ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
250462

การออกแบบและควบคุมระบบแอปติกอินเตอร์เฟส 1 องศาอิสระ

ณัฐนัย โปติ

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ตุลาคม 2554

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
250462

การออกแบบและควบคุมระบบแฮปติกอินเตอร์เฟส 1 องศาอิสระ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

ณัฐชัย โปธิ

วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยเพื่อเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ตุลาคม 2554

การออกแบบและควบคุมระบบแฮปติกอินเตอร์เฟส 1 องศาอิสระ

ณัฐชัย โปธิ

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
Assoc. Prof. Dr. Matthew Owen Thomas Cole

.....กรรมการ
รศ. ดร. ธีระพงษ์ ว่องรัตนะไพศาล

.....กรรมการ
รศ. ดร. ระคม พงษ์วุฒิธรรม

.....กรรมการ
ผศ. ดร. เกรียงไกร อัศวมาศบันลือ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

.....
รศ. ดร. ธีระพงษ์ ว่องรัตนะไพศาล

13 ตุลาคม 2554

© ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก รศ.ดร. ธีระพงษ์ ว่องรัตนะไพศาล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณในคุณูปการของท่านเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ Assoc. Prof. Dr. Matthew Owen Thomas Cole รศ. ดร. ระดม พงษ์วุฒิธรรม และผศ. ดร. เกรียงไกร อัศวมาศบันลือ ที่กรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทความรู้จนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงแด่ครอบครัวของข้าพเจ้า ซึ่งประกอบด้วยคุณพ่อวิรัช คุณแม่สายสมร คุณณัฐพงษ์ และคุณปาริชาต ตลอดจนญาติพี่น้องทุกคนที่ส่งเสริมสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ผู้เขียนมาโดยตลอด

ขอขอบคุณสำหรับความช่วยเหลือและกำลังใจจาก คุณอารีรัตน์ ดาวงษา ที่มีให้กับผู้เขียนตลอดเวลาเสมอมา

ในท้ายที่สุดนี้ขอขอบคุณ คุณวิชญ์พล ฟักแก้ว และพี่ ๆ น้อง ๆ ห้องปฏิบัติการเคลื่อนที่และควบคุมทุกคนที่คอยให้กำลังใจและความช่วยเหลือด้านในต่าง ๆ

ความสำเร็จในครั้งนี้ ขอมอบให้แด่ทุกท่านที่กล่าวมาข้างต้น หากมีสิ่งขาดตกบกพร่องหรือผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขออภัยเป็นอย่างสูง และผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์นี้คงจะมีประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจที่จะศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบและควบคุมระบบแฮปติกอินเตอร์เฟสได้บ้างไม่มากก็น้อย

ณัฐชัย โปธิ

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์	การออกแบบและควบคุมระบบแฮปติกอินเตอร์เฟส 1 องศาอิสระ
ผู้เขียน	นายณัฐชัย โปธิ
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. ธีระพงษ์ ว่องรัตนะไพศาล

บทคัดย่อ

250462

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการออกแบบและควบคุมระบบแฮปติกอินเตอร์เฟส โดยได้สร้างระบบต้นแบบระดับห้องทดลองซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์มาสเตอร์ (master device) 1 องศาอิสระ และอุปกรณ์สเลฟ (slave device) 1 องศาอิสระ ในการศึกษาได้ออกแบบตัวควบคุมด้านสเลฟเป็นแบบ PD บนพื้นฐานของการเคลื่อนที่อิสระเสมือนไม่มีการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมหรือวัตถุ ส่วนตัวควบคุมด้านมาสเตอร์ถูกออกแบบเป็นแบบ PD โดยคำนึงถึงการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมหรือวัตถุที่อยู่นิ่ง ในการศึกษาได้ทดสอบตัวควบคุมในการจับวัตถุที่มีความยืดหยุ่นต่าง ๆ หลายค่า พบว่าระบบที่ออกแบบสามารถทำงานได้ดีทั้งด้านการตามแรงและตำแหน่งเมื่อจับวัตถุที่มีความยืดหยุ่นสูง แต่ขาดเสถียรภาพเมื่อวัตถุมีความยืดหยุ่นต่ำ ระบบควบคุมแบบ passivity ได้ถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของระบบซึ่งสามารถแก้ปัญหาด้านเสถียรภาพของระบบได้ในระดับหนึ่งแลกกับประสิทธิภาพการตามแรงและตำแหน่งที่ลดลง

Thesis Title Design and Control of a One Degree of Freedom Haptic Interface System

Author Mr. Nattachai Pothi

Degree Master of Engineering (Mechanical Engineering)

Thesis Advisor Assoc. Prof. Dr. Theeraphong Wongratanaphisan

ABSTRACT

250462

This thesis involves the design and control of a haptic interface system. A lab-scale prototype consisting of a one degree of freedom master device and a one degree of freedom slave device was constructed. The slave PD controller is designed based on free motion while the master controller is designed taking account of interaction with static environment or object. Experiments were performed in order to test the performance of the system operating on various objects with different stiffness. The system is found to perform well, having good force and position tracking, when the object has low stiffness, but was unstable when stiffness of the object is high. Passivity control was then used to improve the system stability. The experimental results showed that the passivity control can help resolve stability issue to some degree but in the expense of tracking performance.

สารบาญ

		หน้า
กิตติกรรมประกาศ		ค
บทคัดย่อภาษาไทย		ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		จ
สารบาญตาราง		ฉ
สารบาญภาพ		ญ
อักษรย่อและสัญลักษณ์		ฒ
บทที่ 1	บทนำ	1
	1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	4
	1.3 ขอบเขตการวิจัย	4
บทที่ 2	แบบจำลองของระบบแฮปติกและพื้นฐานการควบคุม	5
	2.1 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแฮปติก	5
	2.1.1 แบบจำลองของมือผู้ควบคุม	6
	2.1.2 แบบจำลองของอุปกรณ์มาสเตอร์	7
	2.1.3 แบบจำลองของอุปกรณ์สเลฟ	7
	2.1.4 แบบจำลองของตัวควบคุม	8
	2.1.5 แบบจำลองของสิ่งแวดล้อม	9
	2.2 โครงสร้างทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ใช้ในการควบคุม	10
	2.3 การตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ	12
	2.3.1 วิธีเกณฑ์ของเราธ์ (Routh-Hurwitz)	12
	2.3.2 Lyapunov Stability	12
	2.3.3 Root locus Method	13
	2.4 เกณฑ์การตรวจสอบสมรรถนะ	13
	2.4.1 ผลการติดตามของสัญญาณคลาดเคลื่อน (Tracking Errors)	13

สารบาญ (ต่อ)

		หน้า
	2.4.2 ช่วงความถี่ที่ใช้ในการควบคุมระบบ (Control Bandwidth)	14
บทที่ 3	การออกแบบและการสร้างอุปกรณ์ต้นแบบแฮปติกอินเตอร์เฟส	15
	3.1 การออกแบบอุปกรณ์แฮปติก	15
	3.2 ชนิดของอุปกรณ์แฮปติก	16
	3.3 การออกแบบอุปกรณ์วัดแรง	18
	3.3.1 การออกแบบ gripper ในลักษณะคานยื่น	18
	3.3.2 การออกแบบวงจรไฟฟ้าและวงจรขยายสัญญาณ	20
	3.4 อุปกรณ์วัดตำแหน่ง	25
	3.5 อุปกรณ์ขับกระแส	25
	3.6 อุปกรณ์ขับ (actuator)	25
	3.7 dSpace System	26
	3.8 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ	28
บทที่ 4	การออกแบบตัวควบคุมและการทดสอบสมรรถนะ	30
	4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์แฮปติก	30
	4.1.1 สมการการเคลื่อนที่ของแขนควบคุมการเคลื่อนที่ทางด้านมาสเตอร์	30
	4.1.2 สมการการเคลื่อนที่ของ gripper	32
	4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างการควบคุมสำหรับใช้ในการควบคุมระบบ	33
	4.3 การออกแบบตัวควบคุมด้านสเลฟ	34
	4.4 การออกแบบตัวควบคุมด้านมาสเตอร์	38
	4.5 เสถียรภาพและสมรรถนะของระบบ	41
	4.6 การควบคุมแบบ Time-Domain Passivity Control	43
	4.6.1 คุณสมบัติ passivity ของระบบ	43
	4.6.2 แบบจำลอง 2-port network ของระบบแฮปติก	46
	4.6.3 เงื่อนไขเสถียรภาพเชิง Passivity	47

สารบาญ (ต่อ)

	หน้า
4.6.4 ตัวควบคุม Passivity	48
4.7 การนำไปใช้งานและผลการทดสอบ	50
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์	67
5.1 สรุปผลการวิจัย	67
5.2 วิจารณ์	68
บรรณานุกรม	69
ภาคผนวก	72
ภาคผนวก ก	73
ภาคผนวก ข	78
ประวัติผู้เขียน	84

สารบาญตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 พารามิเตอร์ของการออกแบบคานยื่น	19
4.1 พารามิเตอร์ของอุปกรณ์แฮปติก	33
ข1 ข้อมูลทั่วไปของมอเตอร์กระแสตรง	83

สารบาญภาพ

รูป		หน้า
1.1	ลักษณะของระบบแฮปติกสำหรับงานด้านคอมพิวเตอร์กราฟิก (virtual reality)	2
1.2	ลักษณะของระบบแฮปติกสำหรับการทำงานในระยะไกล (tele-operation)	2
1.3	การใช้งานระบบแฮปติกในด้านคอมพิวเตอร์กราฟิกเพื่อฝึกหัดทันตแพทย์	3
1.4	การใช้งานระบบแฮปติกอินเตอร์เฟสในการผ่าตัดระยะไกล	3
2.1	การเชื่อมต่อของส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบแฮปติก	6
2.2	แบบจำลองของมือผู้ควบคุม	6
2.3	อุปกรณ์มาสเตอร์ 7	
2.4	อุปกรณ์สเลฟ	8
2.5	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของของตัวควบคุม	8
2.6	แบบจำลองของสิ่งแวดล้อม	9
2.7	โครงสร้างในการควบคุมแบบ position error base	10
2.8	โครงสร้างในการควบคุมแบบ Force-position base	11
2.9	โครงสร้างในการควบคุมแบบ 4-channal architecture	11
2.10	เป็นพื้นที่ตำแหน่ง pole ที่มีเสถียรภาพบน *s*-plane	12
2.11	โครงสร้างระบบ negative feedback	13
3.1	อุปกรณ์ต้นแบบระบบแฮปติกอินเตอร์เฟสแบบ 1 องศาอิสระ	17
3.2	gripper ที่ออกแบบเป็นลักษณะคานยื่น	19
3.3	วงจร Wheatstone bridge ในลักษณะต่าง ๆ	21
3.4	อุปกรณ์วัดแรง	21
3.5	ความสัมพันธ์ระหว่างมวลทดสอบและแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากวงจร Wheatstone bridge	22
3.6	วงจรขยายและ Offset สัญญาณ	22

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลทดสอบและแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากวงจรขยายสัญญาณ	23
3.8 สัญญาณแรงที่มีสัญญาณรบกวนในช่วงความถี่สูง	24
3.9 แสดงการเปรียบเทียบสัญญาณแรงที่ผ่านการกรองสัญญาณรบกวน	24
3.10 ระบบ dSpace สำหรับใช้ Interface เพื่อควบคุมอุปกรณ์ภายนอก	27
3.11 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ต้นแบบระบบแฮปติกอินเตอร์เฟส	28
4.1 อุปกรณ์แฮปติกด้านมาสเตอร์	31
4.2 แผนผังวัตถุอิสระของอุปกรณ์แฮปติกด้านมาสเตอร์	31
4.3 อุปกรณ์สเลฟ	33
4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างการควบคุมของระบบ	34
4.5 บล็อกไดอะแกรมสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของ gripper ของอุปกรณ์สเลฟ	35
4.6 root locus ของตัวควบคุมแบบ P PD PI และ PID สำหรับด้านสเลฟ	36
4.7 ผลการตอบสนองต่อ step response ของตัวควบคุมแบบ PD ที่ใช้ควบคุมตำแหน่งด้านสเลฟ	37
4.8 ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของตัวควบคุมที่ใช้ควบคุมตำแหน่งด้านสเลฟ	37
4.9 บล็อกไดอะแกรมสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ด้านมาสเตอร์	38
4.10 root locus ของตัวควบคุมแบบ P PD PI และ PID สำหรับด้านมาสเตอร์	39
4.11 ผลการตอบสนองต่อ step response ของตัวควบคุมแบบ PD ที่ใช้ควบคุมด้านมาสเตอร์	40
4.12 ผลการตอบสนองเชิงความถี่ของตัวควบคุมแบบ PD ที่ใช้ควบคุมด้านมาสเตอร์	40
4.13 บล็อกไดอะแกรมของระบบแฮปติกสำหรับตรวจเสถียรภาพระบบจากผลกระทบของความแข็งของสิ่งแวดล้อม	41
4.14 ขอบเขตของเสถียรภาพของระบบเนื่องจากค่าความแข็งของสิ่งแวดล้อม K_e (N/m)	42
4.15 แบบจำลองของสิ่งแวดล้อมที่ประกอบด้วยสปริงและตัวหน่วง	42

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง B_e และ K_e ของวัตถุที่มีผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ	43
4.17 ตัวอย่างของระบบเครือข่าย N ที่ประกอบด้วยระบบย่อยจำนวน M ระบบ	44
4.18 ตัวอย่างของระบบ M-port network	46
4.19 แผนผังวัตถุอิสระแสดงทิศทางของแรงปฏิกิริยาและความเร็วของระบบแฮปติก	46
4.20 ระบบแฮปติกในลักษณะ 2-port network	47
4.21 ระบบ Tele-operator ในลักษณะ 2-port network	47
4.22 Passivity controller สำหรับระบบ Tele-operator	48
4.23 ผลการทดสอบกรณีทดสอบระบบกับวัตถุประเภทซิลิโคลนเมื่อไม่ใช้ PC (ก) ผลการติดตามของสัญญาณแรง (ข) ผลการติดตามของสัญญาณตำแหน่ง (ค) ค่า PO ของระบบ (ง) สัญญาณควบคุมมอเตอร์ด้านสเลฟ (จ) สัญญาณควบคุม passivity (PC)	51
4.24 ผลการทดสอบกรณีทดสอบระบบกับวัตถุแข็งเกร็งเมื่อไม่ใช้ PC (ก) ผลการติดตามของสัญญาณแรง (ข) ผลการติดตามของสัญญาณตำแหน่ง (ค) ค่า PO ของระบบ (ง) สัญญาณควบคุมมอเตอร์ด้านสเลฟ (จ) สัญญาณควบคุม passivity (PC)	53
4.25 การเชื่อมต่อตัวควบคุม passivity ให้กับระบบระบบแฮปติกอินเตอร์เฟส	54
4.26 ผลการทดสอบกรณีทดสอบระบบกับวัตถุแข็งเกร็งเมื่อใช้ PC (ก) ผลการติดตามของสัญญาณแรง (ข) ผลการติดตามของสัญญาณตำแหน่ง (ค) ค่า PO ของระบบ (ง) ค่าตัวหน่วงของตัวควบคุม passivity (จ) สัญญาณควบคุมมอเตอร์ด้านสเลฟ (ฉ) สัญญาณควบคุมจากตัวควบคุม passivity (PC) (ช) สัญญาณควบคุมเอาต์พุตสำหรับควบคุมมอเตอร์ด้านสเลฟ	55
4.27 ผลการติดตามของสัญญาณแรงและตำแหน่งการเคลื่อนที่ขยายในช่วงเวลาวินาทีที่ 2.2 ถึงวินาทีที่ 2.7 กรณีทดสอบกับวัตถุแข็งเกร็งเมื่อใช้ PC	56

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.28 ผลการทดสอบกรณีทดสอบระบบกับวัตถุแข็งเกร็งเมื่อใช้ PC และมีการ reset ค่า PO (ก) ผลการติดตามของสัญญาณแรง (ข) ผลการติดตามของสัญญาณตำแหน่ง (ค) ค่า PO ของระบบ (ง) ค่าตัวหน่วงของตัวควบคุม passivity (จ) สัญญาณควบคุมมอเตอร์ด้านสเลฟ (ฉ) สัญญาณควบคุมจากตัวควบคุม passivity (PC) (ช) สัญญาณควบคุมเอาต์พุตสำหรับควบคุมมอเตอร์ด้านสเลฟ	58
4.29 ผลการติดตามของสัญญาณแรงและตำแหน่งการเคลื่อนที่ขยายในช่วงเวลาวินาทีที่ 2.45 ถึงวินาทีที่ 2.95 กรณีทดสอบกับวัตถุแข็งเกร็งเมื่อใช้ PC และมีการ reset ค่า PO	59
4.30 ผลการทดสอบกรณีทดสอบระบบกับวัตถุอ่อนตัว (ซิลิโคลน) เมื่อใช้ PC และมีการ reset ค่า PO (ก) ผลการติดตามของสัญญาณแรง (ข) ผลการติดตามของสัญญาณตำแหน่ง (ค) ค่า PO ของระบบ (ง) ค่าตัวหน่วงของตัวควบคุม passivity (จ) สัญญาณควบคุมมอเตอร์ด้านสเลฟ (ฉ) สัญญาณควบคุมจากตัวควบคุม passivity (PC) (ช) สัญญาณควบคุมเอาต์พุตสำหรับควบคุมมอเตอร์ด้านสเลฟ	60
4.31 ผลการทดสอบค่าความแข็ง (stiffness) ของสปริงตัวอย่าง	62
4.32 กราฟแสดงดัชนีสมรรถนะของระบบเมื่อระบบไม่ใช้การควบคุม passivity (ก) ดัชนีสมรรถนะของการติดตามของสัญญาณแรงระหว่างแรงจากมือผู้ควบคุมและแรงปฏิกิริยาของ gripper ด้านสเลฟที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อม (ข) ดัชนีสมรรถนะของการติดตามของตำแหน่งการเคลื่อนที่ระหว่างแขนควบคุมการเคลื่อนที่ทางด้านมาสเตอร์และ gripper ด้านสเลฟ	63
4.33 กราฟแสดงดัชนีสมรรถนะของระบบเมื่อระบบใช้การควบคุม passivity (ก) แสดงดัชนีสมรรถนะของการติดตามของสัญญาณแรงระหว่างแรงจากมือผู้ควบคุมและแรงปฏิกิริยาของ gripper ด้านสเลฟที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อม (ข) แสดงดัชนีสมรรถนะของการติดตามของตำแหน่งการเคลื่อนที่ระหว่างแขนควบคุมการเคลื่อนที่ทางด้านมาสเตอร์และ gripper ด้านสเลฟ	65

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป		หน้า
ก1	Simulink สำหรับการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ด้านสเลฟ	76
ก2	Simulink สำหรับการควบคุมแรงทางด้านมาสเตอร์	76
ก3	Simulink สำหรับการควบคุม Passivity	77

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
F_m	แรงจากมือผู้ควบคุม	N
F_e	แรงปฏิกิริยาของ gripper ทางด้านสเลฟที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อม	N
F_{cm}	แรงจากสัญญาณควบคุมด้านมาสเตอร์	N
F_{cs}	แรงจากสัญญาณควบคุมด้านสเลฟ	N
x_m	ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนควบคุมการเคลื่อนที่ด้านมาสเตอร์	m
x_s	ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของ gripper ทางด้านสเลฟ	m
Z_h	อิมพิแดนซ์ของมือผู้ควบคุม	N/m
Z_m	อิมพิแดนซ์ของอุปกรณ์มาสเตอร์	N/m
Z_s	พิแดนซ์ของอุปกรณ์สเลฟ	N/m
Z_e	อิมพิแดนซ์ของสิ่งแวดล้อม	N/m
m_m	มวลของแขนควบคุมการเคลื่อนที่ด้านมาสเตอร์	Kg
m_s	มวลของ gripper ทางด้านสเลฟ	Kg
C	ตัวควบคุม	-
B_e	สัมประสิทธิ์ค่าความหน่วงของสิ่งแวดล้อม	N.s/m
K_e	สัมประสิทธิ์ค่าความแข็งของสิ่งแวดล้อม	N/m
ε	ความเครียดของวัสดุ	-
W	ความกว้างของคาน	m
L	ความยาวของคาน	m
t	ความหนาของคาน	m
E	ค่าโมดูลัสของยัง	N/m^2

อักษรย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
I	โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดคาน	m^4
R	ความต้านทานของสเตรนเกจ	Ω
J	โมเมนต์ความเฉื่อยของสกรู	Kg.m
l	ระยะพิช (Pitch) ของสกรู	m
r	ระยะรัศมีเฉลี่ยที่แรงลัพธ์กระทำกับสกรู	m
T_{cm}	แรงบิดของมอเตอร์ที่ควบคุมการเคลื่อนที่ทางด้านมาสเตอร์	N.m
T_{cs}	แรงบิดของมอเตอร์ที่ควบคุมการเคลื่อนที่ทางด้านสเลฟ	N.m
f	แรงที่เกิดจากความฝืด	N
N	แรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉาก	N
R	แรงลัพธ์ที่เกิดจากความฝืดและแรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉาก	N
ϕ	มุมระหว่างแรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉากและแรงลัพธ์	-
G_m	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบด้านมาสเตอร์	-
G_s	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบด้านสเลฟ	-
G	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแฮปติก	-
τ	เวลา	s
v	ความเร็ว	m/s
$E_{obsv}(.)$	ตัวสังเกตค่าพลังงานของระบบ	J
α	ตัวควบคุมแบบ passive	-
η	ค่าดัชนีสมรรถนะของระบบ	-