

การวิเคราะห์ความแคล่วคล่อง ของหุ่นยนต์โครงสร้าง 7 ขา

ชิต เหล่าวัฒนา¹ วรพัฒน์ นุกุลวุฒิโสภาส² สิงหา สิริพันธ์²
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์ความแคล่วคล่อง (dexterity) โดยทั่วไปนั้นพิจารณาเฉพาะตัวของหุ่นยนต์เท่านั้น ไม่ได้รวมถึงสิ่งแวดล้อมที่หุ่นยนต์ต้องทำงาน แต่หุ่นยนต์จำเป็นต้องมีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมเสมอ จึงไม่สามารถนำผลวิเคราะห์ไปใช้ในงานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้เสนอการวิเคราะห์ความแคล่วคล่องโดยรวมตัวหุ่นยนต์และสิ่งแวดล้อมที่หุ่นยนต์ทำงานเข้าเป็นระบบเดียวกัน ในที่นี้พิจารณาหุ่นยนต์เดินแบบกึ่งอัตโนมัติ (semi-autonomous walking machine) : Frame Walker กับงานที่หุ่นยนต์กระทำ ได้แก่ การเคลื่อนที่หลบผ่านสิ่งกีดขวาง ผลที่ได้สามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบทางกลของหุ่นยนต์ได้ ขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มจากการคำนวณหาดัชนีความยาก (index of difficulty) จากทฤษฎีด้านข้อมูล ดรรชนีนี้ชี้ความยากง่ายในงานที่หุ่นยนต์ต้องกระทำ และท้ายที่สุดได้ทำการวิเคราะห์หาความแคล่วคล่องของหุ่นยนต์ เมื่อค่านี้เป็นบวกสามารถแน่ใจว่า หุ่นยนต์สามารถทำงานที่ต้องการนั้นได้

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศูนย์ปฏิบัติการพัฒนาหุ่นยนต์ภาคสนาม

² นักศึกษามหาบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

' HJ WLUW \$ QDO VLV RI D6 HP IDXVRQRP RXV

: DOLQJ 0 DFKLQH

Schitt DRZDWMQD¹ : RUDSDVWNNXZXMIRS DV² Singha HHUDSKDQ²

. LQJ 0 RQJNXWV8 QYHMDW RI 7 HKQRBJ\ 7 KRQEXL Bangmod, RRQJNUX%DQJNRN

\$ EWWDFW

7 KHURERWJ WLUW GHMFP IQHGE\ FRQYHQWRQD HMRGVZ DMFRQMCHUQI RQD WHURERW
ZIXRXXQ FRQFHQ eoHQMLRP HQWZ RUNSDFHDURXQGWFP %XWRERWP XWMDZLD VQWDFVQI
Z MKHQMLRQP HQWVWHHXOWFDQQRWSELEDMR UHDMWDMRQMHIFWYHD , QWVSDSHZ H
SUSRVHMHGH WLUW DQDQVLRV WHURERWNNV WWP) UEP H DMHDMFP IDXVRQRP RXV DDIQI
P DKLQHZ DMWLRXJ KIWVXURXQGHQMLRQP HQWV KHLHXOWDGDWRGHML QV QWVHMDQGURERW
FRQILLXDMRQ ILVWGHMFP IQHDQIQGH RI GLIIFXW EDMGRQIQIRP DMRQWHRU 7 KIMQGH
H KHLWVHDMHRI GLIIFXW Z KHQWHURERSWHIRUP WANNHJ REVWFODYRICDQFH QDGGWRQ
Z HFDQXDMWVHMHQW WLUW RI WHURERWDXUHKDMDQVFFHMXQ FRP SOMGHMLHGWANN

¹ HMDUK EKCPVAV%CPVGTQH ZHUDWRQ HQT Field roBQtics ' HMDSP HQW

² WBDWV WGHQMSDWF HQW 0 HFKQIHQ QIQHIIQ

1. บทนำ

ปัจจุบันนี้หุ่นยนต์มีบทบาทอย่างมากในด้านการสำรวจพื้นที่ที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ เช่น การสำรวจอวกาศ พื้นที่ที่มีก๊าซระเบิด หรือพื้นที่ที่มีสารกัมมันตรังสี เป็นต้น ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวส่วนมากเป็นพื้นที่ที่มีความขรุขระ พื้นที่ลาดเอียง พื้นที่ที่เป็นหลุมเป็นบ่อ และมีสิ่งกีดขวางมากมาย หุ่นยนต์ที่ใช้ล้อในการเคลื่อนที่จึงไม่เหมาะสมในการสำรวจ เนื่องจากหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ด้วยล้อนั้นมีข้อจำกัดคือไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามสิ่งกีดขวางที่มีความสูงมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของล้อได้ และมีโอกาสล้มคว่ำได้มากกว่าเมื่อเทียบกับหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ด้วยขา เนื่องจากตัวหุ่นยนต์รองรับด้วยขาที่ยืนอยู่บนพื้น ซึ่งสามารถวางตัวเพื่อรักษาระดับของตัวหุ่นยนต์ได้เหมาะสมกับภูมิประเทศ ได้ดีกว่าหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ด้วยล้อ นั่นคือสามารถตัดผลของภูมิประเทศที่มีต่อตัวหุ่นยนต์ได้ นอกจากนี้ หุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ด้วยขามีลักษณะเฉพาะคือ การเคลื่อนที่แบบค่อยเป็นค่อยไป (incremental motion) ในทิศทางใดก็ได้ ซึ่งทำให้สามารถทำวางแผนการเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น

ศูนย์ปฏิบัติการพัฒนาหุ่นยนต์ภาคสนาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ได้ออกแบบและสร้างหุ่นยนต์โครงสร้างเจ็ดขา : Frame Walker ขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้หุ่นยนต์ดังกล่าวเป็นหุ่นยนต์ต้นแบบเพื่อดำเนินการวิจัย พัฒนาเทคโนโลยีทางด้านหุ่นยนต์เคลื่อนที่โดยใช้ขา โดยงานวิจัยพื้นฐานที่จะใช้หุ่นยนต์ดังกล่าวเป็นฐานในการทดลองเรื่องความสามารถในการเคลื่อนที่เชิงปริมาณ (quantification of mobility) ดังจะได้กล่าวในส่วนต่อไปของบทความนี้

2. งานวิจัยที่มีมาก่อน

สำหรับหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่โดยใช้ขา (legged robot) นั้นได้มีนักวิจัยทำการวิจัย พัฒนา ออกแบบและสร้างกันมาก่อนหน้านี้แล้วดังตัวอย่างผลงานวิจัยที่จะกล่าวต่อไปนี้

หุ่นยนต์แอมเบลอร์ (Ambler) [4] เป็นผลงานวิจัยของสถาบันหุ่นยนต์ มหาวิทยาลัยคาร์เนกีเมลลอนมีหกขา ซึ่งแต่ละขามีลักษณะตั้งฉาก (orthogonal leg) ซึ่งข้อดีคือสามารถควบคุมได้ง่าย เนื่องจากส่วนควบคุมการเคลื่อนที่ของขาและส่วนควบคุมการเคลื่อนที่ของตัวหุ่นสามารถทำงานได้โดยอิสระต่อกัน จุดมุ่งหมายในการสร้างคือ ใช้สำรวจพื้นผิวที่เต็มไปด้วยก้อนหินของดาวอังคาร ซึ่งจำเป็นต้องควบคุมแบบอัตโนมัติเต็มรูปแบบ (fully autonomous) สามารถตัดสินใจในสถานการณ์คับขันได้ด้วยตัวมันเอง เนื่องจากเวลาในการติดต่อสื่อสารระหว่างศูนย์ควบคุมที่อยู่บนโลกและหุ่นยนต์ที่อยู่บนดาวอังคารมากเกินไป การเคลื่อนที่ของแอมเบลอร์เป็นแบบท่าทางแบบข้ๆ (circulated gait) และใช้เลเซอร์วัดระยะทาง (laser rangefinder) ในการสร้างแผนที่ภูมิประเทศ (terrain map) ซึ่งใช้ในการวางแผนการเคลื่อนที่ (path planning) และคำนวณหาตำแหน่งการวางเท้า (footfall selection)

หุ่นยนต์แดดดาลัส (Daedalus) [10] ซึ่งเป็นผลงานวิจัยของสถาบันหุ่นยนต์ มหาวิทยาลัยคาร์เนกีเมลลอน โดยหุ่นยนต์ประกอบด้วยขาหกขาเช่นเดียวกัน มีลักษณะเป็นขาตั้งฉาก แต่จะแตกต่างกันที่ลักษณะการเคลื่อนที่ ซึ่งเคลื่อนที่แบบหมุนและเลื่อนตัวหุ่น ใช้กล้องสเตอริโอในการสร้างแผนที่ความลึก (local depth map) จากภาพสเตอริโอโดยใช้อัลกอริทึมของ Okutami และ Kanade นักวิจัยประจำสถาบันหุ่นยนต์ของมหาวิทยาลัยดังกล่าว

Walking Beam [5] ออกแบบและสร้างโดยคณะวิจัยหุ่นยนต์ของบริษัทมาร์ติน มาเริตตา ภายใต้การสนับสนุนจาก NASA MRSR Program/Internal IR & D Funding มีเซ็นเซอร์แสงเพื่อตรวจสอบระยะความสูงจากพื้น Barghava S. และ Waldron J. K. ได้ทำการวิเคราะห์การสมดุลงของหุ่นยนต์ในการเคลื่อนที่บนพื้นเอียง [6]

Koyachi N. และคณะผู้วิจัยที่ห้องปฏิบัติการวิจัยด้านวิศวกรรมเครื่องกล (MEL) ในประเทศญี่ปุ่นได้พัฒนาหุ่นยนต์ MELcrab 1 [11] ซึ่งเป็นหุ่นยนต์แบบขาตั้งฉากซึ่งลักษณะท่าทางการเคลื่อนที่เลียนแบบปู แต่ละขามีสององศาอิสระสำหรับเคลื่อนที่ในแนวตั้งและแนวระนาบแยกจากกัน MELcrab 1 สามารถเคลื่อนที่ได้เพียงเดินหน้า ถอยหลังในพื้นที่ที่เป็นขั้นหรือทางลาดชัน ต่อมาได้พัฒนา MELcrab 2 [13] ขึ้นโดยเพิ่มให้แต่ละขามีสามองศาอิสระ ทำให้สามารถหมุนขาและเคลื่อนที่ด้านข้างได้ ซึ่งลักษณะท่าทางการเคลื่อนที่ที่สามารถปรับได้ (semi-fixed gait) ใช้สัญญาณป้อนกลับจากพริกขี้มิติเซ็นเซอร์ (proximity sensor) และเซ็นเซอร์แบบสัมผัส (tactile sensor) เพื่อป้องกันการกระแทกและหาตำแหน่งการวางเท้าที่เหมาะสม

ทางด้านงานวิจัยพื้นฐานด้านการประเมินค่าเชิงตัวเลขของความแคล่วคล่องนั้น Sturges R. H., Jr. [9] มหาวิทยาลัยคาร์เนกีเมลลอน สหรัฐอเมริกา ได้นำเอาทฤษฎีข้อมูล (information theory) และกฎของฟิตต์ (Fitt's Law) มาใช้ในการหาค่าความแคล่วคล่องในเชิงปริมาณ (quantification of machine dexterity) ของหุ่นยนต์ที่ใช้ในการสวมชิ้นงาน และเปรียบเทียบหุ่นยนต์ที่ทำการสวมชิ้นงาน โดยศึกษาหาตำแหน่งการวางตัวของหุ่นยนต์ที่มีค่าความแคล่วคล่องสูงสุด และศึกษาผลของการถ่วงน้ำหนักความคลาดเคลื่อนเชิงมุมของข้อต่อ (weighting angle error) ที่มีต่อค่าความแคล่วคล่อง

ชิต เหล่าวัฒนา [8] ศูนย์ปฏิบัติการพัฒนาหุ่นยนต์ภาคสนาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ได้ทำการวิจัยการสวมชิ้นงานแบบอ่อนตาม (passive) โดยชิ้นงานมีลักษณะไม่สมมาตรกันในแนวแกน เช่น ชิ้นงานสวมที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยม หกเหลี่ยม, คอนเน็กเตอร์ 25 เข็ม และใช้ Spatial Remote Center Compliance (SRCC) ซึ่งสร้างจากผลการวิเคราะห์กระบวนการออกแบบโดยใช้วิธีการหาค่าความแคล่วคล่องในเชิงปริมาณของ Sturges R. H., JR., จากการทดลองการใช้ SRCC สามารถสวมชิ้นงานที่มีลักษณะไม่สมมาตรกันในแนวแกนดังกล่าวได้อย่างดี

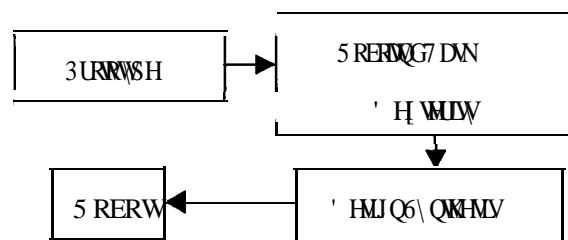
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและขยายผลวิจัยด้านความสามารถในการเคลื่อนที่เชิงปริมาณมาประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ในการวางแผนการเคลื่อนที่ผ่านภูมิประเทศที่กำหนดให้

3. การวิเคราะห์กระบวนการออกแบบแบบย้อนกลับ (Reverse Design Synthesis)

การที่หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ในภูมิประเทศที่มีความขรุขระ พื้นที่ลาดเอียง พื้นที่ที่เป็นหลุมเป็นบ่อ สิ่งที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบคือ ความสามารถในการเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวาง (traversability) ตัวอย่างเช่น หุ่นยนต์ต้องสามารถข้ามสิ่งกีดขวางได้เท่าไร หุ่นยนต์ต้องสามารถขึ้นหรือลงพื้นที่ลาดเอียงที่มีความชันกี่องศา ความเร็วโดยเฉลี่ยของหุ่นยนต์ประมาณเท่าไร เหล่านี้เป็นข้อกำหนดหลัก

ในการออกแบบหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ด้วยขาเพื่อให้เหมาะสมกับสภาพภูมิประเทศ จำต้องกำหนดข้อมูลจำเพาะ เช่น ขนาดของหุ่นยนต์ ความยาวของขา ระยะในการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อ พื้นที่ทำงาน (reachable workspace) ลักษณะท่าทางการเคลื่อนที่ (gait) ฯลฯ ที่เหมาะสมกับสภาพของภูมิประเทศแต่ละแบบได้ แต่เนื่องจากยังไม่มีทฤษฎีพื้นฐานในการสร้าง และข้อจำกัดของระบบทางกล ดังนั้นในการสร้างหุ่นยนต์ต้นแบบจึงจำเป็นต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ขึ้นเอง ซึ่งอาจไม่เหมาะสมกับสภาพภูมิประเทศ ในกรณีนี้เมื่อเข้าไปในพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวาง ซึ่งสูงเกินกว่าที่หุ่นยนต์จะสามารถก้าวข้ามไปได้และเป็นทางตัน อาจจะทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบวนกลับมาตำแหน่งเดิม (local minima หรือ cyclic behavior) เป็นผลให้หุ่นยนต์ไม่สามารถหาทางออก และเคลื่อนที่ไปสู่ตำแหน่งที่ต้องการได้

หุ่นยนต์ต้นแบบที่สร้างขึ้นได้นำทฤษฎีความแคล่วคล่อง (dexterity) มาประยุกต์ใช้ในการวิจัย เพื่อหาข้อมูลจำเพาะต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบ ลักษณะท่าทางการเคลื่อนที่ ข้อจำกัดต่างๆ เพื่อใช้ในการออกแบบระบบทางกลที่เหมาะสม และป้องกันไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่เป็นวนกลับมาตำแหน่งเดิม



รูปที่ 1 การวิเคราะห์กระบวนการออกแบบ (design synthesis)

หุ่นยนต์ที่มีความแคล่วคล่อง (dexterity) สูงต้องประกอบไปด้วย

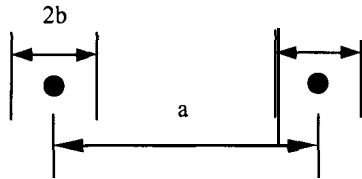
- หุ่นยนต์มีจำนวนองศาอิสระ (degree of freedom) มาก
- ความสามารถในการทำงานที่ความละเอียดสูงได้อย่างแม่นยำ
- ความสามารถรักษาความละเอียดได้คงที่แม้จะทำงานที่ความเร็วสูง
- ความสามารถทำงานได้หลากหลาย

ในการเปรียบเทียบว่าหุ่นยนต์แบบใดมีความแคล่วคล่องมากกว่า จำเป็นต้องหาค่าหรือปริมาณที่สามารถวัดได้ทางเลือกหนึ่งคือการใช้ทฤษฎีข้อมูล (information theory) ซึ่งขอกกล่าวในบทต่อไป

3.1 การใช้ทฤษฎีข้อมูลเพื่อหาค่าความแคล่วคล่อง

เนื่องจากหุ่นยนต์ Frame Walker ถูกออกแบบมาเพื่อการสำรวจในบริเวณที่ไม่ได้คาดหมายไว้ก่อน (unstructured terrain) หากต้องการให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่เข้าไปยังสภาพแวดล้อมใดๆ นั้น ต้องสามารถบอกได้ว่าหุ่นยนต์สามารถกระทำกรนั้นๆ ได้สำเร็จหรือไม่ หรือควรปรับปรุงหุ่นยนต์อย่างไรให้สามารถเข้าไปสำรวจในพื้นที่นั้นๆ ได้ ดังนั้นจึงต้องมีค่าหรือดัชนีที่บอกได้ว่าหุ่นยนต์มีความสามารถเพียงใด และสิ่งแวดล้อมมีความยากง่ายเพียงใด เพื่อมาประเมินความเป็นไปได้ในความสามารถที่จะเคลื่อนที่ไปบนพื้นผิวหรือหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้

ดัชนีความยาก : ID (index of difficulty) มาจากหลักการในทฤษฎีข้อมูล นักวิทยาศาสตร์ฟิตต์ได้เสนอกฎของฟิตต์ (Fitts' Law) [10] ซึ่งคำนวณจากการทดลองโดยการเคลื่อนย้ายจุดในหนึ่งมิติระหว่างเป้าหมายสองจุด มีระยะห่างเท่ากับ a และมีความคลาดเคลื่อนบริเวณจุดแต่ละข้างเท่ากันเท่ากับ b ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การทดลองการเคลื่อนที่ระหว่างจุดสองจุด (Fitts' tapping task)

นิยามดัชนีความยาก (ID) ของ Fitts คือ

$$ID = \log_2 \frac{a}{b} \quad (1)$$

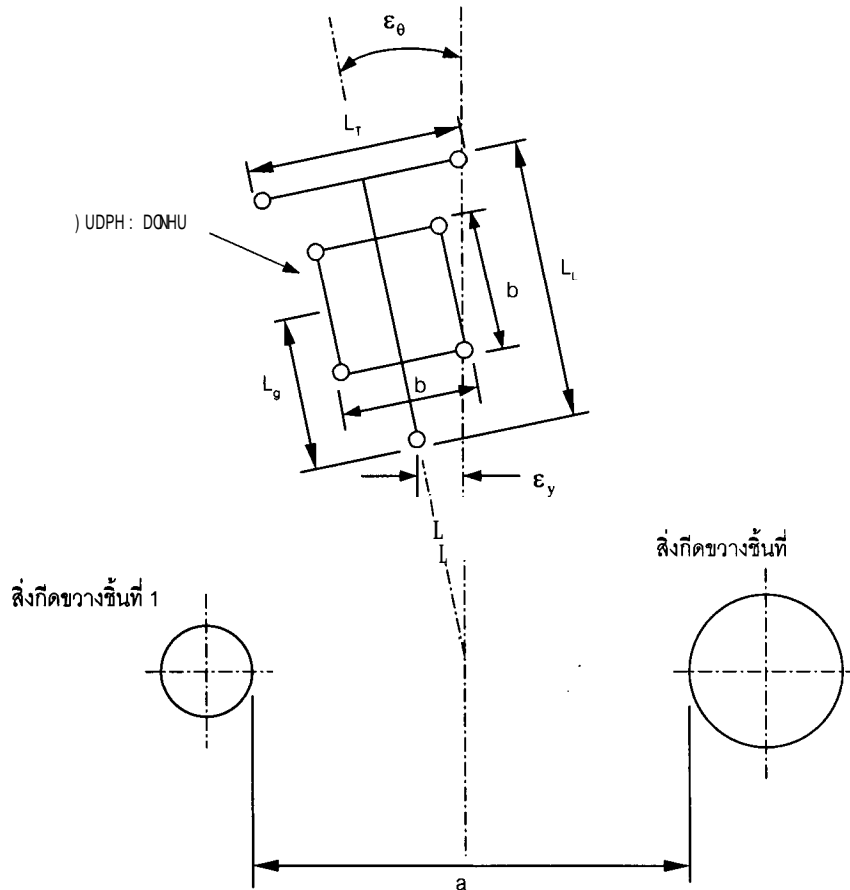
เมื่อแนวความคิดนี้ถูกขยายออกไปใช้กับการเคลื่อนย้ายวัตถุในหลายมิติ ดังนั้นความยากของงานที่ต้องกระทำคือ

$$H = \sum_i \log_2 \left(\frac{a_i}{b_i} \right) \quad i : \text{มิติ} \quad (2)$$

เนื่องจากดัชนีความสามารถ : IC (index of capability) ของหุ่นยนต์ใช้การวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกับดัชนีความยากของงานที่หุ่นยนต์ต้องกระทำ ดังนั้นค่าความแคล่วคล่องรวม (net dexterity) ของงาน สามารถคำนวณได้จากผลต่างต่ำสุดของดัชนีความสามารถของหุ่นยนต์กับความยากของการเคลื่อนที่ (mobile difficulty)

$$Dexterity_{net} = IC_{mobile robot} - ID_{task} \quad (3)$$

จากสมการที่ (3) อธิบายได้ว่าค่าความแฉ่วคล่องมีค่ามากที่สุดเมื่อหุ่นยนต์มีดรรชนีความสามารถสูง และมีค่าต่ำสุดเมื่องานมีดรรชนีความยากมาก เฉพาะค่าความแฉ่วคล่องที่เป็นบวกเท่านั้นหุ่นยนต์จึงสามารถทำงานนั้นได้สำเร็จ



รูปที่ 3 การกำหนดพารามิเตอร์สำหรับวิเคราะห์รูปร่างของหุ่นยนต์ Frame Walker ในการเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวาง

3.2 ความแฉ่วคล่องของหุ่นยนต์เมื่อพื้นที่สำรวจมีสิ่งกีดขวางสองชั้น

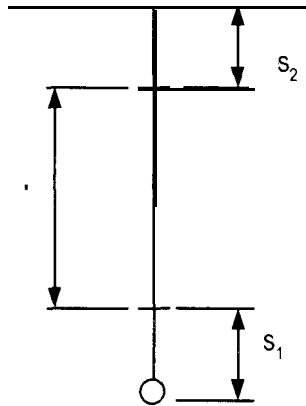
หุ่นยนต์ Frame Walker มีขาแบบตั้งฉากประกอบด้วย body frame มีสี่ขา และ T-frame มีสามขา แต่ละขามีหนึ่งองศาอิสระเป็นแบบข้อพริสมติคเคลื่อนที่ขึ้นและลงในแนวตั้งเท่านั้น ส่วนตัวของ body frame มีสององศาอิสระในการเคลื่อนที่บนระนาบ ประกอบด้วยข้อพริสมติคใช้ในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ให้ได้ระยะทางที่ต้องการ และข้อหมุนสำหรับหมุนตัวหุ่นยนต์ไปในทิศทางที่ต้องการ โดย T-frame และ body frame สลับกันเคลื่อนที่เพื่อให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปในทิศทางต่างๆ ตามลักษณะท่าทางที่ต้องการ

สมมุติว่าสิ่งกีดขวางในระนาบมีหน้าตัดเป็นรูปวงกลม ระยะห่างระหว่างสิ่งกีดขวางน้อยสุดมีค่าเท่ากับ a ดังรูปที่ 3 หุ่นยนต์มีขนาดความกว้าง L_T และมีความยาว L_L ระยะ L_g วัดจากจุดหมุนของหุ่นยนต์ถึงปลายด้านขาเดียวของ T-frame ซึ่งกำหนดให้เป็นด้านหน้าของหุ่นยนต์ ดังนั้นระยะเผื่อ c (clearance) ระหว่างสิ่งกีดขวางกับหุ่นยนต์

$$a = L_T + 2c \quad (4)$$

$$c = \frac{1}{2}(a - L_T) \quad (5)$$

จากรูปที่ 3 เห็นได้ว่าระยะ L_g เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ซึ่งทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในแนวแกน x



รูปที่ พารามิเตอร์ด้านรูปร่างของส่วน T-frame

ความสัมพันธ์ระหว่างระยะ L_g ระยะเลื่อน d และความยาว L_L เป็นดังนี้

$$s_1 + s_2 + D = L_L \quad (6)$$

โดยที่ D คือ ความยาวของเฟืองสะพาน

$$\text{ช่วงจำกัดของระยะเลื่อน } -\frac{D}{2} \leq d \leq \frac{D}{2}$$

โดยที่ d คือ ระยะที่ T - frame เลื่อน

และระยะ L_g มีค่าแปรเปลี่ยนตามระยะเลื่อน d และอยู่ในช่วงจำกัด

$$s_1 \leq L_g \leq s_1 + D$$

$$\text{และ } L_g = d + s_1 + \frac{D}{2} \quad (7)$$

เมื่อกำหนดให้ $s_1 = s_2 = s$ ได้เงื่อนไขบังคับในการเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวางคือ

$$\varepsilon_y + L_g \varepsilon_\theta = c \quad (8)$$

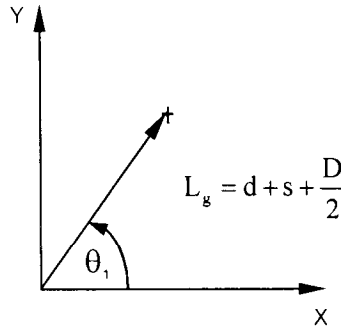
$$\varepsilon_y + (d + s + \frac{D}{2}) \varepsilon_\theta = \quad (9)$$

โดยที่ ε_y คือ ความคลาดเคลื่อนจากแนวกึ่งกลางระหว่างสิ่งกีดขวางในแกน y

ε_θ คือ ความคลาดเคลื่อนเชิงมุมจากแนวกึ่งกลางระหว่างสิ่งกีดขวาง

c คือ ระยะเมื่อระหว่างสิ่งกีดขวางกับหุ่นยนต์

ในการหาค่าความคล่องของหุ่นยนต์ Frame Walker เราต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนในระบบแกนคาร์ทีเซียนกับความคลาดเคลื่อนของแต่ละข้อต่อ (joint coordinate) โดยพิจารณาจากรูปที่ 5 ซึ่งพิจารณาในระบบแกนคาร์ทีเซียนที่ตั้งอยู่บนตัวหุ่นยนต์



รูปที่ 5 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ในระบบของหุ่นยนต์

โดยที่ d คือ ระยะที่ T-Frame เลื่อน และ $d=R\theta_2$

R คือ รัศมีของเฟืองที่ใช้เลื่อน

θ_1 คือ มุมของมอเตอร์สำหรับหมุน T-Frame

θ_2 คือ มุมของมอเตอร์สำหรับเลื่อน T-Frame

จากรูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อกับระยะในแกนคาร์ทีเซียน

$$x = L_g c\theta_1 = \left(R\theta_2 + s + \frac{D}{2} \right) c\theta_1 \quad (10.1)$$

$$y = L_g s\theta_1 = \left(R\theta_2 + s + \frac{D}{2} \right) s\theta_1 \quad (10.2)$$

โดยกำหนดให้ $\cos\theta = c\theta$ และ $\sin\theta = s\theta$

หาอนุพันธ์เทียบกับเวลาเพื่อหาความเร็วในการเคลื่อนที่ของแต่ละแกน

$$\dot{x} = (-s\theta_1)\dot{\theta}_1 \left(R\theta_2 + s + \frac{D}{2} \right) + c\theta_1 R\dot{\theta}_2$$

$$\dot{y} = (c\theta_1)\dot{\theta}_1 \left(R\theta_2 + s + \frac{D}{2} \right) + s\theta_1 R\dot{\theta}_2$$

เขียนในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -s\theta_1 \left(R\theta_2 + s + \frac{D}{2} \right) & c\theta_1 R \\ c\theta_1 \left(R\theta_2 + s + \frac{D}{2} \right) & s\theta_1 R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

เมื่อพิจารณาที่เวลา Δt น้อยๆ เพื่อหาความคลาดเคลื่อนของแต่ละแกนในระบบแกนคาร์ทีเซียน

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -s\theta_1(R\theta_2 + s + \frac{D}{2}) & c\theta_1 R \\ c\theta_1(R\theta_2 + s + \frac{D}{2}) & s\theta_1 R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix}$$

โดยที่ λ_1 เป็นความคลาดเคลื่อนเชิงมุมของมอเตอร์สำหรับหมุน T-Frame

λ_2 เป็นความคลาดเคลื่อนเชิงมุมของมอเตอร์สำหรับเลื่อน T-Frame

เราเรียกเมตริกซ์ที่ mapping ความคลาดเคลื่อนใน joint coordinate ไปยัง Cartesian coordinate ว่า จาคอเบียนเมตริกซ์ (Jacobian matrix) : J

$$- \begin{bmatrix} -s\theta_1(R\theta_2 + s + \frac{D}{2}) & c\theta_1 R \\ c\theta_1(R\theta_2 + s + \frac{D}{2}) & s\theta_1 R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_x \\ J_y \\ J_\theta \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \text{จากสมการที่} \quad \text{จะได้} \quad \log_2 \left(\frac{2\pi}{\lambda_i} \right) - \log_2 \left(\frac{2\pi}{\lambda_1} \right) \\ = \log_2 \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_i} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

โดยที่ λ_i เป็นความคลาดเคลื่อนเชิงมุมของการเคลื่อนที่

λ_i เป็นความคลาดเคลื่อนเชิงมุมของมอเตอร์ และ $i = 1, 2$

สมมติว่าความคลาดเคลื่อนเชิงมุมแต่ละแกนเท่ากัน $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ และ u คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วย สมการที่ (13) สามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_\theta \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} J_x \\ J_y \\ J_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

จากสมการที่ (9) และ (16) เราได้ความคลาดเคลื่อนของการเคลื่อนที่

$$\lambda_i = \frac{\varepsilon}{J_y u + R\theta_2 + s + \frac{D}{2}} \quad (17)$$

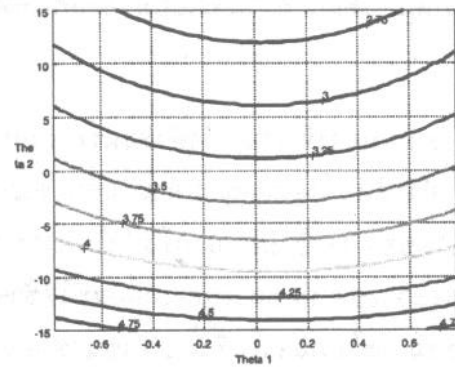
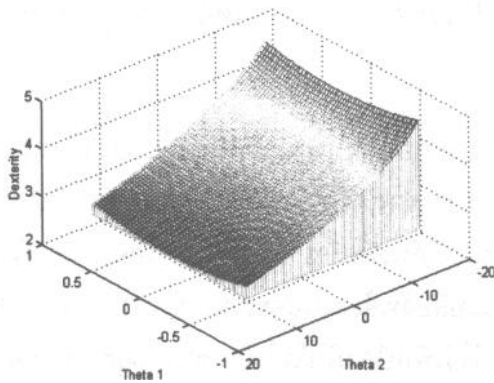
จากสมการที่ (15) และ (17) เราสามารถหาค่าความคลาดเคลื่อนได้

$$\log_2 \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_i} \right) = \frac{\varepsilon}{\lambda \left(J_y u + R\theta_2 + s + \frac{D}{2} \right)} \quad (18)$$

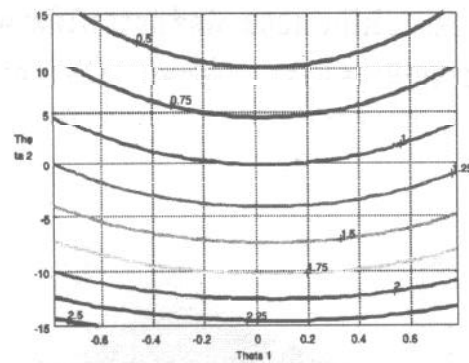
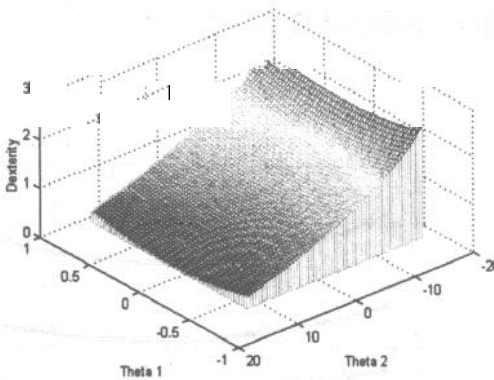
ถ้าค่า $dexterity_{net}$ ที่ได้เป็นบวก แสดงว่าหุ่นยนต์ Frame Walker สามารถเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวางสองชั้นได้โดยที่ไม่เกิดการชนกับสิ่งกีดขวาง

4. ผลการทดลอง

จากการหา $dexterity$ ของ Frame Walker ที่ได้กล่าวมา สมมุติว่าระยะห่างระหว่างสิ่งกีดขวางน้อยสุดมีค่าเท่ากับ $a = 1.00$ เมตร หุ่นยนต์มีขนาดความกว้าง $L_T = 0.75$ เมตร และมีความยาว $L_L = 1.00$ เมตร รัศมีของเฟืองที่ใช้เลื่อน R เท่ากับ 0.02 เมตร ความคลาดเคลื่อนเชิงมุม λ ของแต่ละข้อต่อเท่ากับ 0.01256637 เรเดียนโดยหาจากความละเอียดของเอ็นโคดเดอร์ที่ 500 พัลซ์ต่อรอบ และใช้โปรแกรม MATLAB คำนวณหาค่า $dexterity$ นำมาเขียนกราฟของค่าความคล่องคล่องที่สัมพันธ์กับระยะการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อได้ดังรูปที่ 6 และ 7



รูปที่ 6 กรณีที่ระยะ $a = 1.00$ เมตร $s = 0.2$ เมตร



รูปที่ 7 กรณีที่ระยะ $a = 0.8$ เมตร $s = 0.2$ เมตร

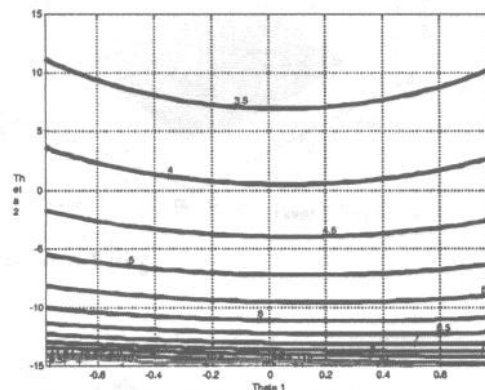
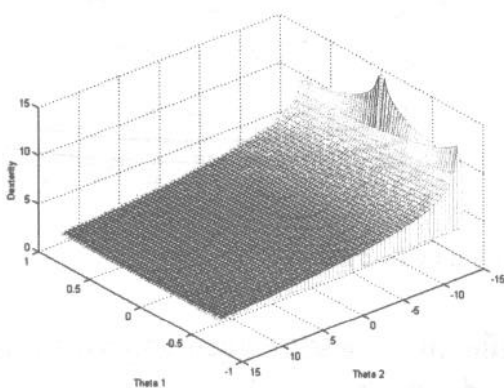
จากผลการคำนวณค่า $dexterity_{net}$ สูงสุดมีค่าเท่ากับ 4.9257 และค่าต่ำสุดเท่ากับ 2.6360 ที่ระยะ $a = 1.00$ เมตร จากค่าที่ได้พบว่าเมื่อระยะเลื่อนมีค่าน้อยลงทำให้ค่า $dexterity$ มีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่ามากที่สุดเมื่อค่ามุม θ_1 มีค่ามากที่สุด เพื่อหาระยะเลื่อนและทิศทางการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมได้

ที่ทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวางที่แคบๆ ได้โดยที่ไม่เกิดการชนกับสิ่งกีดขวาง ระยะ a น้อยสุดที่หุ่นยนต์สามารถผ่านได้เท่ากับ 0.80 เมตรมีค่า $dexterity_{net}$ สูงสุดเท่ากับ 2.6037 และค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.3140

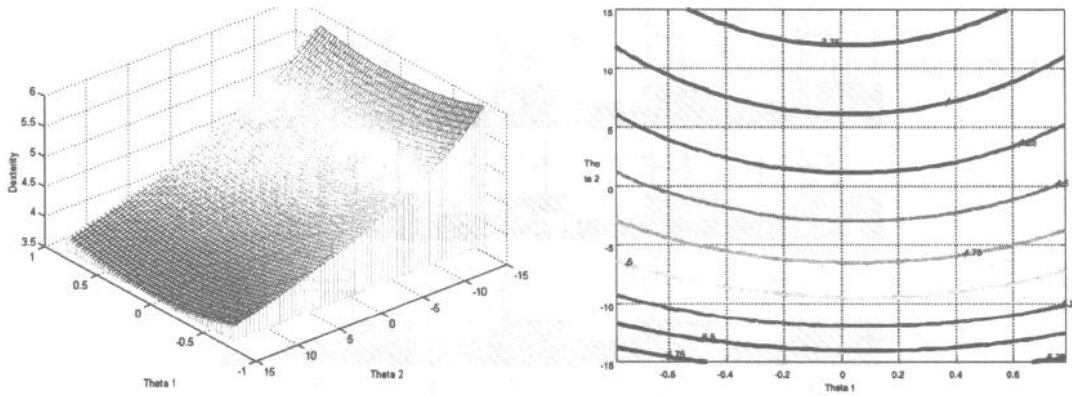
4.1 การออกแบบบนฐานการวิเคราะห์

จากการวิเคราะห์ความคล่องตัวของหุ่นยนต์ เราสามารถคำนวณย้อนกลับเพื่อหาความละเอียด (resolution) ของระบบควบคุมและพารามิเตอร์ด้านรูปร่างของหุ่นยนต์ที่เหมาะสมกับสภาพของพื้นที่และสิ่งกีดขวาง เมื่อกำหนดให้มีสิ่งกีดขวางสองชิ้น ระยะห่างระหว่างสิ่งกีดขวางน้อยสุด a มีค่าเท่ากับ 1.00 เมตร พารามิเตอร์ด้านรูปร่างของหุ่นยนต์ที่ต้องใช้ในการออกแบบ ได้แก่ ความกว้าง L_T และความยาว L_L ของส่วน T-frame และขนาดความกว้าง b ของส่วน body frame รัศมีของเฟืองที่ใช้เลื่อน R และระยะที่หุ่นยนต์สามารถเลื่อนได้ d ส่วนความละเอียดของระบบควบคุม ได้แก่ ความละเอียดของเอ็นโคดเดอร์ ซึ่งก็คือความคลาดเคลื่อนเชิงมุม λ ของแต่ละข้อต่อ

จากสมการที่ (18) ถ้าตัวส่วนของสมการซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ R , D , s และ λ มีค่าน้อยลง ทำให้ค่า $dexterity$ มีค่าเพิ่มขึ้น ขนาดของ R จำกัดที่ความแข็งแรงของวัสดุที่ใช้ทำเฟือง ส่วนขนาดของ D ยิ่งมีค่ามากจึงทำให้ความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้น แต่ถ้ามีค่าน้อยก็ส่งผลให้ต้องมีการยกและวางขา บ่อยครั้งและเคลื่อนที่ได้ช้าซึ่งสิ้นเปลืองพลังงานและเวลา ซึ่งการหาขนาดของ D ที่เหมาะสม จะไม่กล่าวในที่นี้ ส่วนขนาดของ s มีไว้เพื่อป้องกันไม่ให้ขาของ body frame ขวางการหมุนของ T-frame เราสามารถลดได้โดยการปรับปรุงระบบกลไกของหุ่นยนต์เสียใหม่ให้ส่วนขาของ body frame ไม่ขวางการหมุนของ T-frame ซึ่งค่า $dexterity$ มีค่าสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็นอนันต์ที่ตำแหน่ง $\theta_2 = -15$ เรเดียน และ $\theta_1 = 0$ เรเดียน และต่ำสุดเท่ากับ 3.0508 ส่วนกรณีที่เพิ่มความละเอียดของเอ็นโคดเดอร์เป็น 1000 พัลซ์ต่อรอบได้ค่าความคลาดเคลื่อนเป็น 0.00628318 ซึ่งค่า $dexterity$ มีค่าสูงสุดเป็น 5.9257 และต่ำสุดเท่ากับ 3.6360



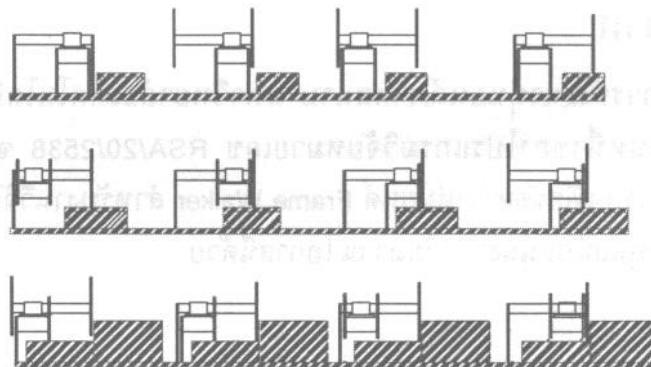
รูปที่ 8 กรณีที่ระยะ $a = 1.00$ เมตร $s = 0$ เมตร และ $\lambda = 0.0125667$

รูปที่ 9 กรณีที่ระยะ $a = 1.00$ เมตร $s = 0.20$ เมตร และ $\lambda = 0.00628318$

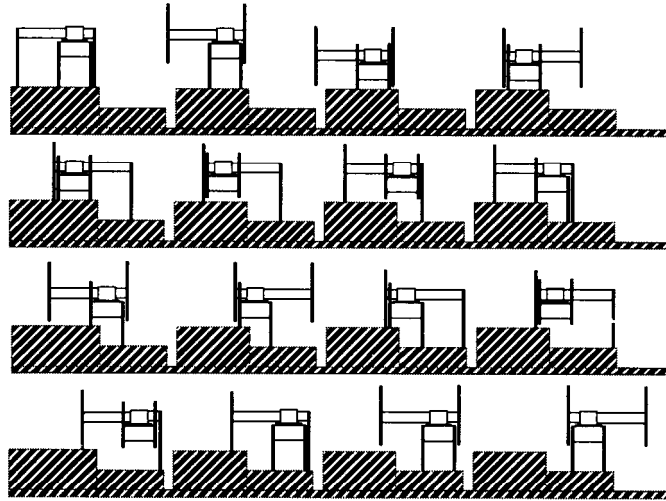
5. แนวทางการพัฒนา

การใช้ระบบ Global Positioning System (GPS) ซึ่งเป็นการวัดแบบ absolute มาช่วยในการกำหนดตำแหน่งของหุ่นยนต์ เพื่อให้สามารถทราบตำแหน่งปัจจุบันได้อย่างถูกต้อง เพราะการใช้วิธีหาตำแหน่งของหุ่นยนต์โดยการคำนวณจากตำแหน่งก่อนหน้า (movement history) ซึ่งเรียกว่า dead reckoning ซึ่งเป็นการวัดแบบ incremental มีความผิดพลาดได้จากระบบทางกลของตัวหุ่นยนต์เอง เช่น ความผิดพลาดที่เกิดจาก backlash ในเฟืองทด ความผิดพลาดจากการคำนวณที่ทำให้เกิดความผิดพลาดสะสม

นอกจากนี้ยังต้องปรับปรุงขีดความสามารถให้สามารถขึ้นและลงพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นขั้นๆ ได้ เนื่องจากมีการย่อหรือยกตัวหุ่นจึงต้องมีการควบคุมตำแหน่งและความเร็วในการย่อหรือยกตัว และเพื่อไม่ให้เกิดการขัดกันของขาต่างๆ จากการที่ความเร็วของแต่ละขามีไม่เท่ากัน ดังนั้นต้องมีส่วนควบคุมวงปิดเก้กัน (coordinated control) รูปที่ 10 และ 11 แสดงลำดับขั้นวิธีการที่ใช้ในการขึ้นและลงบันไดตามลำดับ



รูปที่ 10 ลำดับขั้นการขึ้นบันได



รูปที่ 11 ลำดับขั้นการลงบันได

6. สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการคำนวณหาอัตราของความยาก (index of difficulty) ซึ่งบ่งชี้ความยากง่ายในงานที่หุ่นยนต์ต้องกระทำ และวิเคราะห์หาความแคล่วคล่อง (dexterity) ของหุ่นยนต์ เมื่อค่านี้เป็นบวกเราสามารถแน่ใจว่า หุ่นยนต์สามารถทำงานที่ต้องการนั้นได้ จากค่าที่ได้พบว่า เมื่อระยะเลื่อนมีค่าน้อยลงทำให้ค่า dexterity มีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่ามากที่สุดเมื่อค่ามุม θ_1 มีค่ามากที่สุด เราสามารถที่จะหาระยะเลื่อนและทิศทางการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมได้ ที่ทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวางที่แคบๆ ได้โดยที่ไม่เกิดการชนกับสิ่งกีดขวาง ระยะ a น้อยสุดที่หุ่นยนต์สามารถผ่านได้เท่ากับ 0.80 เมตรมีค่า $dexterity_{net}$ สูงสุดเท่ากับ 2.6037 และค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.3140 เราสามารถคำนวณย้อนกลับเพื่อหาความละเอียด (resolution) ของระบบควบคุมและพารามิเตอร์ด้านรูปร่างของหุ่นยนต์ในกรณีที่ลดขนาดของ s เป็นศูนย์และกรณีที่เพิ่มความละเอียดของเอ็นโคดเดอร์เป็น 1000 พัลซ์ต่อรอบซึ่งทั้งสองกรณีทำให้ค่าของ dexterity มีค่าเพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ศูนย์ปฏิบัติการพัฒนาหุ่นยนต์ภาคสนาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ได้ใช้งบประมาณส่วนหนึ่งของโปรแกรมวิจัยหมายเลข RSA/20/2538 จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) เพื่อจัดสร้างหุ่นยนต์ Frame Walker สำหรับงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

1. สิทธิพงศ์ แซ่คู, สุธีร์ สุกิจพิทยานนท์ และอำนาจ สิริวัฒน์ผลกุล, 2539, หุ่นยนต์โครงสร้าง 7 ขา (Frame Walker) วิทยานิพนธ์นักศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
2. กฤษณ์ ทองขุนคำ และวีรยุทธ อุดมรัตน์, 2539, ระบบควบคุมหุ่นยนต์โครงสร้าง 7 ขา วิทยานิพนธ์นักศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
3. วรพัฒน์ นกุลวุฒิโอภาส, สิงหา ลีระพันธ์ และสิริมา ศรีวรพงศ์เดช, 2540, หุ่นยนต์โครงสร้าง 7 ขา โครงการที่ 2, วิทยานิพนธ์นักศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
4. *Ambler 1990 Presentation Slides*, 1990, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University

%D DQG: KIVNHUJ 3&RQILXUDWRQRI DQ\$ XWQRP RXV5 RERMRU
 0 DUX [SRUDWRQ : RUG 4 QDQHU%PHIPEG 6RHLHW RI 0 DQXDFWUQJ (QIQHUV
 JKDYD6 DQG: DOURQ- . 36WUQW \$ QDQVYRI 7 KH DQIQ %HP
 9 HKIHH 3 URFHGIQ V **QH G** , QM QDWRQD&RQIHQFHRO5 RERWEV **CPF**
 \$ XWP DWRQ
 URMRY(%DUH- HMDHMQRI D3 DQHMU 5 RYH\$ QXDD **4 GUCIE**
4 GNGY KH5 RERWE , QMWWW&DQHIH HQRQ8 QYHMMW
 / DRZDWQD6 (QIQHHG H WUW IR3DWMYH\$ WHP EQ RI 1 RQ - \$ IX P P HWE
 3DUW **2J &** ' DWHUWRQO DFK&DQHIH HQRQ8 QYHMMW
 6WUJH5 + 3\$ 4 XDWIEDWRQRI 0 DFKIQH H WUW \$ SSQEGWRDQ\$ WHP EQ
 7DMN , QM QDWRQD&RQIHQFHRO5 **QH5** RERWEV **4 GUCIE** 9 R02
 KH\$ 3(; 3URMFWRREID5 RERWHMLQ 6-861), *Daedalus &GHP*
 ' REXP HQRQIHQHIH HQRQ8 QYHMMW
 KODP / : KIVNHUJ **JTEC 2CGM CRQVQP 5RCEG** 5 RERWEV in Japan,
 -DSQHMH Techology YDQDWRQ&HQMU7 (&

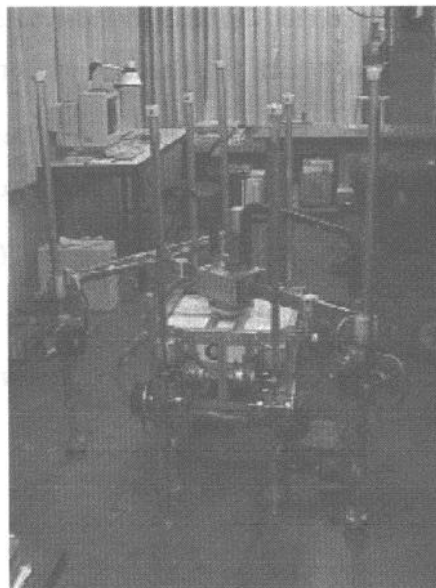
12. Accot J., Zhai S. 1997, "Beyond Fitts' Law: Models for Trajectory-Based HCI Tasks", *Proceedings of the CHI '98 Conference on Human Factors in Computing Systems*, Electronic Publications
13. Koyashi N. et al. 1992, "Sensor-Based Motion Switching Control in Stair-Climbing of Hexapod", *Proceeding of the JAPAN/USA Symposium on Flexible Automation*

ภาคผนวก

ก. ระบบทางกล

หุ่นยนต์โครงสร้างเจ็ดขา (Frame Walker) โดยเป็นหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ด้วยขาแบบขาตั้งฉาก ซึ่งการควบคุมการเคลื่อนที่ไม่ซับซ้อน และทำให้สามารถรักษาระดับของเซ็นเซอร์และอุปกรณ์ต่างๆ ได้ Frame walker ประกอบด้วยสอง sub frame คือ body frame มีสี่ขา และ T-frame มีสามขา แต่ละขามีหนึ่งองศาอิสระเป็นแบบข้อปริสมติคเคลื่อนที่ขึ้นและลงในแนวตั้งเท่านั้น แต่ละขาของหุ่นยนต์ติดตั้งลิimitsวิตช์เพื่อส่งสัญญาณควบคุมการเคลื่อนที่ของขา เมื่อเคลื่อนที่ลงถึงพื้นและเคลื่อนที่ขึ้นและป้องกันไม่ให้ขาเคลื่อนที่เกินระยะที่กำหนด (joint limit)

ส่วนตัวของ body frame มีสององศาอิสระในการเคลื่อนที่บนระนาบเท่านั้น ประกอบด้วยข้อปริสมติคใช้ในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ให้ได้ระยะทางที่ต้องการ และข้อหมุนสำหรับหมุนตัวหุ่นยนต์ไปในทิศทางที่ต้องการ ดังนั้นหุ่นยนต์ Frame Walker จึงมีเก้าองศาอิสระ นั่นคือขาทั้งเจ็ดจะเป็นจุดรองรับและรักษาระดับของตัวหุ่นยนต์ ส่วน body frame จะเป็นส่วนที่เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ โดยการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของขาและการเคลื่อนที่บนระนาบไม่เกี่ยวข้องกัน โดยแต่ละส่วนสลับกันเคลื่อนที่เพื่อให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปในทิศทางต่างๆ ตามลักษณะท่าทาง (gait) ที่ต้องการได้



รูปที่ ก.1 หุ่นยนต์ Frame Walker ที่ศูนย์ปฏิบัติการพัฒนาหุ่นยนต์ภาคสนาม

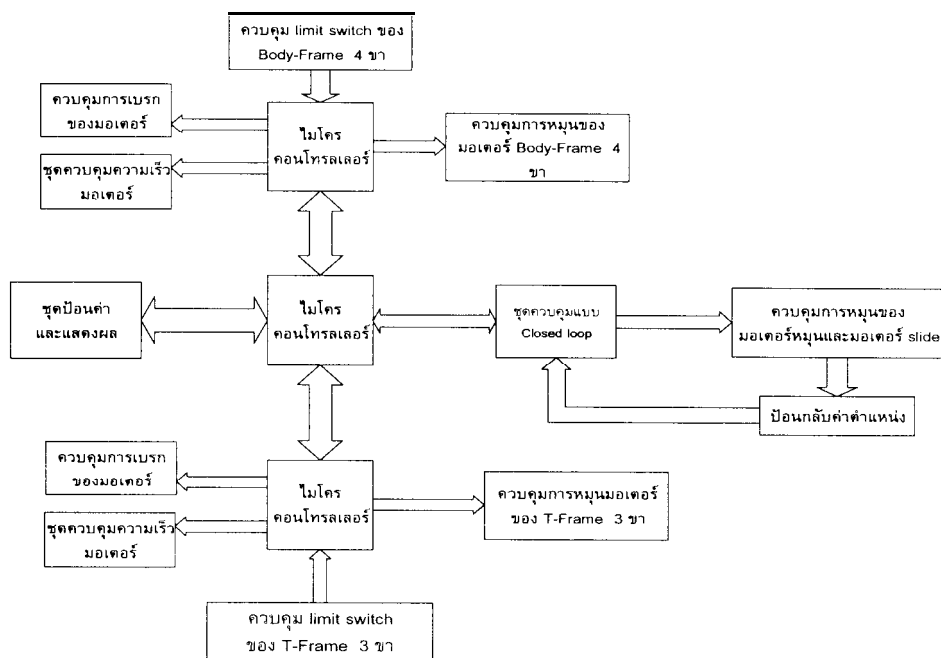
หุ่นยนต์สามารถสมมูลอยู่ได้โดยพยายามทำให้จุดศูนย์กลางอยู่ภายในรูปเหลี่ยมของจตุรกรงรับ (support polygon) ซึ่งสามารถคำนวณได้ในการออกแบบ ยิ่งพื้นที่ของรูปเหลี่ยมของจตุรกรงรับมาก โอกาสที่หุ่นยนต์จะเกิดการพลิกคว่ำก็จะน้อยลง

คณะผู้วิจัยได้ทำ off-line programming โดยกำหนดจุดเป้าหมายให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไป แล้วสร้าง Trajectory โดยคำนวณตำแหน่งของข้อต่อส่งให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์หลักที่ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวระนาบคือส่วนการเลื่อนและหมุนของหุ่นยนต์ โดยให้เคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อเป็นแบบ trapezoidal velocity profile การหาค่าตำแหน่งปัจจุบันของหุ่นยนต์คำนวณได้จากสัญญาณป้อนกลับจากเอ็นโค้ดเดอร์

ข. ระบบควบคุม

ส่วนควบคุมการเคลื่อนที่ (motion controller) แบบวงปิดที่ใช้คือ HCTL-1100 ซึ่งทำงานโดยรับคำสั่งจากคอมพิวเตอร์ประมวลผลและป้อนกลับค่าตำแหน่งจากเอ็นโค้ดเดอร์ การควบคุมมอเตอร์เป็นแบบ Pulse Width Modulation (PWM) ใช้การควบคุมในส่วนของ trapezoidal profile

หุ่นยนต์ Frame Walker แบ่งการทำงานออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ การควบคุมส่วน body Frame การควบคุมส่วน T-Frame และการควบคุมการหมุนและเลื่อนของตัวหุ่นยนต์ ในแต่ละส่วนมีไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมแยกตามการทำงานดังกล่าว โดยการควบคุมแบบวงปิดใช้กับส่วนการหมุนและเลื่อนเท่านั้น ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวหลักทำหน้าที่ในการรับส่งข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ และควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์อีกสองตัว และส่งงานไปยังส่วนควบคุมการเคลื่อนที่ (ส่วนหมุนและเลื่อน) ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เหลือทำหน้าที่รับสัญญาณจากลิมิตสวิทช์ควบคุมการทำงานของเบรคและมอเตอร์ในส่วนของ body Frame และ T-Frame



รูปที่ ข.1 แสดงระบบในการควบคุมหุ่นยนต์ Frame Walker

