแนวนอน ก่อนที่แรงบิดที่คำนวณได้มากเกิน 7.14 นิวตันเมตรและหยุดการจำลอง นอกจากนี้หลังจากที่สไตลัสสัมผัสกำแพงเสมือนสไตลัสยังเกิดการสั้นอยู่ตลอดเวลา

ในส่วนของแรงปฏิบัติการได้ตอบระหว่างสไตลัสกับนิ้วมือของผู้ใช้งานที่ได้จากการคำนวณเมื่อเทียบกับที่เกิดขึ้นในช่วงที่ปลายสไตลัสยังไม่สัมผัสกับกำแพงเสมือนนั้นเกิดขึ้นเล็กน้อยจนไม่สามารถสังเกตเห็นได้จากกราฟที่พลอตตามสเกลในภาพที่ 72 แต่หลังจากปลายสไตลัส

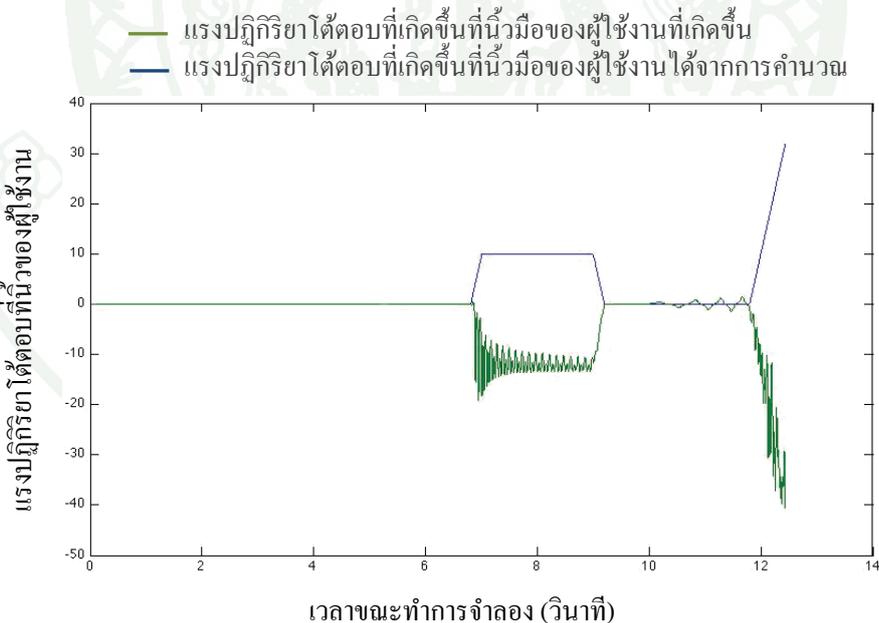
สัมพันธ์กับกำแพงเสมือนแรงปฏิกิริยาตอบโต้ที่เกิดขึ้นก็เกิดขึ้นสอดคล้องกับที่คำนวณได้ แต่แรงตอบสนองเกิดการสั่นตลอดจนกระทั่งหยุดการจำลอง



ภาพที่ 70 กราฟแสดงตำแหน่งของพลาสติกในแกนนอน โดยพลอต ตำแหน่งที่กำหนดเทียบกับตำแหน่งจริง



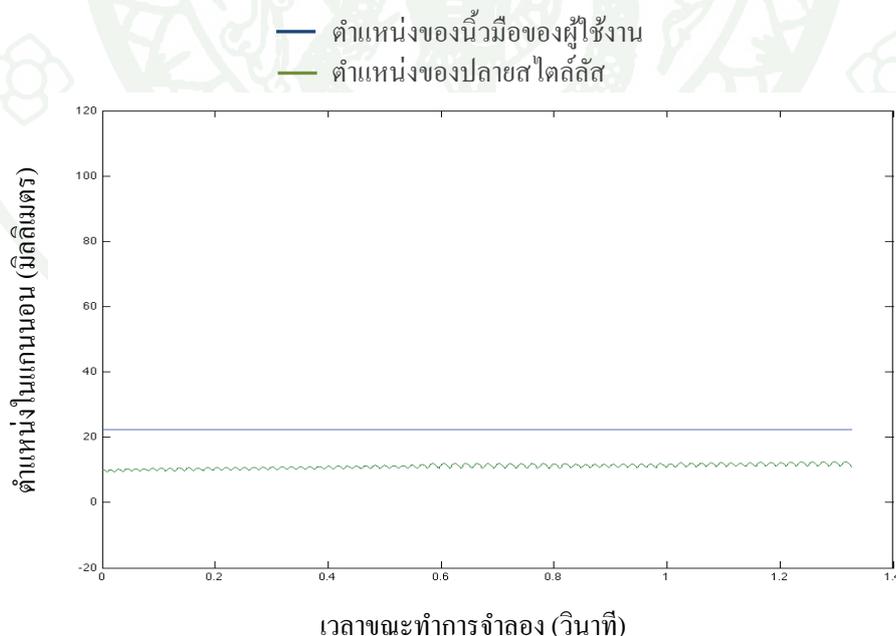
ภาพที่ 71 กราฟแสดงตำแหน่งของปลายสไตลัสในแกนตั้งโดยพลอต ตำแหน่งที่กำหนดเทียบกับตำแหน่งจริง



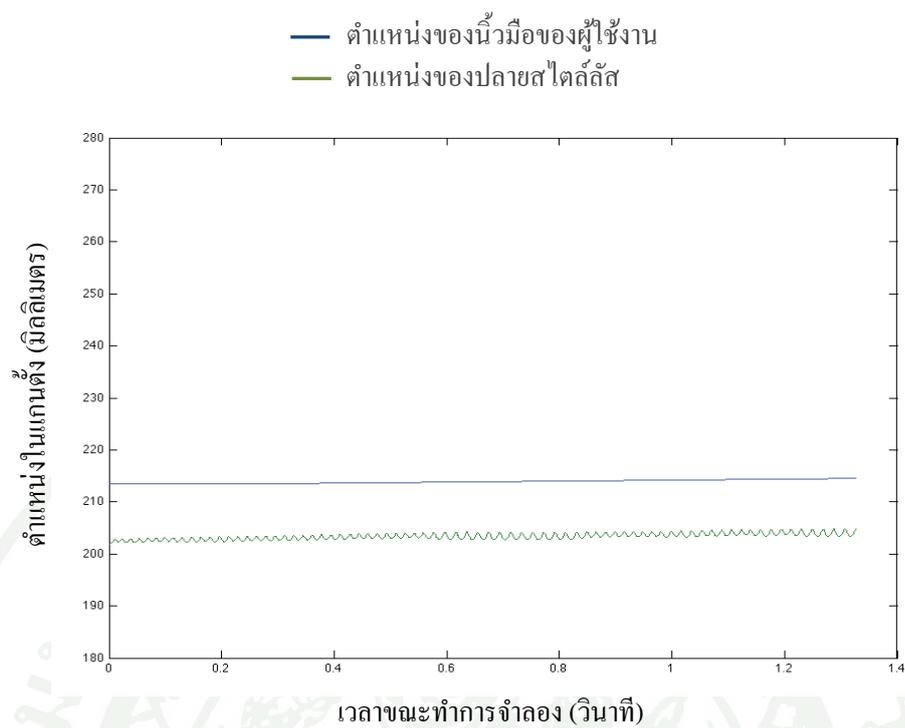
ภาพที่ 72 กราฟแสดงแรงที่ได้จากการคำนวณ (Computed Force) เทียบกับแรงปฏิกิริยาโต้ตอบกับนิ้วมือของผู้ใช้งาน (Reaction Force)

2. ผลการจำลองของแบบจำลองอุปกรณ์ต้นแบบ แบบมีตัวควบคุม PID (Virtual Prototype Simulation with PID Controller)

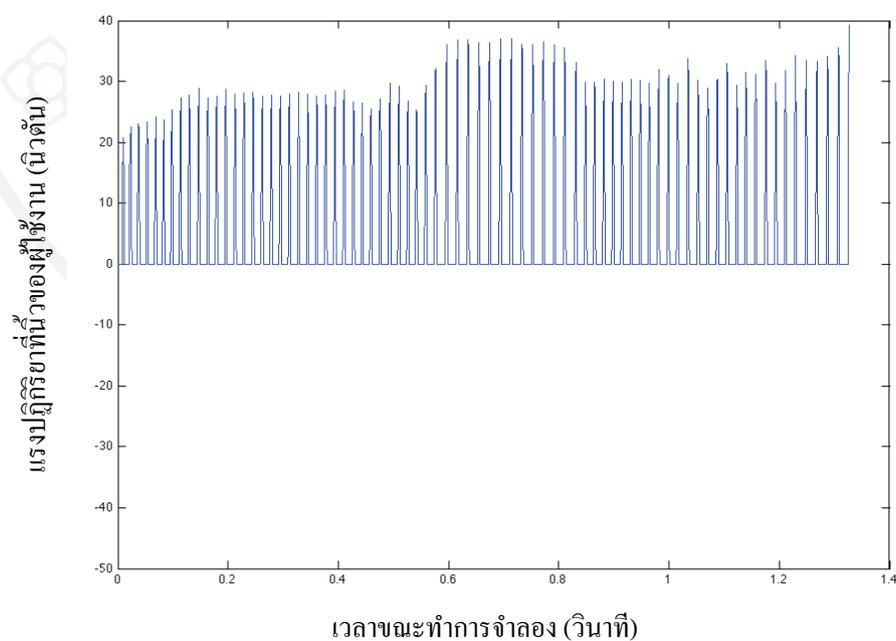
จากผลการจำลองแบบจำลองพลวัตปฏิบัติการแฮตติระหว่างนิ้วของผู้ใช้งานกับอุปกรณ์แฮตติค โดยไม่มีตัวควบคุม PID พบว่าก่อนที่ปลายสไตลัสจะสัมผัสกับกำแพงเสมือนแบบจำลองสามารถจำลองพลวัตของระบบได้ดี แต่เมื่อปลายสไตลัสสัมผัสกับกำแพงเสมือนผลตอบสนองของตำแหน่งปลายสไตลัสมีค่าคลาดเคลื่อนประมาณ 90 มิลลิเมตร เมื่อเทียบกับตำแหน่งของนิ้วมือของผู้ใช้งานซึ่งระยะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่สามารถเกิดขึ้นได้จริงไม่ควรเกิน 5 มิลลิเมตร ดังนั้นในการจำลองแบบจำลองพลวัตปฏิบัติการแฮตติระหว่างนิ้วของผู้ใช้งานกับอุปกรณ์แฮตติคในงานวิจัยจึงจำลองโดยใช้ตัวควบคุม PID โดยได้ผลตอบสนองสัญญาณตำแหน่งที่ดีขึ้นทั้งแนวตั้งและแนวนอน กล่าวคือตำแหน่งของปลายสไตลัสอยู่ห่างจากนิ้วมือของผู้ใช้งานประมาณ 12-15 มิลลิเมตร โดยระยะห่างเริ่มต้นอยู่ที่ 12.3 มิลลิเมตร (วัดจากจุดศูนย์กลางมวลในแกน z) โดยขณะที่ปลายสไตลัสสัมผัสกับกำแพงเสมือนก็เกิดการสั่นอยู่ระหว่าง 1-2 มิลลิเมตร และสุดท้ายค่าคลาดเคลื่อนที่ของตำแหน่งของปลายสไตลัสที่เกิดอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ตามภาพที่ 73 และภาพที่ 74 การตอบสนองต่อสัญญาณแรงปฏิบัติการเกิดการผลัดออกจากกำแพงเสมือนทุกครั้งสัมผัสกับกำแพงเสมือนตามภาพที่ 75



ภาพที่ 73 กราฟแสดงตำแหน่งในแกนนอนของนิ้วมือผู้ใช้งาน โดยพลอดเทียบกับตำแหน่งของปลายสไตลัส



ภาพที่ 74 กราฟแสดงตำแหน่งในแกนนอนของนิ้วมือผู้ใช้งาน โดยพลอตเทียบกับตำแหน่งของพลาสติกโฟม



ภาพที่ 75 กราฟแสดงแรงปฏิกิริยาโต้ตอบกับนิ้วมือของผู้ใช้งาน

วิจารณ์

จากผลการจำลองแบบจำลองพลวัตของอุปกรณ์แสปติกที่ได้สามารถแสดงผลพลจลนศาสตร์ของอุปกรณ์ได้เป็นอย่างดีโดยสามารถใช้ลักษณะทางกายภาพที่ได้จากการออกแบบด้วย CAD ได้ ซึ่งผลที่ได้ก็สอดคล้องกันกับงานวิจัยของ Yang (2010) ที่วิเคราะห์แบบจำลองพลวัตของกลไก Spatial หองศาอิสระ แบบขนานโดยใช้วิธีการของเคน (Kane Approach) โดยใช้ SimMechanic™ จำลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างแบบจำลองลงใน Simulink® ภายใต้งี๋นไขเดียวกัน แล้วจำลองการเคลื่อนที่ของแบบจำลองทั้งสองโดยในงานวิจัยเลือกใช้ตัวควบคุม PID ผลที่ได้มีความถูกต้อง คณะวิจัยจึงสรุปว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นได้ผลดี

สำหรับผลการจำลองแบบจำลองพลวัตปฏิบัติการแสปติกระหว่างนี้ของผู้ใช้งานกับอุปกรณ์แสปติกนั้น ดังที่ได้กล่าวไปแล้วเนื่องจากแบบจำลองพลวัตของกลไกห้าลิ่งค์แบบขนานที่มีสององศาอิสระ มีความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนและมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง (Highly Nonlinear) ตามงานวิจัยของ Yu (2006) ซึ่งทำการวิเคราะห์แบบจำลองคณิตศาสตร์พลศาสตร์ของกลไกห้าลิ่งค์แบบขนานที่ใช้วิธีลากรางจ์ (Lagrangian Formulation) แต่ใช้ตัวควบคุมเชิงเส้นดังนั้นผู้วิจัยเชื่อว่าหากเลือกตัวควบคุมที่เหมาะสมอาจได้ผลการจำลองที่ดียิ่งขึ้น

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ในงานวิจัยทำการออกแบบอุปกรณ์แฮปติกชนิดที่อุปกรณ์ติดอยู่กับกราวด์ (Grounded Device) เป็นแบบสององศาอิสระกลไกห้าลิ้งค์แบบขนาน โดยสามารถเคลื่อนที่ได้ในระนาบมีพื้นที่ทำงานเท่ากับ 200×200 ตารางมิลลิเมตร โดยในงานวิจัยทำการวิเคราะห์ฟอเวิร์ด ไคเนเมติกส์, อินเวอร์ส ไคเนเมติกส์ของกลไกห้าลิ้งค์แบบขนาน และในงานวิจัยได้ใช้ซอฟต์แวร์ทางวิศวกรรมช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์ผลที่ได้ เช่น ใช้ ANSYS ทำการวิเคราะห์ความเค้นด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) สำหรับชิ้นส่วนที่สำคัญที่ทำการออกแบบเพื่อให้สามารถใช้งานได้ตามข้อกำหนด ใช้ Simulink®/SimMechanics™ ในการสร้างแบบจำลองพลวัตของอุปกรณ์ที่ทำการออกแบบเพื่อช่วยในการออกแบบให้เป็นไปตามข้อกำหนดและวิเคราะห์เชิงคุณารที่ดี นอกจากนี้ในงานวิจัยยังใช้ MATLAB/ Simulink® จำลอง ออกแบบตัวควบคุม และวิเคราะห์ระบบพลวัตปฏิบัติการแฮปติกระหว่างนิ้วของผู้ใช้งานกับอุปกรณ์แฮปติกที่ทำการออกแบบ พร้อมทั้งสร้างแบบจำลองพลวัตของนิ้วมือผู้ใช้ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองพบว่าได้ผลสอดคล้องกับเส้นทางการเคลื่อนที่ของนิ้วมือของผู้ใช้งานแต่ปลายสไตลัสเกิดการสั่นเล็กน้อย และแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับนิ้วมือของผู้ใช้งานก็สอดคล้องกัน ในงานวิจัยทำการจำลองแบบจำลองพลวัตของอุปกรณ์แฮปติกที่ออกแบบเพื่อนำไปใช้ช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์ก่อนนำไปสร้างอุปกรณ์ต้นแบบจริง (Physical Prototype) สุดท้ายสร้างชิ้นส่วนอุปกรณ์แฮปติกต้นแบบและนำไปปรับแก้แบบจำลองอุปกรณ์แฮปติกต้นแบบให้มีสมบัติทางกลเหมือนจริงให้มากที่สุดเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมที่ซับซ้อนและเหมาะสมยิ่งขึ้นต่อไป นอกจากนี้ในงานวิจัยยังนำเอาแบบจำลองอุปกรณ์แฮปติกต้นแบบมาช่วยใช้ในการทดสอบสภาพแวดล้อมเสมือน (Virtual Environment) โดยที่นำแรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์ที่ในงานวิจัยเลือกใช้ในการออกแบบมารวมไว้ใน การจำลองเพื่อหยุดการจำลอง

ข้อเสนอแนะ

สำหรับการออกแบบและวิจัยอุปกรณ์แฮปติกที่ทำการออกแบบนี้ถัดไปจากงานวิจัยชิ้นนี้ ควรปรับแก้แบบจำลองพลวัตของอุปกรณ์แฮปติกต้นแบบ โดยการเพิ่มแบบจำลองความเสียดทาน ของส่วนที่มีการเคลื่อนที่จากอุปกรณ์ต้นแบบจริง เพื่อให้แบบจำลองพลวัตของอุปกรณ์แฮปติก ต้นแบบมีความเสมือนจริงมากที่สุดก่อนที่จะนำไปใช้ช่วยในการออกแบบและพัฒนาระบบควบคุม และสร้างปฏิภิกิริยาโต้ตอบทางแฮปติกต่อไป นอกจากนี้เนื่องจากอุปกรณ์ที่ทำการออกแบบมีกลไก ที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงจึงควรเลือกใช้ระบบควบคุมที่ไม่เป็นเชิงเส้นในการออกแบบระบบ ควบคุมเพื่อให้ได้ผลการตอบสนองแฮปติกของแบบจำลองที่ดียิ่งขึ้น

ประกอบอุปกรณ์แฮปติกตามที่ออกแบบไว้ตามแบบจำลองและควรติดตั้งเซ็นเซอร์แรงเพื่อนำไปตรวจสอบความเป็นจริงของแบบจำลองและปรับแก้ให้แบบจำลองมีพฤติกรรมทางกลตรงกับ อุปกรณ์แฮปติกในงานวิจัยมากที่สุด สุดท้ายนำแบบจำลองที่ได้ไปใช้ช่วยการออกแบบระบบ ควบคุมที่ไม่เป็นเชิงเส้นและระบบควบคุมที่สามารถปรับได้เพื่อให้อุปกรณ์สามารถโต้ตอบปฏิภิกิริยา ได้อย่างสมจริง

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์ และ สมโพธิ โทบรณ. 2553. การจำลองและออกแบบอุปกรณ์ แสปติก สององศาอิสระชนิดห้าลิ้งค์แบบขนาน, น. 200 – 207. ใน รายงานการประชุมทางวิชาการ วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ.

ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์ และ สมโพธิ โทบรณ. 2553. การจำลองและออกแบบอุปกรณ์ แสปติก สององศาอิสระชนิดห้าลิ้งค์แบบขนาน, ใน รายงานการประชุมทางวิชาการเครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, อุบลราชธานี.

ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์ และ สมโพธิ โทบรณ. 2554. การจำลองและออกแบบอุปกรณ์ แสปติก สององศาอิสระชนิดห้าลิ้งค์แบบขนานด้วย Simulink®/SimMechanics™ วารสารวิชาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2 (1): 63-72

Biggs, J. and M.A. Srinivasan. 2002. Haptic Interfaces. **KM Stanney**. Lawrence Erlbaum Associates, eds. Virtual Environment Handbook: 93-116

Deniz, E. 2006. **Design of Haptic Device for Micro Parts Handling**. M.S. Thesis, University of Twente.

Hayward, V. and K.E. MacLean. 2007. Do it yourself haptics. **IEEE Robotics and Automation Magazine**. (1): 88–104

Hollis, R. 2004. Haptics. **Berkshire Encyclopedia of Human-Computer Interaction**. vol.1 (2004): 311-316.

Intuitive Surgical, Inc. 2010. **The daVinci Surgical System**. แหล่งที่มา:

http://www.intuitivesurgical.com/products/davinci_surgical_system/, 30 เมษายน 2555

Klatzky, R. L. and S. J. Lederman. 2003. Haptic Interfaces. **Handbook of Psychology**. John Wiley and Sons.: 147–176.

Lawrence, D. A. 1993. Stability and Transparency in Bilateral Telemanipulation. **IEEE Robotics and Automation Magazine**. (5): 624–637.

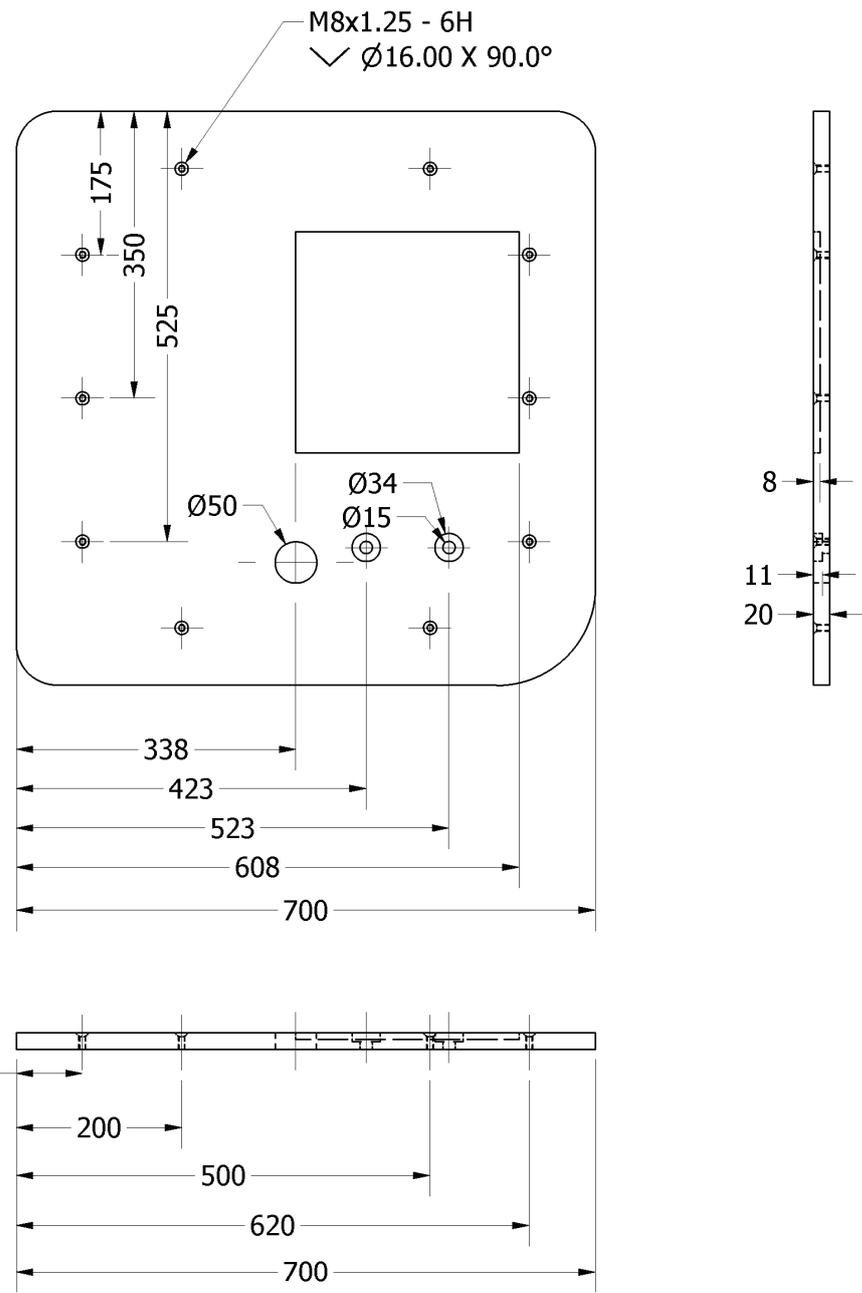
Srinivasan, M. 2003. **What is Haptics?**. แหล่งที่มา: <http://touchlab.mit.edu/>, 30 เมษายน 2555

Stan, S., M. Manic, M. Maties and R. Balan. 2008. Kinematics Analysis, Design, and Control of an Isoglide3 Parallel Robot (IG3PR), *In The 34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Orlando, USA



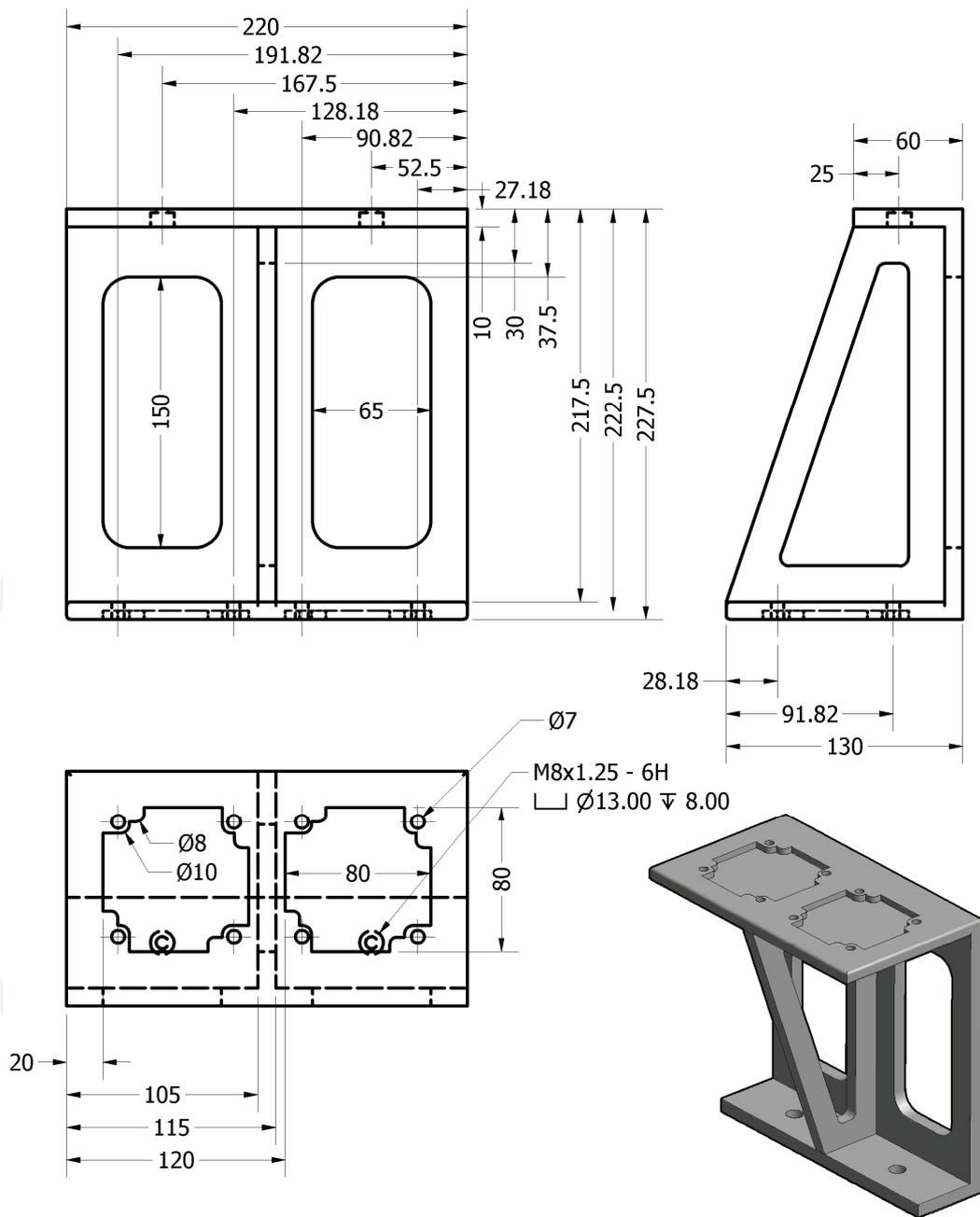


ภาคผนวก ก
แบบของชิ้นส่วนอุปกรณ์แฮปติกที่ทำการออกแบบ



PART NAME			
BOARD			
DESIGNED		APPROVED	
สมโพธิ โดบรเรลง		ผศ.ดร.ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์	
SIZE	DATE	DWG NO.	QTY.
A4	14/9/2553	F01	1
SCALE	1:8	MAT.	ACRYLIC
		SHEET 1 OF 1	

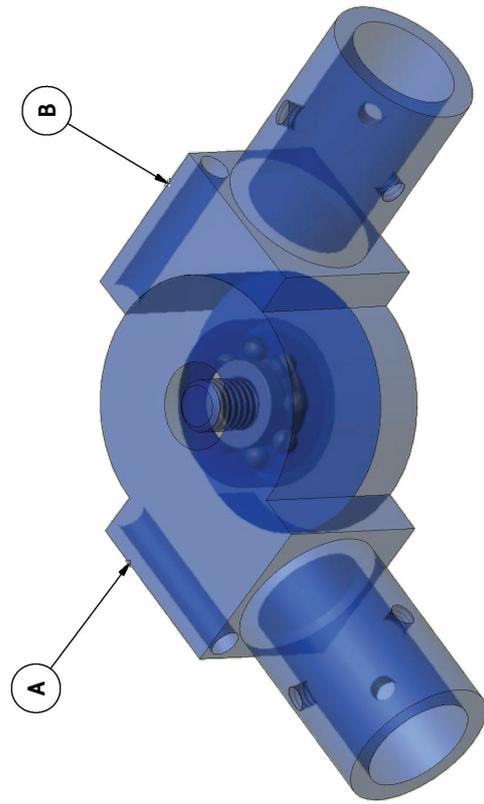
ภาพผนวกที่ ก1 แบบของอุปกรณ์แฮปติกหมายเลข 1



PART NAME			
MOTOR SUPPORT			
DESIGNED		APPROVED	
สมโพธิ โตบรรเลง		ผศ.ดร.ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์	
SIZE	DATE	DWG NO.	QTY.
A4	9/14/2010	F02	1
SCALE	MAT.	SHEET 1 OF 1	
1:3	ALUMINUM		

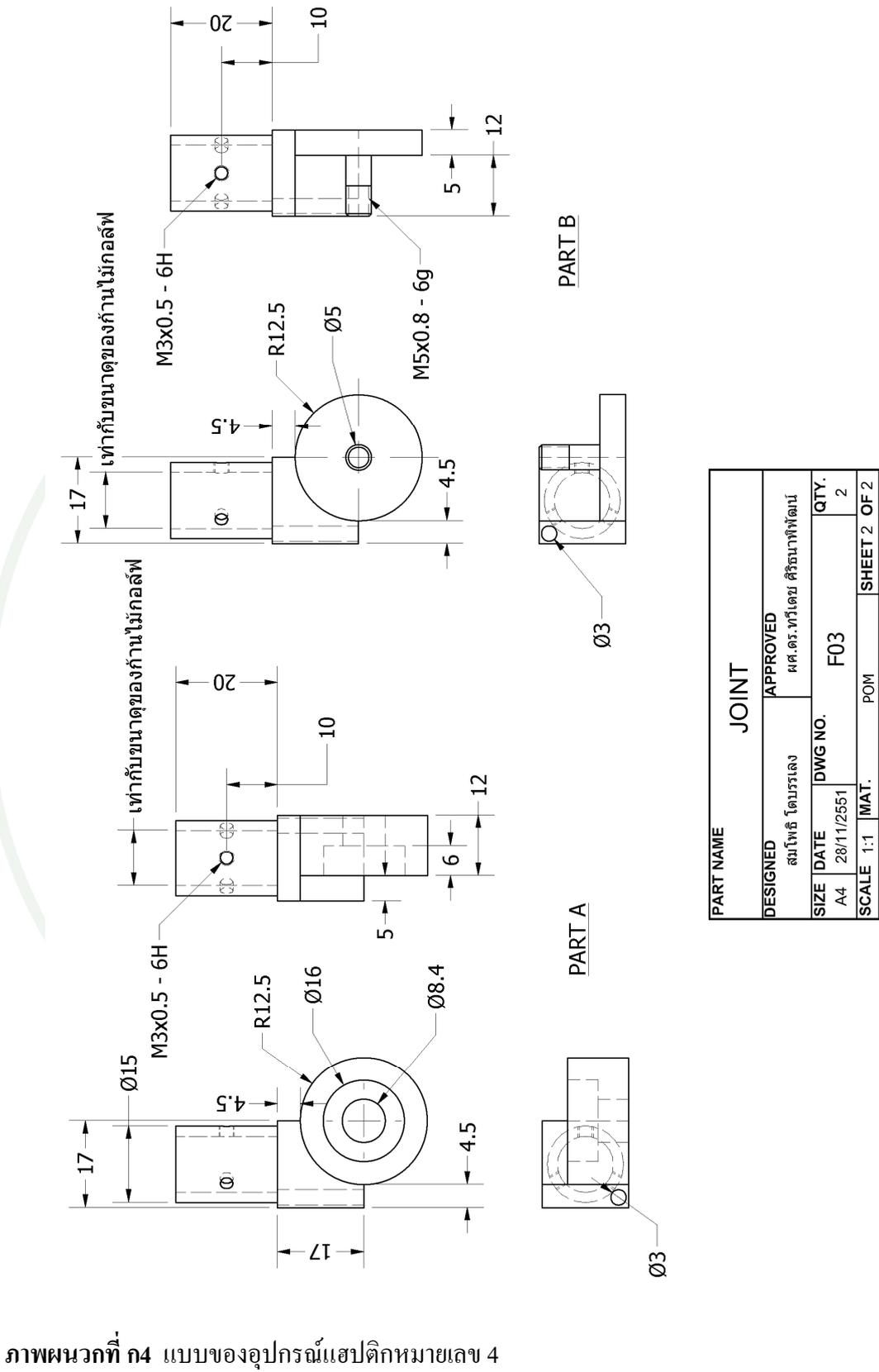
ภาพผนวกที่ ก2 แบบของอุปกรณ์แฮปติกหมายเลข 2

ภาพผนวกที่ ก3 แบบของอุปกรณ์แยกคิกหมายเลข 3



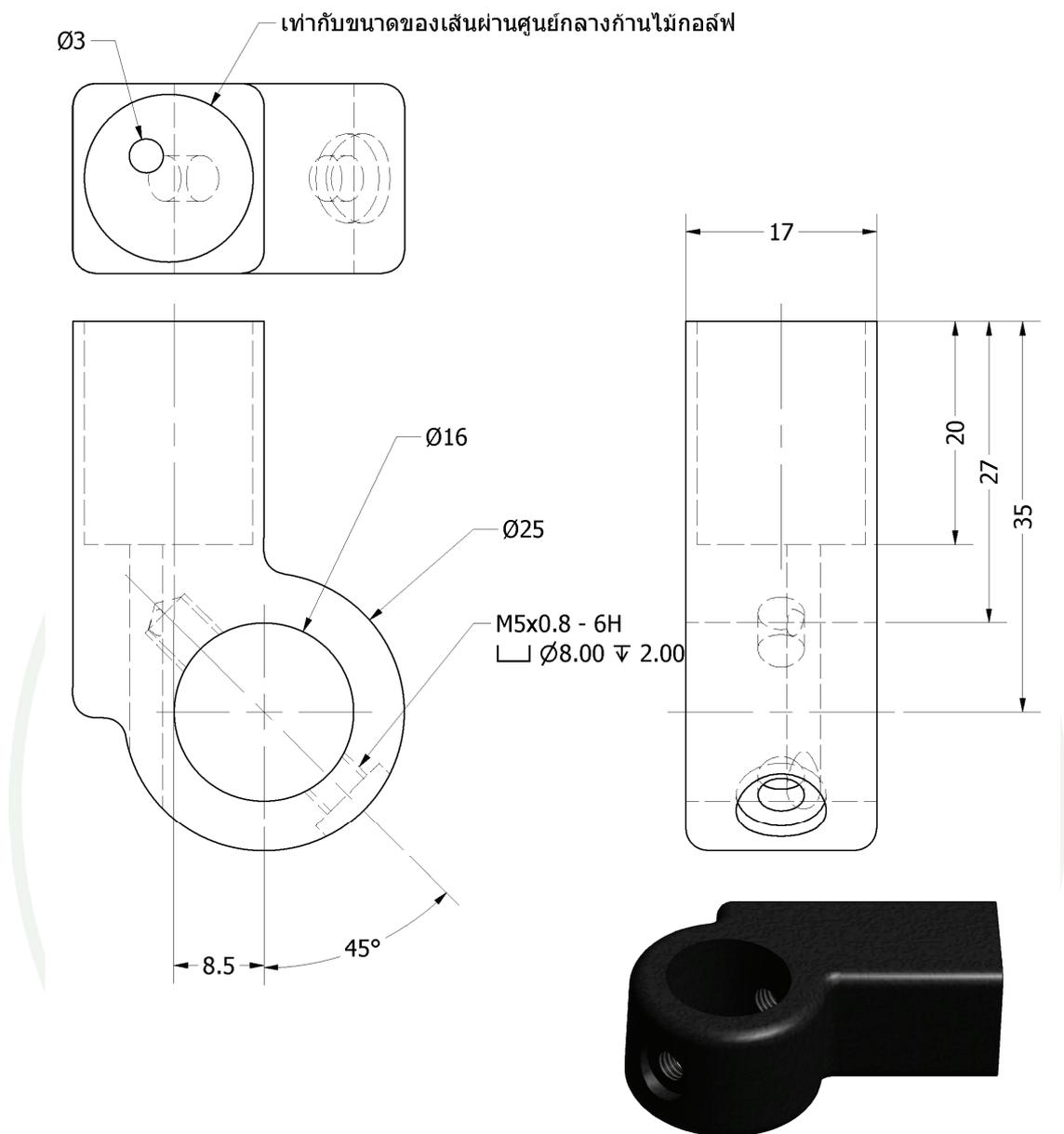
ASSEMBLY DRAWING

PART NAME				JOINT	
DESIGNED		APPROVED			
สมโพธิ โตบรรเลง		ผศ.ดร.ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์			
SIZE	DATE	DWG NO.	QTY.		
A4	28/11/2551	F03	2		
SCALE	1:1	MAT.	POM	SHEET 1 OF 2	



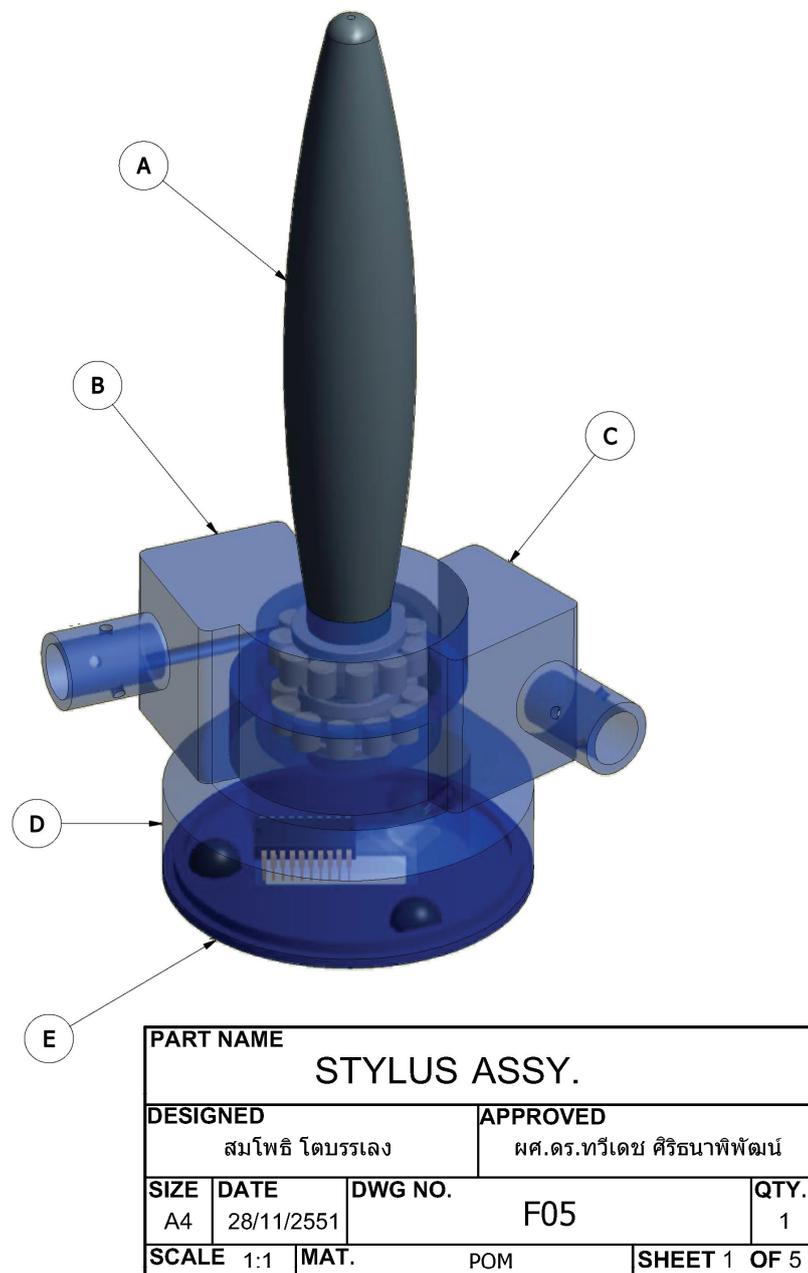
ภาพผนวกที่ ก4 แบบของอุปกรณ์แสปตีกหมายเลข 4

PART NAME		JOINT	
DESIGNED	สนพธิ์ โศภรลง	APPROVED	ศศ.ดร.ทศ.โดย ศิริธนาพิพัฒนา
SIZE	A4	DWG NO.	F03
DATE	28/11/2551	QTY.	2
SCALE	1:1	MAT.	POM
			SHEET 2 OF 2

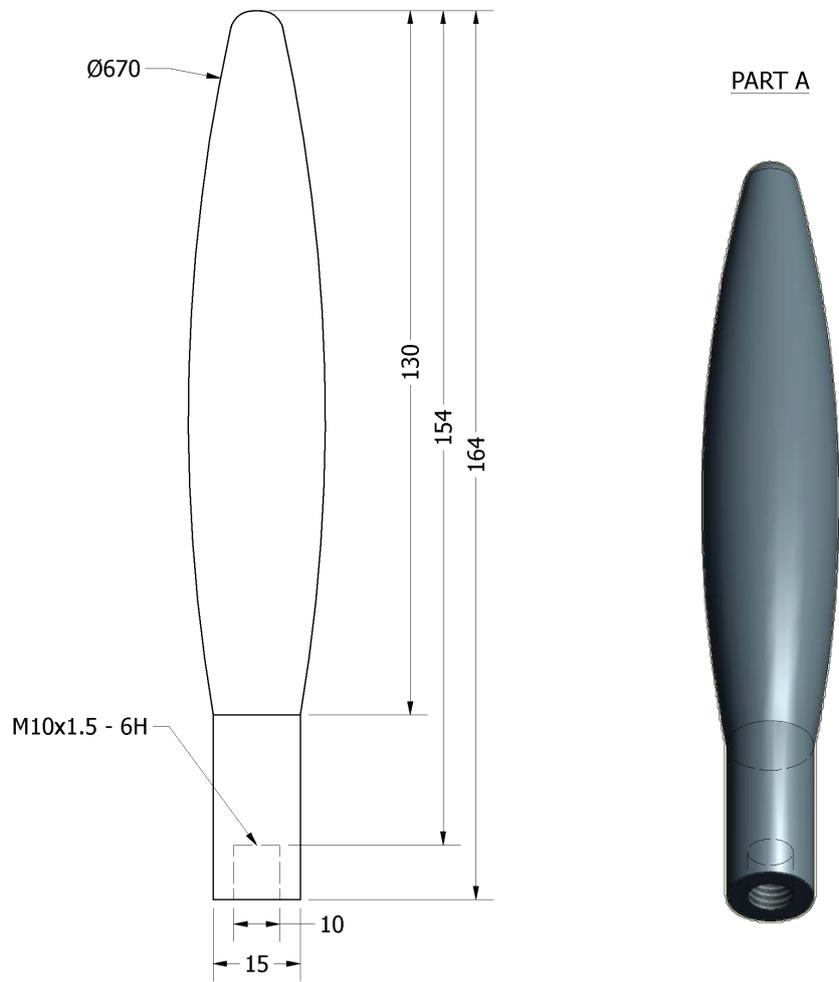


PART NAME			
JOINT@GROUND LINK			
DESIGNED		APPROVED	
สมโพธิ โดบรลง		ผศ.ดร.ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์	
SIZE	DATE	DWG NO.	QTY.
A4	14/9/2553	F04	2
SCALE	1:1	MAT.	ALUMINUM
		SHEET 1 OF 1	

ภาพผนวกที่ ก5 แบบของอุปกรณ์แฮปติกหมายเลข 5

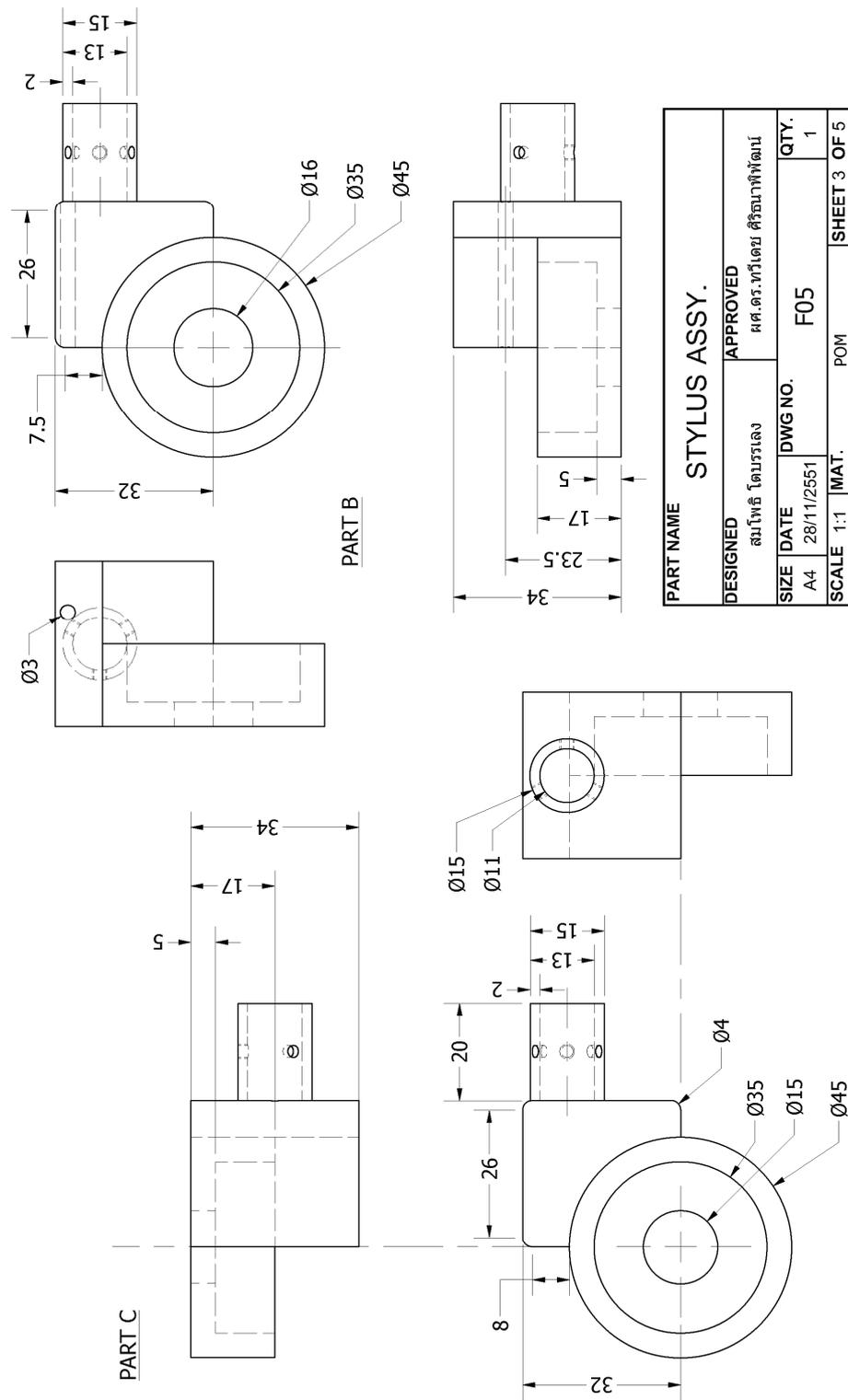


ภาพผนวกที่ 6 แบบของอุปกรณ์แฮปติกหมายเลข 6

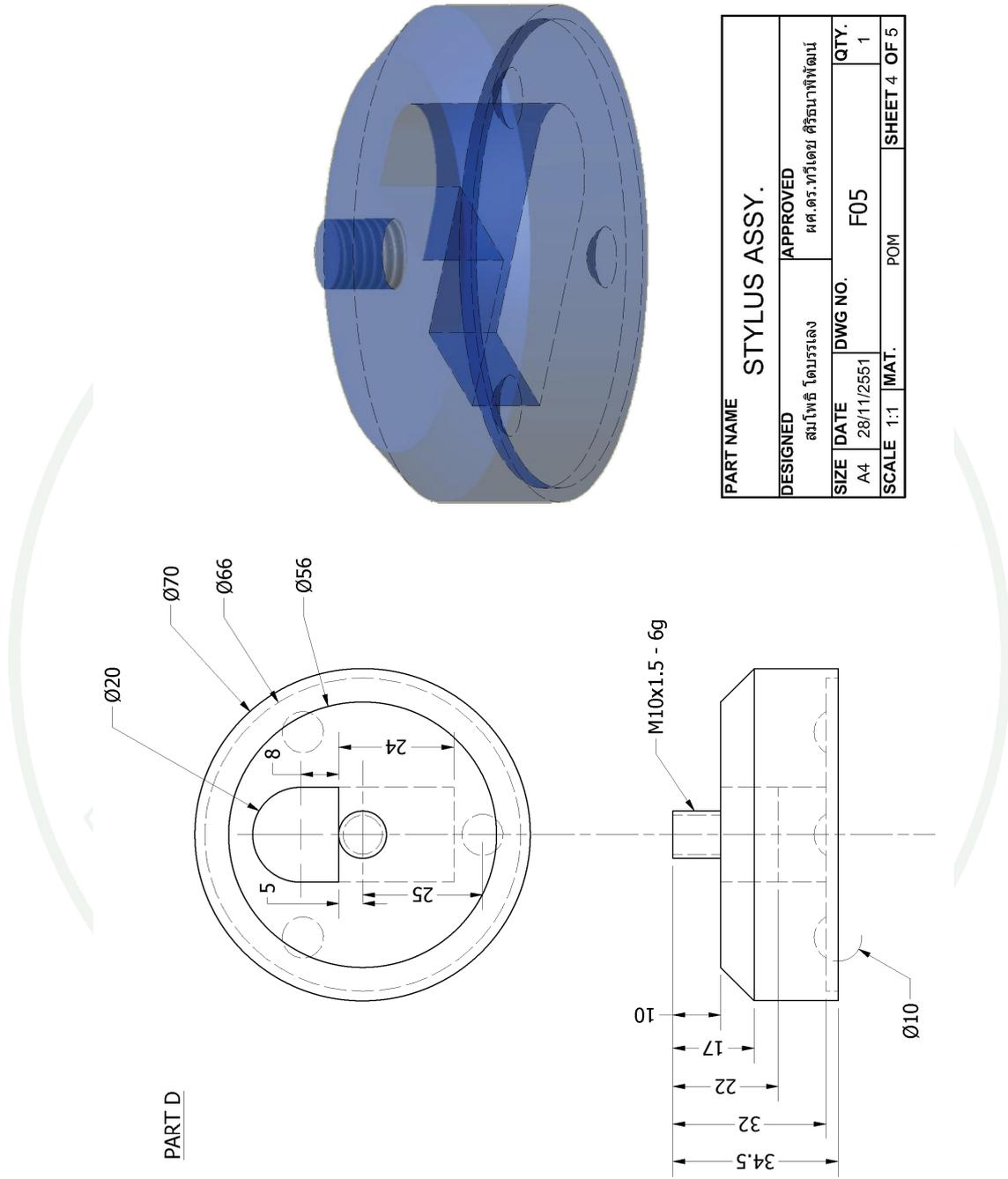


PART NAME			
STYLUS ASSY.			
DESIGNED		APPROVED	
สมโพธิ โดบรลง		ผศ.ดร.ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์	
SIZE	DATE	DWG NO.	QTY.
A4	28/11/2551	F05	1
SCALE	1:1	MAT.	POM
		SHEET 2	OF 5

ภาพผนวกที่ ก7 แบบของอุปกรณ์แฮปติกหมายเลข 7

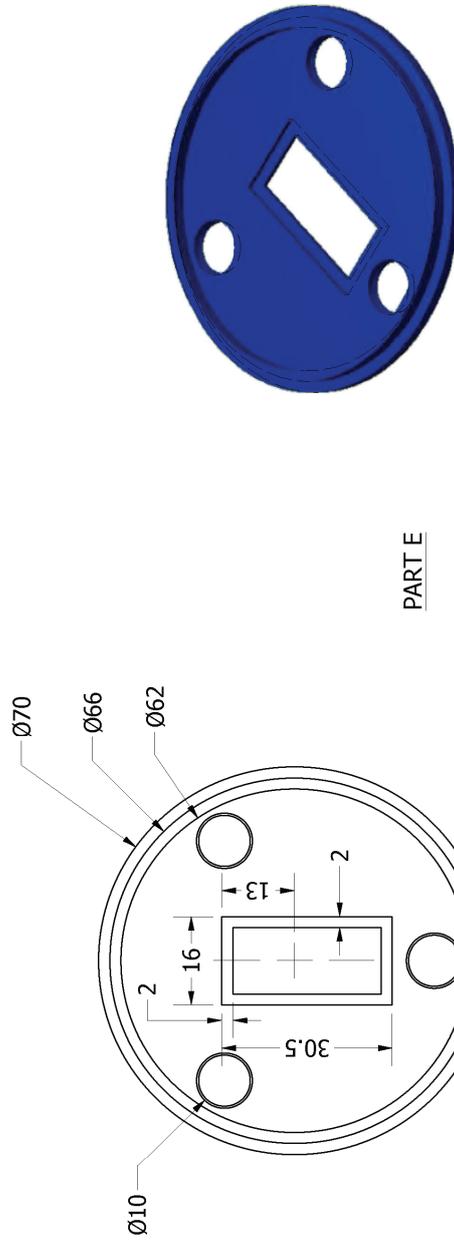


ภาพผนวกที่ 8 แบบของอุปกรณ์แปปติคหมายเลข 8

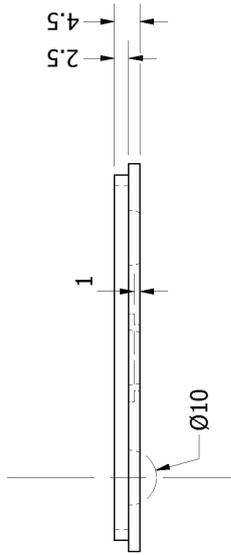


ภาพผนวกที่ ก9 แบบของอุปกรณ์แฮปติกหมายเลข 9

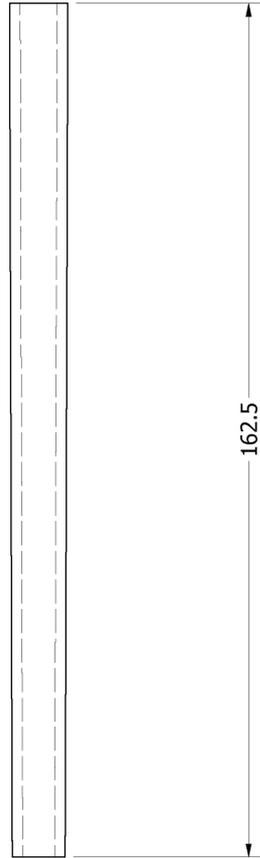
ภาพผนวกที่ ก10 แบบของอุปกรณ์แปปติกหมายเลข 10



PART E

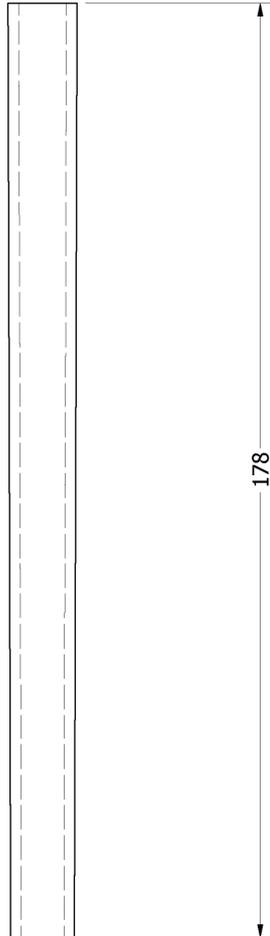


PART NAME		STYLUS ASSY.	
DESIGNED	สมโพธิ โตบรรเลง	APPROVED	ผศ.ดร.พีเดช ศิริธนาพิพัฒน์
SIZE	A4	DWG NO.	F05
DATE	28/11/2551		
SCALE	1:1	MAT.	POM
			SHEET 5 OF 5
			QTY. 1



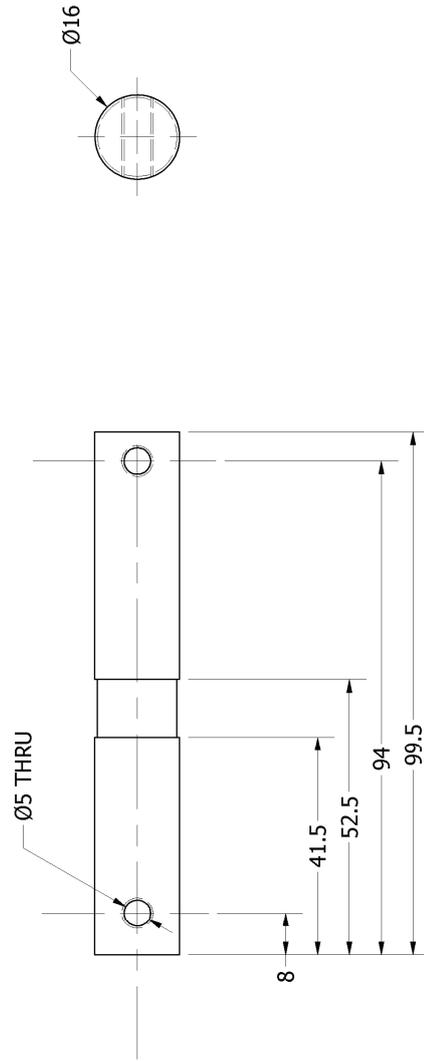
PART NAME				UPPER LINK			
DESIGNED		สมโพธิ โตบรรเลง		APPROVED		ผศ.ดร.ทวีโตย ศิริธนาพิพัฒน์	
SIZE	DATE	DWG NO.	F06	QTY.	2		
A4	14/9/2553						
SCALE	1:1	MAT.	GRAPHITE	SHEET	1	OF 1	

ภาพผนวกที่ ก11 แบบของอุปกรณ์แฮปดิกหมายเลข 11



PART NAME			
LOWER LINK			
DESIGNED		APPROVED	
สมโพธิ โตบรรเลง		ผศ.ดร.ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์	
SIZE	DATE	DWG NO.	QTY.
A4	14/9/2553	F07	2
SCALE	MAT.	SHEET 1 OF 1	
1:1	GRAPHITE		

ภาพผนวกที่ ก12 แบบของอุปกรณ์แสปดิกหมายเลข 12



PART NAME				SHAFT			
DESIGNED		APPROVED					
สมโพธิ โดมบรรเลง		ศต.ดร.ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์					
SIZE	DATE	DWG NO.	F08	QTY.	2		
A4	9/14/2010						
SCALE	1:1	MAT.	ALUMINUM	SHEET	1	OF 1	

ภาพผนวกที่ ก13 แบบของอุปกรณ์แฮปดิกหมายเลข 13



YASKAWA

Σ -II Series SGM□H/SGDM USER'S MANUAL

SGMAH/SGMPH/SGMGH/SGMSH/SGMDH/SGMCS Servomotors
SGDM SERVOPACK



YASKAWA

MANUAL NO. SIEPS80000015A

ภาพผนวกที่ ข14 คู่มือมอเตอร์และชุดขับเคลื่อนที่ 1

สิงสิทจี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3 Specifications and Dimensional Drawings

3.1.1 SGMAH Servomotors Without Gears

3.1 Ratings and Specifications of SGMAH (3000 min⁻¹)

3.1.1 SGMAH Servomotors Without Gears

(1) Ratings and Specifications

- Time Rating: Continuous
- Vibration Class: 15 μm or below
- Insulation Resistance: 500 VDC, 10 M Ω min.
- Ambient Temperature: 0 to 40°C (32 to 104°F)
- Excitation: Permanent magnet
- Mounting: Flange method
- Thermal Class: B
- Withstand Voltage:
 - 100 V, 200 V Servomotors: 1500 VAC for one minute
 - 400 V Servomotors: 1800 VAC for one minute
- Enclosure: Totally enclosed, self-cooled, IP55 (except for shaft opening)
- Ambient Humidity: 20% to 80% (no condensation)
- Drive Method: Direct drive

Voltage		100 V				200 V				400 V			
Servomotor Model SGMAH-		A3B	A5B	O1B	O2B	A3A	A5A	O1A	O2A	O4A	O8A	O3D	O7D
Rated Output *1	kW	0.03	0.05	0.1	0.2	0.03	0.05	0.1	0.2	0.4	0.75	0.3	0.65
Rated Torque *1,*2	N·m	0.0955	0.159	0.318	0.637	0.0955	0.159	0.318	0.637	1.27	2.39	0.955	2.07
	oz·in *3	13.5	22.5	45.0	90.2	13.5	22.5	45.0	90.2	180	338	135	293
Instantaneous Peak Torque *1	N·m	0.286	0.477	0.955	1.91	0.286	0.477	0.955	1.91	3.82	7.16	3.82	7.16
	oz·in *3	40.5	67.5	135	270	40.5	67.5	135	270	541	1010	541	1010
Rated Current *1	A _{rms}	0.66	0.95	2.4	3.0	0.44	0.64	0.91	2.1	2.8	4.4	1.3	2.2
Instantaneous Max. Current *1	A _{rms}	2.0	2.9	7.2	9.0	1.3	2.0	2.8	6.5	8.5	13.4	5.1	7.7
Rated Speed *1	min ⁻¹	3000											
Max. Speed *1	min ⁻¹	5000											
Torque Constant	N·m/A _{rms}	0.157	0.182	0.146	0.234	0.238	0.268	0.378	0.327	0.498	0.590	0.837	1.02
	oz·in/A _{rms} *3	22.2	25.8	20.7	33.1	33.7	38.0	53.5	46.3	70.5	83.6	119	144
Rotor Moment of Inertia J	$\times 10^{-4}$ kg·m ²	0.0166	0.0220	0.0364	0.106	0.0166	0.0220	0.0364	0.106	0.173	0.672	0.173	0.672
	$\times 10^{-3}$ oz·in·s ² *3	0.235	0.312	0.515	1.50	0.235	0.312	0.515	1.50	2.45	9.52	2.45	9.52
Rated Power Rate *1	kW/s	5.49	11.5	27.8	38.2	5.49	11.5	27.8	38.2	93.7	84.8	52.9	63.8
Rated Angular Acceleration *1	rad/s ²	57500	72300	87400	60100	57500	72300	87400	60100	73600	35500	55300	30800

* 1. These items and torque-motor speed characteristics quoted in combination with an SGDM/SGDH SERVOPACK are at an armature winding temperature of 100°C (212°F). Other values quoted at 20°C (68°F). All values are typical.

* 2. Rated torques are continuous allowable torque values at 40°C (104°F) with an 250 × 250 × 6 (mm) [10 × 10 × 0.24 (in.)] aluminum plate (heat sink) attached.

* 3. These values are reference values.

(2) Holding Brake Moment of Inertia

The moment of inertia of the servomotor with holding brake is expressed using the following equation.
 (The moment of inertia of the servomotor with holding brake) = (rotor moment of inertia) + (brake moment of inertia)

Servomotor Model SGMAH-	A3A A3B	A5A A5B	01A 01B	02A 02B	04A 03D	08A 07D
	Holding Brake Moment of Inertia J	×10 ⁻⁴ kg·m ² 0.0085		0.058		0.14
	×10 ⁻³ oz·in ² 0.120		0.821		1.98	

* These values are reference values.

(3) Derating Rate for Servomotor With Oil Seal

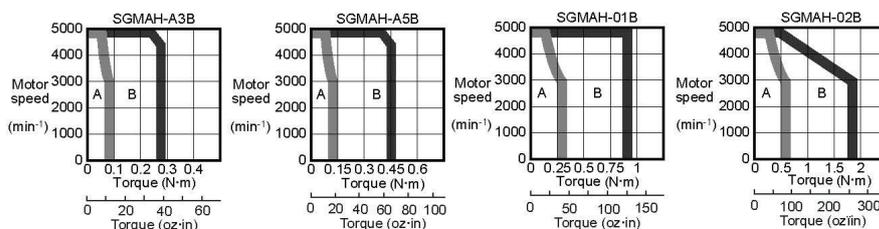
For a motor with oil seal, use the following derating rate because of the higher friction torque.

Servomotor Model SGMAH-	A3A A3B	A5A A5B	01A 01B	02A 02B	04A 03D	08A 07D
	Derating Rate	70		80		90
	%		90		95	

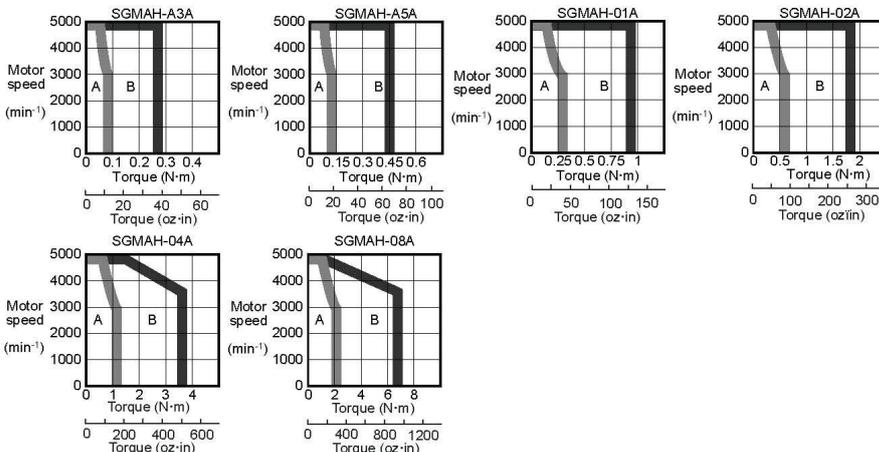
3

(4) Torque-motor Speed Characteristics

(a) 100-V Class



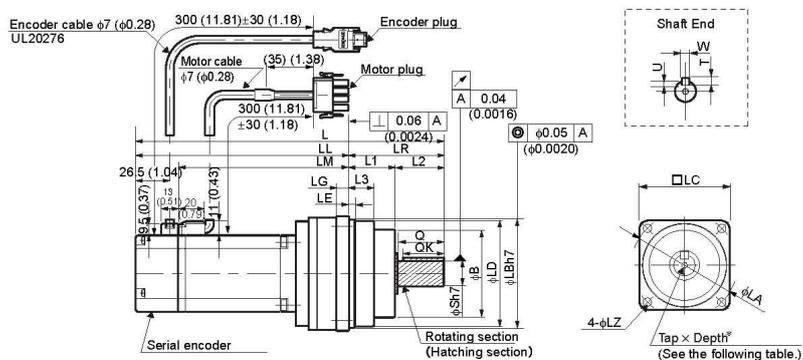
(b) 200-V Class



3-5

ภาพผนวกที่ ข16 คู่มือมอเตอร์และชุดขับหน้าที่ 3

(2) 200 W, 400 W, 750 W



3

Units: mm (in)

Model SGMAH-	Gear Ratio	L	LL	LM	LR	LE	LG	B	LD	LB	L1	L2	L3	Q	QK	S
02□□AJ1□1	1/5	212 (8.35)	138 (5.43)	104.5 (4.11)	74 (2.91)	4 (0.16)	10 (0.39)	69 (2.72)	83 (3.27)	85 (3.35)	36 (1.42)	38 (1.50)	19.5 (0.77)	36 (1.42)	32 (1.26)	20 (0.79)
02□□AJ3□1	3/31	212 (8.35)	138 (5.43)	104.5 (4.11)	74 (2.91)	4 (0.16)	10 (0.39)	69 (2.72)	83 (3.27)	85 (3.35)	36 (1.42)	38 (1.50)	19.5 (0.77)	36 (1.42)	32 (1.26)	20 (0.79)
02□□AJC□1	1/21	249.5 (9.82)	165.5 (6.52)	132 (5.20)	84 (3.31)	4 (0.16)	12 (0.47)	82 (3.23)	98 (3.86)	100 (3.94)	40 (1.57)	44 (1.73)	23 (0.91)	42 (1.65)	36 (1.42)	25 (0.98)
02□□AJ7□1	1/33	249.5 (9.82)	165.5 (6.52)	132 (5.20)	84 (3.31)	4 (0.16)	12 (0.47)	82 (3.23)	98 (3.86)	100 (3.94)	40 (1.57)	44 (1.73)	23 (0.91)	42 (1.65)	36 (1.42)	25 (0.98)
04□□AJ1□1	1/5	240 (9.45)	166 (6.54)	133 (5.24)	74 (2.91)	4 (0.16)	10 (0.39)	69 (2.72)	83 (3.27)	85 (3.35)	36 (1.42)	38 (1.50)	19.5 (0.77)	36 (1.42)	32 (1.26)	20 (0.79)
04□□AJ3□1	3/31	256.5 (10.10)	172.5 (6.79)	139 (5.47)	84 (3.31)	4 (0.16)	12 (0.47)	82 (3.23)	98 (3.86)	100 (3.94)	40 (1.57)	44 (1.73)	23 (0.91)	42 (1.65)	36 (1.42)	25 (0.98)
04□□AJC□1	1/21	305.5 (12.03)	200.5 (7.89)	167 (6.57)	105 (4.13)	5 (0.20)	13 (0.51)	93 (3.66)	112 (4.41)	115 (4.53)	45 (1.77)	60 (2.36)	26.5 (1.04)	58 (2.28)	50 (1.97)	32 (1.26)
04□□AJ7□1	1/33	305.5 (12.03)	200.5 (7.89)	167 (6.57)	105 (4.13)	5 (0.20)	13 (0.51)	93 (3.66)	112 (4.41)	115 (4.53)	45 (1.77)	60 (2.36)	26.5 (1.04)	58 (2.28)	50 (1.97)	32 (1.26)
08□□AJ1□1	1/5	277 (10.91)	193 (7.60)	159.5 (6.28)	84 (3.31)	4 (0.16)	12 (0.47)	82 (3.23)	98 (3.86)	100 (3.94)	40 (1.57)	44 (1.73)	23 (0.91)	42 (1.65)	36 (1.42)	25 (0.98)
08□□AJ3□1	3/31	301 (11.85)	196 (7.72)	162.5 (6.40)	105 (4.13)	5 (0.20)	13 (0.51)	93 (3.66)	112 (4.41)	115 (4.53)	45 (1.77)	60 (2.36)	26.5 (1.04)	58 (2.28)	50 (1.97)	32 (1.26)
08□□AJC□1	1/21	330 (12.99)	223 (8.78)	189.5 (7.46)	107 (4.21)	10 (0.39)	15 (0.59)	107 (4.21)	134 (5.28)	140 (5.51)	44 (1.73)	63 (2.48)	42 (1.65)	60 (2.36)	45 (1.77)	40 (1.57)
08□□AJ7□1	1/33	330 (12.99)	223 (8.78)	189.5 (7.46)	107 (4.21)	10 (0.39)	15 (0.59)	107 (4.21)	134 (5.28)	140 (5.51)	44 (1.73)	63 (2.48)	42 (1.65)	60 (2.36)	45 (1.77)	40 (1.57)

ภาพผนวกที่ ข18 คู่มือมอเตอร์และชุดขับหน้าที่ 5

3 Specifications and Dimensional Drawings

3.12.3 SGMAH Servomotors (3000 min⁻¹) With Standard Backlash Gears

Model SGMAH-	Gear Ratio	LC	LA	LZ	TapxDepth *	U	W	T	Approx. Mass kg (lb)	Allowable Radial Load N (lbf)	Allowable Thrust Load N (lbf)
02□□AJ1□1	1/5	90 (3.54)	105 (4.13)	9 (0.35)	M5×10L	3.5 (0.14)	6 (0.24)	6 (0.24)	2.8 (6.2)	275 (62)	235 (53)
02□□AJ3□1	3/31	90 (3.54)	105 (4.13)	9 (0.35)	M5×10L	3.5 (0.14)	6 (0.24)	6 (0.24)	2.8 (6.2)	360 (82)	
02□□AJC□1	1/21	105 (4.13)	120 (4.72)	9 (0.35)	M6×12L	4 (0.16)	8 (0.31)	7 (0.28)	4.2 (9.3)	585 (133)	290 (66)
02□□AJ7□1	1/33	105 (4.13)	120 (4.72)	9 (0.35)	M6×12L	4 (0.16)	8 (0.31)	7 (0.28)	4.2 (9.3)	635 (144)	
04□□AJ1□1	1/5	90 (3.54)	105 (4.13)	9 (0.35)	M5×10L	3.5 (0.14)	6 (0.24)	6 (0.24)	3.4 (7.5)	275 (62)	235 (53)
04□□AJ3□1	3/31	105 (4.13)	120 (4.72)	9 (0.35)	M6×12L	4 (0.16)	8 (0.31)	7 (0.28)	4.3 (9.5)	460 (104)	290 (66)
04□□AJC□1	1/21	120 (4.72)	135 (5.31)	11 (0.43)	M8×16L	5 (0.20)	10 (0.39)	8 (0.31)	6.4 (14.1)	655 (149)	310 (70)
04□□AJ7□1	1/33	120 (4.72)	135 (5.31)	11 (0.43)	M8×16L	5 (0.20)	10 (0.39)	8 (0.31)	6.4 (14.1)	755 (171)	
08□□AJ1□1	1/5	105 (4.13)	120 (4.72)	9 (0.35)	M6×12L	4 (0.16)	8 (0.31)	7 (0.28)	6.0 (13.2)	355 (80)	290 (66)
08□□AJ3□1	3/31	120 (4.72)	135 (5.31)	11 (0.43)	M8×16L	5 (0.20)	10 (0.39)	8 (0.31)	7.5 (16.5)	525 (119)	310 (70)
08□□AJC□1	1/21	145 (5.71)	165 (6.50)	14 (0.55)	M10×20L	5 (0.20)	12 (0.47)	8 (0.31)	12.4 (27.3)	1070 (243)	490 (111)
08□□AJ7□1	1/33	145 (5.71)	165 (6.50)	14 (0.55)	M10×20L	5 (0.20)	12 (0.47)	8 (0.31)	12.4 (27.3)	1210 (273)	



- The dimensions for L and LL of a servomotor incorporating an encoder with super-capacitor (model: SGMAH-□□□4) are as shown below.
SGMAH-02 and 04: L-dimension + 8.2 mm (0.32 in), LL-dimension + 8.2 mm (0.32 in)
SGMAH-08: L-dimension + 0 mm, LL-dimension + 0 mm
- The working point of the SGMAH servomotor radial load is at the position of minus 5 mm from the shaft end.

• Dimensional Tolerances

Units: mm (in)

Model SGMAH-	Flange Face Dimensions	Shaft-end Dimensions
	LB	S
02□□AJ1□1	$85 \begin{matrix} 0 \\ -0.035 \end{matrix} \begin{matrix} (3.35 \\ -0.0014) \end{matrix}$	$20 \begin{matrix} 0 \\ -0.021 \end{matrix} \begin{matrix} (0.79 \\ -0.0008) \end{matrix}$
02□□AJ3□1	$85 \begin{matrix} 0 \\ -0.035 \end{matrix} \begin{matrix} (3.35 \\ -0.0014) \end{matrix}$	$20 \begin{matrix} 0 \\ -0.021 \end{matrix} \begin{matrix} (0.79 \\ -0.0008) \end{matrix}$
02□□AJC□1	$100 \begin{matrix} 0 \\ -0.035 \end{matrix} \begin{matrix} (3.94 \\ -0.0014) \end{matrix}$	$25 \begin{matrix} 0 \\ -0.021 \end{matrix} \begin{matrix} (0.98 \\ -0.0008) \end{matrix}$
02□□AJ7□1	$100 \begin{matrix} 0 \\ -0.035 \end{matrix} \begin{matrix} (3.94 \\ -0.0014) \end{matrix}$	$25 \begin{matrix} 0 \\ -0.021 \end{matrix} \begin{matrix} (0.98 \\ -0.0008) \end{matrix}$
04□□AJ1□1	$85 \begin{matrix} 0 \\ -0.035 \end{matrix} \begin{matrix} (3.35 \\ -0.0014) \end{matrix}$	$20 \begin{matrix} 0 \\ -0.021 \end{matrix} \begin{matrix} (0.79 \\ -0.0008) \end{matrix}$



ภาคผนวก ค

คู่มือที่เกี่ยวข้องของ CMOS Laser Mouse Sensor และ VCSEL

PAW3601DH-NF Bundles Datasheet introduction

- The PAW3601DH-NF sensor along with the PNLR-00038 lens and PNDR-00004 laser diode form a complete and compact laser mouse tracking system.
- High speed motion detection up to 28 inches/sec and acceleration can be up to 20g.
- This document will begin with some general information and usage guidelines on the bundle set.



Part Number	Part Number Description
PAW3601DH-NF	CMOS Laser Mouse Sensor
PNDR-00004	Multi-Mode Vertical-Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL)
PNLR-00038	Laser Mouse Rectangular Lens

All rights strictly reserved any portion in this paper shall not be reproduced, copied or transformed to any other forms without permission.

1

專利公示：本產品業經本公司獲得台灣專利第 509867, 530489, 529309, 560179, 526662, 554497, 1230890, 1287732 號專利在案。

PixArt Imaging Inc.

E-mail: fae_service@pixart.com.tw

V2.3, Mar. 2010

ภาพผนวกที่ ค21 คู่มืออุปกรณ์ภายในของเลเซอร์เมาส์หน้าที 1

PAW3601DH-NF CMOS LASER MOUSE SENSOR

General Description

PAW3601DH-NF is a CMOS laser mouse sensor with DSP integration chip that serves as a non-mechanical motion estimation engine for implementing a computer mouse.

Features

- ❑ Single power supply
- ❑ Precise laser motion estimation technology
- ❑ Complete 2-D motion sensor
- ❑ No mechanical parts
- ❑ Accurate motion estimation over most of surfaces
- ❑ High speed motion detection up to 28 inches/sec and acceleration can be up to 20g
- ❑ High resolution up to 1600 cpi
- ❑ Power down pin and register setting for low power dissipation
- ❑ Power saving mode during times of no movement
- ❑ Serial Interface for programming and data transfer
- ❑ Low power for wireless application
- ❑ No fly on the air

Key Specification

Power Supply	4.25V ~ 5.5V (VDD) 3.0V ~ 3.6V (VDDD, VDDA)
System Clock	27 MHz
Speed	28+ inches/sec
Acceleration	20g
Resolution	800/1600 cpi
Frame Rate	6600 frames/sec
Operating Current	< 18 mA @Mouse moving (Normal) < 8 mA @Mouse not moving (Sleep) < 200 uA @Shutdown mode
Package	Shrunk DIP20

Ordering Information

Order number	I/O	Resolution
PAW3601DH-NF	CMOS output	800/1600 cpi

All rights strictly reserved any portion in this paper shall not be reproduced, copied or transformed to any other forms without permission.

2

專利公示：本產品經本公司獲得台灣專利第 509867, 530489, 529309, 560179, 526662, 554497, 1230890, 1287732 號專利在案。

PixArt Imaging Inc.

E-mail: fae_service@pixart.com.tw

V2.3, Mar. 2010

ภาพผนวกที่ ค22 คู่มืออุปกรณ์ภายในของเลเซอร์เมาส์หน้าที่ 2

1. Pin Configuration

1.1 Pin Description

Pin No.	Name	Type	Definition
1	VSS_LD	GND	LD ground
2	LD	OUT	LD control
3	OSCOUT	OUT	Resonator output
4	OSGIN	IN	Resonator input
5	VDDD	PWR	Chip digital power, 3.3V
6	VSSD	GND	Chip digital ground
7	VSSA	GND	Chip analog ground
8	VDD	PWR	Chip power, 5V power supply
9	VDDA	PWR	Chip analog power, 3.3V
10	NC	-	No connection
11	YA	OUT	YA quadrature output
12	YB	OUT	YB quadrature output
13	XA	OUT	XA quadrature output
14	XB	OUT	XB quadrature output
15	NC	-	No connection
16	NC	-	No connection
17	CPI	IN	CPI IO trap select pin Pull-high to VCC (3.3V or 5.0V): 800 cpi Pull-low to GND: 1600 cpi
18	SCLK	IN	Serial interface clock
19	SDIO	I/O	Serial interface bi-direction data
20	PD	IN	Power down pin, active high

1.2 Pin Assignment

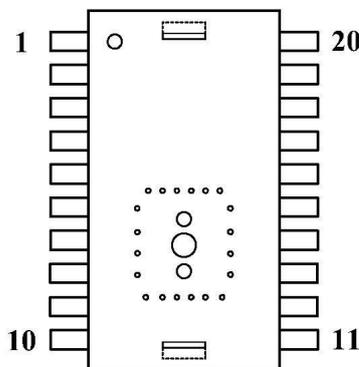


Figure 1. Top View Pinout

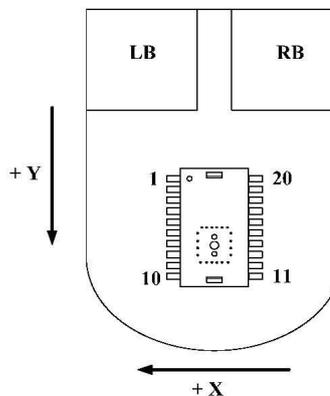


Figure 2. Top View of Mouse

All rights strictly reserved any portion in this paper shall not be reproduced, copied or transformed to any other forms without permission.

3

專利公示：本產品業經本公司獲得台灣專利第 509867, 530489, 529309, 560179, 526662, 554497, 1230890, 1287732 號專利在案。

PixArt Imaging Inc.

E-mail: fae_service@pixart.com.tw

V2.3, Mar. 2010

ภาพผนวกที่ ค23 คู่มืออุปกรณ์ภายในของเลเซอร์เมาส์หน้าที่ 3

2. Block Diagram and Operation

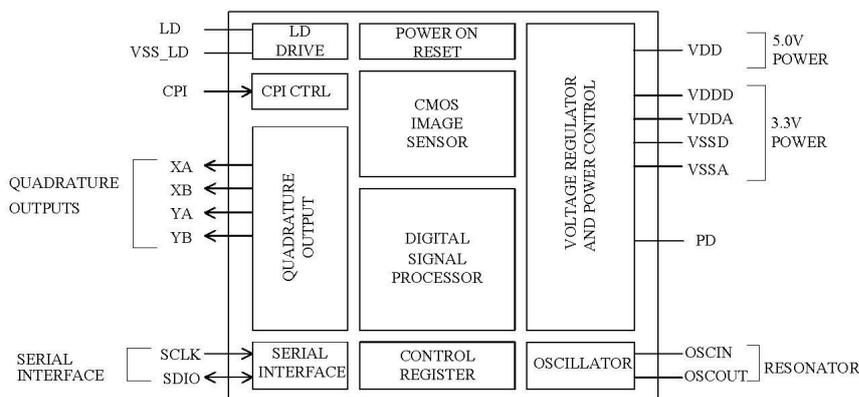


Figure 3. Block Diagram

In the traditional optical mouse, it uses LED as a light source. The light illuminates on the working surface and generates the bright and dark shadow that shows the micro-texture of the surface. The imaging sensor in the optical mouse chip captures sequential this micro-texture images of the working surface. Based on the captured images, the optical chip can determine the speed and direction when the optical mouse is moving. Thus, for the more rough surface, the more obvious shadow image will be generated and much easier to determine the movement and direction.

The PAW3601DH-NF is a CMOS laser mouse sensor with DSP integration chip that serves as a non-mechanical motion estimation engine for implementing a computer mouse. It is based on new laser speckle navigation technology. In the laser mouse, it uses laser diode (LD), specially uses VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) as light source, where laser is one kind of coherent light. When this light illuminates on the working surface, the surface will reflect and diffuse the incident light and generates speckle pattern. The imaging sensor in the laser mouse chip detects the speckle pattern that generated from the working surface and determines the movement and direction. Since the speckle pattern can be generated on the most of the surface if this surface is not perfect smooth or transparent, the laser mouse can adapt on more surfaces as compared with traditional LED-based optical mouse. The mouse sensor is in a 20-pin optical package. The output format is two-channel quadrature (X and Y direction), which emulates encoder phototransistors. The current X and Y information are also available in registers accessed via a serial port. The word "mouse sensor," instead of PAW3601DH-NF, is used in the document.

All rights strictly reserved any portion in this paper shall not be reproduced, copied or transformed to any other forms without permission.

專利公示：本產品業經本公司獲得台灣專利第 509867, 530489, 529309, 560179, 526662, 554497, 1230890, 1287732 號專利在案。

PixArt Imaging Inc.

E-mail: fae_service@pixart.com.tw

V2.3, Mar. 2010

ภาพผนวกที่ ค24 คู่มืออุปกรณ์ภายในของเลเซอร์เมาส์หน้าที่ 4

PixArt Imaging Inc.

PAW3601DH-NF

CMOS Laser Mouse Sensor

3. Registers and Operation

The PAW3601DH-NF can be programmed through registers, via the serial port, and DSP configuration and motion data can be read from these registers. All registers not listed are reserved, and should never be written by firmware.

3.1 Registers

Address	Name	R/W	Default	Data Type
0x00	Product_ID1	R	0x30	Eight bits [11:4] number with the product identifier
0x01	Product_ID2	R	0x0N	Four bits [3:0] number with the product identifier Reserved[3:0] number is reserved for further
0x02	Motion_Status	R	-	Bit field
0x03	Delta_X	R	-	Eight bits 2's complement number
0x04	Delta_Y	R	-	Eight bits 2's complement number
0x05	Operation_Mode	R/W	-	Bit field
0x06	Configuration	R/W	-	Bit field

3.2 Register Descriptions

0x00		Product_ID1							
Bit		7	6	5	4	3	2	1	0
Field		PID[11:4]							
Usage		The value in this register can't change. It can be used to verify that the serial communications link is OK.							
0x01		Product_ID2							
Bit		7	6	5	4	3	2	1	0
Field		PID[3:0]				Reserved[3:0]			
Usage		The value in this register can't change. PID[3:0] can be used to verify that the serial communications link is OK. Reserved[3:0] is a value between 0x0 and 0xF, it can't be used to verify that the serial communication.							

All rights strictly reserved any portion in this paper shall not be reproduced, copied or transformed to any other forms without permission.

5

專利公示：本產品業經本公司獲得台灣專利第 509867, 530489, 529309, 560179, 526662, 554497, 1230890, 1287732 號專利在案。

PixArt Imaging Inc.

E-mail: fae_service@pixart.com.tw

V2.3, Mar. 2010

ภาพผนวกที่ ค25 คู่มืออุปกรณ์ภายในของเลเซอร์เมาส์หน้าที่ 5

PixArt Imaging Inc.

PAW3601DH-NF

CMOS Laser Mouse Sensor

0x02		Motion_Status						
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Field	Motion	Reserved[3:2]		DYOVF	DXOVF	Reserved[1:0]		RES
Usage	<p>Register 0x02 allows the user to determine if motion has occurred since the last time it was read. If so, then the user should read registers 0x03 and 0x04 to get the accumulated motion. It also tells if the motion buffers have overflowed since the last reading. The current resolution is also shown.</p> <p>Reading this register freezes the <i>Delta_X</i> and <i>Delta_Y</i> register values. Read this register before reading the <i>Delta_X</i> and <i>Delta_Y</i> registers. If <i>Delta_X</i> and <i>Delta_Y</i> are not read before the motion register is read a second time, the data in <i>Delta_X</i> and <i>Delta_Y</i> will be lost.</p>							
Notes	Field Name	Description						
	Motion	Motion since last report or PD 0 = No motion (Default) 1 = Motion occurred, data ready for reading in <i>Delta_X</i> and <i>Delta_Y</i> registers						
	Reserved[3:2]	Reserved for future use						
	DYOVF	Motion Delta Y overflow, ΔY buffer has overflowed since last report 0 = No overflow (Default) 1 = Overflow has occurred						
	DXOVF	Motion Delta X overflow, ΔX buffer has overflowed since last report 0 = No overflow (Default) 1 = Overflow has occurred						
	Reserved[1:0]	Reserved for future use						
	RES	Resolution in counts per inch 0 = 1600 1 = 800						
0x03		Delta_X						
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Field	X7	X6	X5	X4	X3	X2	X1	X0
Usage	X movement is counts since last report. Absolute value is determined by resolution. Reading clears the register. Report range -128 ~ +127.							
0x04		Delta_Y						
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Field	Y7	Y6	Y5	Y4	Y3	Y2	Y1	Y0
Usage	Y movement is counts since last report. Absolute value is determined by resolution. Reading clears the register. Report range -128 ~ +127.							

All rights strictly reserved any portion in this paper shall not be reproduced, copied or transformed to any other forms without permission.

6

專利公示：本產品經本公司獲得台灣專利第 509867, 530489, 529309, 560179, 526662, 554497, 1230890, 1287732 號專利在案。

PixArt Imaging Inc.

E-mail: fae_service@pixart.com.tw

V2.3, Mar. 2010

ภาพผนวกที่ ค26 คู่มืออุปกรณ์ภายในของเลเซอร์เมาส์หน้าที่ 6

PixArt Imaging Inc.

PAW3601DH-NF

CMOS Laser Mouse Sensor

0x05	Operation_Mode																	
	Bit	7	6	5	4	3	2	1	0									
Field	LDsht_enh	XY_enh	Reserved	Slp_enh	Slp2au	Slp2mu	Slp1mu	Wakeup										
Usage	<p>Register 0x05 allows the user to change the operation of the mouse sensor. Shown below are the bits, their default values, and optional values.</p> <p>Operation_Mode[4:0] “0xxxx” = Disable sleep mode “10xxx” = Enable sleep mode¹ “11xxx” = Enable sleep mode² “1x100” = Force enter sleep2³ “1x010” = Force enter sleep1³ “1x001” = Force wakeup from sleep mode³</p> <p>Notes: 1. Enable sleep mode, but disable automatic entering sleep2 mode, that is, only 2 modes will be used, normal mode and sleep1 mode. After 0.45 sec not moving during normal mode, the mouse sensor will enter sleep1 mode, and keep on sleep1 mode until moving is detected or wakeup is asserted. 2. Enable sleep mode full function, that is 3 modes will be used, normal mode, sleep1 mode and sleep2 mode. After 0.45 sec not moving during normal mode, the mouse sensor will enter sleep1 mode, and keep on sleep1 mode until moving is detected or wakeup is asserted. And after 27.3 sec not moving during sleep1 mode, the chip will enter sleep2 mode, and keep on sleep2 mode until detect moving or force wakeup to normal mode.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Mode</th> <th>Sampling rate @6600 frame/sec</th> <th>Active duty cycle @6600 frame/sec</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Sleep1</td> <td>206/sec</td> <td>22%</td> </tr> <tr> <td>Sleep2</td> <td>6.43/sec</td> <td>2.25%</td> </tr> </tbody> </table> <p>3. Only one of these three bits slp2mu_enh, slp1mu_enh, and wakeup can be set to 1 at the same time, others have to be set to 0. After a period of time, the bit, which was set to 1, will be reset to 0 by internal signal.</p>									Mode	Sampling rate @6600 frame/sec	Active duty cycle @6600 frame/sec	Sleep1	206/sec	22%	Sleep2	6.43/sec	2.25%
Mode	Sampling rate @6600 frame/sec	Active duty cycle @6600 frame/sec																
Sleep1	206/sec	22%																
Sleep2	6.43/sec	2.25%																
Notes	Field Name	Description																
	LDsht_enh	LD shutter enable/disable 0 = Disable 1 = Enable (Default)																
	XY_enh	XY quadrature output enable/disable 0 = Disable 1 = Enable (Default)																
	Reserved	Reserved for future use																
	Slp_enh	Sleep mode enable/disable 0 = Disable 1 = Enable (Default)																
	Slp2au	Automatic enter sleep2 mode enable/disable 0 = Disable (Default) 1 = Enable																
	Slp2mu	Manual enter sleep2 mode, set “1” will enter sleep2 and this bit will be reset to “0”																
	Slp1mu	Manual enter sleep1 mode, set “1” will enter sleep1 and this bit will be reset to “0”																
	Wakeup	Manual wake up from sleep mode, set “1” will enter wakeup and this bit will be reset to “0”																

All rights strictly reserved any portion in this paper shall not be reproduced, copied or transformed to any other forms without permission.

7

專利公示：本產品業經本公司獲得台灣專利第 509867, 530489, 529309, 560179, 526662, 554497, 1230890, 1287732 號專利在案。

PixArt Imaging Inc.

E-mail: fae_service@pixart.com.tw

V2.3, Mar. 2010

ภาพผนวกที่ ค27 คู่มืออุปกรณ์ภายในของเลเซอร์เมาส์หน้าที่ 7

PixArt Imaging Inc.

PAW3601DH-NF

CMOS Laser Mouse Sensor

0x06	Configuration							
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Field	Reserved[5:2]				PD_enh	Reserved[1:0]		RES
Usage	The Configuration register allows the user to change the configuration of the mouse sensor. Shown below are the bits, their default values, and optional values.							
Notes	Field Name	Description						
	Reserved[5:2]	Reserved for future use						
	PD_enh	Power down mode 0 = Normal operation (Default) 1 = Power down mode						
	Reserved[1:0]	Reserved for future use. Must be written to "00"						
	RES	Output resolution setting. In the power-on initial state, the resolution is depend on the CPI IO trap select pin. If the mouse controller writes the register, it is depend on the register value. 0 = 1600 1 = 800						

All rights strictly reserved any portion in this paper shall not be reproduced, copied or transformed to any other forms without permission.

8

專利公示：本產品業經本公司獲得台灣專利第 509867, 530489, 529309, 560179, 526662, 554497, 1230890, 1287732 號專利在案。

PixArt Imaging Inc.

E-mail: fac_service@pixart.com.tw

V2.3, Mar. 2010

ภาพผนวกที่ ค28 คู่มืออุปกรณ์ภายในของเลเซอร์เมาส์หน้าที่ 8

PixArt Imaging Inc.

PAN3601DH-NF

CMOS Laser Mouse Sensor

PNDR-00004

850nm Epoxy molded VCSEL for Laser Mouse

FEATURES

- Epoxy Molded with round emission surface.
- Small divergence angle.



ELECTRO-OPTICAL CHARACTERISTICS:

PARAMETERS	SYMBOL	MIN	TYP	MAX	UNIT	TEST CONDITIONS
Output Power	P_o		0.475	0.7	mW	$I = I_f^{(1)}$
Wavelength	λ_p	830	850	860	nm	$I_f = 6 \text{ mA}$
Forward Voltage	V_F	1.6	1.75	1.9	V	$I_f = 6 \text{ mA}$
Series Resistance	R_S		40	60	Ω	$I_f = 6 \text{ mA}$
Breakdown voltage	V_{BD}	7	14		V	$I_r = 10\mu\text{A}$
Beam Divergence($1/e^2$)	θ		8		degree	$I_f = 6 \text{ mA}$

Notes :(1) Binning

APPLY TO PAN/PAW 3601 DH-NF

Optical power at each of following nominal bin operating current and constrained resistor at **VDD=2.7V**

Bin grade	LD current (mA)	Single Constrain resistor :R(Ω)	6 Series Constrain resistor: r_n (Ω)	Bin grade	LD current (mA)	Single Constrain resistor :R(Ω)	6 Series Constrain resistor: r_n (Ω)
P36	3.6	282	47	P50	5.0	180	30
P40	4.0	234	39	P52	5.2	162	27
P42	4.2	234	39	P54	5.4	162	27
P44	4.4	216	36	P56	5.6	132	22
P46	4.6	198	33	P58	5.8	132	22
P48	4.8	180	30	P60	6.0	132	22

Single constrain resistor R value = 6 series connection resistor for eye safety protection

$$R = r_1+r_2+r_3+r_4+r_5+r_6$$

Ex. P48:180 Ω = 30 Ω + 30 Ω +30 Ω +30 Ω +30 Ω +30 Ω

PixArt reserves the right to

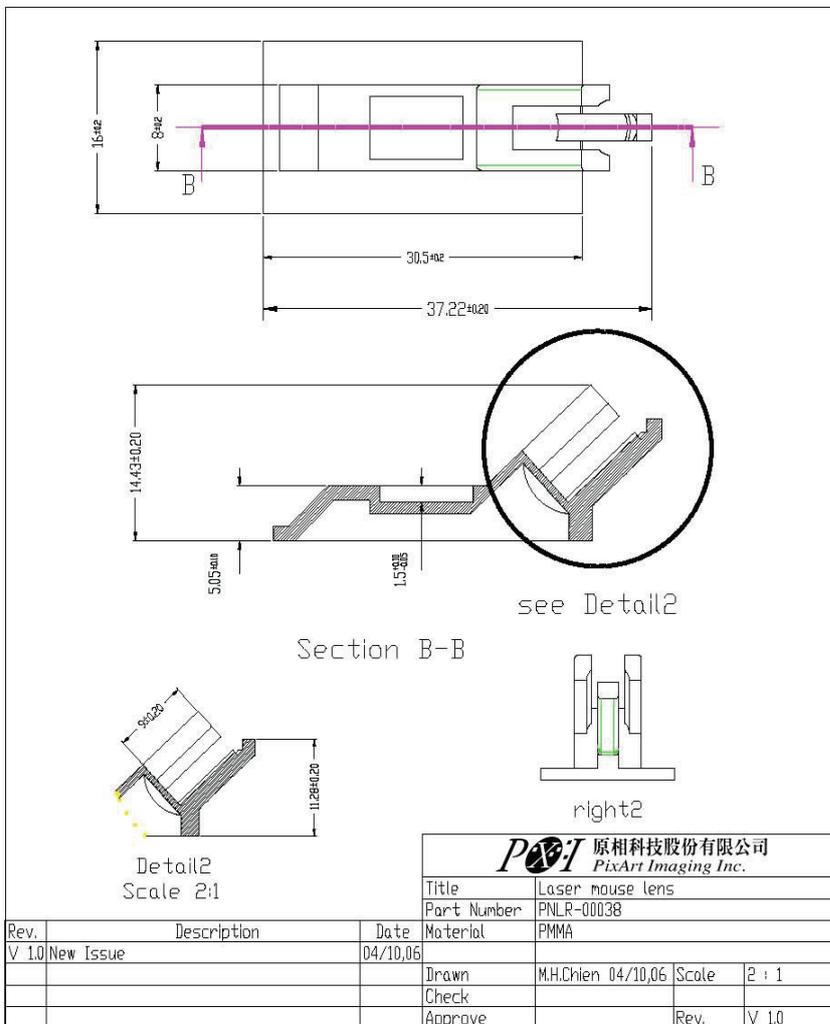
make changes due to the improvement of process and package technology.



Rev 2.50

ภาพผนวกที่ ค29 คู่มืออุปกรณ์ภายในของเลเซอร์เมาส์หน้าที่ 9

PNLR-00038 Lens Dimensions



All rights strictly reserved any portion in this paper shall not be reproduced, copied or transformed to any other firms without permission.

34

專利公示：本產品與經本公司獲得台灣專利第 502867, 530489, 529309, 560179, 526562, 554497, 1230890, 1287732 號專利在案。
 PixArt Imaging Inc.

E-mail: fae_service@pixart.com.tw

V2.3, Mar. 2010

ภาพผนวกที่ ค30 คู่มืออุปกรณ์ภายในของเลเซอร์เมาส์หน้าที่ 10

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-สกุล	สมโพธิ โดบรแดง
วัน เดือน ปี ที่เกิด	21 สิงหาคม 2523
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยมหิดล จังหวัดนครปฐม
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-