



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการควบคุมอุปกรณ์แฮพติคแบบแขนกลขนานขับเคลื่อนด้วยเส้นลวด

โดย ชีระพงษ์ ว่องรัตนะไพศาล

กุมภาพันธ์ 2561

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการควบคุมอุปกรณ์แฮพติคแบบแขนกลขนานขับเคลื่อนด้วยเส้นลวด

ธีระพงษ์ ว่องรัตนะไพศาล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นความเห็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

## บทคัดย่อ

แขนกลแบบขนานขับเคลื่อนด้วยเส้นลวดถือเป็นระบบแขนกลชนิดหนึ่งที่มีศักยภาพในการนำไปใช้ในงานที่หลากหลาย โดยมีข้อดีคือมีช่วงการทำงานที่กว้าง มีน้ำหนักที่เบา และมีองค์ประกอบในการผลิตใช้งานค่อนข้างง่าย อย่างไรก็ตามการใช้งานของแขนกลประเภทนี้ยังคงไม่เป็นที่แพร่หลายเนื่องจากมีความยากเชิงการออกแบบพื้นที่การใช้งานที่เหมาะสม รวมทั้งความซับซ้อนในด้านการควบคุมเนื่องจากเส้นลวดเป็นชิ้นส่วนที่สามารถส่งผ่านแรงได้เฉพาะแรงดึง โครงการนี้เป็นการพัฒนาออกแบบแขนกลขนานขับเคลื่อนด้วยเส้นลวด ซึ่งมีเป้าหมายในการนำไปใช้งานเป็นอุปกรณ์แฮนด์คิกสำหรับสร้างแรงเสมือนให้ผู้ที่ใช้งาน โดยดำเนินการออกแบบ รูปแบบของแขนกลแบบขนานขับเคลื่อนด้วยเส้นลวด วิเคราะห์พื้นที่ใช้งานและขนาดที่เหมาะสมของแขนกลสำหรับการใช้งานสร้างแรงเสมือนศึกษาด้าน kinematics และ dynamic ของระบบและศึกษาวิธีการควบคุมอุปกรณ์ให้สามารถสร้างแรงเสมือนตามสิ่งแวดล้อมจำลองที่กำหนดได้ โดยได้ทดสอบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในโครงการได้สร้างชุดทดสอบ ซึ่งสามารถใช้งานได้ทั้งการเคลื่อนที่แบบ 2 มิติและการเคลื่อนที่แบบ 3 มิติ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและทดสอบวิธีการควบคุมแบบต่างๆ ทั้งนี้โครงการลดขอบเขตเหลือการทดสอบเพียง 2 มิติ เนื่องจากขาดอุปกรณ์เซนเซอร์ที่สามารถตรวจวัดการเคลื่อนที่ของแขนกลได้เป็นบริเวณกว้างและมีความละเอียดถูกต้องที่สูง อย่างไรก็ตามผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้ด้วยความแม่นยำระดับหนึ่ง

## **Abstract**

Cable driven parallel robots have great potential for used in many applications. They have advantages for large working space, light weight and simple components that can be simply constructed. However, they are still not widely used as cables are not easy to deal with especially in systems that require precision. There are also difficulties in workspace analysis and control due to the fact that cables can supply only unilateral force. This project develops the design of a cable-driven parallel robot which is suitable for use as a haptic device which can generate virtual feedback force to the user. The design and workspace analysis have been studied to obtain suitable platform for the robot to work effectively to as a haptic device. Dynamics of the robot has been analyzed and control methodologies have been proposed. Simulation studies have been performed. A laboratory prototype was constructed to allow for performance test on 2- and 3-dimensional motion. In this project however the scope of the test was reduced to 2 dimensional motion due to lack of proper equipment that can measure large motion with fine precision. The results of test, nevertheless, show that the prototype, to some level, can work well with suitable precision.

## Executive Summary

Robots have been an integral part of manufacturing in many factories. Many of the robots employed are of serial type. With their huge presence, many research have much focused on this type of robot. The other type is parallel robot. Although still not widely used, researchers have put more attention to them. Parallel robots have some advantages over serial robots such as rigidity and payload to mass ratio. The disadvantages includes small workspace and singularities. Cable-driven parallel robot is a parallel robot that has cables as actuating members. They have great potential for used in many applications. They have advantages for large working space, light weight and simple components that can be simply constructed. However, they are still not widely used as cables are not easy to deal with especially in systems that require precision. There are also difficulties in workspace analysis and control due to the fact that cables can supply only unilateral force. This project focus on analysis and design of a cable-driven parallel robot which is suitable for use as a haptic device. A haptic device is a device that can generate virtual feedback force to user who operate on it. It can be useful for operations that local operator required force feedback from the remote system. The remote system can either be a physical system or a virtual system created in computer such as games. Here, design aspects of the cable driven parallel robot and its workspace analysis, both “wrench closure workspace (WCW)” and “wrench feasible workspace (WFW)”, have been studied in order to obtain suitable platform for the robot to work effectively to as a haptic device. Dynamics of the robot has been analyzed. Control methodologies have been studied for 3-cable and 4-cable systems. This includes individual PD length control and individual PD length control with null-space force to ensure the positive cable tension. Another control approach was also created to generate virtual environment to the user. Simulation studies have

been performed. A laboratory prototype was constructed to allow for performance test on 2- and 3-dimensional motion. However, in this project, the scope of the test was reduced to 2 dimensional motion due to lack of proper equipment that can measure large motion with fine precision. The results of the tests, nevertheless, show that the prototype, to some level, can work well with suitable precision.

# บทที่ 1

## บทนำ

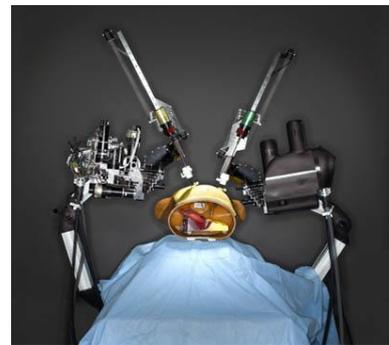
เทคโนโลยีแขนกล (robot manipulator) นอกจากจะเป็นปัจจัยสำคัญในการขับเคลื่อนการผลิตในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์คอมพิวเตอร์แล้ว ยังเป็นปัจจัยที่สำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีเฉพาะทางต่างๆ ตัวอย่างเช่น ในวิทยาการแพทย์สมัยใหม่ มีการใช้แขนกลในการช่วยการผ่าตัด ในอวกาศมีการใช้งานแขนกลสำหรับช่วยซ่อมแซมดาวเทียม ในอุตสาหกรรมอากาศยานมีการใช้แขนกลแบบขนาน (parallel manipulator) ขนาดใหญ่ในการจำลองพฤติกรรมการบิน (flight simulator) ในห้องทดลองทางวิทยาศาสตร์มีการใช้ระบบแขนกลสำหรับรองรับอุปกรณ์ที่มีความละเอียดสูง (micro-precision positioning) เป็นต้น รูปที่ 1.1 แสดงตัวอย่างการใช้งานแขนกล



Flight simulator



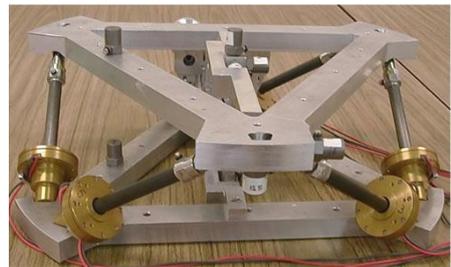
SurgiScope (ISIS)



Surgical robot (U. of



Surgical robot (Mazor



Vibration isolator

รูปที่ 1.1 ตัวอย่างระบบแขนกลที่ใช้งานใน

แขนกลที่ใช้งานในงานอุตสาหกรรม โดยมากเป็นแขนกลที่มีโครงสร้างแบบอนุกรม (serial manipulator) ซึ่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแขนกลประเภทนี้อยู่มาก ส่วนแขนกลแบบขนาน (parallel manipulator) นั้นยังไม่เป็นที่แพร่หลาย ยังมีแง่มุมที่ต้องการการวิจัยอีกมากก่อนที่จะนำไปใช้ได้อย่างกว้างขวาง ทั้งด้านการออกแบบ กลศาสตร์ พลศาสตร์ การควบคุม ในประเทศไทยยังคงขาดบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญทางด้านนี้เพียงพอ ทำให้ต้องนำเข้าอุปกรณ์ที่ต้องอาศัยเทคโนโลยีนี้จาก

ต่างประเทศ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแขนกลประเภทนี้เป็นงานวิจัยพื้นฐาน หากเราพัฒนาองค์ความรู้ด้านนี้ให้เกิดเชี่ยวชาญได้ เราจะสามารถนำเอาไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ ได้อย่างมาก นำไปสู่การลดการพึ่งพาผลิตภัณฑ์จากต่างประเทศ

งานประยุกต์แขนกล ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งงานหนึ่งคือแขนกลช่วยการผ่าตัด (robotic assisted surgery) ซึ่งเป็นยังถือหัวข้อในระดับวิจัย ยังพัฒนาไม่ถึงระดับนำออกมาใช้อย่างแพร่หลาย ที่ผ่านมามีเพียงไม่กี่บริษัทจากทั่วโลกที่มีการนำเสนอผลิตภัณฑ์ในรูปแขนกลช่วยผ่าตัด การใช้แขนกลช่วยผ่าตัดมีข้อดีคือมีความถูกต้องแม่นยำสูง ทำให้ลดความเจ็บปวดและจำกัดรอยแผลของคนไข้ ลดจำนวนแพทย์ผู้ช่วยผ่าตัด และช่วยลดความเมื่อยล้าของศัลยแพทย์ซึ่งต้องใช้เวลานานในการผ่าตัด สำหรับแขนกลแบบขนานนั้นเหมาะสำหรับงาน robotic assisted surgery อย่างยิ่งเนื่องจากมีความแข็งแรงและมั่นคง สามารถออกแบบให้มีขนาดเล็กกว่าแขนกลแบบอนุกรม และเหมาะกับการใช้งานที่มีพื้นที่จำกัด ในงานวิจัยแขนกลช่วยการผ่าตัดนั้น ศัลยแพทย์จะเป็นผู้ควบคุมแขนกลเพื่อทำการผ่าตัด ในการควบคุมแขนกลให้มีประสิทธิภาพนั้นแง่มุมที่สำคัญอย่างยิ่งแง่มุมคือการทำที่ศัลยแพทย์สามารถรับรู้ถึงความสัมผัสที่แขนกลกระทำกับคนไข้ขณะทำการผ่าตัด หากศัลยแพทย์ไม่สามารถรับรู้ถึงการสัมผัสเช่นเดียวกับการทำการผ่าตัดแบบปัจจุบันได้ อาจทำให้ศัลยแพทย์ควบคุมแขนกลผิดพลาดและเกิดอันตรายต่อคนไข้ มีนักวิจัยจำนวนหนึ่งได้ศึกษาแนวคิดการทำใช้แขนกลช่วยในการผ่าตัดที่เรียกว่า tele-surgery ซึ่งเป็นแนวทางการผ่าตัดที่ศัลยแพทย์ควบคุมแขนกลเรียกว่า “slave manipulator” ซึ่งทำการผ่าตัดผู้ป่วย ผ่านอุปกรณ์ควบคุมที่เรียกว่า “master” ซึ่งเป็นอุปกรณ์ “haptic” ที่ต้องสามารถสร้างแรงเสมือนจริงใกล้เคียงกับแรงที่ศัลยแพทย์จะรู้สึกจริงในกรณีที่ทำการผ่าตัดด้วยตัวเอง อุปกรณ์ haptic นี้เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญยิ่งต่อความสำเร็จของการใช้แขนกลช่วยผ่าตัดในอนาคต

คุณสมบัติที่ดีของอุปกรณ์ haptic คือจะต้องมีมวลน้อยซึ่งจะทำให้ผลของแรงทางพลศาสตร์ของกลไกเองมีค่าน้อย ไม่รบกวนต่องานหลักในการสร้างแรงเสมือน แนวคิดในการใช้กลไกลักษณะแขนกลแบบขนานขับเคลื่อนด้วยเส้นลวดเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถลดมวลของระบบได้ อย่างไรก็ตามการขับเคลื่อนแขนกลแบบขนานด้วยเส้นลวดนั้นยังมีแง่มุมที่ต้องศึกษาอีกมาก ทั้งด้านการออกแบบ การควบคุมการเคลื่อนที่ที่สามารถรองรับการสั่นสะเทือนของเส้นลวด และการควบคุมระบบภายใต้การควบคุมของผู้ใช้งาน (operator) ให้มีเสถียรภาพและสมรรถนะที่ดี

โครงการนี้มุ่งที่จะศึกษาแง่มุมการออกแบบและควบคุมอุปกรณ์ haptic ที่มีโครงสร้างเป็นแขนกลแบบขนานขับเคลื่อนด้วยเส้นลวด เพื่อสร้างองค์ความรู้พร้อมสำหรับประยุกต์ใช้งานด้านใช้แขนกลช่วยในการผ่าตัดและด้านอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป

## แขนกลแบบขนาน

แขนกลแบบขนานเป็นระบบที่ประกอบไปด้วยชิ้นส่วนกลไกที่ต่อกันเป็นวงรอบ โดยมีจุดยึดติดกับพื้นมากกว่า 1 จุด ซึ่งต่างจากแขนกลแบบอนุกรมซึ่งชิ้นส่วนต่างๆ ต่อกันแบบอนุกรมและมีชิ้นส่วนที่ยึดติดกับพื้นเพียงชิ้นเดียว รูปที่ 1.2 แสดงภาพตัวอย่างของแขนกลแบบขนานเปรียบเทียบกับแขนกลแบบอนุกรม แขนกลแบบขนานนั้น เป็นระบบที่มีความแข็งแรงและ stiffness สูง เนื่องจากมีชิ้นส่วนที่ยึดติดกับพื้นหลายจุด ทำให้ช่วยแบ่งเบาภาระจาก load ได้ดี ซึ่งจากคุณสมบัตินี้ ทำให้ระบบมีความถูกต้องแม่นยำสูง แขนกลแบบขนานถือเป็นระบบทางเครื่องกลที่มีความซับซ้อนในการควบคุมเนื่องจากเป็นระบบที่มีข้อกำหนดทาง kinematic สูงและไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) ทำให้การแก้ปัญหาคอมพิวเตอร์เชิง kinematic และ dynamic มีแง่มุมที่จะต้องพิจารณาอย่างมาก ซึ่งปัญหานี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างและรูปทรงของแขนกล โครงสร้างของแขนกลแบบขนานมีอยู่หลายรูปแบบ สามารถจำแนกได้ในหลายๆ แ่งมุม เช่น ตามองศาอิสระในการเคลื่อนที่ (2, 3, 4, 5, 6-DOF) ตามการเคลื่อนที่ของ end-effector (translation, rotational, mixed translation and rotation) ตามประเภทของข้อต่อ (revolute, prismatic, spherical) เป็นต้น ซึ่งในแต่ละแบบก็มีข้อดีข้อเสียต่างกันไป โดยคุณลักษณะที่พึงประสงค์ของระบบคือมีช่วงการเคลื่อนที่ที่กว้าง มีการเคลื่อนที่ที่ต่อเนื่อง การเคลื่อนที่ในแต่ละแกนมีความอิสระต่อกัน ส่วนคุณสมบัติที่ไม่พึงประสงค์คือ มีจุดที่เรียกว่า singularity หรือจุดบอดของการเคลื่อนที่ ซึ่งจะทำให้ระบบเคลื่อนที่ไม่ได้



รูปที่ 1.2 ก) แขนกลแบบขนาน (Hydra Power System Inc.) ข) แขนกลแบบอนุกรม (KUKA Robotic Corp.)

ผู้ที่อาจถือว่าเป็นคนออกแบบแขนกลแบบขนานคนแรกคือ James E. Gwinnett (1931) ซึ่งยื่นจดสิทธิบัตรเรื่อง amusement devices ซึ่งเป็นกลไกสร้างการเคลื่อนที่ของแขนกลขนาดใหญ่สำหรับจำลองการเคลื่อนที่ให้สอดคล้องกับภาพในโรงภาพยนตร์ ต่อมา Pollard (1940) ได้ออกแบบแขนกลแบบขนาน 5-DOF สำหรับพ่นสีในโรงงานอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามทั้งสองกลไกนี้ไม่ได้ถูกสร้างขึ้นมาจริง กลไกที่ถือได้ว่าเป็นจุดเริ่มต้นแห่งความสนใจของแขนกลแบบขนานนั้นถูกออกแบบโดย Stewart (1965) ซึ่งได้เสนอให้ใช้กลไก 6-DOF ของเขาในการจำลองการบินและหลังจากนำเสนอแล้วกลไกนี้ก็เป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลายในนามของ “Stewart Platform” อย่างไรก็ตามกลไกที่ Stewart นำเสนอนั้น ถูกแย้งว่าไม่ใช่กลไกใหม่แต่ประการใดเนื่องจาก Gough (1962) ได้ออกแบบกลไกซึ่งมีโครงสร้างใกล้เคียงกันและใช้งานอยู่จริงในการทดสอบอย่างมาก่อนหน้านั้นแล้วตั้งแต่ปี 1947 ดังนั้นในหลายครั้ง กลไกในลักษณะเดียวกันนี้ก็จะรู้จักกันในชื่อของ “Gough Platform”

หลังจากนั้นได้มีการออกแบบแขนกลแบบขนานมาใช้งานต่างๆ มากขึ้น ตัวอย่างเช่น 1) ในวิทยาการแพทย์ Brandt (1999) ใช้แขนกลแบบขนานมีชื่อเรียกว่า CRIGOS ในการช่วยผ่าตัด orthopedic surgery โดยใช้เป็นฐานที่รองรับส่วสำหรับเจาะกระดูก แขนกลนี้ทำให้ส่วสามารถเคลื่อนที่ไปได้ตามตำแหน่งและทิศทางที่ต้องการ 2) บริษัท ISIS Robotics ได้ออกแบบแขนกลขนานติดตั้งจากเพดาน สำหรับรองรับกล้องจุลทรรศน์ซึ่งใช้ในการช่วยผ่าตัด โดยกล้องจุลทรรศน์นี้สามารถเคลื่อนที่ไปได้ตามตำแหน่งและทิศทางที่ต้องการ และไม่กินพื้นที่ใช้งานด้านล่างที่มีทั้งผู้ป่วยแพทย์อยู่ 3) Shoham (2003) เสนอการใช้แขนกลขนานขนาดเล็กติดตั้งยึดติดกับกระดูกผู้ป่วย เพื่อช่วยในการนำทางอุปกรณ์ผ่าตัดกระดูกสันหลัง และลดผลของการเคลื่อนตัวของผู้ป่วย 4) ในด้านการจำลองการเคลื่อนที่ ได้มีทีมนักวิจัยหลายทีมพัฒนาระบบจำลองการเคลื่อนที่ของเครื่องบิน เพื่อใช้ในการฝึกการบินให้กับนักบินตั้งรายงานโดย Koevermans (1975) 5) ระบบแขนกลขนานชื่อ Turrest Motion Based Simulator (TMBS) ถูกพัฒนาขึ้นโดย US Army Center for Tank Research เป็นแขนกลแบบขนานขนาดใหญ่ ขับเคลื่อนโดยไฮดรอลิก สามารถรองรับน้ำหนักได้ 27 ตัน และสร้างอัตราเร่งได้สูงถึง 6g ใช้สำหรับทดสอบด้าน ergonomics และทดสอบระบบรองรับอาวุธของรถถัง 6) ระบบแขนกลขนานใช้จำลองการเคลื่อนที่ของม้าถูกพัฒนาขึ้นโดยสถาบัน Ecole Nationale d'Equitation เพื่อให้ผู้เรียนขี่ม้าได้ฝึกหัดและสร้างความคุ้นเคยก่อนเริ่มขี่ม้าจริง 7) บริษัท Giddings & Lewis Company (ชื่อเดิม) ได้พัฒนาแขนกลขนาน 6-DOF สำหรับงาน machine tools ชื่อ Variax เป็นเครื่องแรกในปี ค.ศ. 1994 ซึ่งบริษัทได้อ้างว่าระบบมีความมั่นคงแข็งแรง (stiffness) สูงกว่าระบบที่มีใช้ทั่วไปถึง 5 เท่า ปัจจุบันมีบริษัทอีกหลายๆ บริษัทที่เริ่มพัฒนาระบบนี้ขึ้นมาใช้งาน เช่น Corss Huller, Kovosvit Mas, Starrage-Heckert, Krauseco & Mauser, Comau เป็นต้น 8) หลายๆ บริษัทได้มีการออกแบบและผลิต positioning device ซึ่งใช้สำหรับวางอุปกรณ์ที่มีความละเอียดสูง หรือในกระบวนการ optical alignment ในห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์เช่น บริษัท Physik Instrumenye,

Micos, Alio, Hephaist เป็นต้น 9) บริษัท Fanuc Robotics ได้ออกแบบแขนกลแบบขนานมาใช้สำหรับหยิบจับชิ้นงาน ในอุตสาหกรรมยานยนต์ โดยแขนกลมีน้ำหนัก 100 kg แต่สามารถจับชิ้นงานได้ที่มีน้ำหนักมากถึง 190 kg ซึ่งนับว่ามีอัตราของภาระต่อน้ำหนักที่สูงมาก

### Inverse Kinematics

สำหรับตำแหน่งของ end-effector ของแขนกลที่กำหนดมา ปัญหา inverse kinematics คือการหาค่า coordinate ของ actuator แต่ละตัว ให้สอดคล้องกับตำแหน่งของ end-effector ซึ่งความซับซ้อนของปัญหาการวิเคราะห์ kinematic นั้น ขึ้นโดยตรงกับโครงสร้างของแขนกล

กำหนดให้  $X$  เป็น set ของ coordinate ที่บอกตำแหน่งของแท่นเคลื่อนที่ซึ่งเรียกว่า pose ให้  $A_i$  และ  $B_i$  เป็นจุดที่ปลายของก้านต่อของสาขา  $i$  ในแขนกลขนานยึดติดกับฐานและแท่นเคลื่อนที่ตามลำดับ ซึ่งสำหรับแต่ละสาขาของแขนกล เวกเตอร์  $\overline{A_i B_i}$  สามารถเขียนได้ในรูป

$$\overline{A_i B_i} = f_{1i}(X)$$

และหากให้  $\theta_i$  เป็น joint coordinate ที่เราต้องการหาค่า เราสามารถเขียน  $\overline{A_i B_i}$  ได้ในรูป

$$\overline{A_i B_i} = f_{2i}(X, \theta_i)$$

ดังนั้น เราสามารถหา  $\theta_i$  โดยแก้สมการ

$$f_{1i}(X) = f_{2i}(X, \theta_i) \quad (1.1)$$

หรือ

$$\theta_i = F_i(X) \quad (1.2)$$

สำหรับทุกๆ สาขาของแขนกลรวมกัน ซึ่งสมการดังกล่าวเป็นสมการ nonlinear และความยากง่ายในการแก้สมการขึ้นอยู่กับโครงสร้างของแขนกล ดังที่ได้กล่าวมา

### Forward kinematics

ปัญหา forward kinematics หรือ direct kinematics เป็นปัญหาที่กลับกันกับปัญหาแบบ inverse kinematics กล่าวคือเมื่อทราบค่าต่างๆ ของ joint coordinate  $\theta_i$  สิ่งที่ต้องการทราบคือ pose  $X$  ของแท่นเคลื่อนที่ ซึ่งรูปแบบสมการก็เป็นเช่นเดียวกับสมการ (1) และสามารถเขียนได้เป็น

$$X = G_i(\theta_i) \quad (1.3)$$

ในการหาคำตอบของการวิเคราะห์ทั้ง inverse kinematics และ forward kinematics สำหรับแขนกลแบบขนานทั่วไปนั้นจำเป็นต้องใช้ เทคนิคเชิงตัวเลขเข้ามาช่วยแก้สมการ ซึ่งในแต่ละตำแหน่ง

ของ post อาจต้องใช้เวลาานาน ทำให้การควบคุมแบบ real-time เป็นไปได้ยาก ปัจจุบันหัวข้อนี้ยังคงเป็นหัวข้อวิจัยที่เปิดกว้างและมีนักวิจัยหลายกลุ่มที่ยังคงค้นหาคำตอบ ตัวอย่างบทความตีพิมพ์ล่าสุด เช่น Li (2007), Richard (2007), Gallardo-Alvarado (2007) ฯลฯ

### Dynamic and Control

สมการการเคลื่อนที่ของแขนกลสามารถเขียนได้ในรูป

$$M(X)\ddot{X} + C(X, \dot{X}, \theta) + G(X) = F + F_{ext} \quad (1.4)$$

โดย  $M$  คือ inertia matrix,  $G$  คือ gravitational vector,  $F$  คือ generalized force จาก actuator และ  $F_{ext}$  คือ generalized force ที่เกิดจากแรงภายนอกกระทำ หากต้องการหาการเคลื่อนที่ตามสมการ (1.4) แล้ว จะต้องแก้สมการนี้ร่วมกับข้อจำกัดทาง kinematic ในสมการ (1.1) และเนื่องจาก สมการทั้งสองนั้นอยู่ในรูปของสมการ nonlinear โดยทั่วไปแล้วจะไม่สามารถหาคำตอบเชิง analytical ได้ จำต้องใช้เทคนิคทาง numerical เข้าช่วย

ในการควบคุมตำแหน่ง (position control) นั้นเมื่อมองในรูปตามสมการ (1.4) จะเห็นว่าหากแทนค่าต่างๆ ( $X, \dot{X}, \ddot{X}, \theta$ ) ที่เราต้องการลงไปด้านซ้ายของสมการ เราจะสามารถคำนวณหาแรง  $F$  ได้ แต่อย่างไรก็ตาม วิธีนี้จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อเราทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบเช่น น้ำหนัก จุดศูนย์กลางมวล ของชิ้นส่วนทุกชิ้นในแขนกล ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเราจะทราบค่าเหล่านี้โดยประมาณ ดังนั้นในแง่ของการออกแบบตัวควบคุมแล้ว ตัวควบคุมจะต้องสามารถรองรับค่าความไม่แน่นอนเหล่านี้ได้ในระดับหนึ่ง หัวข้อของการควบคุมถือเป็นอีกหัวข้อหนึ่งในการศึกษาแขนกลแบบขนาน และปัจจุบันยังคงเป็นหัวข้อวิจัยที่เปิดกว้าง มีผู้วิจัยหลายกลุ่มกำลังดำเนินการศึกษา ตัวอย่างบทความตีพิมพ์ในระยะ 2-3 ปีที่ผ่านมา เช่น Lopes and Almeida (2007), Giblin et.al. (2007), Bruzzone and Molino (2006)

### Haptic device and parallel manipulator

การพัฒนาอุปกรณ์ haptic ในรูปแบบของแขนกลแบบขนานนั้น มีการออกแบบโครงสร้างกลไกในแง่มุมต่างๆ จากนักวิจัยหลายกลุ่ม ตัวอย่างเช่น Kim et.al. (2003), Hwang et.al. (2006), Kim et.al. (2007), Kong et.al. (2008) ออกแบบอุปกรณ์ haptic แบบขนานโดยคำนึงถึงความสำคัญด้านจำนวนองศาอิสระและ workspace Lee et.al. (2002), Kim et.al. (2004), Kim et.al. (2005) คำนึงถึงแ่งมุมของ singularity Hwang et.al. (2007) คำนึงถึงแ่งมุมของ manipulability Ryu et.al. (2010) ออกแบบระบบ transmission ในอุปกรณ์ haptic โดยการใช้การขับเคลื่อนของเส้นลวดทดแทน ระบบเกียร์ซึ่งมี backlash สูง

การควบคุมถือเป็นหัวข้อสำคัญที่ทำให้ของระบบ haptic สามารถสร้างแรงได้เสมือนจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบที่มีโครงสร้างแบบขนานเนื่องจากเป็นระบบที่มีความซับซ้อนทั้งทางด้าน

กลศาสตร์ (kinematic) และพลศาสตร์ (dynamic) Lopes and Almeida (2006) ศึกษาการควบคุมระบบ haptic 6-DOF โดยวิธี acceleration based force impedance control ซึ่งควบคุม actuator แต่ละแกน แยกกัน Kim et.al (2007) ศึกษาการควบคุมระบบ haptic 3-DOF ที่มี actuator มากกว่า 3 ตัวโดยใช้ แรงที่ได้จาก actuator ที่มีจำนวนมากกว่าความจำเป็นนี้มาใช้ในการควบคุมให้ระบบมี stiffness ที่สูง Jinung and Kwon (2009) ศึกษาการควบคุมระบบ haptic 2-DOF แบบ 5-bar linkage โดยหลักการ power flow Ando et.al. (2004) ใช้วิธีการควบคุมแบบ model reference adaptive control เพื่อชดเชย แรงเสียดทานในอุปกรณ์ haptic 6-DOF Karkoub et.al. (2004) ศึกษาการควบคุมอุปกรณ์ haptic โดยใช้สัญญาณจากอุปกรณ์วัดแรงในการปรับจูน PID controller โดยวิธี Neural Network Kwon et.al. (1999) ใช้ disturbance observer สำหรับตรวจค่า nonlinear effect ของระบบและทำการชดเชยในการ ควบคุมอุปกรณ์ haptic สำหรับหุ่นยนต์ช่วยผ่าตัด

### Wire-driven haptic device

สำหรับอุปกรณ์ haptic ที่สร้างจากแขนกลแบบขนานขับเคลื่อนด้วยเส้นลวดนั้น มีทีมนักวิจัย จำนวนหนึ่งที่ได้ทำการศึกษา เหตุผลหลักของการใช้เส้นลวดแทน linkage ก็เพื่อลดมวลของระบบและ หากออกแบบให้เหมาะสมยังสามารถลดแรงเสียดทานได้ด้วย Ferlay and Gosselin (2008) ได้ออกแบบ อุปกรณ์ haptic 3-DOF โดยใช้เส้นลวด ผสมกับ linkage เพื่อให้มีคุณลักษณะทาง isotropy และ homogeneity ที่ดี Otis et.al. (2008) พัฒนาระบบช่วยฝึกการเดินชื่อ “Cable-Driven Locomotion Interface (CDLI) walker” ซึ่งมีฐานเป็นอุปกรณ์ haptic 6-DOF ขับเคลื่อนด้วยเส้นลวด Sabater et.al (2004, 2005, 2007) ออกแบบอุปกรณ์ haptic ตามโครงสร้างของแขนกลขนานแบบ Stewart platform โดยใช้เส้นลวดแทน linear actuator Ferraresi et.al. (2006) ออกแบบอุปกรณ์ haptic 6-DOF ขับเคลื่อน ด้วยเส้นลวดและนิวเมติกส์ งานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบสามารถอ้างอิงเพิ่มเติมได้จาก Ferraresi et.al. (2007), Williams II (2008), Park et.al. (2007) เป็นต้น

ในด้านการควบคุมสำหรับอุปกรณ์ haptic แบบแขนกลขนานขับเคลื่อนด้วยเส้นลวดนั้น ยังไม่มี งานวิจัยที่ศึกษาและทำการเผยแพร่อย่างเด่นชัด จะมีที่เกี่ยวข้องกับแขนกลขนานขับเคลื่อนด้วยเส้นลวด (ไม่ใช่อุปกรณ์ haptic) เช่น Kawamura et.al. ศึกษาการควบคุมแขนกลขนานขับเคลื่อนด้วยเส้นลวด “FALCON-7” ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง โดยการควบคุมแบบ PD Diao and Ma (2009) วิเคราะห์การสั่นสะเทือนในระบบแขนกลขนาน 6 DOF ขับเคลื่อนด้วยเส้นลวด ซึ่งมีข้อสรุปเบื้องต้นว่า การสั่นสะเทือนของเส้นลวดในแนวขวางนั้นมีผลน้อยกว่าการสั่นสะเทือนในแนวยาวของเส้นลวด ผลงานที่เกี่ยวข้องอื่นๆ มักจะไม่แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับการควบคุมโดยเฉพาะด้านเสถียรภาพเมื่อใน ระหว่างการสัมผัสกับ operator งานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะศึกษาและสร้างองค์ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับด้าน เหล่านี้ขึ้น

ทั้งนี้ยังพบงานวิจัยอื่นๆ ที่นำแกนกลแบบขนานขับเคลื่อนด้วยเส้นลวดมาใช้ประโยชน์ ในงานอื่นๆ เช่น Ottaviano et.al. (2008) ได้ออกแบบแกนกลแบบขนานขับเคลื่อนด้วย เส้นลวดมาใช้สำหรับพยุงคนสูงอายุในการเปลี่ยนทางนั่ง-ยืน Pervez et.al. (2007) ศึกษาาระบบ ควบคุมอัตโนมัติสำหรับอุปกรณ์ช่วยเดิน Otis et.al. (2009) ศึกษาาระบบแทนเดินซึ่งขับเคลื่อนด้วยเส้นลวด สามารถประยุกต์ใช้กับงานฟื้นฟูสภาพผู้ป่วยได้ Honma et.al. (2002) ศึกษาาระบบระบบฟื้นฟูสมรรถภาพของขาโดยใช้แกนกลขับเคลื่อนด้วยเส้นลวด เป็นต้น

### วัตถุประสงค์ของโครงการ

- เพื่อพัฒนาออกแบบอุปกรณ์แฮพติกแบบแกนกลขนานขับเคลื่อนด้วยเส้นลวด
- เพื่อพัฒนาหลักการควบคุมการเคลื่อนที่และแรงของอุปกรณ์แฮพติกแบบแกนกลขนานขับเคลื่อนด้วยเส้นลวด

### ขั้นตอนในการศึกษาวิจัย

#### ขั้นตอนที่ 1 วิเคราะห์ออกแบบและสร้างแกนกลแบบขนานขับเคลื่อนด้วยเส้นลวด

ในการวิเคราะห์จะมีการพิจารณาแง่มุมด้าน workspace การคำนึงถึงการเลือกและการติดตั้ง sensor และความเหมาะสมในการทำงานแบบอุปกรณ์ haptic โดยออกแบบโดยใช้โปรแกรม CAD และสร้างชิ้นงานโดยใช้เครื่องกัด CNC ที่ความละเอียดถูกต้องสูง

#### ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาและทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่ของแกนกลขนานขับเคลื่อนด้วยเส้นลวด

ในขั้นตอนนี้เป็นการวิเคราะห์สมการการเคลื่อนที่ของระบบ ในรูปแบบที่ input คือแรงหรือความยาวของเส้นลวด ส่วน output คือการเคลื่อนที่ของแกนกล

#### ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาและทดสอบการควบคุมแรงของแกนกลขนานขับเคลื่อนด้วยเส้นลวดเพื่อพัฒนาเป็นอุปกรณ์ haptic

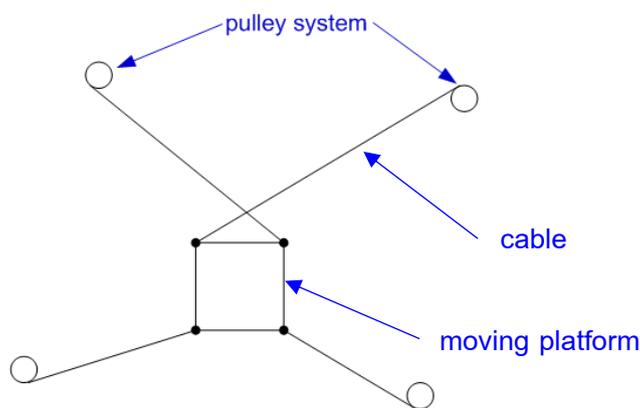
ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาวิธีการควบคุมทั้งในแง่มุมของการเคลื่อนที่และในแง่มุมของการสร้างแรงเสมือนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ผ่านไปใกล้กับสิ่งแวดล้อมจำลอง

## บทที่ 2

### การออกแบบแขนกลแบบขนานขับเคลื่อนด้วยเส้นลวด

แขนกลแบบขนานกับขับเคลื่อนด้วยเส้นลวดเป็นระบบที่ถือว่ามีความพิเศษเฉพาะ เนื่องจากโดยทั่วไปในระบบเครื่องจักรกลที่สร้างกำลังมักจะเป็นกลไกที่ทำจากชิ้นส่วนส่งกำลังที่มีลักษณะแข็งเกร็ง ซึ่งสามารถสร้างได้ทั้งแรงดึงและแรงผลัก ต่างจากเส้นลวดซึ่งสร้างแรงเฉพาะในแนวแรงดึงเท่านั้น จึงมีความเฉพาะตัวทั้งในแง่มุมของการออกแบบ รวมทั้งความยากในการควบคุม

แขนกลแบบขนานขับเคลื่อนด้วยเส้นลวด (รูปที่ 2.1) ประกอบไปด้วย 1) moving platform ทำหน้าที่เป็นตัวจับหัว tool ของแขนกล 2) ชุดขับเคลื่อนเส้นลวด (pulley system) ทำหน้าที่เป็นตัวสร้างแรงดึงในเส้นลวด และ 3) เส้นลวด (หรือสายเคเบิล) สำหรับเส้นลวดมีได้ตั้งแต่ 2 เส้นเป็นต้นไป ระบบขับเคลื่อนด้วยเส้นลวดมีข้อดีคือสามารถสร้างแรงที่ใช้ในการขับเคลื่อน moving platform ในช่วงกว้าง ทำให้มีพื้นที่การทำงานที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวขับเคลื่อนแบบวัตถุแข็งเกร็ง อีกทั้งชิ้นส่วนต่างๆ ของระบบถือว่าเป็นชิ้นส่วนที่สร้างขึ้นมาได้ง่ายไม่ซับซ้อน แต่ทั้งนี้ในการออกแบบที่ใช้งานให้สมบูรณ์จำเป็นจะต้องมีจำนวนเส้นลวดมากกว่าจำนวนองศาอิสระของการเคลื่อนที่เนื่องมาจากเงื่อนไขของการขับเคลื่อนได้ในทิศทางเดียวของเส้นลวด ซึ่งอาจมองได้ว่าเป็นข้อจำกัดของระบบนี้เนื่องจากโดยทั่วไปเราอยากจะให้ระบบมีจำนวนตัวขับเคลื่อนเท่ากับจำนวนองศาอิสระของการเคลื่อนที่เพื่อลดค่าใช้จ่ายของระบบลง อีกแง่หนึ่งของความยากของระบบประเภทนี้คือการควบคุมแรงดึงในเส้นลวด เนื่องจากว่าตัว moving platform ถูกขับเคลื่อนด้วยแรงจากสายเคเบิล ข้อที่จำเป็นต้องระวังคือเส้นลวดอาจมีการหย่อนตัว ทำให้ระบบสูญเสียองศาอิสระการเคลื่อนที่ หรือกรณีที่ เส้นลวดมีแรงดึงน้อยเกินไป อาจทำให้ค่า stiffness โดยรวมของระบบมีค่าน้อยเกินไปจนขาดประสิทธิภาพในการควบคุม



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของแขนกลแบบขนานขับเคลื่อนด้วยเส้นลวด

ในการออกแบบเพื่อนำไปสร้างนั้นมีแง่มุมที่จะต้องตัดสินใจ คือ 1) ตำแหน่งที่จะติดตั้งระบบ pulley system 2) ขนาดของ moving platform 3) ตำแหน่งที่จะยึดเส้นลวดบน moving platform ซึ่งค่าต่างๆ

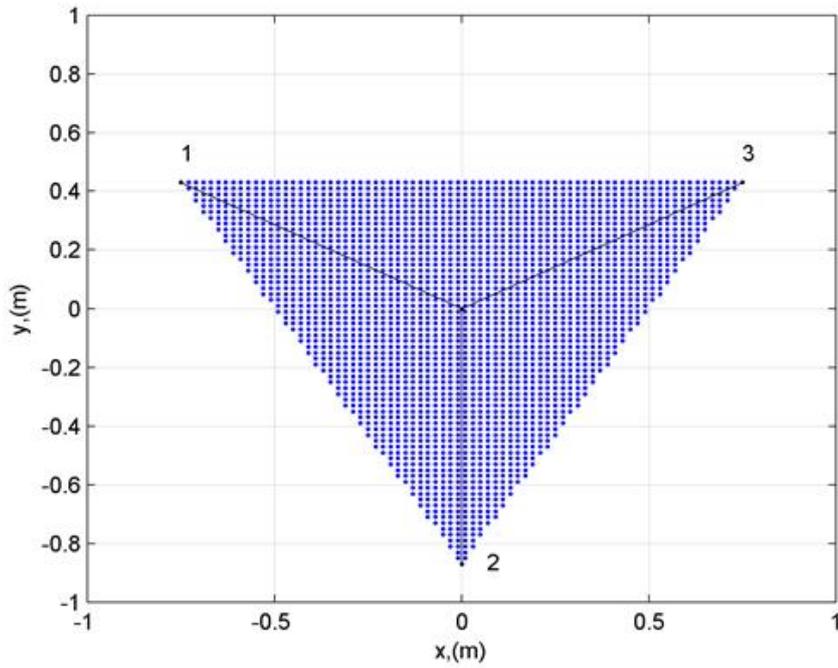
ที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่ใช้งาน (workspace) ของแขนกลที่ต้องการ สำหรับแขนกลแบบขนานขับเคลื่อนด้วยเส้นลวดจะมีแง่มุมการออกแบบ workspace ที่ต่างจากแขนกลขนานโดยทั่วไป โดยหลักแล้ว workspace มีอยู่ 2 ประเภทคือ wrench closure workspace (WCW) และ wrench feasible workspace (WFW) WCW หมายถึงพื้นที่การทำงานที่ moving platform สามารถเคลื่อนที่ไปได้โดยสามารถรับ (หรือสร้าง) แรงบิดและแรงเชิงเส้นใดๆ ที่เกิดขึ้นบน moving platform ได้ในกรณีที่แรงดึงเส้นลวดมีขนาดได้ไม่จำกัด workspace ประเภทนี้สามารถนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์เบื้องต้นในแง่มุมพื้นที่ทำงานของแขนกลที่จะสร้างขึ้นมา ซึ่งควรจะอยู่ใน workspace นี้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากในทางปฏิบัติขนาดของ actuator มีขนาดจำกัด การวิเคราะห์ WCW จึงอาจจะไม่เหมาะสมนัก ส่วน workspace แบบ WFW หมายถึงพื้นที่การทำงานที่แขนกลสามารถสร้างแรงเชิงเส้นและแรงบิดได้ตามที่กำหนด โดยแรงดึงในเส้นลวดจะมีค่าไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ การวิเคราะห์ลักษณะนี้จะเหมาะสมในทางปฏิบัติแต่จะมีความซับซ้อนมากกว่าการวิเคราะห์ WCW

ในโครงการได้มีการตั้งเป้าที่จะสร้างอุปกรณ์ haptics ที่สามารถสร้างแรงเคลื่อนที่ได้ใน 3 มิติ อย่างไรก็ตามเนื่องจากความซับซ้อนในแง่มุมของ workspace ของกลไก อีกทั้งในแง่มุมของอุปกรณ์วัดต่างๆ สำหรับการทดสอบการเคลื่อนที่ใน 3 มิติมีความซับซ้อนมาก ทำให้ในโครงการวิจัยนี้ได้ปรับ scope ของโครงการเป็น 2 มิติ โดยในการออกแบบได้คำนึงถึงอุปกรณ์แฮพติก ที่สามารถสร้างแรงเสมือนได้ในระนาบมีขนาดโครงสร้างประมาณ 1.0 x 1.0 เมตร สามารถสร้างแรงเสมือนได้ประมาณ 30 นิวตันรอบทิศทาง

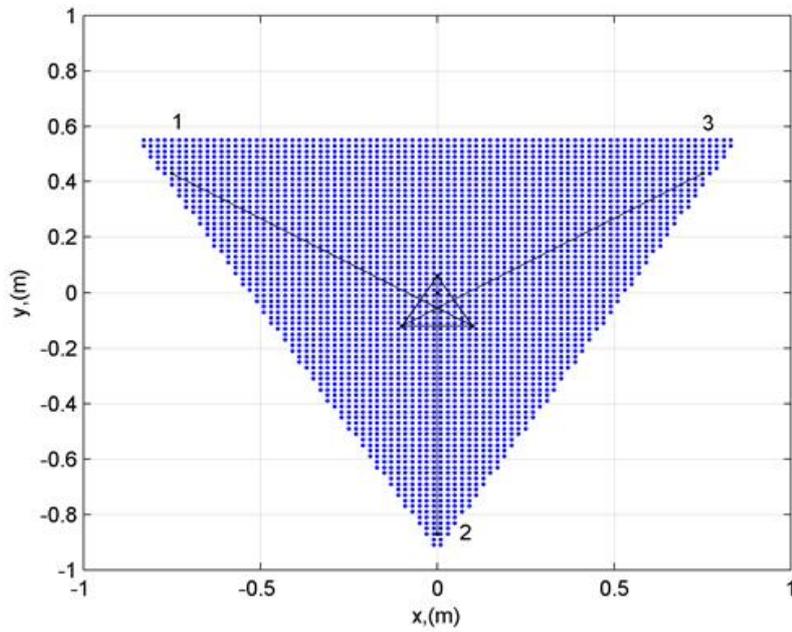
## 2.1 พื้นที่ทำงานแบบ Wrench Closure Workspace (WCW)

### 2.1.1 ระบบแบบ 3 เส้นลวด

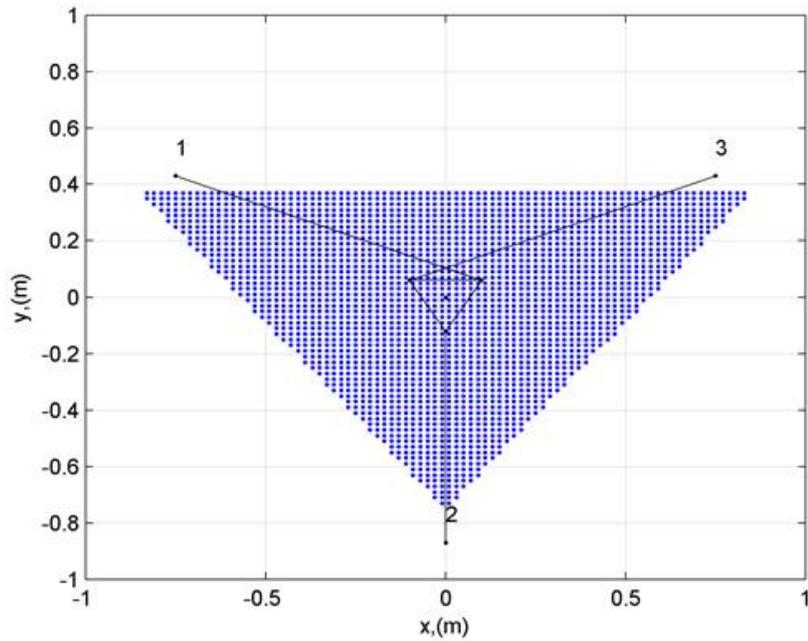
เริ่มต้นจากการจำลองระบบที่มี 3 เส้นลวดโดยตั้งตัวฐาน 3 จุดระยะห่างประมาณ 1.2 เมตร ในกรณีที่ 1 กำหนด platform เป็นแบบจุดซึ่งระบบจะสามารถสร้างแรงได้เฉพาะเชิงเส้นไม่สามารถสร้างแรงบิดได้ รูปที่ 2.2 แสดงถึงพื้นที่การทำงานแบบ WCW ซึ่งจะเห็นว่าระบบนี้ มีพื้นที่การทำงานอยู่ภายในเส้นรอบฐานทั้ง 3 ดังนั้นเราจึงไม่สามารถกำหนดพื้นที่การทำงานนอกจากฐานทั้งสามได้ ในกรณีที่ฐานของ moving platform เป็นแบบแผ่น workspace จะขึ้นอยู่กับ การติดตั้งเส้นลวดกับฐาน รูปที่ 2.3 แสดงถึงพื้นที่การทำงานแบบ WCW ในกรณีที่การวางตัวของฐาน moving platform สลับทิศทางกลับการวางตัวของจุดยึดเส้นลวดบนพื้น (ground) โดยคำนึงเฉพาะการสร้างแรงเชิงเส้น จะเห็นว่าพื้นที่การทำงานในกรณีนี้ใกล้เคียงกับกรณีในรูป 2.2 อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบในกรณีที่ยึดเส้นลวดกับ moving platform แตกต่างกันดังรูปที่ 2.4 พื้นที่การทำงานก็จะมีรูปร่างเปลี่ยนไป



รูปที่ 2.2 WCW ของระบบ 3 เส้นลวด ที่มี moving platform เป็นจุด (case



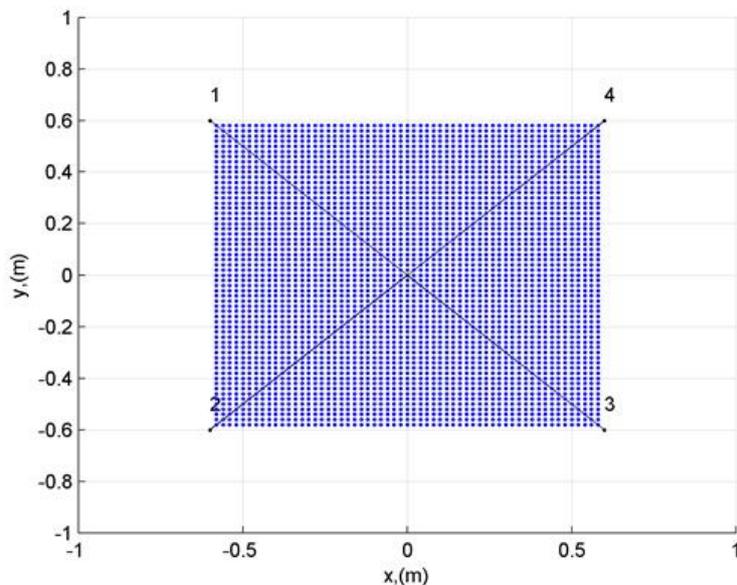
รูปที่ 2.3 WCW ของระบบ 3 เส้นลวด ที่มี moving platform เป็นแผ่น (case 2)



รูปที่ 2.4 WCW ของระบบ 3 เส้นลวด ที่มี moving platform เป็นแผ่น (case 3)

### 2.1.2 ระบบแบบ 4 เส้นลวด

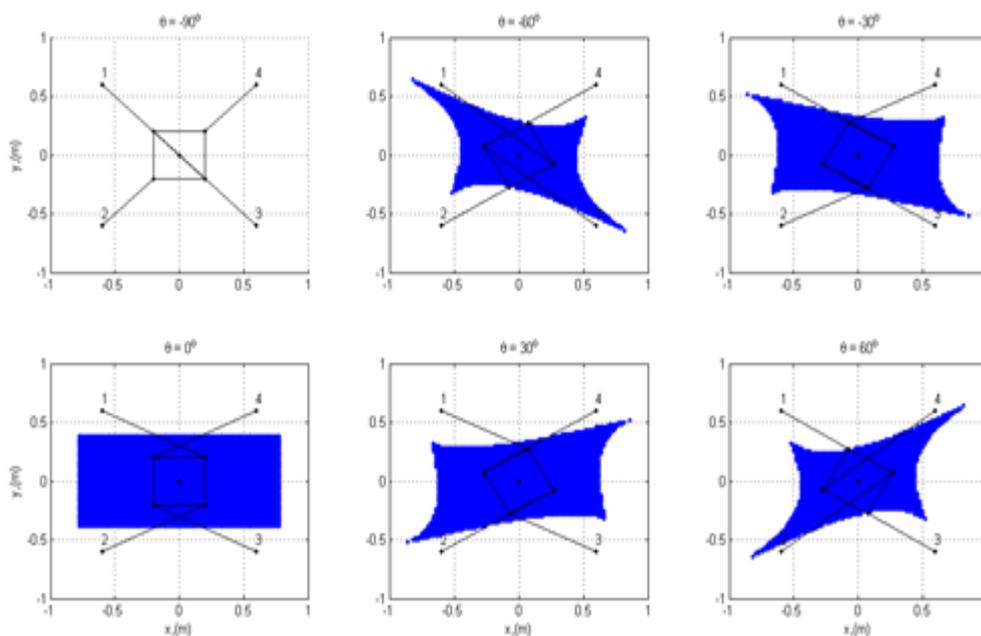
แบบที่ 2 เป็นการจำลองระบบที่ใช้ 4 เส้นลวด ซึ่งมีฐานประมาณ 1.2x1.2 เมตร ในกรณีที่ 1 กำหนด platform เป็นแบบจุดซึ่งในกรณีนี้ระบบจะสามารถสร้างแรงได้เฉพาะเชิงเส้นไม่สามารถสร้างแรงบิดได้



รูปที่ 2.5 WCW ของระบบ 4 เส้นลวด ที่มี moving platform เป็นจุด

รูปที่ 2.5 แสดง WCW ของระบบนี้ซึ่งคล้ายเคียงกับระบบ 3 เส้นลวดคือพื้นที่การทำงานจะอยู่ภายในเส้นรอบกรอบของฐานที่ยึดติดกับพื้น

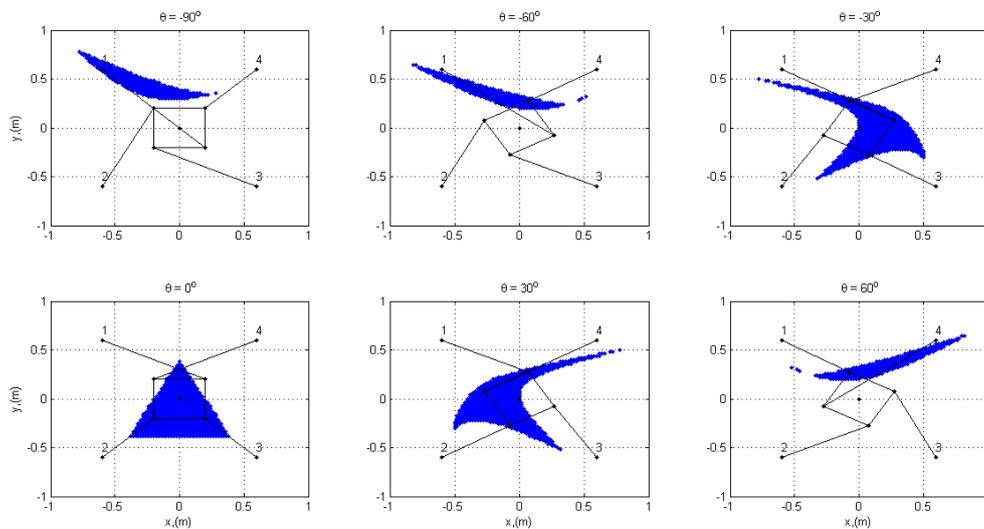
สำหรับกรณีพื้นฐานของ moving platform เป็นแบบแผ่น เราจะคำนึงถึงความสามารถทั้งการสร้างแรงเชิงเส้นและแรงบิด ในกรณีนี้ workspace จะขึ้นอยู่กับ การติดตั้งเส้นลวดกับ moving platform ซึ่งจะเป็นไปได้อย่างดีในการติดตั้งหลากหลายกว่ากรณี 3 เส้นลวด รูปที่ 2.6-2.9 แสดงถึงพื้นที่การทำงานแบบ WCW เปรียบเทียบกัน ในหลายๆ กรณีที่ติดตั้งจุดยึดเส้นลวดบน moving platform ต่างกัน ในรูปที่ 2.6 เป็นการผูกเส้นลวดกับ moving platform แบบไขว้โดยคู่ของจุดที่ 1 และ 4 และคู่ของจุดที่ 2 และ 3 สลับด้านกัน จะเห็นว่าการวางตัวเชิงมุมของ moving platform มีผลต่อพื้นที่การทำงานอย่างมาก ดังนั้นหากในระบบจำเป็นต้องมีการสร้างการเคลื่อนที่ที่มีมุมของ moving platform เปลี่ยนไปจำเป็นต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้อย่างดีในการสร้างแรงซึ่งในกรณีนี้จะต้องนำผลในแต่ละรูปกราฟมาทำการ intersection ในรูปที่ 2.6 ด้านซ้ายบนจะเห็นว่า เมื่อ moving platform มีการวางตัว  $-90$  องศา workspace จะไม่หลงเหลืออีกต่อไปดังนั้นในกรณีวางผูกเส้นลวดแบบนี้ ระบบจะไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานที่มีการขับเคลื่อนแผ่น moving platform ในเชิงมุมที่มากเกินไปหรือใกล้เคียง  $-90$  องศาได้



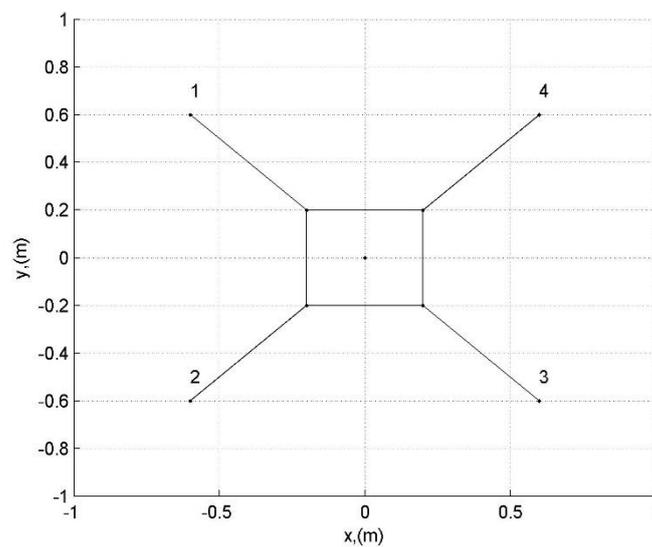
รูปที่ 2.6 WCW ของระบบ 4 เส้นลวด ที่มี moving platform เป็นแผ่น (case 1)

รูปที่ 2.7 แสดงถึงพื้นที่การทำงาน WCW ของระบบ 4 เส้นลวดที่มีการผูกลวดคู่จุดที่ 1 และ 4 ไขว้กัน ในกรณีนี้จะเห็นได้ว่าพื้นที่การทำงานลดลงเป็นอย่างมาก รวมทั้งยังมีรูปทรงที่คาดเดายากเมื่อมีการเปลี่ยนการวางตัวของ moving platform ในกรณีนี้ก็จะเห็นวาระบบจะไม่เหมาะสมกับการนำไปขับเคลื่อนฐานในงานที่ต้องการให้ moving platform บนตัวด้วยระบบใน กรณีที่ 1 จะเหมาะสมกว่า

ประเด็นหนึ่งที่น่าสนใจคือในกรณีที่มีการผูกเส้นลวดเข้ากับ moving platform อย่างง่ายดังรูปที่ 2.8 โดยบังคับให้การวางตัวของ moving platform อยู่ในแนวราบ ปรากฏว่าพื้นที่ทำงาน WCW กลายเป็นศูนย์ นั่นคือไม่มีพื้นที่ใดเลยที่สามารถสร้างแรงเชิงเส้นและแรงบิดได้ตามที่กำหนดแบบสุ่ม



รูปที่ 2.7 WCW ของระบบ 4 เส้นลวด ที่มี moving platform เป็นแผ่น (case 2)



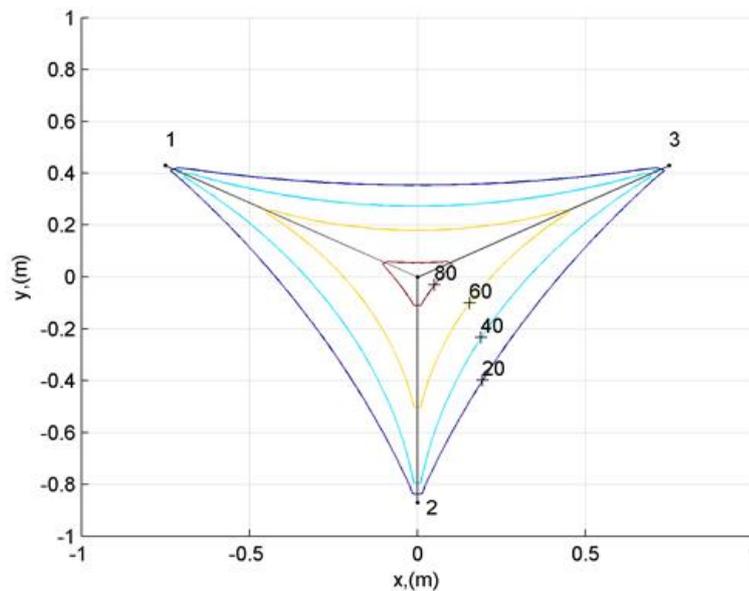
รูปที่ 2.8 WCW ของระบบ 4 เส้นลวด ที่มี moving platform เป็นแผ่น (case 3)

## 2.2 พื้นที่ทำงานแบบ Wrench Feasible Workspace (WFW)

สำหรับพื้นที่การทำงานลักษณะนี้จะสอดคล้องกับการใช้งานมากขึ้นเนื่องจากขนาดแรงดึงในเส้นลวดซึ่งต้องสร้างจากตัวขั้วนั้นมีขนาดที่จำกัด ในการออกแบบได้กำหนดให้ค่าแรงดึงเชือกไม่เกิน 100 นิวตัน โดยจะคำนึงถึงรูปแบบต่างๆ ในการติดตั้งเส้นลวดดังต่อไปนี้

### 2.2.1 ระบบ 3 เส้นลวด

รูปที่ 2.9 แสดงถึงพื้นที่ทำงานแบบ WFW ของระบบ 3 เส้นลวดที่มี moving platform เป็นแบบจุด กราฟที่แสดงเป็นกราฟ contour plot ที่บ่งบอกถึงระดับของความสามารถในการสร้างแรงเชิงเส้นรอบทิศทางได้ ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงใกล้ๆ กับกรอบฐาน ระบบจะสร้างแรงได้ประมาณ 20 นิวตันรอบทุกทิศทาง และสำหรับบริเวณที่เคลื่อนตัวเข้าใกล้กับจุดกึ่งกลางของฐานก็จะสามารถสร้างแรงได้มากขึ้นตามลำดับ จนถึงประมาณ 80 นิวตัน ซึ่งกราฟนี้มีประโยชน์สำหรับกำหนดพื้นที่การทำงานตามลักษณะของงานที่ตั้งขึ้นมา ตัวอย่างเช่นหากต้องการให้ระบบสามารถสร้างแรงรอบทิศทางได้ประมาณ 60 นิวตัน ก็ต้องกำหนดจุดที่จะทำงานอยู่ภายในกรอบสี่เหลี่ยม สำหรับในกรณีนี้ที่ moving platform เป็นแบบแผ่น โดยการผูกเส้นลวดกับ moving platform เป็นแบบสลัดด้านตามรูปที่ 2.10 และบังคับการวางตัวเชิงมุมของแผ่น moving platform ไม่ให้มีการเปลี่ยนแปลงนั้น ปรากฏว่ามีลักษณะของพื้นที่ทำงาน WFW ใกล้เคียงกัน

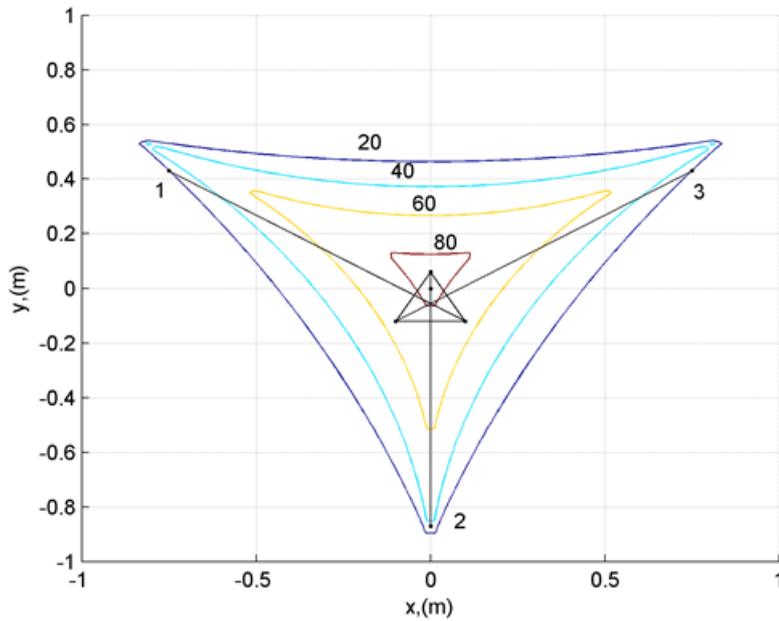


รูปที่ 2.9 WFW ของระบบ 3 เส้นลวด ที่มี moving platform เป็นจุด แรงดึงเชือกสูงสุดทุกเส้น

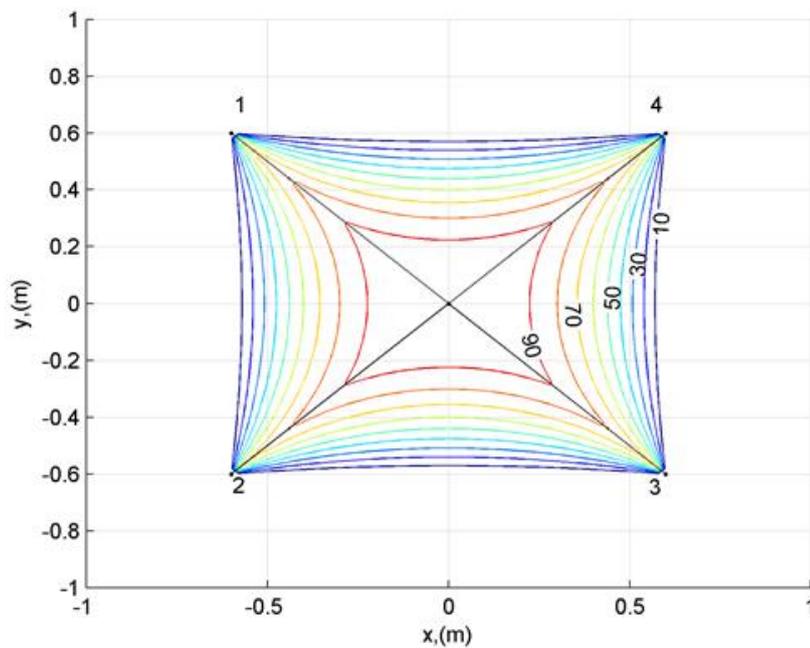
### 2.2.2 ระบบ 4 เส้นลวด

รูปที่ 2.11 แสดงถึงพื้นที่ทำงานแบบ WFW ของระบบ 4 เส้นลวดที่มี moving platform เป็นแบบจุด กราฟที่แสดงเป็นกราฟ contour plot ที่บ่งบอกถึงระดับของความสามารถในการสร้างแรงเชิงเส้นรอบทิศทางได้ ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงใกล้ๆกับกรอบฐานของระบบจะสร้างแรงได้ประมาณ 10 นิวตันรอบทิศทาง เมื่อเงื่อนไขแรงดึงในเส้นลวดทุกเส้นมีค่าไม่เกิน 100 N และสำหรับบริเวณที่เคลื่อนตัวเข้าใกล้กับจุด

กึ่งกลางของฐานก็จะสามารถสร้างแรงได้มากขึ้นตามลำดับ จนถึงประมาณ 90 นิวตัน ในบทต่อไป จะใช้แบบจำลองในรูปแบบ 4 เส้นนี้สำหรับการศึกษาการควบคุมแบบต่างๆ



รูปที่ 2.10 WFW ของระบบ 3 เส้นลวด ที่มี moving platform เป็นแผ่น แรงดึงเชือกสูงสุดทุกเส้น 100N

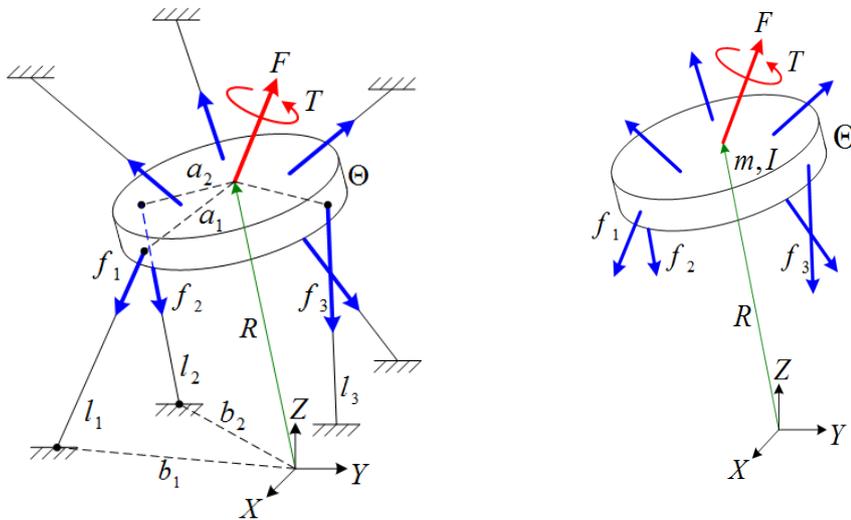


รูปที่ 2.11 WFW ของระบบ 4 เส้นลวด ที่มี moving platform เป็นจุด แรงดึงเชือกสูงสุดทุกเส้น 100N

### บทที่ 3

#### การควบคุมแขนกลแบบขนานขับเคลื่อนด้วยเส้นลวด

##### 3.1 สมการการเคลื่อนที่



รูปที่ 3.1. Free-body diagram ของแขนกลแบบขนานขับเคลื่อนด้วยเส้นลวด

$a_i$  attached position of cable  $i$  w.r.t. mobile plate

$b_i$  attached position of cable  $i$  w.r.t. fixed frame

$l_i$  length of cable  $i$

$f_i$  force in cable  $i$

$R$  position vector of mobile plate

$\theta$  orientation (matrix) of mobile plate

$F, T$  external wrench acting on mobile plate

รูปที่ 3.1 แสดงภาพการกำหนดตัวแปรตำแหน่งต่างๆ ของแขนกลแบบขนานขับเคลื่อนด้วยเส้นลวด ตำแหน่งของ moving platform มีความเชื่อมโยงกันระหว่างตัวแปร input คือ  $l_i$  และตัวแปร output  $R, \theta$  ในรูปของฟังก์ชัน  $g_i$

$$g_j(R, \theta, l_i) = 0, i = 1 \dots n, j = 1 \dots n \quad (3.1)$$

โดยสมการข้างต้นเป็นสมการารูป geometry ที่เป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้น ซึ่งแบ่งเป็นสองแง่มุม

- การวิเคราะห์เชิง Forward kinematics ซึ่งต้องการจะหาตำแหน่งของ moving platform  $R, \theta$  เมื่อมีการกำหนดค่าความยาวต่างๆ ของเส้นลวด  $l_i$  ทุกเส้น ซึ่งรูปแบบของสมการความสัมพันธ์ตามสมการที่ 3.1 นั้น จะหาคำตอบค่อนข้างยากเนื่องจากสมการตัวแปรของเส้นลวดมีความสัมพันธ์กัน

แบบไม่เชิงเส้น และจำเป็นต้องแก้สมการหลายสมการพร้อมกัน ซึ่งในหลายกรณีจำเป็นต้องใช้วิธีเชิงตัวเลข (numerical method) มาช่วยแก้สมการ

- การวิเคราะห์เชิง inverse kinematics นั้นมีวัตถุประสงค์กลับกันกับการวิเคราะห์เชิง Forward kinematic ข้างต้น นั่นคือต้องการจะหาค่าของความยาวของเส้นลวด  $l_i$  ทุกเส้นเมื่อมีการกำหนดค่าตำแหน่งของ moving platform  $R, \theta$  การวิเคราะห์ในกรณีนี้ทำได้ง่ายกว่าการหาค่าตอบของ Forward kinematics และมักจะกระทำได้โดยแยกกันอิสระในแต่ละเส้นลวด สำหรับในแง่มุมมองของการควบคุมการเคลื่อนที่นั้นเนื่องจากเราสามารถควบคุมความยาวเชือกได้โดยตรงพร้อมมีเซนเซอร์ตรวจจับหรือสวิตช์ระยะความยาวของเส้นลวด เราอาจจะทำการกำหนดตำแหน่งปลายและแก้สมการเชิง inverse kinematic เพื่อหาความยาวหลังจากนั้นก็ควบคุมความยาวเชือกของแต่ละเส้นโดยอิสระได้ อย่างไรก็ตามข้อผิดพลาดของวิธีนี้จะขึ้นอยู่กับว่าเราสามารถประเมินค่าพารามิเตอร์ของระบบได้ถูกต้องหรือไม่

ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่เชิง dynamic จาก free-body diagram ในรูปที่ 3.1 สมการการเคลื่อนที่ของระบบสามารถเขียนแสดงในรูป

$$\sum_{i=1}^n f_i + F = m\ddot{R} \quad (3.2)$$

และ

$$\sum_{i=1}^n a_i \times f_i + T = I\ddot{\theta} \quad (3.3)$$

โดย  $n$  คือจำนวนของเส้นลวดซึ่งต้องมีค่ามากกว่าจำนวนองศาอิสระของแขนกลที่ออกแบบ เราอาจแบ่งแง่มุมมองของการควบคุมออกเป็น 2 รูปแบบคือ 1) การควบคุมการเคลื่อนที่และ 2) การควบคุมแรง สำหรับงานด้าน haptic interface นั้นเราจำเป็นต้องพิจารณาทั้ง 2 ส่วนรวมกัน

### 3.2 การควบคุมตำแหน่งของ moving platform

ในการควบคุมตำแหน่งของ moving platform จะมีการกำหนดค่าตำแหน่ง  $R, \theta$  ที่ต้องการ ในที่นี้ใช้สัญลักษณ์  $R_d, \theta_d$  ดังนั้นปัญหาของการควบคุมคือจะควบคุมแรงดึงเชือกอย่างไรเพื่อให้ moving platform เคลื่อนตัวไปยังตำแหน่งนั้นในกรณีที่ไม่มีความรบกวนภายนอก  $F, T$  กระทำ ในกรณีที่มีแรงรบกวนภายนอก กระทำ ระบบจะมองว่าเป็นแรงรบกวนที่สามารถมีอยู่ตามจริงได้ หากแต่เราไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง

#### 3.2.1 การควบคุมความยาวแบบแยกส่วน

สำหรับการควบคุมแบบนี้เป็นการใช้หลักการของ inverse kinematic เมื่อกำหนดค่า  $R_d, \theta_d$  ก็จะมีการคำนวณหาความยาวเป้าหมายของเส้นลวดแต่ละเส้น  $l_{di}, i=1 \dots n$  ดังนั้นปัญหาของการ

ควบคุมจึงถูกลดรูปมาเป็นการทำ tracking control ของความยาวของเส้นลวด ซึ่งเราอาจใช้วิธีการอย่างง่ายเช่น PD control

$$f_i = k_{pi}(l_{di} - l_i) + k_{di}(\dot{l}_{di} - \dot{l}_i), \quad i = 1 \dots n \quad (3.4)$$

ซึ่งในกรณีนี้สมการการเคลื่อนที่จะอยู่ในรูป

$$\sum_{i=1}^n k_{pi}(l_{di} - l_i) + k_{di}(\dot{l}_{di} - \dot{l}_i) = m\ddot{R}$$

และ

$$\sum_{i=1}^n a_i \times (k_{pi}(l_{di} - l_i) + k_{di}(\dot{l}_{di} - \dot{l}_i)) = I\ddot{\theta}$$

### 3.2.2 การควบคุมความยาวแบบแยกส่วน โดยการกำหนดแรงตึงเริ่มต้น

ในการควบคุมตามข้อ 3.2.1 นั้นไม่มีข้อกำหนดใดที่เกี่ยวข้องกับการบังคับให้แรงตึงในเส้นลวดมีค่ามากกว่าศูนย์ซึ่งหมายถึงเส้นลวดจะไม่มีอาการหย่อน ดังนั้นหากช่วงหนึ่งในการควบคุมปรากฏว่าความยาวของเส้นลวดที่ต้องการมีค่ามากกว่าความยาวปัจจุบันก็จะทำให้เกิดการสั่งการที่ทำให้เส้นลวดเกิดการหย่อนตัวได้ ในกรณีนี้วิธีการโดยง่ายอาจจะมีการกำหนดค่าแรงตึงเริ่มต้น (preload) ในเส้นลวด

$$f_i = k_{pi}(l_{di} - l_i) + k_{di}(\dot{l}_{di} - \dot{l}_i) + f_{pi}, \quad i = 1 \dots n \quad (3.5)$$

โดย  $f_{pi}$  คือค่าของแรงเริ่มต้นที่จะสั่งการให้ตัวขับเคลื่อนสร้างให้เส้นลวดแต่ละเส้น

### 3.2.3 การควบคุมความยาวแบบแยกส่วน โดยการกำหนดแรงตึงเชิงอวกเริ่มต้นแบบ null-space

ในการควบคุมตามข้อ 3.2.2 การตั้งค่าแรงตึงเริ่มต้น  $f_{pi}$  เป็นลักษณะของการปรับตั้งแบบจูน โดยค่า  $f_{pi}$  ของเป็นค่าคงที่ตลอดการเคลื่อนที่ ซึ่งกรณีนี้มีความไม่เหมาะสมเนื่องจากแรงลัพท์โดยรวมที่เกิดจากค่า  $f_{pi}$  นี้ทุกเส้นลวดจะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของ moving platform และทำให้ตำแหน่ง สุดท้ายมีความคลาดเคลื่อนถาวรได้ ในกรณีนี้เราสามารถที่จะใช้หลักการของการสร้างแรงแบบ null-space ซึ่งไม่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของ moving platform นำมาประยุกต์ใช้ได้ ซึ่งการควบคุมลักษณะนี้จะอยู่ในรูป

$$\{f_i\} = \{k_{pi}(l_{di} - l_i) + k_{di}(\dot{l}_{di} - \dot{l}_i)\} + (I - A^+A)\xi \quad (3.6)$$

โดย  $A = J^+$  เมื่อ  $J$  คือ Jacobian matrix,  $+$  คือ pseudo-inverse และ  $\xi$  คือเวกเตอร์สุ่มใดๆ ในกรณีนี้ไม่ว่า  $\xi$  จะมีค่าเท่าใดก็ตามจะไม่มีผลทำให้แรงลัพท์ จากเทอม  $(I - A^+A)\xi$  ที่ทำบน moving platform เปลี่ยนไป ดังนั้นเราสามารถกำหนดให้  $\xi$  มีค่ามากพอที่จะทำให้แรงตึงในเส้นลวดทุกเส้นมีค่ามากกว่าศูนย์ได้

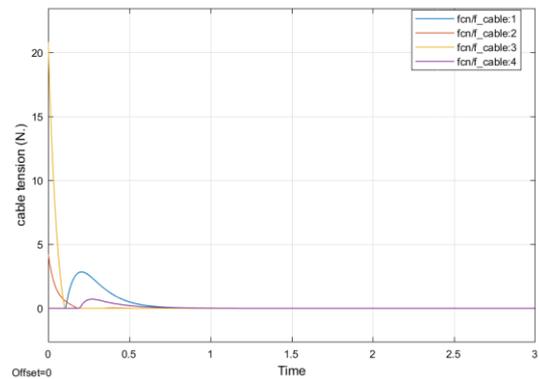
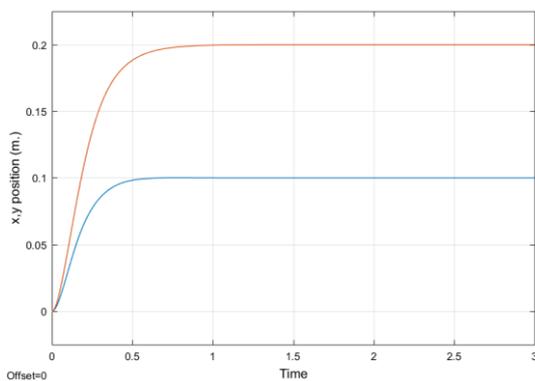
### Simulation result

ในการทดสอบได้ทำการจำลองสร้างระบบแขนกลแบบขนานขับเคลื่อนด้วยเส้นลวดแบบ 4 เส้น โดยที่จุดยึดของเส้นและพื้นอยู่ที่ตำแหน่ง  $(-0.6, -0.6)$   $(-0.6, 0.6)$   $(0.6, 0.6)$  และ  $(0.6, -0.6)$  และ moving platform เป็นแบบจุดที่มีมวล 1 กิโลกรัม

#### กรณีที่ 1: การควบคุมแบบ PD – length control based on (3.4)

รูปที่ 3.1 แสดงถึงผลของการควบคุมโดยการตั้งจูนค่า gain  $kd=20$ ;  $kp=100$  ให้มีความเหมาะสม ซึ่งจากรูปการตอบสนองได้ผลการควบคุมตำแหน่งที่ดีมาก แต่เมื่อพิจารณาจากแรงที่ส่งไปที่เส้นลวด ก็เห็นว่ามีส่วนช่วงที่มีการสั่งการให้แรงดึงมีค่าติดลบ ซึ่งในกรณีนี้หากมีแรงติดลบจะทำการปรับให้เป็นค่าศูนย์แทน เพื่อป้องกันการคลายตัวของเส้นลวดออกจากชุดเก็บ ซึ่งทำให้เกิดปัญหาการพันกันได้ อย่างไรก็ตามเมื่อ moving platform ถึงที่หมาย ที่ต้องการแรงของเส้นลวดจะกลายเป็นศูนย์ ซึ่งหมายถึงเชือกอาจจะหย่อนตัวและมีโอกาสที่จะคลายตัวหลุดออกจากชุดเก็บเส้นลวดได้อีก ทำให้เกิดปัญหาเรื่องเชือกพันกันได้

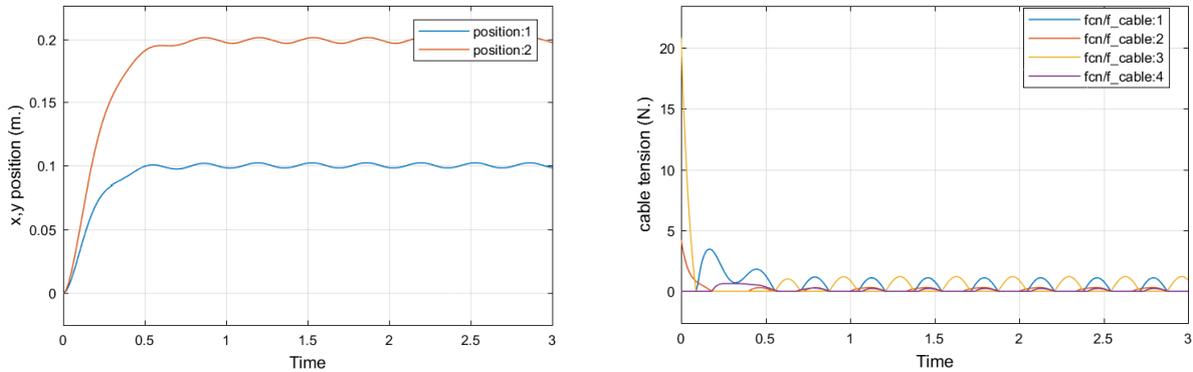
รูปที่ 3.2 แสดงถึงการตอบสนองของการควบคุมขั้นต้นเมื่อมีแรงภายนอกรบกวนเป็นคลื่นรูป sine ขนาด 3 นิวตัน จะเห็นว่าในทางทฤษฎีระบบสามารถที่จะต้านแรงภายนอกได้โดยค่า stiffness จะขึ้นอยู่กับค่า  $Kp$  ที่เราตั้งเอาไว้ แม้ว่าหลังจากระบบเข้าสู่ steady-state แรงดึงของเส้นลวดจะเป็นศูนย์ แต่ Action ของการควบคุมแบบ PD ก็ตอบสนองอย่างรวดเร็ว แต่ในทางปฏิบัติอาจไม่เป็นเช่นนั้น เนื่องจากเชือกอาจจะหย่อนตัวจนเกิดการพันกันได้ ตามที่กล่าวข้างต้น



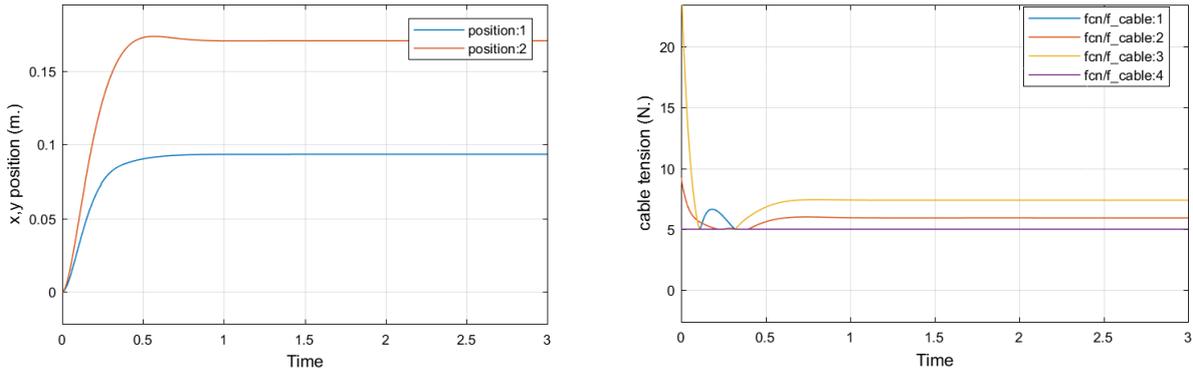
รูปที่ 3.1 ผลการควบคุมตำแหน่ง  $x_d=0.2$ ,  $y_d=0.1$  ของระบบ 4 เส้นลวด ที่มี moving platform เป็นแผ่น แรงดึงเชือกสูงสุดทุกเส้น 100N ( $Kp=100$ ,  $Kd=20$ )

**กรณีศึกษาที่ 2: ควบคุมแบบ PD – length control + Preload based on (3.5)**

จากปัญหาในกรณีแรกเราทดลองใส่ค่าแรงเริ่มต้นให้กับเส้นลวดในแต่ละเส้นเป็น 5 N โดยพารามิเตอร์อื่นๆ ตั้งค่าไว้คงเดิม ซึ่งจะได้การตอบสนองตามรูปที่ 3.2 ในกรณีนี้จะเห็นว่าเมื่อ moving platform เคลื่อนที่เข้าสู่จุดสมดุลแล้ว เส้นลวดทุกเส้นยังคงมีแรงตึงอยู่ อย่างไรก็ตามการตั้งค่าแรงเริ่มต้นลักษณะนี้จะมีผลต่อความแม่นยำความถูกต้องของตำแหน่งของ moving platform ซึ่งจะเห็นว่าค่าเคลื่อนไปจากตำแหน่งที่ต้องการ



รูปที่ 3.2 ผลการควบคุมตำแหน่ง  $x_d=0.2, y_d=0.1$  ของระบบ 4 เส้นลวด ตาม (3.4) เมื่อมีแรงภายนอกกรบกวนเป็นคลื่นรูป sine ขนาด 3 N ( $K_p=100, K_d=20$ )

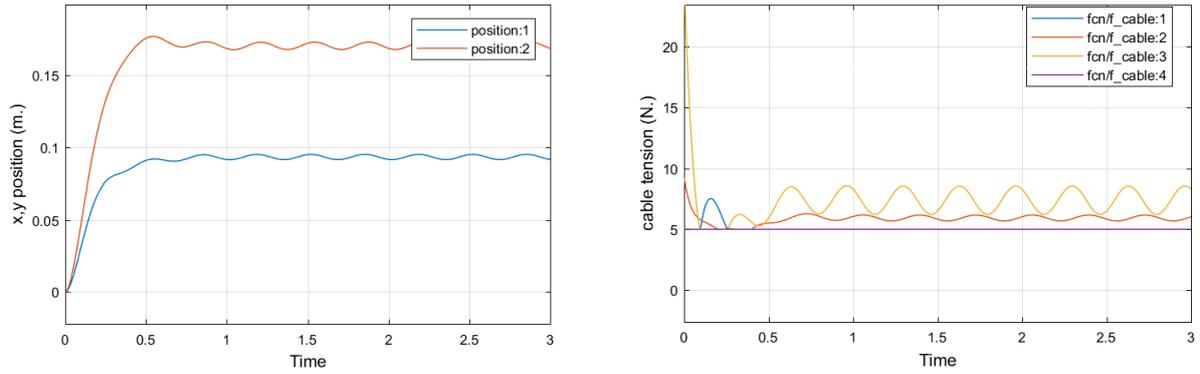


รูปที่ 3.3 ผลการควบคุมตำแหน่ง  $x_d=0.2, y_d=0.1$  ของระบบ 4 เส้นลวด ตาม (3.5) เมื่อมีแรงเริ่มต้นในเส้นลวดทุกเส้นเท่ากัน 5 N ( $K_p=100, K_d=20$ )

**กรณีศึกษาที่ 3: ควบคุมแบบ PD – length control + Null space preload based on (3.6)**

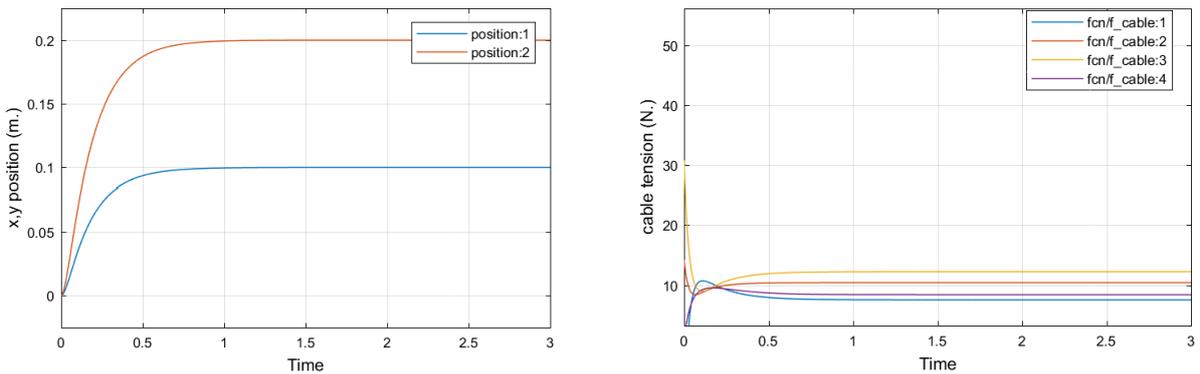
ตามสมการที่ 3.6 ในกรณีระบบ 4 เส้นลวดนี้ เมทริกซ์ A สามารถหาได้จาก

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial l_1}{\partial x} & \frac{\partial l_2}{\partial x} & \frac{\partial l_3}{\partial x} & \frac{\partial l_4}{\partial x} \\ \frac{\partial l_1}{\partial y} & \frac{\partial l_2}{\partial y} & \frac{\partial l_3}{\partial y} & \frac{\partial l_4}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x-x_1}{l_1} & \frac{x-x_2}{l_2} & \frac{x-x_3}{l_3} & \frac{x-x_4}{l_4} \\ \frac{y-y_1}{l_1} & \frac{y-y_2}{l_3} & \frac{y-y_3}{l_3} & \frac{y-y_4}{l_4} \end{bmatrix}$$

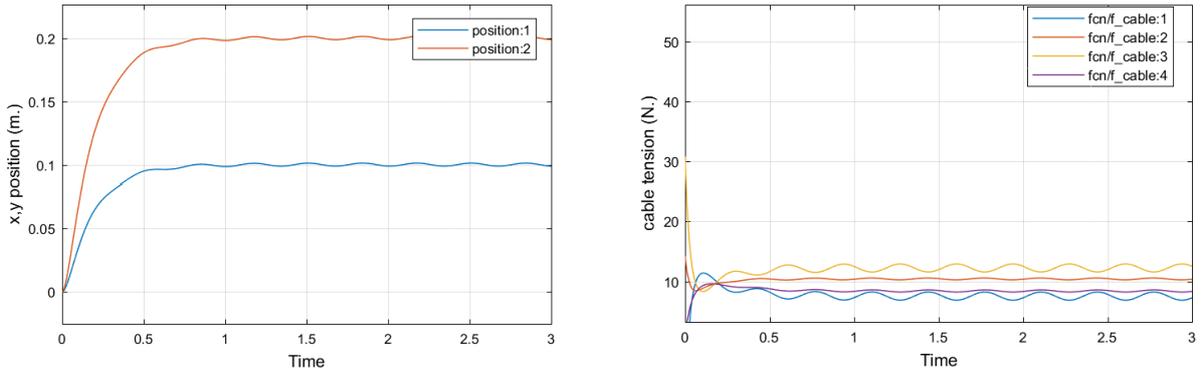


รูปที่ 3.4 ผลการควบคุมตำแหน่ง  $x_d=0.2$ ,  $y_d=0.1$  ของระบบ 4 เส้นลวด ตาม (3.5) เมื่อมีแรงเริ่มต้นในเส้นลวดทุกเส้นเท่ากับ 5 N ( $K_p=100$ ,  $K_d=20$ )

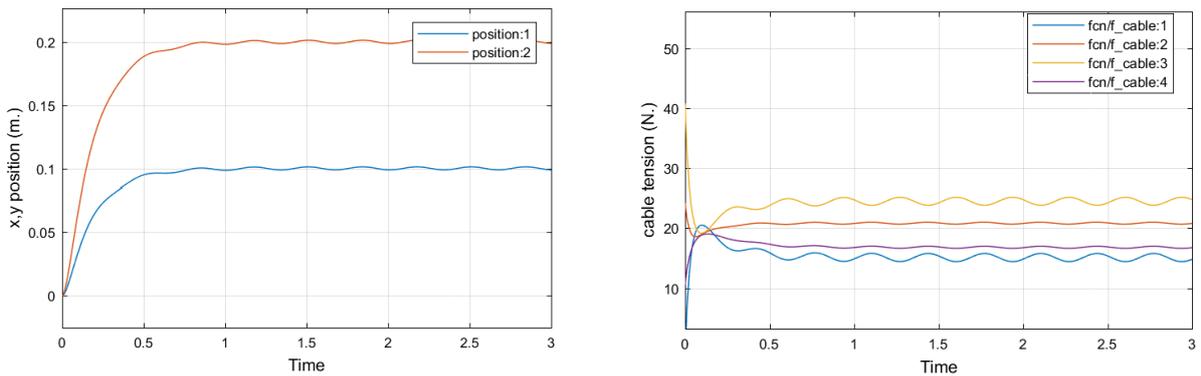
โดย  $x_i, y_i, i=1 \dots 4$  คือค่าพิกัดที่เส้นลวดยึดกับพื้น รูปที่ 3.5 แสดงผลการตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งของ moving platform ซึ่งจะเห็นว่าระบบมีการตอบสนองเชิงการเคลื่อนที่คล้ายกับกรณีที่ 1 แต่ถ้าพิจารณาแรงตึงในเส้นลวดก็จะเห็นว่ามีความมากกว่าศูนย์ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มแรงในเทอมที่เกี่ยวข้องกับ null-space โดยค่า  $\zeta = 10$  ต่างจากกรณีแรกที่แรงตึงในเส้นลวดมีค่าเข้าสู่ศูนย์ รูปที่ 3.6 แสดงถึงกรณีที่ถูกแรงภายนอกรบกวนเป็นคลื่นรูป sine ขนาด 3 นิวตันซึ่งจะเห็นว่าพฤติกรรมเชิงการเคลื่อนที่ที่เหมือนกรณีแรกเพียงแต่แรงตึงเชือกจะไม่เป็นศูนย์ เมื่อทำการเพิ่มค่าของ  $\zeta = 20$  ปรากฏว่าเป็นไปตามความคาดหมายคือพฤติกรรมเชิงการเคลื่อนที่ของระบบยังคงเหมือนกรณีแรก แต่ในกรณีนี้ จะเห็นว่าค่าแรงตึงในเส้นลวดทุกเส้นมีค่ามากขึ้น (รูป 3.7)



รูปที่ 3.5 ผลการควบคุมตำแหน่ง  $x_d=0.2$ ,  $y_d=0.1$  ของระบบ 4 เส้นลวด ตาม (3.6) เมื่อมีแรง null-space กระทำ ( $K_p=100$ ,  $K_d=20$ )

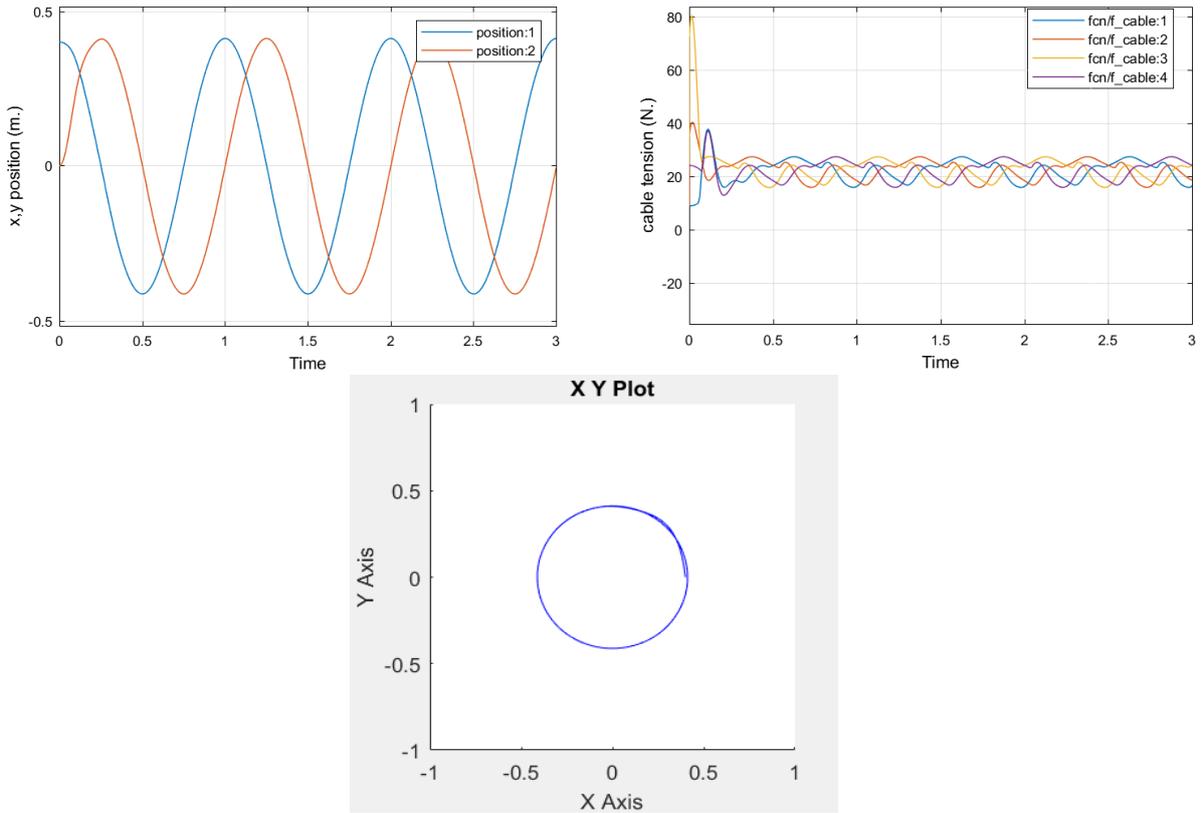


รูปที่ 3.6 ผลการควบคุมตำแหน่ง  $x_d=0.2$ ,  $y_d=0.1$  ของระบบ 4 เส้นลวด ตาม (3.6) เมื่อมีแรงภายนอกกระทำเป็นคลื่นรูป sine ขนาด 3 N ( $K_p=100$ ,  $K_d=20$ ,  $\xi = 10$ )



รูปที่ 3.7 ผลการควบคุมตำแหน่ง  $x_d=0.2$ ,  $y_d=0.1$  ของระบบ 4 เส้นลวด ตาม (3.6) เมื่อมีแรงภายนอกกระทำเป็นคลื่นรูป sine ขนาด 3 N ( $K_p=100$ ,  $K_d=20$ ,  $\xi = 20$ )

รูปที่ 3.8 แสดงผลของการบังคับให้ moving platform เคลื่อนที่ไปตามรูปวงกลมรัศมี 0.4 เมตรซึ่งจะเห็นว่าระบบสามารถติดตามการเคลื่อนที่เชิง tracking ได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้สมรรถนะของการควบคุมขึ้นอยู่กับค่า inertia ของระบบและการปรับตั้งค่า  $K_p$  และ  $K_d$  แต่โดยรวมแล้วถือว่าระบบที่ขับเคลื่อนด้วยเส้นลวดมีชิ้นส่วนที่มีมวลเคลื่อนที่อยู่ชั้นเดียวคือ moving platform ดังนั้นพฤติกรรมในเชิง dynamic จะไม่ซับซ้อนเท่ากับแขนกลแบบ serial หรือ parallel ที่มีชิ้นส่วนเป็นแบบ rigid body ในกรณีนั้นมักจะมีแรง centrifugal force และ Coriolis force อยู่ในระบบ ซึ่งทำให้มีพฤติกรรมในเชิง coupling และ nonlinear



รูปที่ 3.8 ผลการควบคุมแบบ tracking รูปร่างกลมรัศมี 0.4 m ของระบบ 4 เส้นลวด ตาม (3.6) เมื่อมีแรงภายนอกกระทำเป็นคลื่นรูป sine ขนาด 3 N ( $K_p=100$ ,  $K_d=20$ ,  $\xi = 20$ )

### 3.3 การควบคุมแบบแฮพติก

ในการควบคุมแบบแฮพติกนั้นเราต้องการที่จะสร้างแรงเสมือนให้เกิดขึ้นที่ผู้ใช้งานอุปกรณ์ซึ่งกำลังสัมผัสหรือจับกับ moving platform อยู่ ทำให้ผู้ใช้งานสามารถรู้สึกถึงแรงที่เกิดจากการที่แขนกลไปสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม สิ่งแวดล้อมนี้อาจเป็นสิ่งแวดล้อมจริง ที่อุปกรณ์แฮพติกควบคุมอยู่ เช่นแขนกลที่ไปสัมผัสกับภายนอก หรืออาจเกิดจากสิ่งแวดล้อมที่จำลองขึ้นมาในคอมพิวเตอร์อย่างเช่นกรณีที่ใช้อุปกรณ์แฮพติกไปควบคุมเกมส์เป็นต้น โดยแรงที่เกิดขึ้นสามารถจำลองได้จากสมการ

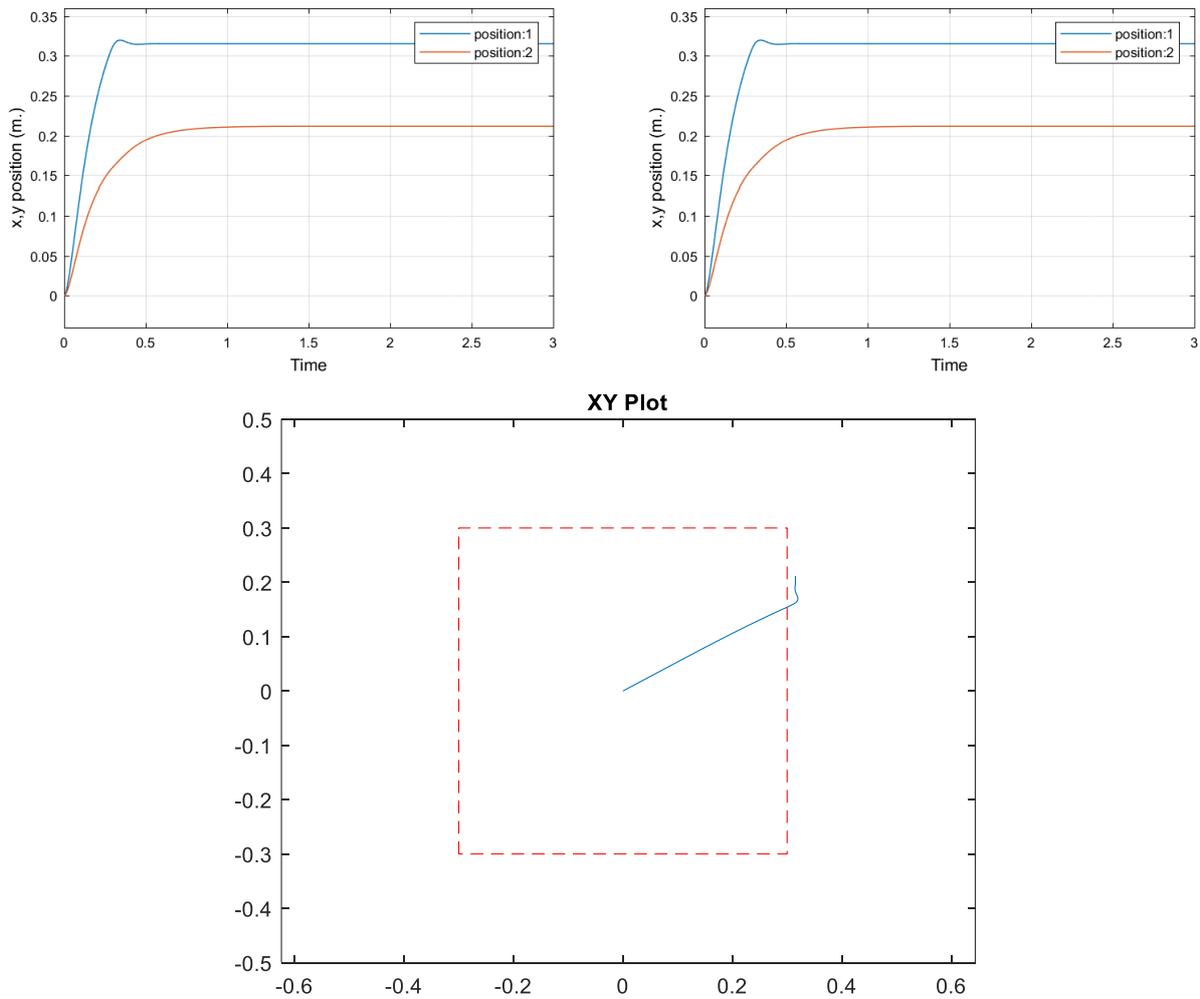
$$f_{contact} = -k_{wall}(x - x_{wall}), x > x_{wall} \quad (3.7)$$

สำหรับการควบคุมนั้นได้จากการจำลองค่าแรงสัมผัสที่จะเกิดขึ้นและทำการสร้างค่าแรงนี้ให้เกิดขึ้นที่แพทฟอร์ม จากแรงของเส้นลวด ซึ่งทั้งนี้สามารถสร้างแรงได้จาก

$$f = A^+ f_{contact} + (I - A^+ A) \xi \quad (3.8)$$

รูปที่ 3.9 แสดงถึงผลการจำลองการควบคุมแบบ PD ที่กำหนดตำแหน่งให้เป้าหมายสุดท้ายอยู่ที่พิกัด (0.4, 0.2) และมีกำแพงกั้นที่ตำแหน่ง  $x = 0.3$  ที่มีค่า stiffness  $K_{wall} = 1,000$  N/m โดยได้สร้างแรง

เสมือนตาม (3.7) และหลักการควบคุมตาม 3.8 เข้าไปด้วย ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อแขนกลเคลื่อนที่เข้าไปที่ตำแหน่ง  $x=0.3$  ก็จะถูกดันไม่ให้เคลื่อนที่ไปตามแนว  $x$  แต่ยังคงเคลื่อนที่ต่อไปตามแนวแกน  $y$  ได้

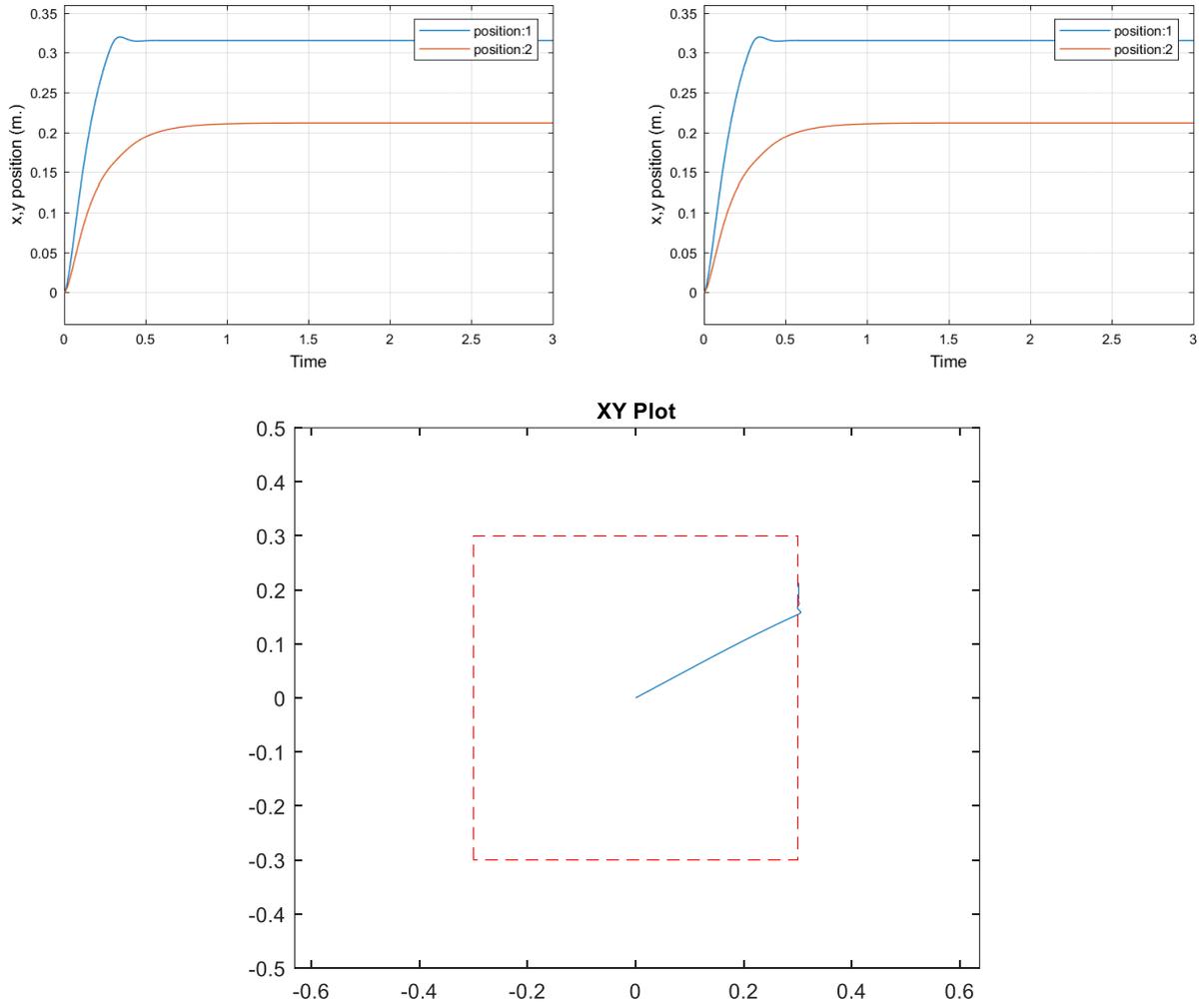


รูปที่ 3.9 ผลการควบคุมแบบ PD ที่มีการสร้าง virtual wall (เส้นประ) ของระบบ 4 เส้นลวด โดยมีเป้าหมายสุดท้ายที่ (0.4, 0.2)  $K_p=100$ ,  $K_d=20$ ,  $\xi = 20$ ,  $K_{wall} = 1,000$  N/m

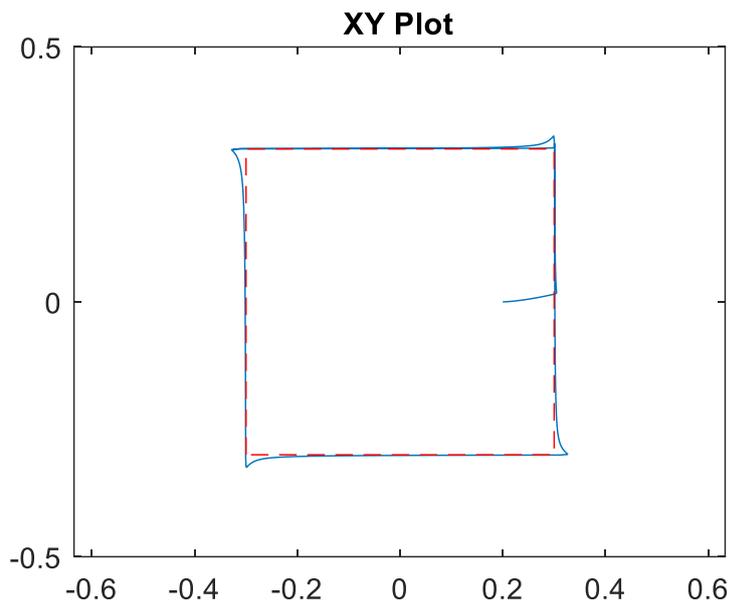
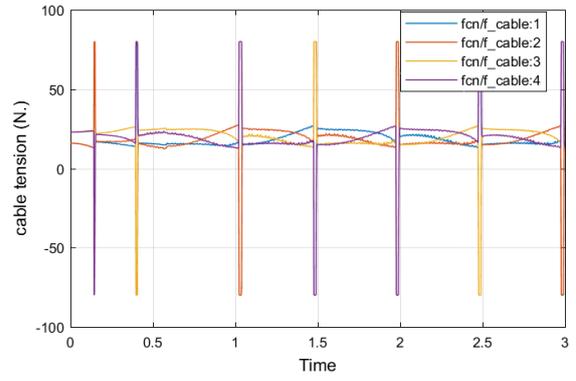
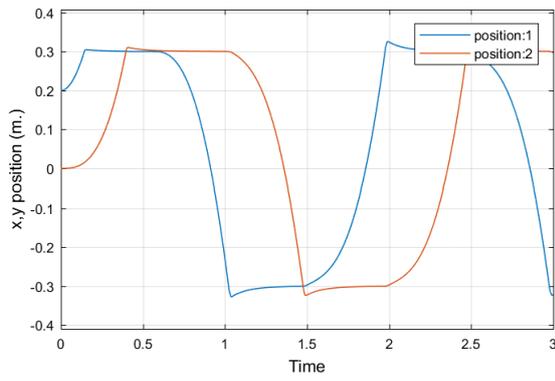
รูปที่ 3.10 แสดงกรณีคล้ายกับข้างต้นเพียงแต่เปลี่ยนค่า stiffness ของผนังเป็น 10,000 นิวตันต่อเมตร ซึ่งก็จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่เข้าไปอยู่ในผนังมีค่าน้อยลงเนื่องจากมีแรงต้านของผนังจำลองมีค่ามากขึ้น

รูปที่ 3.11 แสดงผลการจำลองการควบคุมโดยจำลองสิ่งแวดล้อมจำลองเป็นผนังรูปสี่เหลี่ยมวงปิด ตามแนวช่วง  $x = -0.3, 0.3$  และ  $y=-0.3, 0.3$  ตามรูป จากนั้นได้ทำการจำลองแรงจากผู้ควบคุมอุปกรณ์ให้มีขนาด 20 นิวตันกระทำบน moving platform พร้อมกับเปลี่ยนแรงนี้ไปตามทิศทางโดยรอบจาก 0 ถึง 360 องศาภายในเวลา 2 วินาที โดยตำแหน่งเริ่มต้นอยู่ที่พิกัด (0.2,0) ซึ่งตามแบบจำลองจะ

เห็นว่าแขนกลเคลื่อนที่เข้าไปผนังทางด้านขวาเมื่อหลังจากนั้นเมื่อแรงมีการปรับตัวไปทางด้านแนวตั้งมากขึ้นแขนกลก็จะสไลด์ไปตามผนังเข้าไปยังมุมขวาบนของสี่เหลี่ยม จากนั้นเมื่อแรงมีการปรับทิศไปทางด้านซ้ายมือ แขนกลก็จะเคลื่อนตัวไปตามขอบด้านบนในลักษณะนี้เรื่อยๆ จนครบรอบ



รูปที่ 3.10 ผลการควบคุมแบบ PD ที่มีการสร้าง virtual wall (เส้นประ) ของระบบ 4 เส้นลวด โดยมีเป้าหมายสุดท้ายที่ (0.4, 0.2)  $K_p=100$ ,  $K_d=20$ ,  $\xi = 20$ ,  $K_{wall} = 10,000$  N/m



รูปที่ 3.11 ผลการควบคุม force-reflecting ที่มีการสร้าง virtual wall (เส้นประ) ของระบบ 4 เส้น ลวด โดยจำลองผู้ใช้งานให้สร้างแรงขนาด 20N เปลี่ยนทิศโดยรอบ  $\xi = 20$ ,  $K_{wall} = 10,000 \text{ N/m}$ ,  $K_{wall \text{ damping}} = 1000$ .

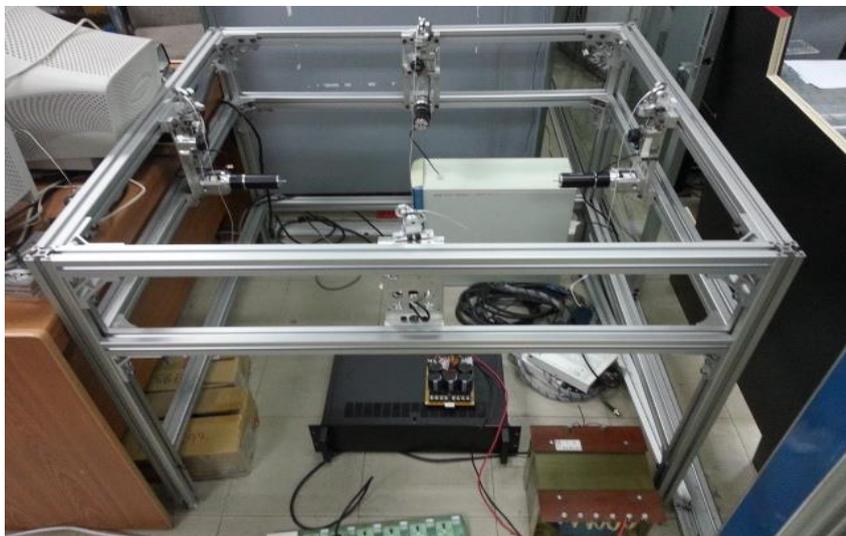
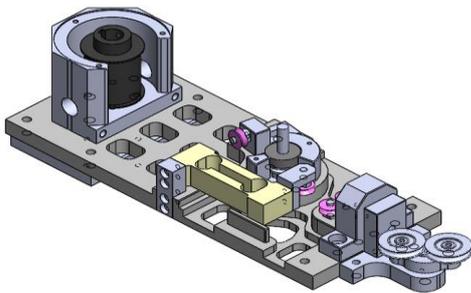
## บทที่ 4

### ชุดทดสอบและการทดลอง

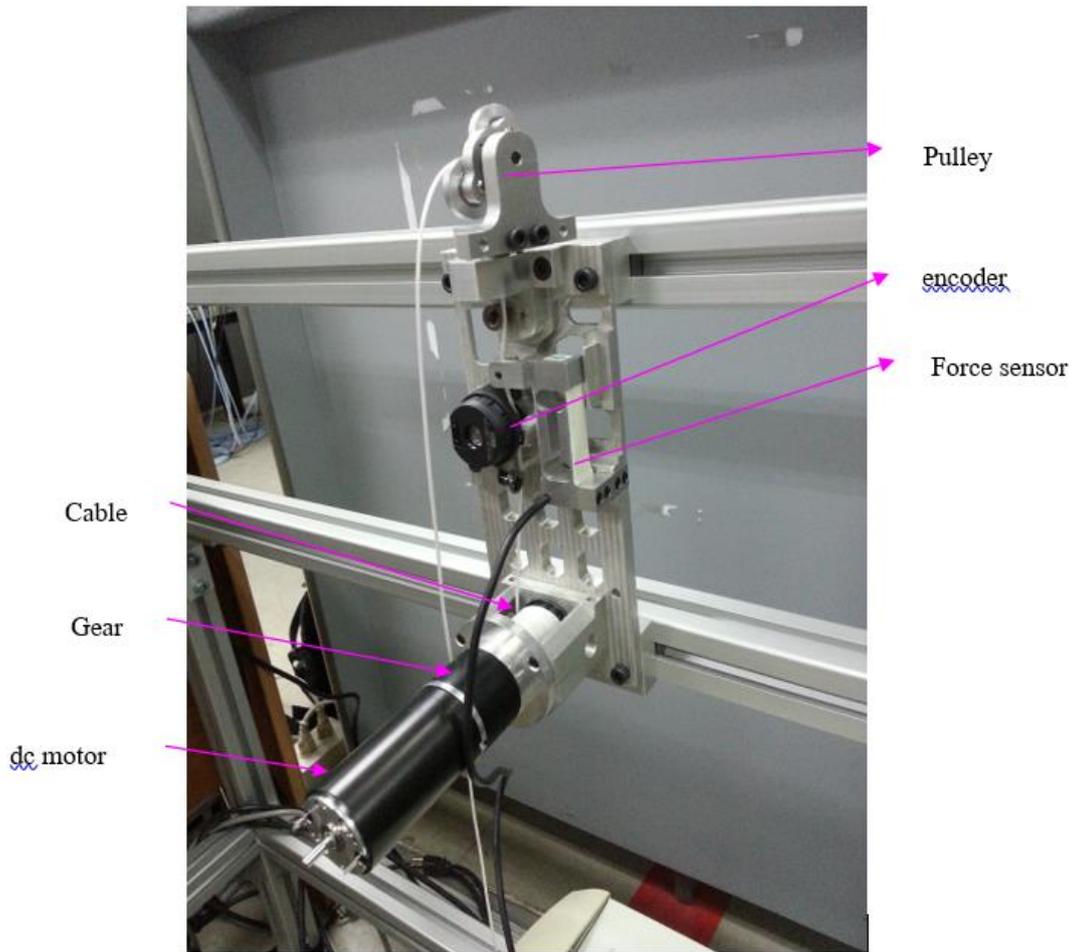
ในงานวิจัยได้มีการสร้างชุดทดสอบสำหรับทดสอบ concept ของการออกแบบและการควบคุม ซึ่งชุดทดสอบมีองค์ประกอบหลักต่างๆ ดังนี้

#### 1. องค์ประกอบเชิงกล

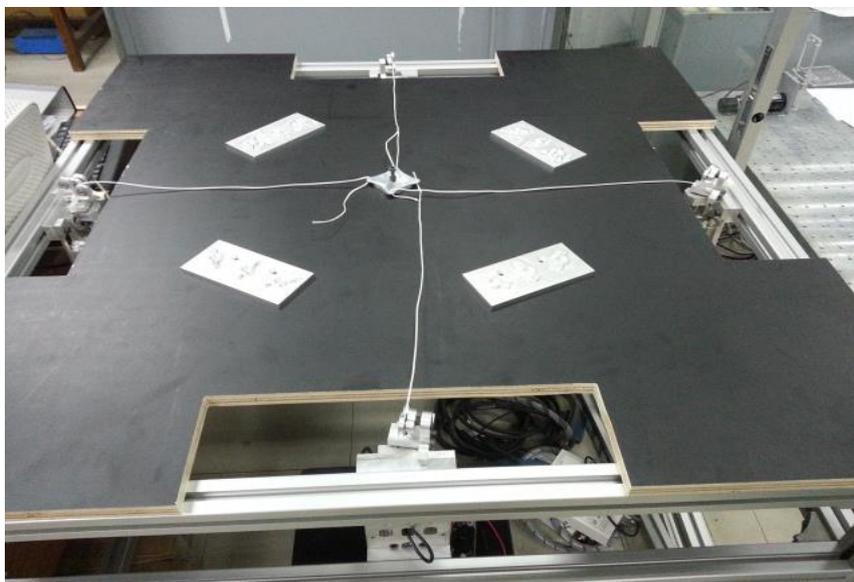
ประกอบไปด้วยชุดขับเคลื่อนเส้นลวด (รูปที่ 4.1) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของการขับเคลื่อนและสร้างแรงในเส้นลวด ชุดขับเคลื่อนเส้นลวดมีทั้งหมด 4 ชุด ออกแบบโดยใช้แท่งอลูมิเนียมขึ้นรูป สร้างเป็นฐานยึดมอเตอร์มีเพลายึดอยู่กับ drum เก็บเส้นลวด (สีดำ) เส้นลวดวิ่งผ่านชุดวัดความยาวเชือก จากนั้นผ่านชุดวัดแรง และในที่สุดผ่านชุดพูลเลย์ออกไปเพื่อไปยึดกับฐานของแพลตฟอร์มเคลื่อนที่ ชุดขับเคลื่อนเส้นลวดนี้ถูกติดตั้งอยู่กับโครงอลูมิเนียมโปรไฟล์ (รูปที่ 4.2) ที่จัดสร้างเป็นแบบฐานสี่เหลี่ยมมีขนาดกว้างคูณยาวคูณสูงเป็น 1.2 x 1.2 x 0.8 เมตร ด้านบนของโครงฐานมีแผ่นไม้ยึดติด (รูปที่ 4.3) สำหรับทำการทดลองการเคลื่อนที่ที่เป็น 2 มิติ โดยเส้นลวดที่ใช้ทำจากเชือก dyneema rope ซึ่งมีค่า stiffness ที่สูง



รูปที่ 4.1 ชุดขับเคลื่อนเส้นลวดและโครงฐาน



รูปที่ 4.2 การยึดชุดขับเคลื่อนลวดกับโครงฐาน



รูปที่ 4.3 แผ่นไม้ด้านบนโครงฐาน

## 2. ระบบไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ เซ็นเซอร์

สำหรับตัวขับเคลื่อนที่ใช้สร้างแรงตึงเส้นลวดได้ใช้มอเตอร์กระแสตรงแบบ brushed DC Motor (รูปที่ 4.4) รุ่น RE40 + gear head GP42 C อัตราทด 5.6:1 ของบริษัท Maxon ซึ่งเป็นมอเตอร์ที่มีคุณภาพสูงให้การตอบสนองที่ดี โดยด้านปลายของกันมอเตอร์ติดตั้งตัววัดมุมรุ่น EC35-10000-4-236-H-D-DM-B ของบริษัท US Digital (รูปที่ 4.5) ซึ่งมีความละเอียด 10,000 pulse/rev ตัวขับเคลื่อนเป็นแบบ linear รุ่น ELTROL SERIES 59 ของบริษัท PeakServo (รูปที่ 4.6) ซึ่งมีสัญญาณรบกวนต่ำเหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการความละเอียดสูง



รูปที่ 4.4 มอเตอร์กระแสตรง รุ่น RE40 + gear head GP42 C อัตราทด 5.6:1 ของบริษัท Maxon



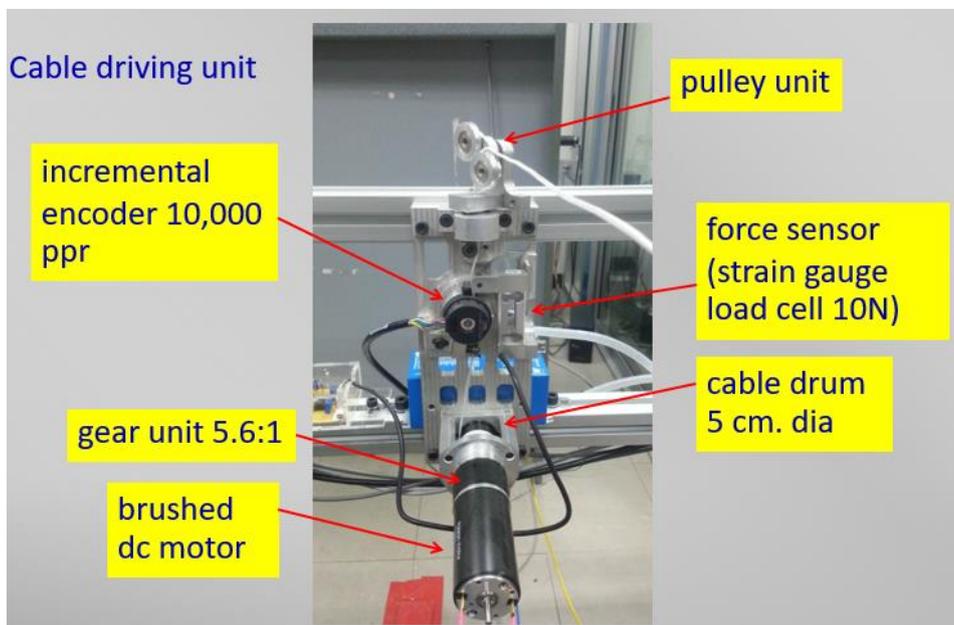
รูปที่ 4.5 ตัววัดมุม รุ่น EC35-10000-4-236-H-D-DM-B ของบริษัท US Digital



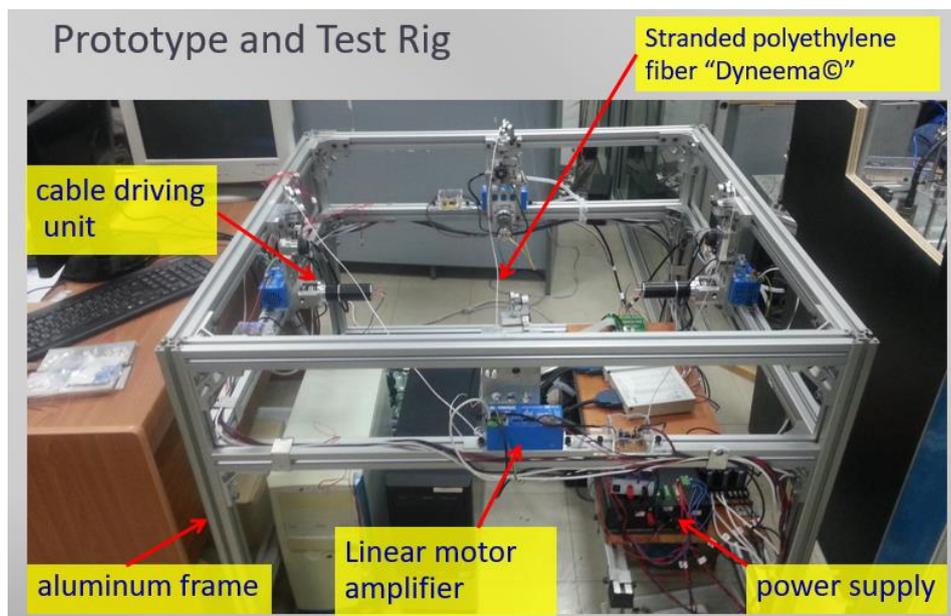
รูปที่ 4.6 ตัวขับเคลื่อนแบบ linear รุ่น ELTROL SERIES 59 ของบริษัท PeakServo

### ค. การติดตั้ง

รูปที่ 4.7 แสดงการติดตั้งชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เข้ากับโครงฐานของระบบ และแสดงการขับเคลื่อนมอเตอร์ผ่านอุปกรณ์วัดแรงดึงในเส้นลวด และผ่านชุด pulley เพื่อเปลี่ยนทิศทางของเส้นลวด รูปที่ 4.8 แสดงภาพรวมของการติดตั้งชุดขับเคลื่อนเส้นลวด 4 ชุดบนโครงฐานซึ่งใช้สำหรับการทดลองการขับเคลื่อนแขนกลแบบ 2 มิติ ซึ่งชุดขับเคลื่อนเส้นลวดถูกติดตั้งอยู่ด้านข้างของโครงฐานทั้ง 4 ด้าน



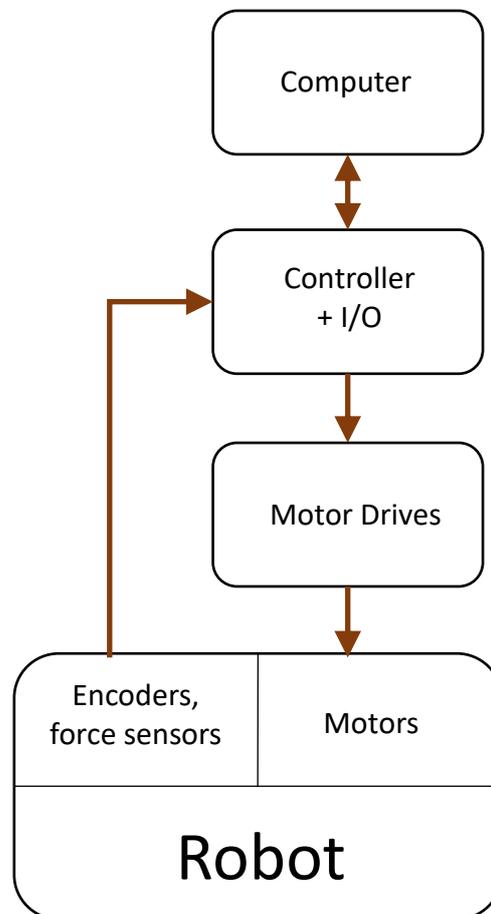
รูปที่ 4.7 การติดตั้งชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เข้ากับโครงฐานของระบบ



รูปที่ 4.8 การติดตั้งชุดขับเคลื่อนเส้นลวดกับโครงฐาน

### ง. การติดตั้งระบบชุดทดสอบ

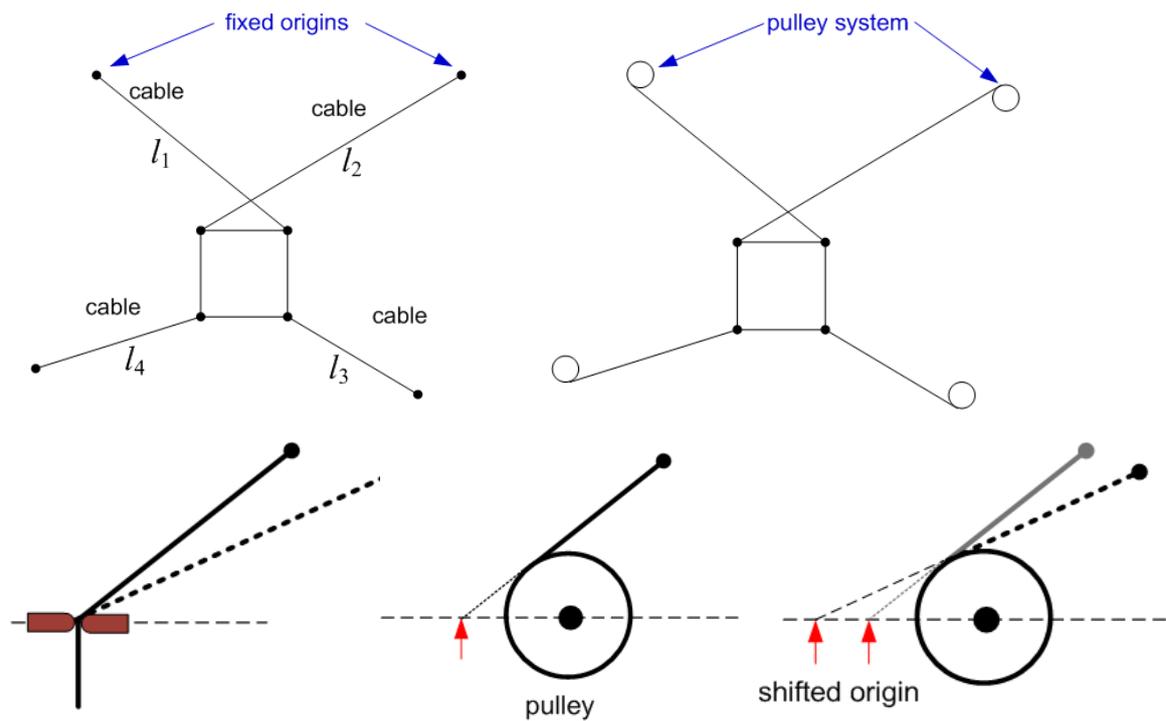
รูปที่ 4.9 แสดงถึงแผนผังการติดตั้งและต่อเชื่อมอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับระบบทดสอบ โดยคอมพิวเตอร์มีการติดตั้งอุปกรณ์ i/o card ที่สามารถรับ-ส่งสัญญาณอนาล็อกและดิจิตอลส่งผ่านไปยังชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ของแขนกล พร้อมทั้งรับค่าสัญญาณเซ็นเซอร์วัดมุมและสัญญาณจาก force sensor กลับไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผล คอมพิวเตอร์นำข้อมูลต่างๆ และสร้างชุดคำสั่งเพื่อส่งกลับไปยังมอเตอร์เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล



รูปที่ 4.9 แผนผังการต่อเชื่อมอุปกรณ์สำหรับดำเนินการทดสอบ

### ข้อจำกัดของชุดทดสอบ

- สำหรับชุดทดสอบนี้มีแง่มุมของการทำงานที่ไม่เป็นเชิงอุดมคติตามทฤษฎีคือเรื่องปัญหาด้าน kinematic inconsistency ซึ่งเกิดจากการนำระบบ pulley เข้ามาใช้ จากรูปที่ 4.10 ด้านซ้ายมือจะเป็นรูปแบบการทำงานของจุดยึดสายเคเบิลที่ให้ตำแหน่งจุดยึดที่แน่นอนแต่เมื่อนำระบบ pulley เข้ามาใช้ ซึ่งให้ผลดีในแง่ของการลดแรงเสียดทานแต่ลักษณะการทำงานของ pulley จะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของจุดยึด (shift origin) ซึ่งหากมีค่ามากเกินไปเมื่อเทียบต่อสัดส่วนความยาวของเชือกก็จะทำให้มีความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งของ moving platform ค่อนข้างสูง



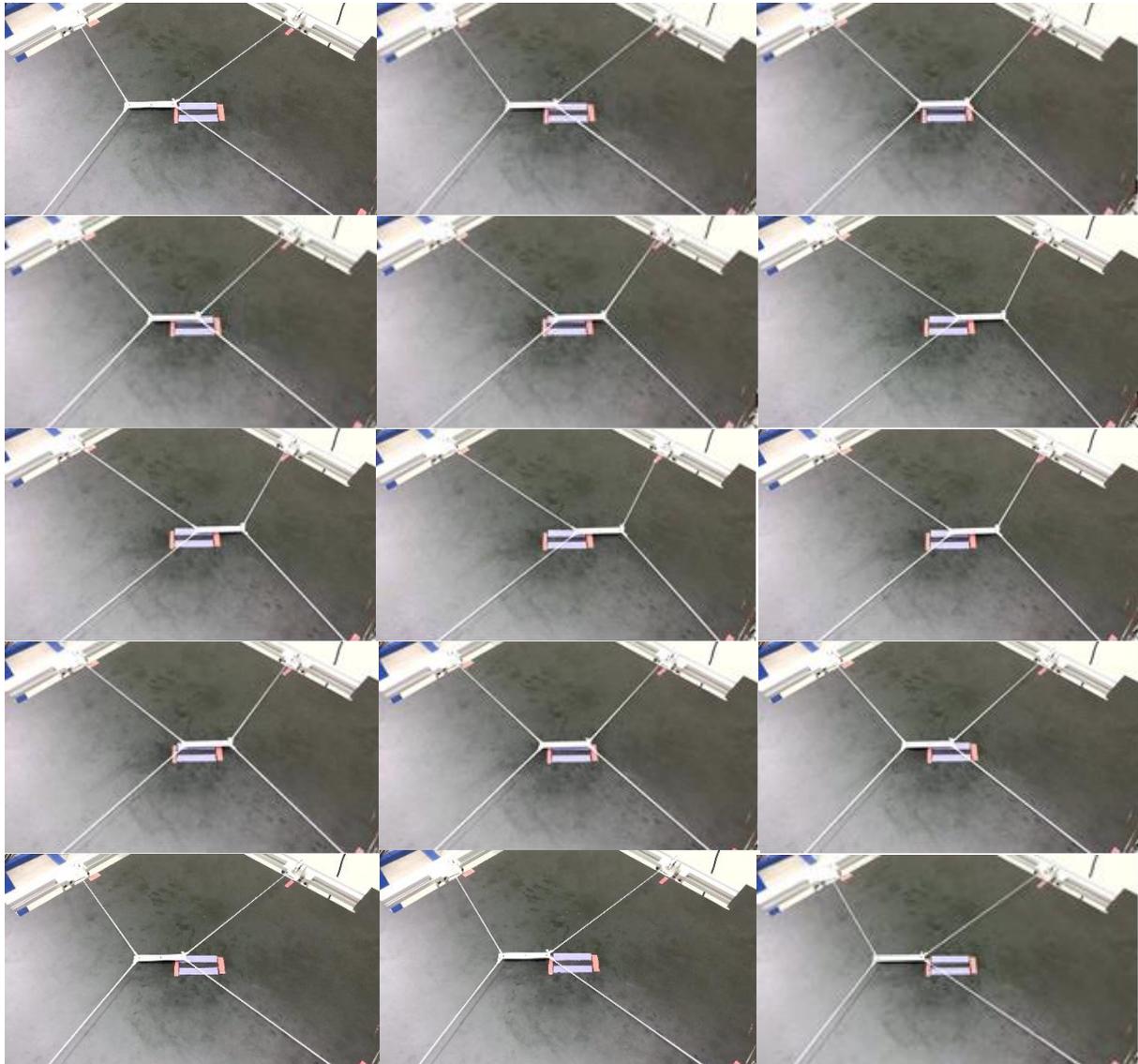
รูปที่ 4.10 ปัญหา kinematic inconsistency จากการใช้ pulley แทนจุดยึด

- ระบบเซ็นเซอร์ที่ใช้วัดแรง strain Gauge ซึ่งออกแบบมาไว้สำหรับการวัดแรงดึงในเส้นลวด ในช่วง 1 ถึง 50 นิวตัน ค่อนข้างที่จะอ่อนตัวเกินไปซึ่งในแง่ดีคือสามารถวัดแรงในระดับต่ำได้ แต่ข้อเสียคือทำให้ความถี่สูงสุดในการควบคุม (control bandwidth) ลดค่าลงไปด้วย
- ชุดทดสอบที่สร้างขึ้นยังคงขาดอุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่มีความละเอียดสูงสำหรับใช้ในการวัดตำแหน่งของ moving platform อย่างถูกต้อง และด้วยความละเอียดสูง จึงทำให้ข้อมูลในการทดสอบต่างๆ ไม่สามารถยืนยันถึงตำแหน่งอันแท้จริงของ moving platform ได้

### ผลการทดสอบ

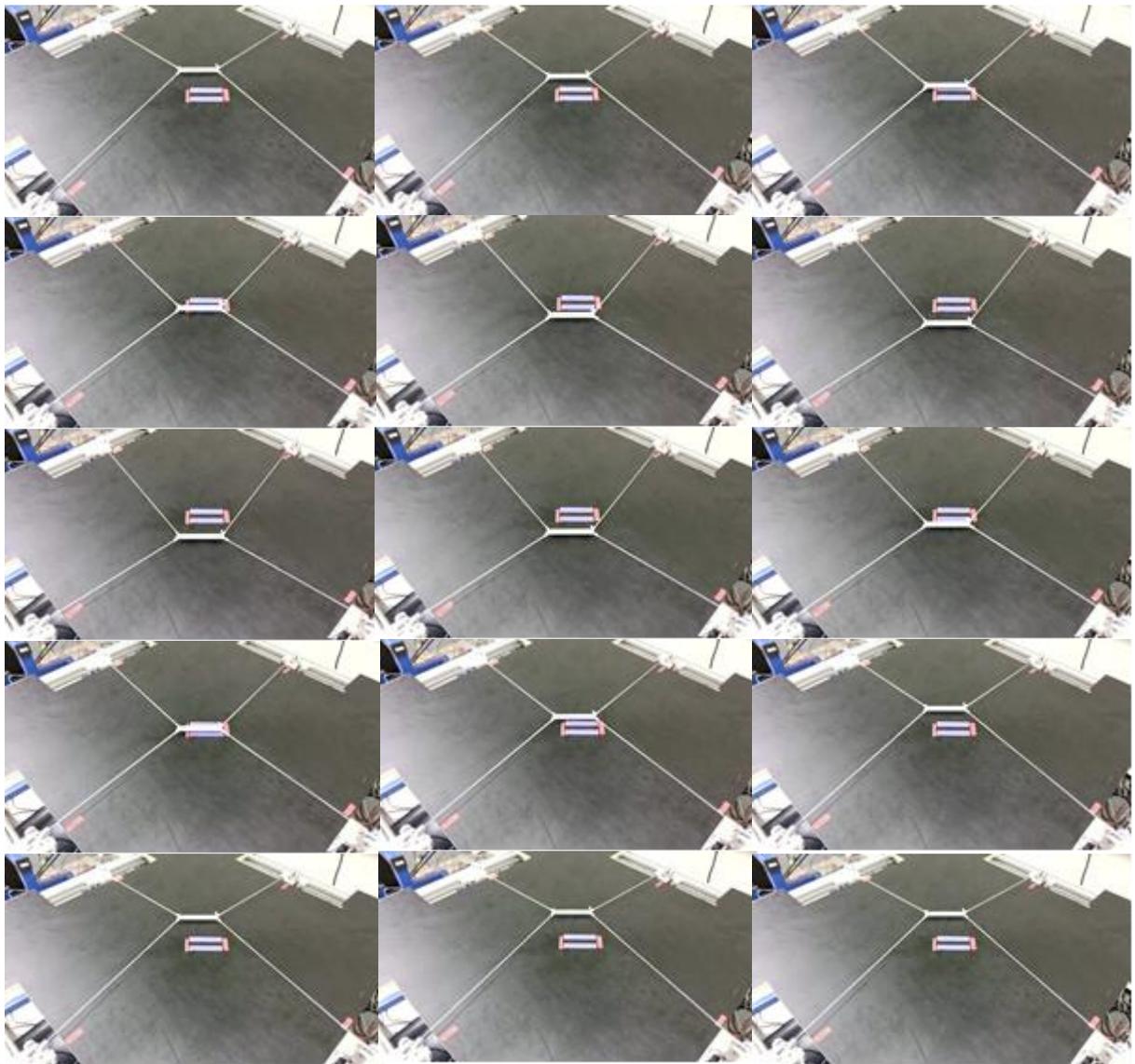
ในการเริ่มดำเนินการทดลองเนื่องจากการนับความยาวของเส้นลวดเป็นการเทียบวัดจากมุมการหมุนของ encoder แบบ incremental จะต้องมียุติตั้งต้นของ moving platform ที่เราสามารถวัดค่าความยาวของเส้นลวดอย่างแน่นอน และใช้จุดนี้เป็นจุดตั้งต้นของการเทียบวัดความยาวของเส้นลวด ในการทดสอบได้ทำการควบคุมการเคลื่อนที่ของ moving platform ในรูปแบบต่างๆ ทั้งในแง่มุมของการเคลื่อนที่เชิงเส้นและการเคลื่อนที่เชิงมุม ซึ่งสามารถแสดงผลการเคลื่อนที่ในเชิงรูปภาพได้ดังรูป 4.11-4.14 รูปที่ 4.11 แสดงการควบคุมการเคลื่อนที่ของ moving platform เป็นแบบเส้นตรงจากซ้ายไปขวา กลับมาด้านซ้ายโดยมีระยะในการเคลื่อนที่ซ้าย-ขวา เป็น 12 เซนติเมตรและคาบของการเคลื่อนที่ไปกลับ 2 วินาที รูปที่ 4.12 แสดงถึงการเคลื่อนที่แบบขึ้นบนลงล่างระยะในการเคลื่อนที่บนล่าง เป็น 12

เซนติเมตรและคาบของการเคลื่อนที่ไปกลับ 2 วินาที รูปที่ 4.13 แสดงการควบคุมเชิงการหมุนโดยมีจุดศูนย์กลางของ moving platform อยู่นิ่งอยู่กับที่ โดยมีช่วงมุมในการเคลื่อนที่ 60 องศา และคาบของการเคลื่อนที่ไปกลับ 2 วินาที ซึ่งจากการสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าระบบสามารถควบคุมให้ moving platform เคลื่อนที่ไปได้ตามประสงค์เป็นอย่างดี ที่ความเร็วและช่วงแอมพลิจูดของการเคลื่อนที่ที่กำหนด โดยที่เส้นลวดไม่มีการหย่อนตัว

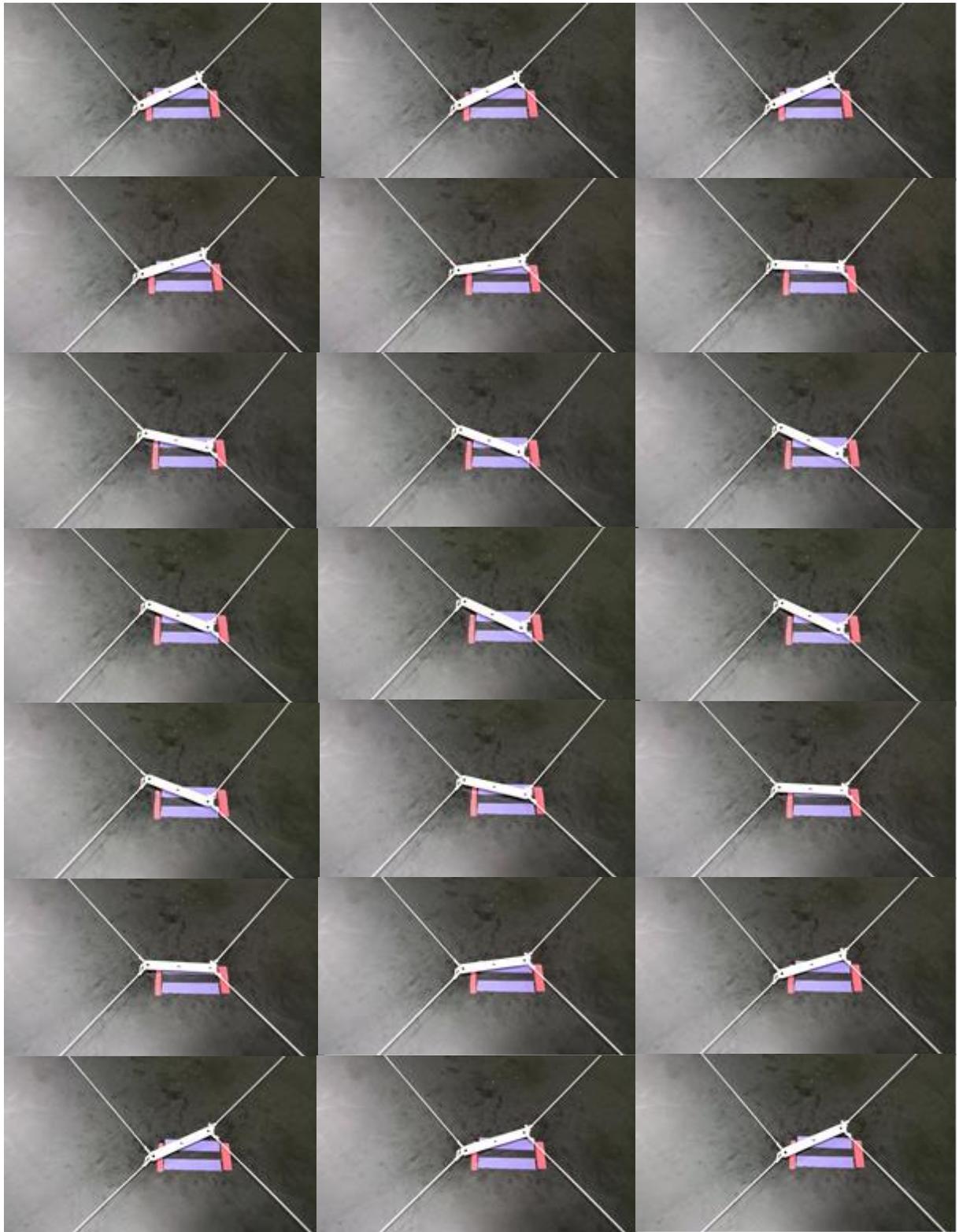


รูปที่ 4.11 การเคลื่อนที่แบบเส้นตรง ซ้าย-ขวา

เมื่อเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่ของของ moving platform ปรากฏว่า จะมีบางจังหวะที่เส้นลวดมีการหย่อนตัวซึ่งเกิดจากระบบถึงขีดความสามารถของการสร้างแรงในเส้นลวด อย่างไรก็ตามสำหรับงานทั่วไปของการควบคุมแบบแฮพติด ที่มีการเคลื่อนที่ในช่วงกว้าง จะไม่จำเป็นต้องสร้างแรงที่มี bandwidth สูงมากนักซึ่งระบบที่สร้างถือว่าเพียงพอต่องานประยุกต์ ทางด้าน haptic interface



รูปที่ 4.12 การเคลื่อนที่แบบขึ้นบน-ลงล่าง



รูปที่ 4.13 การเคลื่อนที่แบบหมุน

## ปัญหาและอุปสรรค

ในด้านการทดสอบนี้เนื่องจากยังคงขาดอุปกรณ์ที่สามารถตรวจวัดตำแหน่งของ moving platform ได้อย่างละเอียดแม่นยำ จึงยังไม่สามารถยืนยันผลการทดสอบในเชิงตัวเลขได้ ดังนั้นหน้าที่ในด้านของผลสัมฤทธิ์ของการควบคุมจึงน้อย จำเป็นต้องหาแนวทางที่เหมาะสมที่จะแสดงผลออกมาให้ถูกต้อง ทางเลือกหนึ่งคือการใช้ระบบ vision ความเร็วและความละเอียดสูงเข้ามาช่วยในการตรวจวัด ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวปัจจุบันยังไม่สามารถจัดหาได้

## บทที่ 5

### บทสรุป

โครงการวิจัยนี้ได้ดำเนินการพัฒนาอุปกรณ์แฮพติกซึ่งทำงานบนพื้นฐานของระบบแขนกลแบบขนานขับเคลื่อนด้วยเส้นลวด โดยภารกิจหลักคือการออกแบบระบบเชิงกลที่เหมาะสม รวมทั้งการออกแบบตัวควบคุมให้ระบบสามารถสร้างแรงเสมือนจริงได้ ในโครงการนี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์โครงสร้างเชิง kinematics ซึ่งเกี่ยวข้องกับการหาค่าตอบเชิง inverse kinematics การกำหนดขนาดที่เหมาะสมในการนำระบบไปใช้ในงาน haptic interface รวมทั้งการหา workspace ของระบบขับเคลื่อนด้วยเส้นลวด ซึ่ง workspace ของระบบขับเคลื่อนด้วยเส้นลวดมีความซับซ้อนมากกว่าแขนกลแบบขนานทั่วไปและมีการให้นิยามที่แตกต่างกัน ในการวิเคราะห์ไดนามิกส์ dynamics ได้มีการศึกษาสมการการเคลื่อนที่รวมทั้งการควบคุมตำแหน่งของ moving platform และการสร้างแรงเสมือนให้เกิดขึ้นกับ moving platform ได้ ระบบทดสอบที่ได้สร้างขึ้นสามารถรองรับการทดสอบทางรูปแบบ 2 มิติและ 3 มิติ โดยในโครงการได้เน้นในส่วนของการทดสอบการเคลื่อนที่แบบ 2 มิติ ผลการทดสอบในแง่มุมของเชิงการควบคุมการเคลื่อนที่ของ moving platform นั้น พบว่าระบบสามารถทำการควบคุมการเคลื่อนที่ของ moving platform 2 มิติ ได้เป็นอย่างดี ซึ่งปัญหาในแง่มุมของ kinematic inconsistency ซึ่งเกิดจากการนำระบบตัวเลขเข้ามาใช้นั้นมีปัญหาคือความถูกต้องแม่นยำน้อยมาก ไม่มีผลต่อการนำระบบมาใช้ในลักษณะของ haptic device 2 มิติ ได้ อย่างไรก็ตามสำหรับชุดทดสอบที่สร้างขึ้น ยังคงขาดอุปกรณ์ที่สำคัญในการเทียบวัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของ moving platform อย่างถูกต้องแม่นยำเพียงพอที่จะนำไปใช้อ้างอิงหรือประเมินผลในการควบคุมได้อย่างเพียงพอ จำเป็นจะต้องหาอุปกรณ์ที่สามารถตรวจวัดระยะการเคลื่อนที่ที่มีช่วงกว้างรวมทั้งให้ค่าความละเอียดอย่างสูงดังเช่นกล้องความเร็วสูงความละเอียดสูง และนำเทคนิคทางด้าน Vision เข้ามาใช้ หรือหาทางประยุกต์ใช้อุปกรณ์ในรูปแบบอื่นที่สามารถตรวจวัดการเคลื่อนที่ของระบบ 2-3 มิติได้และมีความแม่นยำที่เพียงพอ

## เอกสารอ้างอิง

- Ando, N., Korondi, P. and Hashimoto, H., "Networked telemicromanipulation systems "Haptic Loupe"," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 51 (6), pp. 1259-1271, 2004.
- Brandt G., et.al, "CRIGOS: A compact robot for image-guided orthopedic surgery," *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, Volume 3, Issue 4, 1999, Pages 252-260.
- Bruzzone, L.E., Molfino, R.M., "A geometric definition of rotational stiffness and damping applied to impedance control of parallel robots," *International Journal of Robotics and Automation*, Volume 21, Issue 3, 2006, Pages 197-205
- Diao, X. and Ma, O., "Vibration analysis of cable-driven parallel manipulators," *Multibody Syst Dyn*, Vol. 21, pp. 347–360, 2009.
- Ferlay, F. and Gosselin, F., "A new cable-actuated Haptic interface design," *Lecture Notes in Computer Science*, 5024 LNCS, pp. 474-483, 2008.
- Ferraresi, C., Carello, M., Pescarmona, F. and Grassi, R., "Wire-driven pneumatic actuation of a new 6-DOF haptic master," *Proceedings of 8th Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis, ESDA2006*, 2006.
- Ferraresi, C., Paoloni, M. and Pescarmona, F., "A force-feedback six-degrees-of-freedom wire-actuated master for teleoperation: The WiRo-6.3," *Industrial Robot*, 34 (3), pp. 195-200, 2007.
- Gallardo-Alvarado, J., Orozco-Mendoza, H., Rodríguez-Castro, R. and Rico-Martínez, J.M., "Kinematics of a class of parallel manipulators which generates structures with three limbs," *Multibody System Dynamics*, Volume 17, Issue 1, February 2007, Pages 27-46.
- Giblin, D.J., Zongliang, M., Kazerounian, K. and Gan, Z.X., "Target tracking manipulation theories for combined force and position control in open and closed loop manipulators," *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, Volume 129, Issue 3, March 2007, Pages 326-333.
- Gough, V.E. and Whitehall, S.G., "Universal tyre test machine," *Proceedings of the FISITA Ninth International Technical Congress*, pp. 117-137, May, 1962.
- Gwinnett, J.E., "Amusement devices," *US Patent No. 1,789,680*, January 20, 1931.

- Homma, K., Fukuda, O., Nagata, Y., "Study of a wire-driven leg rehabilitation system," IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Lausanne, September 2002, pp. 1451-1456.
- Hwang, G., Szemes, P.T., Ando, N, Hashimoto, H., "Development of a single-master multi-slave tele-micromanipulation system," *Advanced Robotics*, 21 (3-4), pp. 329-349, 2007.
- Hwang, Y.-K. , Yoon, J.-W. , Ryu, J.-H., "The optimum design of a 6-DOF parallel manipulator with large orientation workspace," SICE-ICASE International Joint Conference, art. no. 4109156, pp. 1255-1259, 2006.
- Jinung An and Kwon, D.-S., "Five-bar linkage haptic device with DC motors and MR brakes," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20 (1), pp. 97-107, 2009.
- Karkoub, M., Her, M.-G., Hsu, K.-S. and Chen, C.-Y. , "Neural-net tuned PID control of a parallel type mechanism with force feedback for virtual reality applications," *Robotica*, 22 (3), pp. 319-327, 2004.
- Kawamura, S., Kino, H., and Choe Won, "High-speed manipulation by using parallel wire-driven robots," *Robotica* , V. 18, pp. 13–21, 2000.
- Kim, J.-W., Park, D.-H., Kim, H.-S. and Han, S.-H., "Design of a novel 3-DOF parallel-type haptic device with redundant actuation," International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2007), art. no. 4406704, pp. 2270-2273, 2007.
- Kim, K., Chung, W.K., Youm, Y., "Design and Analysis of a New 7-DOF Parallel Type Haptic Device: PATHOS-II," IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 3, pp. 2241-2246, 2003.
- Kim, H.W., Lee, J.H., Suh, I.H., and Yi, B.-J., "Comparative study and experimental verification of singular-free algorithms for a 6 DOF parallel haptic device," *Mechatronics*, 15 (4), pp. 403-422, 2005.
- Kim, T.-J. , Yi, B.-J. and Suh, I.H., "Load distribution algorithms and experimentation for a redundantly actuated, singularity-free 3-DOF parallel haptic device," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 3, pp. 2899-2904, 2004.
- Koevermans W.P, et.al., "Design and performance of the four d.o.f. motion system of the NLR research flight simulator. In AGARD Conf. Proc. No 198, Flight Simulation, pages 17-1/17-11, La Haye, October, 20-23, 1975

- Kong, M., Zhang, Y., Du, Z. and Sun, L., "Design of a novel parallel haptic device," *High Technology Letters*, 14 (1), pp. 12-17, 2008.
- Kwon, Dong-Soo, Woo, Ki Young, Cho, Hyung Suck, "Haptic control of the master hand controller for a microsurgical telerobot system," Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, 3, pp. 1722-1727, 1999.
- Lee, J.H., Kim, H.W., Yi, B.-J., Suh, I.-H., "Singularity-free algorithms and design scheme for a new 6-DOF parallel haptic device," Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, 4, pp. 4229-4235, 2002.
- Lopes, A.M. and Almeida, F.G., "Acceleration-based force-impedance control of a six-dof parallel manipulator," *Industrial Robot*, Volume 34, Issue 5, 2007, Pages 386-399.
- Lopes, A.M. and Almeida, F.G., "Acceleration based force-impedance control of a 6-dof parallel robotic manipulator," IEEE International Conference on Computational Cybernetics, ICCCB, art. no. 4097687, 2006.
- Merlet, J.-P., "Parallel Robots 2<sup>nd</sup> edition," in Solid Mechanics and its applications series: Springer, 2006
- Ottaviano, E., Castelli, G., and Cannella, G. "A Cable-Based System for Aiding Elderly People in Sit-to-Stand Transfer," *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 36: 310–329, 2008
- Otis, M.J.-D., Mokhtari, M., Du Tremblay, C., Laurendeau, D., De Rainville, F.-M. and Gosselin, C.M., "Hybrid control with multi-contact interactions for 6DOF haptic foot platform on a cable-driven locomotion interface," Symposium on Haptics Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Haptics, art. no. 4479937, pp. 161-168, 2008.
- Otis, M.J.-D., Perreault, S., Nguyen-Dang, T.-L., Lambert, P., Gouttefarde, M., Laurendeau, D., Gosselin, C. Determination and management of cable interferences between two 6-DOF foot platforms in a cable-driven locomotion interface, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans* 39 (3), 2009, pp. 528-544
- Park, H., Lim, Y.-A., Pervez, A., Lee, B.-C., Lee, S.-G. and Ryu, J., "Teleoperation of a multi-purpose robot over the internet using augmented reality," ICCAS 2007 - International Conference on Control, Automation and Systems, art. no. 4406776, pp. 2456-2461, 2007.

- Pervez, A, Lim, Y. A., Park, H., and Ryu, J., "Active Synchronized Motion Control for Comfortable Walking Support," International Conference on Control, Automation and System, Oct. 17-20,2007 in COEX, Seoul , Korea
- Pollard, W.L.G., "Spray painting machine," US Patent No. 2,213,108, August 26, 1940.
- Richard, P.-L., Gosselin, C.M. and Kong, X., "Kinematic analysis and prototyping of a partially decoupled 4-DOF 3T1R parallel manipulator," *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, Volume 129, Issue 6, June 2007, Pages 611-616.
- Ryu, D., Song, J.B., Cho, C., Kang, S., and Kim, M., "Development of a six DOF haptic master for teleoperation of a mobile manipulator," *Mechatronics*, Vol. 20, pp.181–191, 2010.
- Sabater, J.M., Saltarén, R.J. and Aracil, R., "Design, modelling and implementation of a 6 URS parallel haptic device," *Robotics and Autonomous Systems*, 47 (1), pp. 1-10, 2004.
- Sabater, J.M., Azorin, J.M., Aracil, R. and Saltaren, R.J., "Magister-P; a 6-URS parallel haptic device with open control architecture" *Robotica*, 23 (2), pp. 177-187, 2005.
- Sabater, J.M., Aracil, R., Saltaren, R.J. and Payá, L., "A novel parallel haptic interface for telerobotic systems," *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 31, pp. 45-59, 2007.
- Shoham et.al., "Bone-Mounted miniature robot for surgical procedures: concept and clinical applications," *IEEE transaction on Robotics and Automation*, 19(5): 893-901, October 2003.
- Stewart, D., "A platform with six degrees of freedom," Proceedings of the IMechE, Vol. 180, Pt. 1, No. 15, pp. 371-385, 1965-66.
- Williams II, R.L., "Cable-suspended vehicle simulation system concept," Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, DETC2007, 8 PART A, pp. 199-207, 2007.