



# การควบคุมหุ่นยนต์ 6 ขา

multiprocessor controlled six-legged walking robot

โดย

นายดวง	สุภรณ์ไพบุลย์	37014120
นายสุเดช	ไพโรจน์ธีระรัชต์	37014505
นายสุรศักดิ์	ฉัตรมณี	37014532

วัน เดือน ปี..... 11. ๑๑. 2541  
เลขทะเบียน..... 038876  
เลขเรียกหนังสือ..... ๓๐๑๑๐ ๑๖๑๖ ก

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

038876

# การควบคุมหุ่นยนต์ 6 ขา

multiprocessor controlled six-legged walking robot

โดย

นายดวง	สุภรณ์ไพบูลย์	37014120
นายสุเดช	ไพโรจน์ธีระรัชต์	37014505
นายสุรศักดิ์	ฉัตรมณี	37014532

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.โยธิน เปรมปราณีรัชต์

อาจารย์สุมิตร พนาอุดมทรัพย์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# การควบคุมหุ่นยนต์ 6 ขา

multiprocessor controlled six-legged walking robot

โดย

นายดวง สุภรณ์ไพบูลย์ 37014120

นายสุเดช ไพโรจน์ธีระรัชต์ 37014505

นายสุรศักดิ์ ฉัตรมณี 37014532

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.โยธิน เปรมปราณีรัชต์

อาจารย์สุมิตร พนาอุดมทรัพย์

ปีการศึกษา 2540

## บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้กล่าวถึงแนวทางในการออกแบบ การสร้าง และ การควบคุม หุ่นยนต์ 6 ขาขนาดเล็ก โดยครอบคลุมรายละเอียดมากพอ ที่จะสามารถสร้างหรือพัฒนาโครงการนี้ได้ต่อไป ทั้งนี้เราแบ่งปริญญานิพนธ์ออกเป็น 3 ส่วนหลักด้วยกัน คือ การออกแบบขาและส่วนประกอบทางแมคคานิกส์ต่าง ๆ การออกแบบวงจรส่วนควบคุม การออกแบบโปรแกรมควบคุม โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดและการออกแบบในแต่ละส่วนแยกตามบทไป ถึงแม้ว่าหุ่นยนต์ที่สร้างขึ้นจะมีความสามารถในการปฏิบัติงานได้ในระดับหนึ่ง แต่ก็ยังต้องมีการปรับปรุงพัฒนาอีกมาก อย่างไรก็ตาม ปริญญานิพนธ์นี้ก็เป็นเครื่องมือพื้นฐานสำคัญ ที่จะช่วยเป็นแนวทางให้กับผู้สนใจได้ศึกษาพัฒนาต่อไป

# MULTIPROCESSOR CONTROLLED SIX-LEGGED WALKING ROBOT

DUANG SUPORNPAIBOON  
SUDEJ PAIROJTEERARATCH  
SURASAK CHATMANEE  
Academic Supervisor  
Asst.Prof.YOTIN PREMPRANEERATCH  
SUMIT PANAUDOMSUB  
Academic Year 1997

## ABSTRACT

This thesis describe about the designing & prototyping through an implementation of a small multiprocessors six-legged walking robot in sufficient detail to allow reproduction and continuation of the work. The document is broken up into three main different categories; mechanical leg design, hardware controller design, and software design. The motivation behind this project and the design decisions made throughout the course of the project are describe in their respective section. Our current work still need a further development, or even need to be reengineered. However, it is hoped that this paper will provide some fundamental useful guidelines for those who are of interest or wish to continue this project in the future.



## คำนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*foreword*

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ กล่าวถึง การควบคุมหุ่นยนต์ 6 ขา ( *multiprocessor controlled six-legged walking robot* )

โดยมีรายละเอียดมากพอที่จะสามารถสร้างหุ่นยนต์ขึ้นมาใหม่ หรือ พัฒนาหุ่นยนต์ต่อไปได้

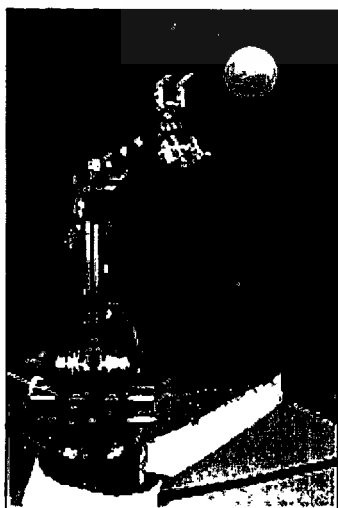
เราได้แบ่งปริญญาานิพนธ์นี้ออกเป็น 3 ส่วนหลักด้วยกัน คือ *mechanical leg design* , *hardware controller design* , และ *software design* โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดของแต่ละส่วนแยกตามบทไป

อย่างไรก็ดีความตั้งใจของคณะผู้จัดทำ เพียงต้องการแสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ในการสร้างหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ด้วยขา โดยการใช้อุปกรณ์เท่าที่มีอยู่

ถึงแม้ว่าหุ่นยนต์จะสามารถทำงานได้แต่ก็ยังมีขาดความแข็งแรงอยู่อีกมาก การพัฒนาหุ่นยนต์ต่อไปจึงควรเริ่มต้นใหม่ตามแนวทางที่ได้ให้ไว้ยังมีขั้นตอน ซึ่งต้องการเวลาและความต่อเนื่องพอสมควร โดยควรที่จะมีการคำนวณและทฤษฎีรองรับทุกขั้นตอน มากกว่าที่จะเป็นการทำหุ่นยนต์ให้เสร็จสมบูรณ์ในปีการศึกษาเดียว

ด้วยการทำงานในลักษณะนี้นั้น จะทำให้โครงการนี้สามารถขยายสัดส่วนของงานได้ ( *scalable* ) อันอาจนำไปสู่การสร้างหุ่นยนต์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อใช้งานจริงในอนาคต ซึ่งจะเป็นประโยชน์มากขึ้นกว่าที่เป็นอยู่ในขณะนี้

ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ก็ด้วยความเอื้อเฟื้อจากคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ และ เพื่อน ๆ ในภาควิชาฯ รวมถึงคำแนะนำ ความเข้าใจ และ ความช่วยเหลือ ที่มีอาจประเมินค่าได้จากอาจารย์ที่ปรึกษา ครอบครัวยของผู้จัดทำ และผู้สนับสนุนทางการเงิน ตลอดจน ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.



'Whole Arm Manipulator : WAM ' กำลังหยิบจับลูกบอลที่ลอยอยู่กลางอากาศ  
picture appears courtesy of MIT Artificial Intelligence Vision and Touch Guided Manipulation Group  
taken from <http://www.ai.mit.edu/projects/handarm-haptics/manipulation.html>



## สารบัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ **contents** ทำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ABSTRACT

FOREWORD

CONTENTS

INTRODUCTION	1
LEG DESIGN	7
MECHANICAL OVERVIEW	18
CIRCUIT BOARD DESIGN	22
ROBOT CONTROL SCHEME & SOFTWARE DESIGN	29
EXPERIMENTAL ON MODIFIED SERVO	36
CONCLUSION & RECOMMENDATIONS	38
REFERENCES	42
APPENDIX A : mechanical layout	44
APPENDIX B : servo motors	52
APPENDIX C : direct & inverse kinematics	55
APPENDIX D : datasheets	69

*list of contents*

abstract	บทคัดย่อ
foreword	คำนำ
contents	สารบัญ
introduction	บทนำ 1
- introduction	
- motivation	
<i>adapt from</i>	
Horvath,Dylan / Lee,Jeff / Williams,Stefan	
SYDE461 - Microprocessor Controlled Autonomous Modular Walking Vehicle	
Hexotica : the design and implementation of a small walking robot	
Systems Design Engineering Program Workshop , University of Waterloo	
Waterloo : Canada , c 1996	
<i>article found at</i> <a href="http://real.uwaterloo.ca/~robot/4b_report/1.html">http://real.uwaterloo.ca/~robot/4b_report/1.html</a>	
leg design	การออกแบบขา 7
- leg design alternatives	
- kinematic analysis	
- workspace	
- detail design & realization	
- mechanical problems	
<i>adapt from</i>	
Horvath,Dylan / Lee,Jeff / Williams,Stefan	
SYDE461 - Microprocessor Controlled Autonomous Modular Walking Vehicle	
Hexotica : the design and implementation of a small walking robot	
Systems Design Engineering Program Workshop , University of Waterloo	
Waterloo : Canada , c 1996	
<i>article found at</i> <a href="http://real.uwaterloo.ca/~robot/4b_report/2.html">http://real.uwaterloo.ca/~robot/4b_report/2.html</a>	
mechanical overview	ลักษณะโดยทั่วไปของหุ่นยนต์ 18
- general design aspect	
- component mounting	

(continued)

*list of contents* (continued)

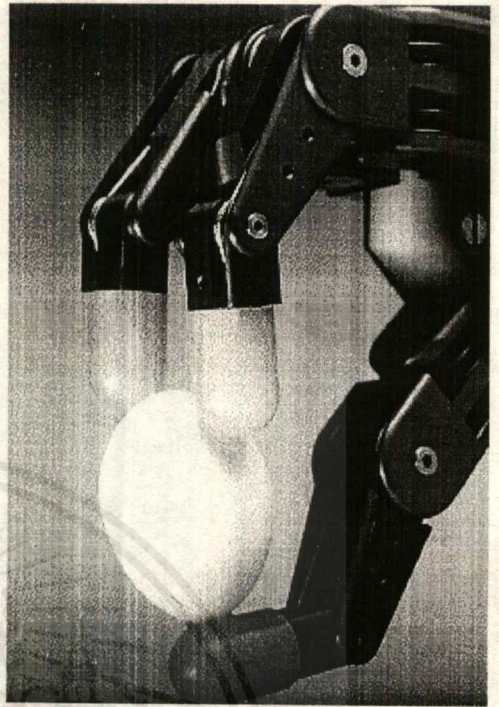
circuit board design _____	วงจรรควบคุม	22
- robot core board		
- leg control board		
- junction terminal & system bus slots		
<i>partially adapt from Horvath,Dylan / Lee,Jeff / Williams,Stefan</i>		
<i>SYDE461 - Microprocessor Controlled Autonomous Modular Walking Vehicle</i>		
<i>Hexotica : the design and implementation of a small walking robot</i>		
<i>Systems Design Engineering Program Workshop , University of Waterloo</i>		
<i>Waterloo : Canada , c 1996</i>		
<i>article found at <a href="http://real.uwaterloo.ca/~robot/4b_report/3.html">http://real.uwaterloo.ca/~robot/4b_report/3.html</a></i>		
robot control scheme & software design _____	แนวคิดในการควบคุมและโปรแกรมหุ่นยนต์	29
- low-level control		
- high-level control		
- software design		
<i>partially adapt from Horvath,Dylan / Lee,Jeff / Williams,Stefan</i>		
<i>SYDE461 - Microprocessor Controlled Autonomous Modular Walking Vehicle</i>		
<i>Hexotica : the design and implementation of a small walking robot</i>		
<i>Systems Design Engineering Program Workshop , University of Waterloo</i>		
<i>Waterloo : Canada , c 1996</i>		
<i>article found at <a href="http://real.uwaterloo.ca/~robot/4b_report/6.html">http://real.uwaterloo.ca/~robot/4b_report/6.html</a></i>		
<i><a href="http://real.uwaterloo.ca/~robot/4b_report/7.html">http://real.uwaterloo.ca/~robot/4b_report/7.html</a></i>		
experimental on modified servo _____	การทดลองเกี่ยวกับการดัดแปลงเซอร์โวมอเตอร์	36
conclusion & recommendations _____	สรุปและข้อเสนอแนะ	38
references _____	หนังสืออ้างอิง	42
appendix a : mechanical layout _____	ผนวก ก	44
appendix b : servo motors _____	ผนวก ข	52
appendix c : direct & inverse kinematics _____	ผนวก ค	55
appendix d : datasheets _____	ผนวก ง	69



## บทนำ

*introduction*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ในเชิงการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หุ่นยนต์ทำงานแทนมนุษย์ได้จริงหรือ หุ่นยนต์มือและแขนกำลังจับไข่ดิบ  
picture appears courtesy of Science Photo Library / Hank Morgan

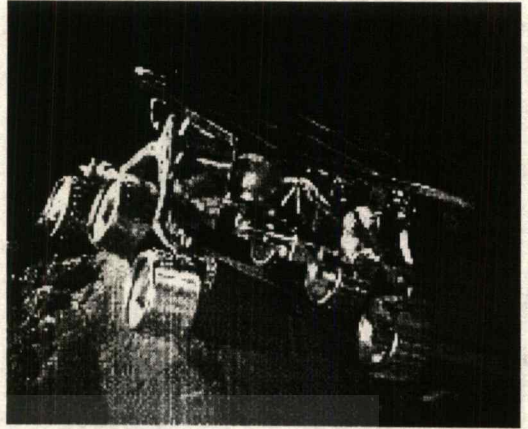
## INTRODUCTION

ในปัจจุบันวิทยาการหุ่นยนต์ (Robotics) เป็นสาขาวิชาที่เติบโตก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว พร้อมกับกับหุ่นยนต์ในปัจจุบันได้เพิ่มความสลับซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ทำให้เกิดการค้นพบแนวทางการประยุกต์ใช้งานใหม่ๆ การปรับปรุงพัฒนาในส่วนของระบบควบคุม แหล่งจ่ายพลังงาน และการออกแบบหุ่นยนต์ ทำให้สามารถนำหุ่นยนต์ไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้มากมาย อาทิเช่นงานด้านพลังงาน ด้านป่าไม้ ด้านระบบการป้องกัน ด้านยานยนต์การขนส่ง และอื่น ๆ อีกมากมาย

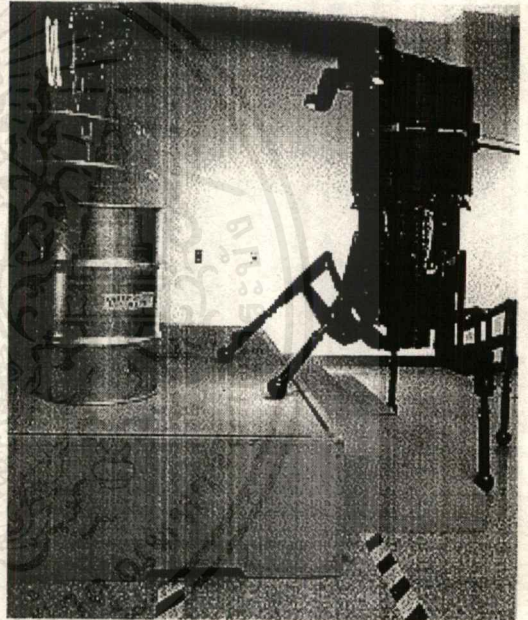
ส่วนมากหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ มักจะใช้ล้อในการเคลื่อนที่ ซึ่งสะดวกต่อการควบคุมและการกำหนดทิศทาง ล้อทำให้ส่วนฐานของหุ่นยนต์มีความมั่นคง และยังทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างคล่องแคล่ว ทั้งยังสร้างได้ง่าย แต่ข้อด้อยที่สำคัญประการหนึ่งของการใช้ล้อก็คือ มีข้อจำกัดในการเคลื่อนที่เข้าไปในพื้นที่ที่มีอุปสรรคต่าง ๆ เนื่องจากล้อต้องการพื้นที่ที่เป็นผิวราบในการปฏิบัติงาน อย่างไรก็ตามในสภาพแวดล้อมที่ทึบกันดาร หุ่นยนต์ต้องสามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมได้ เช่น บริเวณที่เป็นภูเขาหรือเนินเขา ซึ่งมักพบในงานด้านป่าไม้ การเก็บสิ่งปฏิกูล การสำรวจดาวเคราะห์ ซึ่งมีความต้องการใช้งานหุ่นยนต์สูง การศึกษาวิจัยหุ่นยนต์ที่ใช้การเคลื่อนที่ด้วยขา จึงน่าที่จะเอาชนะอุปสรรคเหล่านี้ได้

เนื่องจากการควบคุมหุ่นยนต์แบบมีขา ให้เดินไปตามพื้นที่ต่าง ๆ มีความซับซ้อน ทำให้การสร้างหุ่นยนต์ในลักษณะนี้ทำได้ยากกว่าแบบที่ใช้ล้อ

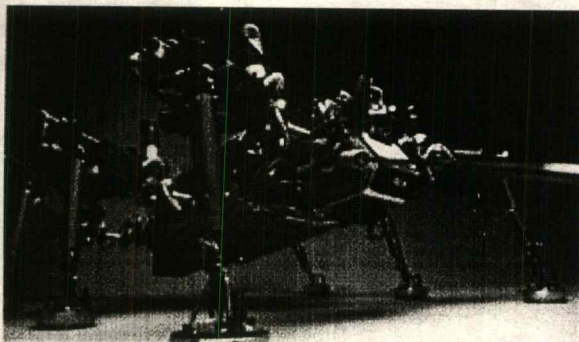
เมื่อไม่นานมานี้ ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีระบบควบคุมขนาดเล็ก (embedded controller technology) โดยได้มีการผลิตตัวควบคุมขนาดเล็ก ที่สามารถโปรแกรมและติดตั้งได้โดยง่าย ด้วยส่วนประกอบที่มีความก้าวหน้าสูงเหล่านี้ ทำให้เราสามารถสร้างและควบคุมหุ่นยนต์ที่มีความซับซ้อนนี้ได้



'ไซเจอร์เนอร์' ยานยนต์เคลื่อนที่ด้วยล้อขนาดเล็กใช้ในการสำรวจดาวอังคาร  
 picture appears courtesy of Smithsonian Institution photo # 97-15601  
 taken from <http://www.nasm.edu/galleries/gal209/gal209.html>



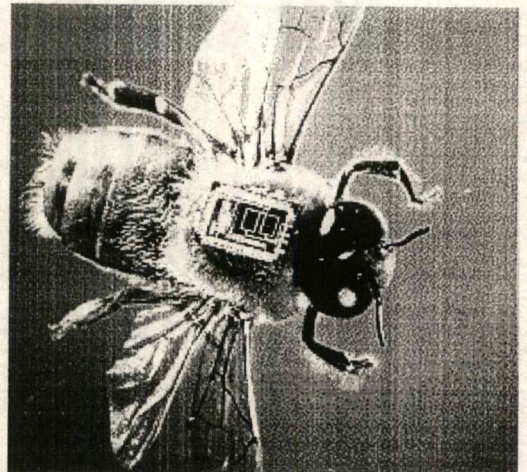
'โรบิน' หุ่นยนต์เดินด้วยขาใช้ทำงานในโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์  
 picture appears courtesy of Science Photo Library / Hank Morgan



'Hannibal' หุ่นยนต์เดิน 6 ขาที่พัฒนาเป็นรุ่นที่สองของ MIT

picture appears courtesy of MIT Artificial Intelligence Mobile Robot Lab.

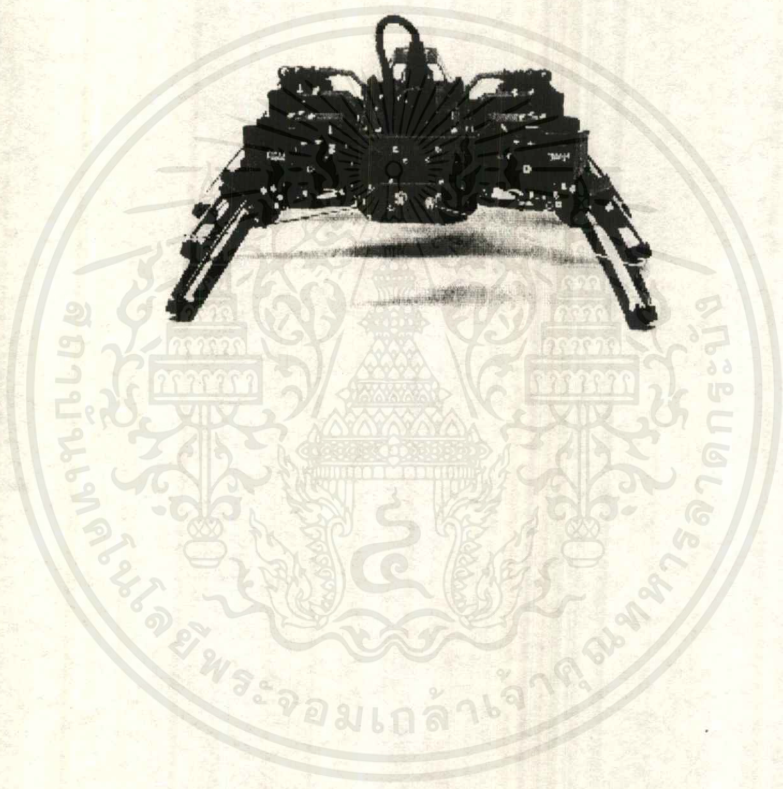
taken from <http://www.ai.mit.edu/projects/hannibal/hannibal.html>



นักวิจัยได้ฝังไมโครชิปที่มีเครื่องส่งอินฟราเรด เพื่อใช้ศึกษา

การอพยพของ ผึ้งเพชรชาติ จากบราซิล

picture appears courtesy of Martin Manietta Energy System Inc.



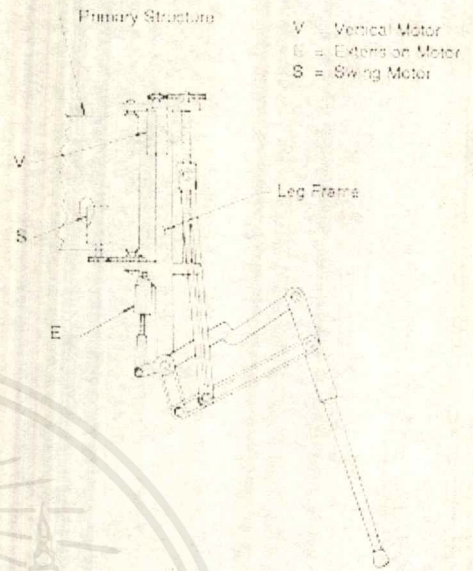
'Hermes II' หุ่นยนต์ 6 ขาที่มีการผลิตจำหน่ายจากอดีตคณะผู้จัดทำจาก MIT  
 picture appears courtesy of IS Robotics, Inc.  
 taken from <http://www.isr.com/projects/herms/default.html>

จุดประสงค์ของปฏิญานีพจนนี้ คือ การออกแบบหุ่นยนต์ขนาดเล็กที่สามารถเคลื่อนที่โดยใช้ขา โดยการออกแบบจะ  
 ใช้ความรู้ด้านการควบคุมในหลายแขนง ทั้งวิธี *Inverse Kinematics* จากแขนกลที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมและแนวคิด  
 ในการควบคุมแบบ *High - Level* ซึ่งเป็นแนวทางที่นำไปสู่รูปแบบของลำดับการก้าวเดินของขา (gaits) และการ  
 ควบคุมแบบ *Low - Level* เพื่อควบคุมตำแหน่งปลายขาในขอบเขตการเคลื่อนไหวของขา (Work Space) ในส่วน  
*hardware* ของหุ่นยนต์จะเน้นการออกแบบที่ทำให้หุ่นยนต์สามารถแยกออกเป็นส่วนๆ ได้ (*modularization*) ทำให้  
 การเพิ่มเติม ปรับเปลี่ยน หรือซ่อมแซม ส่วนต่างๆ ของหุ่นยนต์จะสามารถทำได้โดยง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

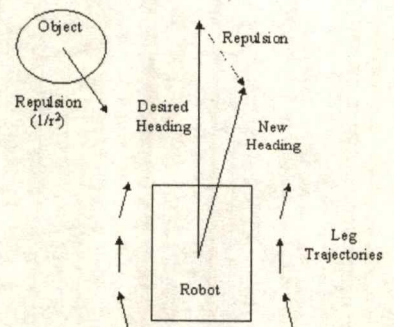
ปริญญาานิพนธ์นี้จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

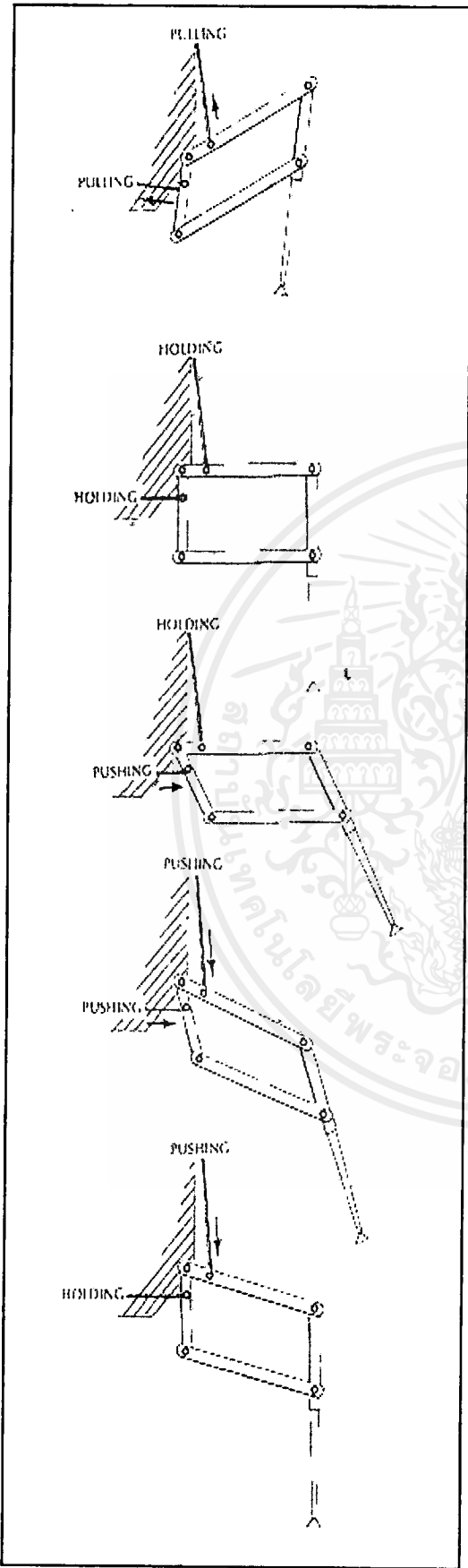
1. *robot mechanical design* กล่าวถึงการออกแบบโครงสร้าง และส่วนประกอบทางแมคคานิกส์ของหุ่นยนต์ การออกแบบที่ดี จะช่วยให้สะดวกและเป็นประโยชน์ต่อขั้นตอนการทำงานต่อไป ทั้งยังช่วยลดโอกาสที่จะต้องออกแบบใหม่อีก การออกแบบที่ดี จะทำให้เราสามารถควบคุมการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ได้



2. *embedded controller & electronics interface* คือ ตัวควบคุมและการ ออกแบบวงจรีเลคทรอนิกส์ ซึ่งเป็นส่วนที่มีความสำคัญมากเพราะต้องม การติดต่อระหว่างกัน (*interfaces*) ของส่วนควบคุมและส่วนที่ถูกควบคุม

3. *control architecture* เกี่ยวข้องกับการออกแบบรูปแบบในการควบคุม หุ่นยนต์ (*control architecture*) สำหรับการควบคุมในระดับล่าง จะขึ้น กับลักษณะทางแมคคานิกส์และตัวควบคุมที่เราเลือกใช้ ส่วนการควบคุม ในระดับสูง ควรที่จะเป็นอิสระไม่ขึ้นกับลักษณะทางกายภาพและสามารถ ให้หุ่นยนต์มีความเป็นอัตโนมัติได้ในระดับหนึ่ง





แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ต่าง ๆ ของขาแบบ pantograph  
adapt from 'Introduction to Robotics'

MOTIVATION

เนื่องจากสมาชิกทุกคนในกลุ่ม มีความสนใจในงานด้านหุ่นยนต์เป็นปัจจัยสำคัญในการตัดสินใจที่จะศึกษาวิจัยในหัวข้อนี้ และจากที่ได้มีพื้นฐานในวิชา Robotics มาก่อน ทำให้เกิดความคิดที่จะจัดทำหุ่นยนต์ ที่สามารถเคลื่อนที่โดยใช้ขาได้โดยอัตโนมัติ

ในหลาย ๆ วิชาทางวิศวกรรม นักศึกษาได้สัมผัสกับภาคทฤษฎีมากกว่าภาคปฏิบัติ ดังนั้นสมาชิกในกลุ่มจึงต้องการที่จะได้รับประสบการณ์ทางภาคปฏิบัติ โดยเห็นว่าการทำหุ่นยนต์นั้น จะต้องพบกับงานภาคปฏิบัติเป็นส่วนใหญ่ อีกทั้งความรู้ทางด้านหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ด้วยล้อได้แพร่หลายแล้ว ซึ่งต่างจากหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ด้วยขาที่ยังเป็นเรื่องใหม่อยู่ ทำให้ความยากในการสร้างหุ่นยนต์แบบมีขามีมากกว่าแบบล้อ จากเหตุผลทั้งหมดทำให้สมาชิกในกลุ่มเลือกหัวข้อนี้ในการทำปริญญานิพนธ์



## บทที่ 1

## การออกแบบขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไป *leg design* หรือเผยแพร่ในสื่ออื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปแสดงการพัฒนาของ 'Hannibal' หุ่นยนต์เดิน 6 ขา ของ MIT

picture appears courtesy of MIT Artificial Intelligence Mobile Robot Lab.

taken from <http://www.ai.mit.edu/projects/hannibal/hannibal.html>

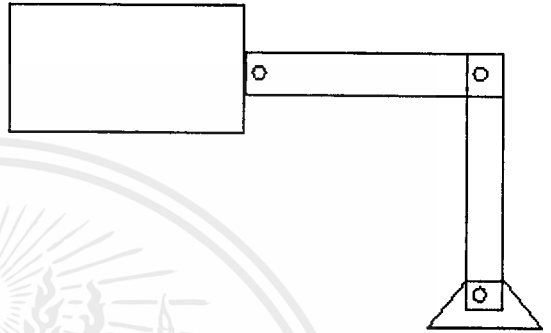
การออกแบบขาหุ่นยนต์ที่มีประสิทธิภาพนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของขาที่เราเลือกใช้ ซึ่งในปัจจุบันมีให้เลือกอยู่หลายชนิด เพราะลักษณะของการเดินของขาแต่ละแบบจะขึ้นอยู่กับข้อจำกัดทางกายภาพของขา สิ่งสำคัญของการเลือกขาคือ จะต้องเลือกแบบที่มีระยะของการเคลื่อนไหวมากที่สุด และจะต้องมีลักษณะการก้าวเดินได้หลายแบบอยู่พอสมควร ดังนั้นขั้นแรกของการออกแบบขา ก็คือการเลือกแบบขาที่เหมาะสมที่สุด

## LEG DESIGN ALTERNATIVES

จากคาร์คั่นคว่ำเอกสารต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าในปัจจุบันได้มีการออกแบบขาหุ่นยนต์อยู่หลายชนิด แต่ละแบบก็มีทั้งข้อดีและข้อเสีย ซึ่งเราได้เลือกแบบที่มีความเป็นไปได้ในการสร้างบางแบบมาพิจารณาดังนี้

## Simple Two-Link Leg

ขาหุ่นยนต์แบบนี้แสดงดังรูป ขาชนิดนี้จะมีลักษณะเป็นสองท่อน ต่อผ่านข้อต่อเข้า โดยเราจะควบคุมลักษณะการเดินได้ โดยการควบคุมมุมของขาแต่ละท่อน ที่จะเป็นตัวกำหนดตำแหน่งปลายขาหุ่นยนต์ ส่วนของขาทั้งหมดจะต่อเข้ากับเดือยที่โคนขาเพื่อใช้ในการก้าวและยึดหดขา

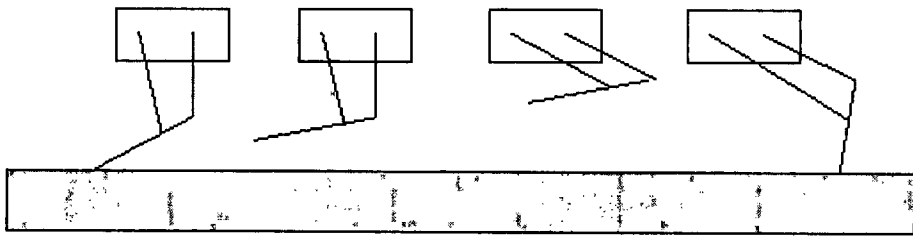


รูปแสดง simple two-link leg

มีหลายวิธีที่จะทำให้ข้อต่อทำงานได้ โดยเราใช้ลักษณะการขับเคลื่อน (*actuate*) ของข้อต่อเข้าเป็นตัวแยกชนิดของขาออกเป็นแบบต่าง ๆ สำหรับขาแบบนี้เราอาจติดตั้งมอเตอร์เข้าที่ข้อต่อโดยตรง หรือใช้โซ่ สายพาน หรือสกรู ที่ส่งกำลังมาจากมอเตอร์ที่ติดตั้งอยู่ในลำตัวบริเวณโคนขา เพื่อกำหนดมุมที่ข้อต่อเข้า ข้อต่อยประการสำคัญของขาแบบนี้คือ เราจำเป็นต้องให้ตัวขับเคลื่อน (*actuator*) อยู่ใกล้กับข้อต่อ การติดตั้งตัวขับเคลื่อน (*actuator*) เข้าที่ข้อต่อเข้าทำให้เกิดผลกระทบทางไดนามิคต่อขาซึ่งต้องมีการชดเชยโดยใช้ตัวควบคุมอันเป็นการเพิ่มความซับซ้อนให้กับอัลกอริธึมในการเคลื่อนที่ของขา รวมทั้งยังต้องการมอเตอร์ที่มีกำลังสูงที่ข้อต่อส่วนสะโพก (*Hip Joint*) เพื่อใช้ในการเคลื่อนขาที่มีมวลมาก แม้ว่าการติดตั้งตัวขับเคลื่อน (*actuator*) ที่ฐานของขาจะช่วยกำจัดปัญหาเหล่านี้ แต่ก็จัดเป็นการเพิ่มความซับซ้อนทางแมคคานิกส์ นอกจากนี้การคับปลิง (*coupling*) ของปลายขากับตัวขับเคลื่อน (*actuator*) ยังเป็นลักษณะของขาที่ไม่พึงประสงค์อีกด้วย

## Mamalian Leg

แบบขาอีกแบบหนึ่งที่เลือกมาพิจารณาคือ ขาที่เลียนแบบมาจากขาของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม (*mamalian*) ที่มีรูปแบบการเดินพื้นฐานดังแสดงในรูป ขาทั้งขาจะแกว่งกวาดไปตามแนวข้อต่อสะโพกเพื่อก้าวไปข้างหน้าพร้อมกับหดขา ในขณะที่มุมของข้อต่อเข้าจะควบคุมการยกปลายขาให้พ้นพื้นในระหว่างการก้าวไปข้างหน้า เราสามารถออกแบบขาให้เป็นคานสี่ท่อนและมีคานอีกหนึ่งท่อนที่สามารถปรับความยาวได้

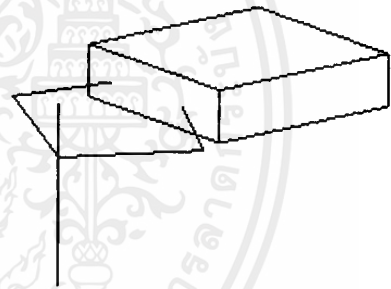


รูปแสดงการก้าวเดินของขาแบบ mammalian

ขาแบบนี้เป็นแบบที่เราตัดทิ้งไปตั้งแต่แรก เพราะโครงสร้างของขาแบบนี้ไม่สามารถเคลื่อนไหวในระยะที่กว้างได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังมีการคัปปลิง (coupling) ระหว่างข้อต่อต่าง ๆ ทั้งยังมีขอบเขตการเคลื่อนไหว (workspace) ที่จำกัด อีกทั้งน้ำหนักของหุ่นยนต์ทั้งหมดจะลงไปข้อต่อสะโพก ทำให้ต้องใช้มอเตอร์ขนาดใหญ่ที่มีกำลังสูงและมีราคาแพง ซึ่งไม่เหมาะกับการสร้างหุ่นยนต์ขนาดเล็ก

### Pentagraph Leg

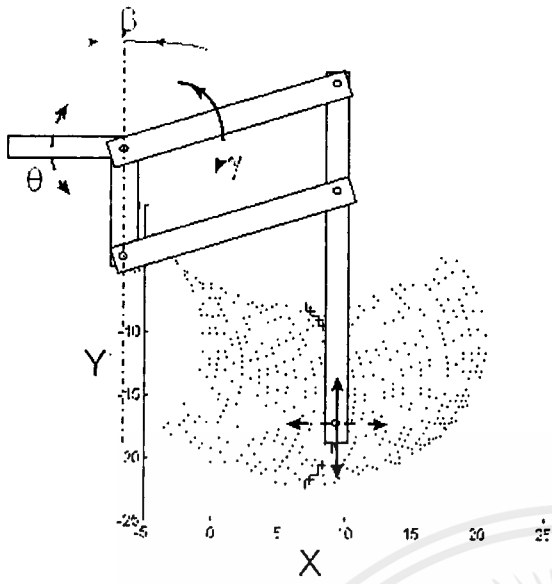
Pentagraph หรือระบบทางแมคคานิกส์ที่มี 5 แขนง ซึ่งใช้ในงานด้าน robotics ต่าง ๆ ที่สามารถมองเห็นโครงสร้างของ linkage ได้อย่างชัดเจน โดยการติดตั้งตัวขับเคลื่อน (actuator) ที่ศูนย์กลางของฐาน และใช้ส่วนประกอบที่มีน้ำหนักเบา จะทำให้สามารถลดผลกระทบทางไดนามิกของระบบ แต่อย่างไรก็ตามความแข็งแรงของโครงสร้างอยู่ ซึ่งเราสามารถดัดแปลงให้



รูปแสดงการดัดแปลง pentagraph เพื่อใช้เป็นขาหุ่นยนต์ ใช้เป็นขาของหุ่นยนต์ดังแสดงในรูป สำหรับขาแบบนี้เราสามารถกำหนดตำแหน่งของขาในระนาบได้ โดยการควบคุมการเคลื่อนไหวในระนาบ 3 แขนง ข้อเสียของขาแบบนี้ก็คือ เกิดการคัปปลิงของข้อต่อ (coupling) มากกว่าแบบอื่น เพราะการเคลื่อนตำแหน่งของปลายขาในทิศทางใด ๆ ก็ตาม จะต้องใช้มอเตอร์อย่างน้อย 2 ตัวทำงานพร้อมกันซึ่งเป็นอัลกอริทึมการควบคุมที่ซับซ้อนกว่าวิธีอื่น ในการขยับขาของหุ่นยนต์

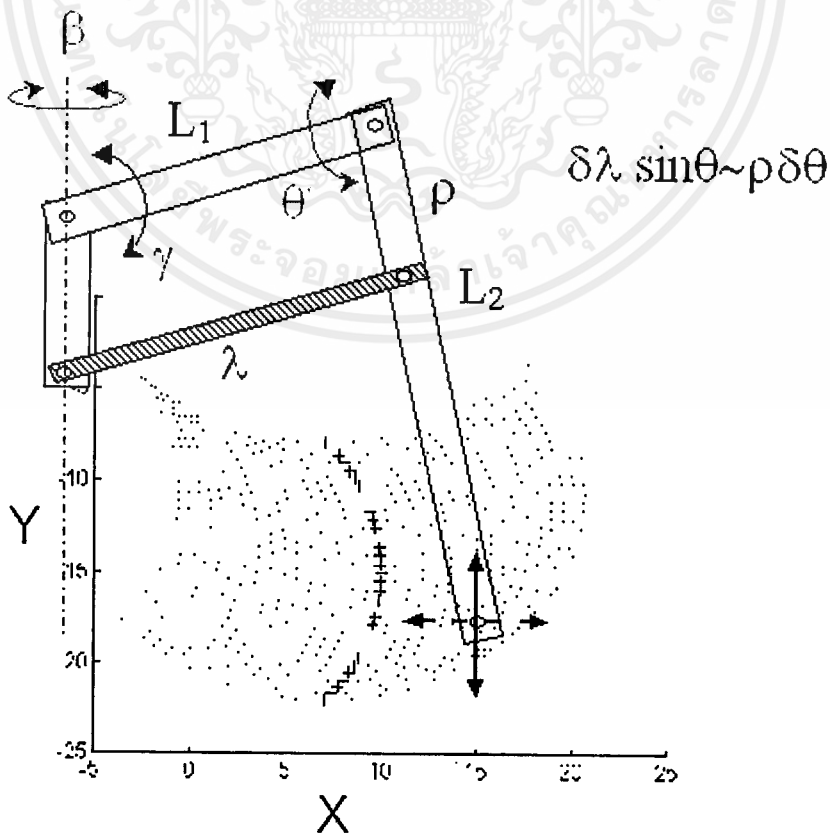
### Pantograph Leg

เป็นแบบที่เราเลือกใช้เป็นขาของหุ่นยนต์ ซึ่งเป็นแบบที่มีผู้ใช้กันอย่างแพร่หลาย ระบบแมคคานิกส์ของขาแบบนี้จะประกอบด้วยคานสี่ท่อนขนานกันเป็นรูปสี่เหลี่ยมด้านขนาน ทำให้การควบคุม kinematics และระบบทางแมคคานิกส์ของขาทำได้ง่าย ซึ่งลดการประมวลผลที่ซับซ้อนในการควบคุมลงได้



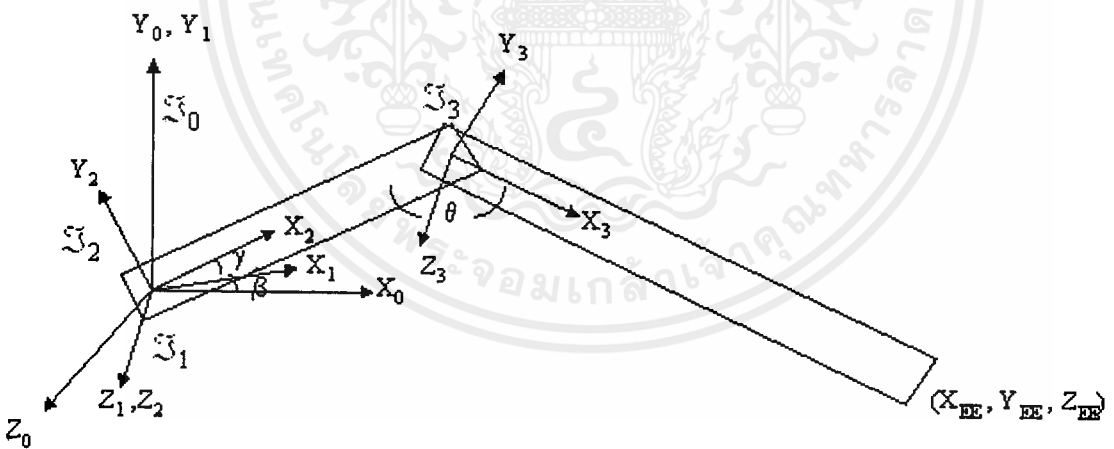
รูปแสดงขอบเขตการเคลื่อนไหวกขา (workspace) ของขาแบบ pantograph

ขอบเขตการเคลื่อนไหวของขา (workspace) แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างแบบนี้ยังคงมีการคัปปลิง (coupling) ของข้อต่อเกิดขึ้นในการเคลื่อนปลายขาทำให้ปลายขาเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้ง เนื่องจากว่าขาแบบนี้เป็นแบบที่มีลักษณะทางเรขาคณิตอย่างง่าย ๆ ทำให้ผู้ออกแบบมักเลือกขาแบบนี้มาใช้ก่อนแบบอื่น แต่ปัญหาทางเมคานิกส์ที่พบระหว่างการสร้างขาต้นแบบ ทำให้เราต้องดัดแปลงขาแบบนี้อีกครั้งก่อนที่จะตัดสินใจใช้ขาแบบนี้ให้เป็นแบบขาที่จะนำไปใช้งาน



**KINEMATIC ANALYSIS**

การคำนวณตำแหน่งของปลายขาที่ถูกต้องเป็นสิ่งจำเป็นมาก โดยเฉพาะในสถานการณ์ที่หุ่นยนต์ต้องวางขาให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม อาทิเช่นเมื่อหุ่นยนต์ต้องเคลื่อนที่ไปในพื้นที่ที่มีอุปสรรค ถ้าหุ่นยนต์สามารถเลือกตำแหน่งที่จะวางปลายขาได้ หุ่นยนต์จะต้องสามารถเคลื่อนขาให้อยู่ในท่าทางที่เหมาะสม ตำแหน่งของปลายขาในขอบเขตการเคลื่อนไหวใด ๆ สามารถคำนวณได้ ถ้าเราทราบมุม  $g, q, b$  ดังแสดงในรูป



Kinematic Parameters ของโครงสร้างขา

Axis	q	d	a	a	Home
1	b	0	L 1	p/2	0
2	g	0	L 2	0	0
3	q	0	0	p/2	p/2

เมตริกซ์แขน (Arm Matrix)

$$T_0^1 T_1^2 T_2^3 = T_0^3 = \begin{bmatrix} C_\beta C_\gamma C_\theta - C_\beta S_\gamma S_\theta & S_\beta & C_\beta C_\gamma S_\theta + C_\beta S_\gamma C_\theta & L_2 C_\beta C_\theta + L_1 C_\beta \\ S_\beta C_\gamma C_\theta - S_\beta S_\gamma S_\theta & -C_\beta & S_\beta C_\gamma S_\theta + S_\beta S_\gamma C_\theta & L_2 S_\beta C_\theta + L_1 S_\beta \\ S_\gamma C_\theta + C_\gamma S_\theta & 0 & S_\gamma S_\theta & L_2 S_\gamma \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

หาสมการแขนจาก Tool - Configuration Vector นี้

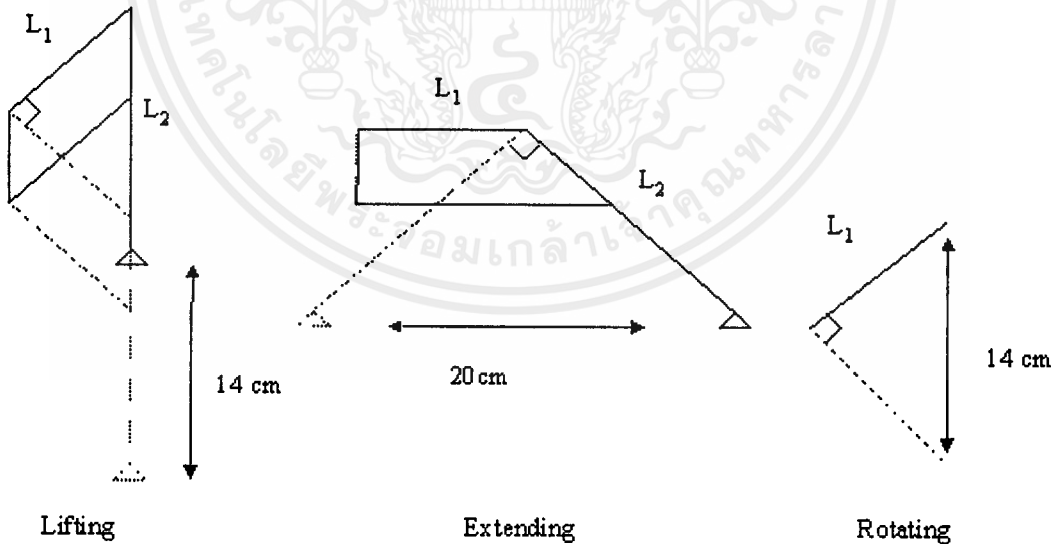
$$w = \begin{bmatrix} L_2 C_\beta C_\gamma + L_1 C_\beta \\ L_2 S_\beta C_\gamma + L_1 S_\beta \\ L_2 S_\gamma \\ [\exp(\beta / \pi)](C_\beta C_\gamma S_\theta + C_\beta S_\gamma C_\theta) \\ [\exp(\gamma / \pi)](S_\beta C_\gamma S_\theta + S_\beta S_\gamma C_\theta) \\ [\exp(\theta / \pi)](S_\gamma S_\theta - C_\gamma C_\theta) \end{bmatrix}$$

## WORK SPACE

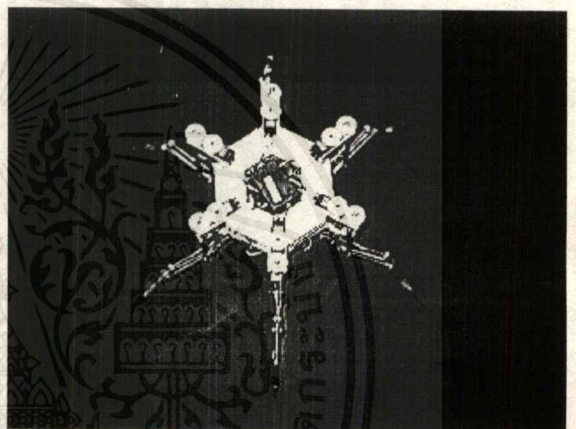
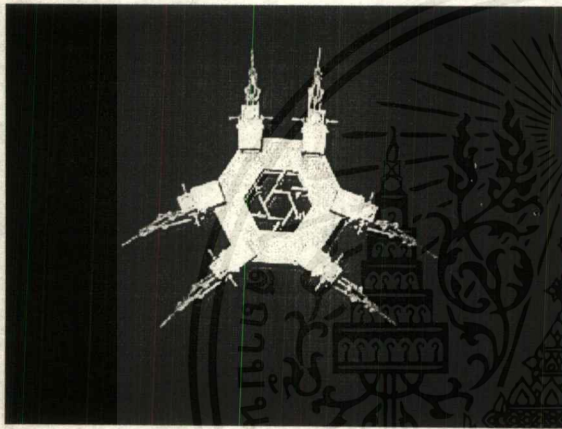
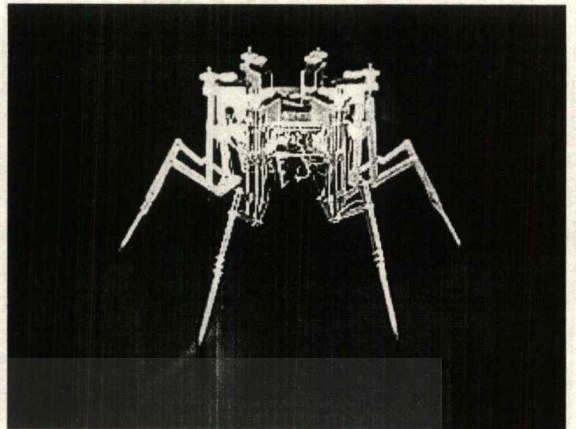
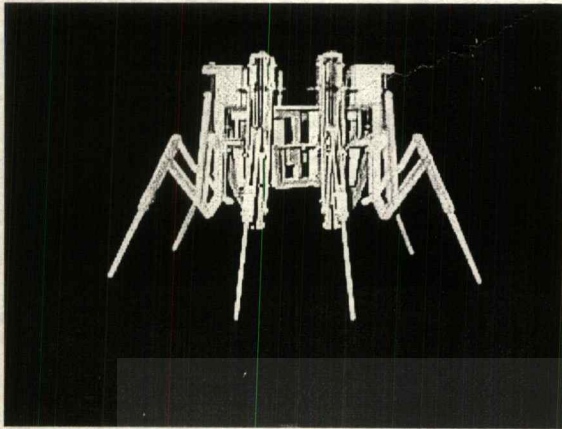
ข้อควรพิจารณาที่สำคัญในระหว่างขั้นตอนการออกแบบ คือ ขนาดของขอบเขตการเคลื่อนไหวของขา (workspace) ที่ต้องการ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อขนาดของขา การเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวของแต่ละส่วนของขาจะทำให้ความสูงที่หุ่นยนต์สามารถยกขาได้หรือระยะที่หุ่นยนต์สามารถยืดขาได้เปลี่ยนไป ซึ่งส่งผลให้ขนาดของการก้าวแต่ละก้าวเปลี่ยนแปลงไปด้วย

จากความจริงที่ว่าหุ่นยนต์ที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีราคาสูงกว่า และข้อจำกัดในด้านขนาดของหุ่นยนต์อันเนื่องมาจากขนาดกำลังขับของตัวขับเคลื่อน (actuator) ซึ่งได้แก่แรงบิด (torque) และขนาดของเซอร์โวมอเตอร์ เราพบว่าขาที่เหมาะสมจะมีความสูงของการก้าวขาประมาณ 15 เซนติเมตรหรือมากกว่า ความยาวของขาที่อนต่าง ๆ ที่เลือกมา และขอบเขตการเคลื่อนไหวของขา (workspace) แสดงดังในรูป โดยคำนึงถึงการเคลื่อนที่ใน 3 แนว คือ

- การยกขา (lifting)
- การยืดขา (extending)
- การแกว่งขา (rotating)



รูปแสดงขอบเขตการทำงานของขา เมื่อ  $L_1 = 10 \text{ cm}$   
 $L_2 = 24 \text{ cm}$



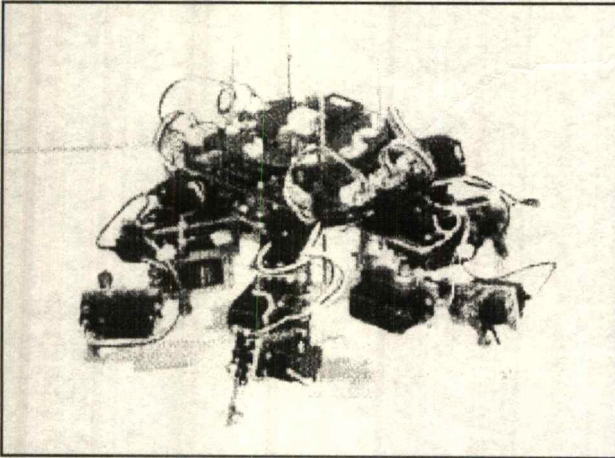
รูปเปรียบเทียบแสดงลักษณะของหุ่นไม้ต้นแบบพัฒนาเป็นหุ่นที่ใช้โลหะเป็นโครงสร้าง

## DETAIL DESIGN AND REALIZATION

หลังจากการเลือกแบบของขาที่จะใช้ในการออกแบบ งานขั้นต่อไปจึงเกี่ยวกับรายละเอียดของแบบขา ทั้งสัดส่วนและขนาดโครงสร้างที่ถูกต้อง ในครั้งนี้เราจึงสร้างหุ่นยนต์ต้นแบบที่ทำจากไม้เพื่อให้เราเข้าถึงทุกรายละเอียดของการออกแบบหุ่นยนต์ รายละเอียดของแบบจะแสดงให้เห็นถึงขั้นตอนและปัญหาหรือความซับซ้อนทางแมคคานิกส์ ที่อาจเกิดขึ้นก่อนที่จะสร้างขากจากวัสดุที่จะใช้งานจริงขึ้นมา ทำให้เราสามารถป้องกันและหาทางแก้ไขได้จากต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและที่ยังอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

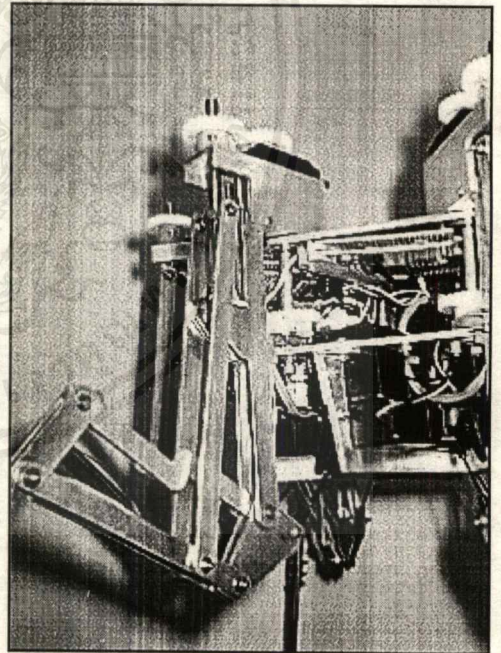


การติดตั้งตัวขับเคลื่อนที่เชื่อมต่อเพิ่มความซับซ้อนในการควบคุมทำให้ต้องมีการชดเชยทางไดนามิกส์  
picture appears courtesy of UK Engineering and Physical Science Research Council  
taken from <http://www.salford.ac.uk/eee/staff/dpb/homepage.html>

หลักในการออกแบบที่สำคัญที่ควรพิจารณาอีกประการหนึ่งก็คือ การพยายามให้ตัวขับเคลื่อน (*actuator*) อยู่ใกล้กับฐานของขา การติดตั้งตัวขับเคลื่อน (*actuator*) ให้อยู่ที่จุดศูนย์กลางจะทำให้ผลกระทบไดนามิคลดลงทั้งยังลดภาระทางไดนามิคของแต่ละขาอีกด้วย เพราะไม่ต้องเคลื่อนมวลของตัวขับเคลื่อน (*actuator*) ที่ติดตั้งอยู่ในตำแหน่งที่ห่างออกไปตามข้อต่อต่าง ๆ

วัสดุที่สามารถนำมาใช้ในการสร้างหุ่นยนต์นั้นมีอยู่หลายชนิด ซึ่งราคาก็เป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่ง แต่อย่างไรก็ตามน้ำหนักก็มีบทบาทที่สำคัญกว่า ที่จะต้องนำมาพิจารณาเพื่อประสิทธิภาพโดยรวมของหุ่นยนต์ ดังนั้นเราจึงเลือกใช้อลูมิเนียมเป็นวัสดุหลัก เพราะมีน้ำหนักเบาและตัดแต่งได้ง่าย โดยยึดชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกันโดยใช้สกรู เพื่อให้ขาของหุ่นยนต์ทำงานได้ดี ข้อต่อต่าง ๆ ต้องออกแบบให้มีความเสียดทานต่ำและไม่หลวมจนเกินไป เราจึงเลือกใช้ลูกปืน (*bearing*) ในการใช้งาน แต่อย่างไรก็ตามการติดตั้งลูกปืนขนาดเล็กในพื้นที่เล็ก ๆ นั้นทำได้ยาก และลูกปืนก็ยังมีราคาแพงอีกด้วย

รายละเอียดของสัดส่วนตัวทางแมคคานิกส์ จะกล่าวถึงในภาคผนวกอีกครั้ง ซึ่งจะประกอบด้วยรูปและขนาดของชิ้นส่วนตลอดจนโครงสร้างของหุ่นยนต์แต่ละชิ้น อย่างไรก็ตามก็มีชิ้นส่วนบางชิ้น ที่ยังต้องการการปรับปรุงหรือออกแบบใหม่อีก เพื่อให้หุ่นยนต์มีประสิทธิภาพและความแข็งแรงที่ดีขึ้นกว่าที่เป็นอยู่ในขณะนี้



ภาพแสดงรายละเอียดส่วนลำตัวของหุ่นยนต์  
สังเกตการติดตั้งตัวขับเคลื่อนที่จุดศูนย์กลาง

## MECHANICAL PROBLEMS



ปัญหาที่พบสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ

- ระหว่างการออกแบบ ( design phase )

หาแบบที่เหมาะสมได้ยาก เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่มี เช่น การออกแบบช่องใส่แบตเตอรี่ในลำตัว เพื่อให้จุดศูนย์ถ่วงของหุ่นยนต์ ( centre of gravity ) อยู่ต่ำ ๆ และเพื่อไม่ให้แบตเตอรี่หลุดหลวมหรือขยับได้ อีกทั้งต้องมีส่วนที่ใช้ติดตั้งเซอร์โวมอเตอร์เพื่อให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม ตลอดจนการแก้ไขปรับปรุงแบบให้เหมาะสมกับอุปกรณ์อื่น ๆ เท่าที่จะสามารถหาได้

- ระหว่างการสร้าง ( construction phase )

เนื่องจากอุปกรณ์บางชิ้นที่จำเป็นต้องนำมาใช้งาน มีรูปร่างที่ไม่สามารถใช้งานร่วมกันได้ ทำให้ต้องแก้ไขตัดแปลงอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้เหมาะสม เช่น ฟันเฟืองต่าง ๆ สกรูเกลียว ลูกปืน หรือแม่กระทั่ง ลักษณะรูปร่างหรือความหนาของตัวอลูมิเนียมเอง ซึ่งบางครั้งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นก็เกิดจากข้อจำกัดของประสิทธิภาพของเครื่องมือที่มีอยู่ หรือประการสำคัญก็คือ การขาดประสบการณ์ในการใช้เครื่องมือ ของคณะผู้จัดทำเอง เช่น การติดตั้งลูกปืนเข้ากับข้อต่อต่าง ๆ การไม่สามารถเชื่อมชิ้นส่วนอลูมิเนียมที่มีขนาดเล็กได้ การใช้เครื่องมือกลที่ผิดวิธี หรือ ยังไม่มีความชำนาญเพียงพอ ตลอดจนความผิดพลาดที่เกิดจากการขึ้นรูปชิ้นส่วนต่าง ๆ ด้วยมือ เหล่านี้ล้วนทำให้เกิดความผิดพลาดได้โดยง่าย ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อลักษณะทางแมคคานิกส์โดยรวมของหุ่นยนต์

- เมื่อขึ้นงานแล้วเสร็จ ( completion & operation phase )

การทดลองในเบื้องต้นเมื่อสร้างหุ่นยนต์เสร็จพบว่า มีอุปกรณ์บางอย่างที่ต้องปรับปรุงเพื่อเพิ่มสมรรถนะให้กับหุ่นยนต์ เช่น สกรูเกลียวที่ใช้ในการยกขาของหุ่นยนต์ ( vertical screw ) นั้นมีการทำงานที่ช้าอยู่ ไม่สอดคล้องกับการเคลื่อนไหวในแนวการเคลื่อนที่อื่นของขา แนวทางในการปรับปรุงคือ หามอเตอร์ที่มีความเร็วและมีอัตราทดที่เพียงพอ หรือเปลี่ยนสกรูเกลียวที่มีระยะห่างระหว่างเกลียว ( pitch ) ที่กว้างขึ้น หรือในเรื่องความแข็งแรงโดยรวมของขา ซึ่งพบว่าสัดส่วนของขาเมื่อเทียบกับลำตัวยังมีความเปราะบางอยู่บ้าง ซึ่งอาจแก้ไขได้โดยการขยายสัดส่วน หรือ เพิ่มความหนาของอลูมิเนียมที่ใช้ทำหุ่นยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ออกของหามมเหตุดแปลงเนื้อหาและหยั่งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

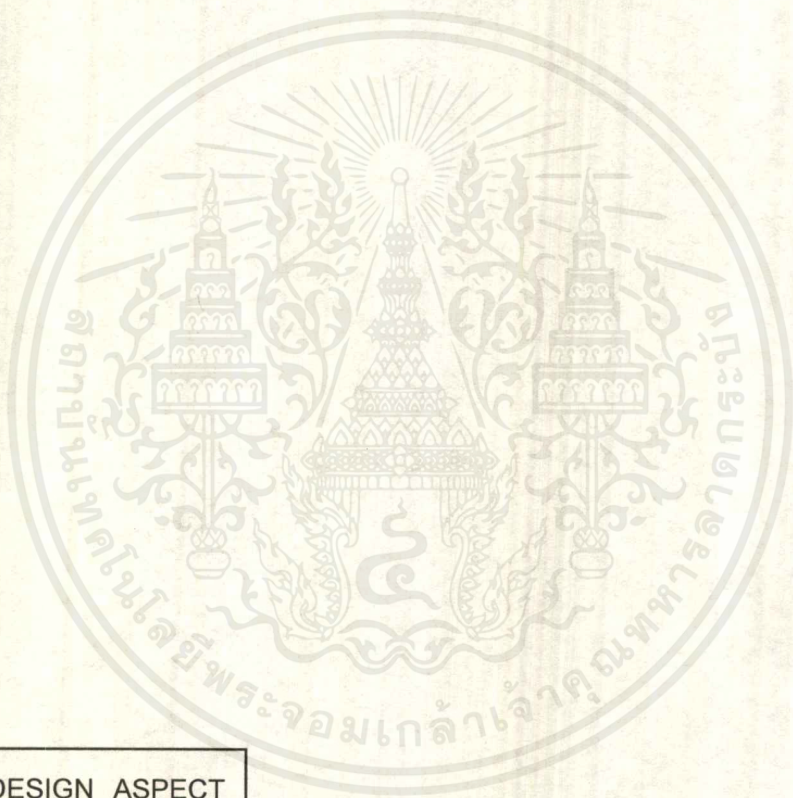


## บทที่ 2

## ลักษณะโดยทั่วไปของหุ่นยนต์

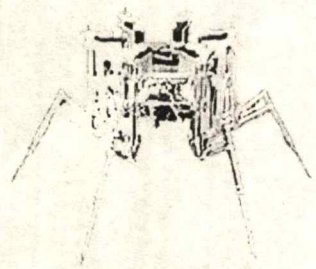
*mechanical overview*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่สำหรับผู้บริโภคหรือเพื่อใช้เชิงพาณิชย์ ผู้ใช้ควรปฏิบัติตามเงื่อนไขการใช้งานที่ปรากฏในเอกสารฉบับนี้ หากมีข้อสงสัยหรือข้อผิดพลาดใดๆ โปรดแจ้งให้เราทราบทันที



GENERAL DESIGN ASPECT

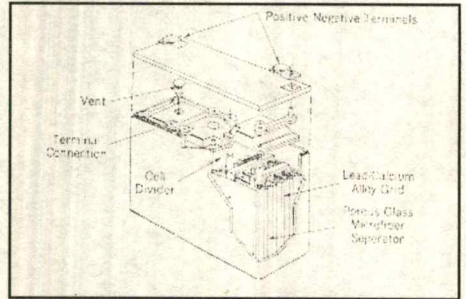
การออกแบบรูปร่างของหุ่นยนต์และการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ลงบนตัวหุ่นยนต์นั้นสามารถทำได้หลายแบบแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับแนวความคิดและจุดประสงค์ ในการสร้างหุ่นยนต์ของผู้สร้างแต่ละราย ในการสร้างหุ่นยนต์ครั้งนี้ เราต้องการสร้างหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่โดยการไต่ขาจึงได้ออกแบบรูปร่างของหุ่นยนต์ให้คล้ายกับแมลง ซึ่งมีขา 6 ขา



รูปแสดงโครงสร้างของหุ่นยนต์โดยรวม

การออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ของหุ่นยนต์นั้นมีปัจจัยหลายอย่างที่เป็นข้อจำกัดในการออกแบบดังนี้

1. เนื่องจากหุ่นยนต์นี้สร้างจากอลูมิเนียม จึงไม่สามารถเชื่อมชิ้นส่วนบางชิ้นที่มีขนาดเล็กได้ เพราะจะทำให้อลูมิเนียมละลาย ดังนั้นในการประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ จึงได้ใช้สกรูยึดแทน
2. ขนาดและรูปร่างของแหล่งจ่ายไฟ (*battery*) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดขนาดของหุ่นยนต์ โดยเราได้เลือกใช้ *sealed lead - acid battery* ที่มีรูปร่างและรายละเอียดดังรูป
3. ขนาดรูปร่าง ตำแหน่งติดตั้ง และ กำลังขับของอุปกรณ์ขับเคลื่อนหุ่นยนต์ ได้แก่ *R/C servo* ซึ่งให้แรงบิดประมาณ 3 kg-cm
4. ความแข็งแรงของโครงสร้างอลูมิเนียม ซึ่งไม่สามารถออกแบบให้รับน้ำหนักมากได้ เนื่องจากต้องออกแบบเพื่อให้สามารถติดตั้งหรือรองรับอุปกรณ์อื่น ๆ เช่น แหล่งขับเคลื่อนหรือแหล่งจ่ายไฟจึงทำให้สัดส่วนของโครงสร้างบางชิ้นมีความแข็งแรงต่ำ



โครงสร้างภายในของ *sealed lead - acid battery*  
taken from 'Robot Evolution : the development of anthropotics'

## COMPONENT MOUNTING

การติดตั้งอุปกรณ์นั้นแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ

1. ส่วนลำตัว (*body components*)
2. ส่วนขา (*leg components*)

### Body Components

1. *leg board (slave controller)*

เป็นวงจรควบคุมการเคลื่อนที่ของแต่ละขาของหุ่นยนต์ ซึ่งจะเหมือนกันทั้ง 6 ขา ติดตั้งอยู่ที่ *plate* ของลำตัวส่วนบน

2. *swing servo & swing gears*

เป็น *servo* และชุดเฟือง ที่ควบคุมการแกว่งขา ติดตั้งอยู่ที่ *plate* ของลำตัวส่วนล่าง

3. *extension servo & linkage*

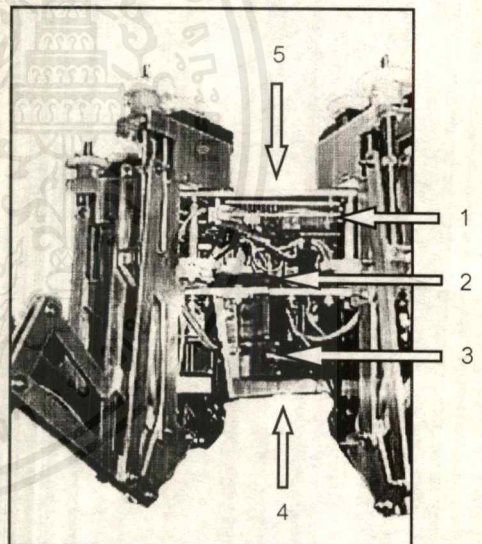
เป็น *servo* และ *linkage* ที่ควบคุมการยืดหดขา ติดตั้งอยู่กับคานที่เป็นโครงสร้างหลักของลำตัว

4. *sealed lead-acid battery*

เป็น *battery* แบบแห้ง ติดตั้งอยู่กลางลำตัวเพื่อความสมดุลของหุ่นยนต์และเป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ทุกตัว

5. *junction terminal & slots with core controller (master controller)*

แผงวงจรที่รวม *connector* จาก *legboard (slave controller)* ที่มาจากขาทุกขา ซึ่งมี *slots* สำหรับการเสียบแผงวงจรหลักในการควบคุมหุ่นยนต์และวงจรอื่น ๆ โดยจะติดตั้งอยู่เหนือ *battery*



รูปแสดงตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์  
ในส่วนลำตัวของหุ่นยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเนื้อหา และ ห้ามนำไปอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Leg Components

## 1. gearbox

เป็นชุดขับเคลื่อนเพื่อใช้ในการยกขาในแนวดิ่ง ประกอบด้วย

- servo ที่ดัดแปลงแล้วพร้อมกับ R-slide เพื่อใช้ในการบ่อนกลับตำแหน่ง
- ชุดเฟือง

## 2. screw

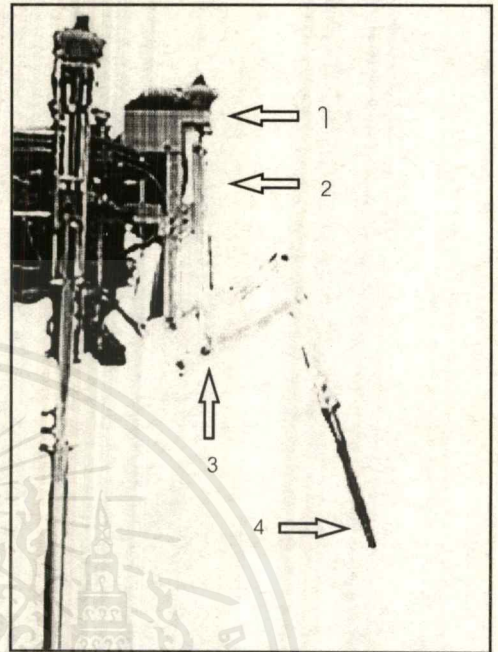
เกลียวที่ต่อกับชุด gearbox เพื่อควบคุมการขึ้นลงของขา

## 3. bearing

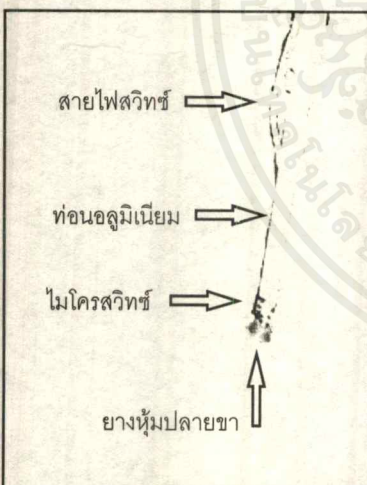
ลูกปืนช่วยลดความฝืดในข้อต่อต่าง ๆ ทุกข้อต่อ

## 4. leg switch

เป็นไมโครสวิตช์ติดตั้งอยู่บริเวณปลายขาที่หุ้มด้วยยาง



รูปแสดงส่วนประกอบของขา



รูปแสดงรายละเอียดของปลายขา



### บทที่ 3

### วงจรควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น *circuit board design* ค่า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

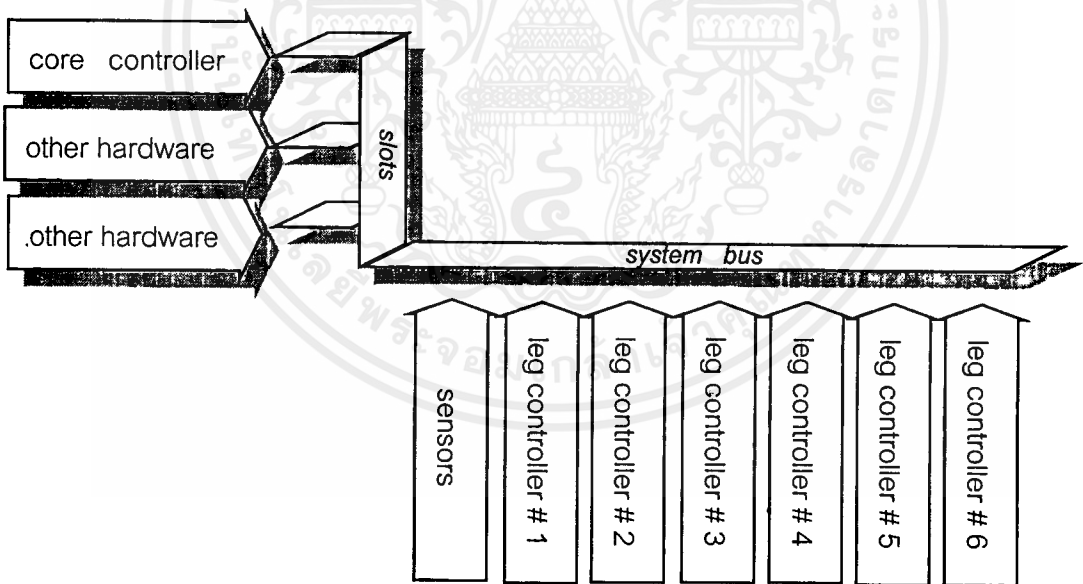
## Hardware Control System

ระบบควบคุมฮาร์ดแวร์ ( *hardware control system* ) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ให้ ซอฟต์แวร์ ซึ่งได้แก่ โปรแกรม สามารถติดต่อกันได้ ( *interfaces* ) กับฮาร์ดแวร์ ในที่นี้คือ ตัวขับเคลื่อน ( *actuator* ) ซึ่งได้แก่ เซอร์โวมอเตอร์ ระบบควบคุมฮาร์ดแวร์ที่ดีจะต้องมีลักษณะที่สามารถแยกเป็นส่วนๆ ได้ ( *modular* ) ซึ่งจะทำให้ระบบมีความยืดหยุ่น ( *flexible* ) และสามารถปรับปรุงหรือเพิ่มเติมได้โดยง่าย

อีกทั้งการควบคุมการเคลื่อนที่โดยใช้ขานั้นมีความซับซ้อน ดังนั้นระบบควบคุมฮาร์ดแวร์ที่ดีจึงควรที่จะมีความสามารถในการติดต่อกับหน่วยประมวลผลหลาย ๆ ตัว ( *multiple processors* ) และนอกจากนี้ยังควรมีความสามารถในการติดต่อสื่อสารระหว่างกัน ( *communication interface* )

## Architecture Overview

สถาปัตยกรรมพื้นฐานที่ได้ออกแบบไว้มีลักษณะดังรูป



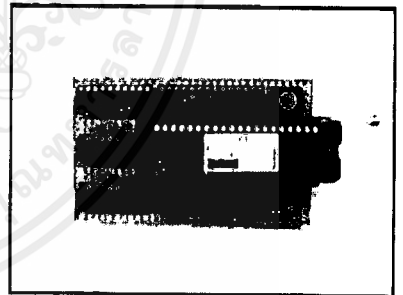
สถาปัตยกรรมพื้นฐานของหุ่นยนต์

โดยระบบต่าง ๆ ของหุ่นยนต์ จะต่อเข้ากับ *system bus* ที่นอกจากจะประกอบไปด้วยสัญญาณควบคุมต่าง ๆ แล้ว ยังประกอบไปด้วย ระบบไฟเลี้ยงและกราวด์ ระบบการติดต่อสื่อสารแบบอนุกรม ( *serial networking* ) จะเห็นได้ว่าเราสามารถเพิ่มเติมหรือถอดอุปกรณ์ต่าง ๆ ของหุ่นยนต์ผ่านทาง *system bus* ได้โดยสะดวก

## ROBOT CORE BOARD

## Features

- microcontroller AT89C51/52
- crystal 11.0592MHz
- capacitor 30 pF
- 0.1 pF
- reset switch
- LED : power LED
- mini LED
- R - pull up 10k Ohm
- resistor : 10k Ohm
- 220 Ohm
- external memory UM61256
- bus transceiver 74LS245
- transparent latch 74LS373

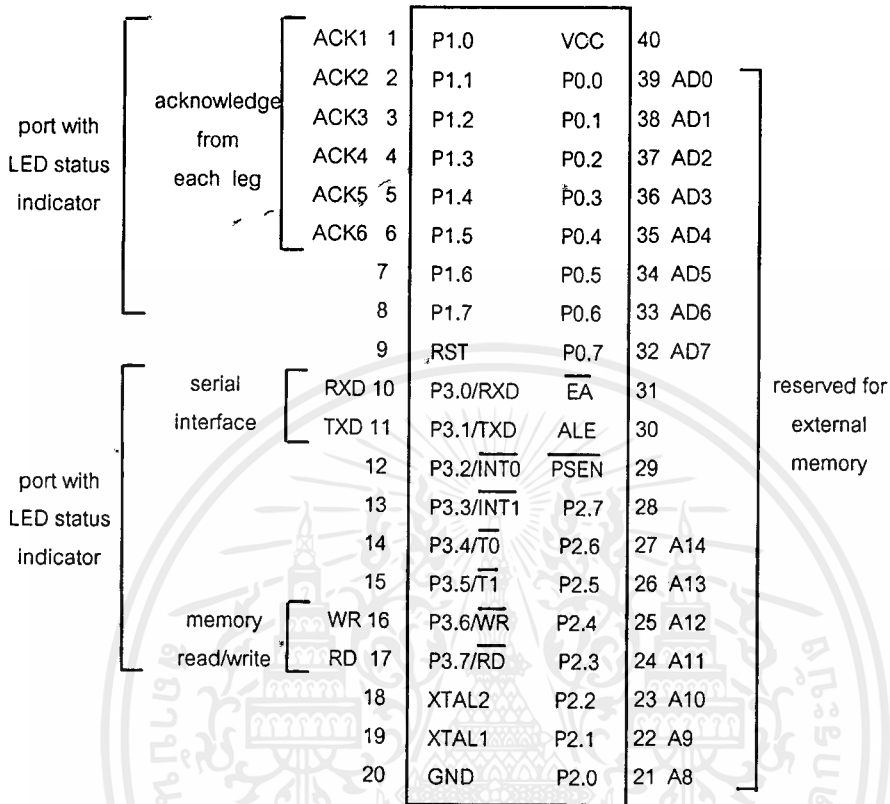


รูปแสดง robot core board

## Functional Description

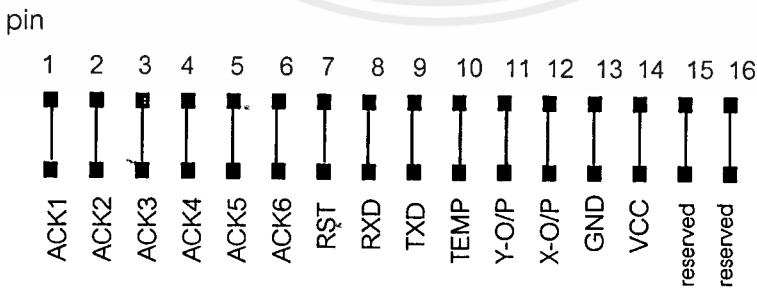
เป็นบอร์ดที่มีหน่วยประมวลผลหลักของหุ่นยนต์เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89C521/52 และหน่วยความจำภายนอก UM61M256 ขนาด 32kbyte ซึ่งจะเชื่อมต่อเข้ากับระบบอื่น ๆ ของหุ่นยนต์ผ่านทาง connector ที่สามารถเสียบลงบน slot ขนาด 16 X 2 pin ซึ่งใช้เป็น system bus ของหุ่นยนต์ได้ บอร์ดนี้จะทำหน้าที่หลักอยู่สองประการคือ การรับคำสั่งหรือโปรแกรมจากผู้ใช้งานไมโครคอมพิวเตอร์ และการกระจายคำสั่งการควบคุมผ่านไปยังหน่วยประมวลผลรอง โดยการติดต่อสื่อสารดังกล่าวนี้ จะใช้มาตรฐานการรับ / ส่งข้อมูลแบบอนุกรมในโหมด multiprocessor พอร์ต 0 และ พอร์ต 2 จะถูกใช้ในการอ้างอิง address และการรับ / ส่งข้อมูลกับหน่วยความจำภายนอก พอร์ต 1 และ พอร์ต 3 จะมี LED แสดงสถานะในแต่ละบิตของพอร์ตโดยอาศัย buffer เพื่อช่วยขับ LED

### Pin Configuration



รูปการเชื่อมต่อขาของไมโครโปรเซสเซอร์

### Connections

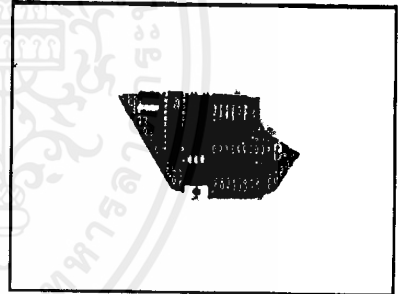


แสดง pin assignment ของ connector

## LEG CONTROL BOARD

## Features

- microcontroller AT89C2051
- crystal 11.0592MHz
- capacitor 30 pF
- 0.1 pF
- on / off switch
- LED : power LED
- user LED
- leg switch LED
- extension servo LED
- swing servo LED
- vertical servo LED
- R - pull up 10k Ohm
- feedback resistor for servo:
  - trimpot 1k Ohm
  - calibrated resistor



รูปแสดง leg control board

## Functional Description

บอร์ดนี้ประกอบไปด้วย หน่วยประมวลผลรองที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89C2051 คอยรับคำสั่งผ่านการสื่อสารแบบอนุกรมจากหน่วยประมวลผลหลัก (core controller) ที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89C51 / 52 เพื่อประมวลผลการเคลื่อนที่ของขาแต่ละขา โดยไมโครคอนโทรลเลอร์แต่ละตัวมีหน้าที่หลักในการส่งสัญญาณไปขับเซอร์โวมอเตอร์ที่ควบคุมการเคลื่อนที่ทั้ง 3 แขนของขาแต่ละขา อันได้แก่

- การยกขา ควบคุมโดย vertical servo
- การแกว่งขา ควบคุมโดย swing servo
- การยืดหดขา ควบคุมโดย extension servo

และไมโครคอนโทรลเลอร์ดังกล่าว ยังสามารถรับค่าจากสวิทช์ที่ติดตั้งอยู่บริเวณปลายขา พร้อมทั้งแสดงสถานะการทำงานต่าง ๆ ช่างต้น ผ่านทาง LED ได้

(ต่อหน้าถัดไป)

Functional Description (ต่อจากหน้าที่แล้ว)

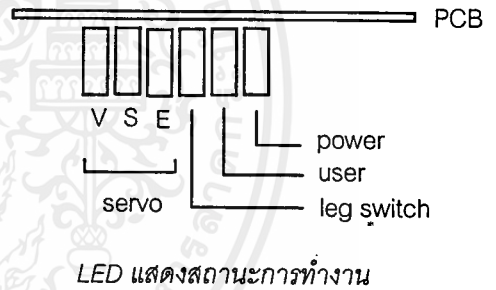
นอกจากระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ข้างต้นแล้ว บนบอร์ดยังประกอบไปด้วยระบบความต้านทานที่ใช้ในการป้อนกลับตำแหน่งของ vertical servo ที่ได้ทำการดัดแปลง ให้เป็นการป้อนกลับตำแหน่งโดยใช้ R-slide แทน R-pot แบบเดิม ระบบความต้านทานป้อนกลับดังกล่าว จะประกอบไปด้วย R ค่าคงที่ค่าหนึ่ง และ trimpot สำหรับปรับแต่งค่าละเอียด ต่ออนุกรมเข้าไปที่ทั้งสองข้างของ R-slide ทั้งนี้ก็เพื่อชดเชยให้ค่าความต้านทานป้อนกลับ มีค่าเท่ากับของเดิมที่ใช้การป้อนกลับตำแหน่งด้วย R-pot

ระบบต่าง ๆ บนบอร์ด จะเชื่อมต่อเข้ากับอุปกรณ์อื่น ๆ ผ่านทาง connector ซึ่งได้แก่ servo motor ทั้ง 3 ตัว สวิตช์ ปลายขา ระบบค่าความต้านทานป้อนกลับสำหรับ servo รวมไปถึงจนถึง ไฟเลี้ยง กราวนด์ สัญญาณรับ / ส่งอนุกรม สัญญาณรีเซต และ สัญญาณโต้ตอบโดยตรงกับหน่วยประมวลผลหลัก

Pin Configuration

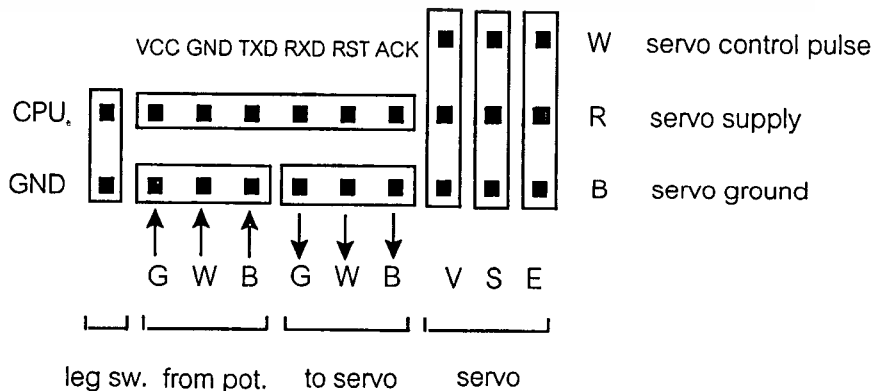
LEDs indicator

1	RST	VCC	20		
RXD	2	P3.0	P1.7	19	extension servo drive
TXD	3	P3.1	P1.6	18	swing servo drive
4	XTAL2	P1.5	17	vertical servo drive	
5	XTAL1	P1.4	16	acknowledge	
reserved	6	P3.2	P1.3	15	user LED
reserved	7	P3.3	P1.2	14	extension LED
reserved	8	P3.4	P1.1	13	swing LED
reserved	9	P3.5	P1.0	12	vertical LED
10	GND	P3.7	11	leg switch I/p & LED	



รูปการเชื่อมต่อขาของไมโครโปรเซสเซอร์

Connections



แสดง pin assignment ของ connector

## JUNCTION TERMINAL & SYSTEM BUS SLOTS

### Features

- 6 sets of distribution connector for leg control board
- 14 X 2 pins robot system bus
- 4 sets of 16 X 2 pins connector slots
- 5 pins connector for inclinometer
- 3 pins connector for RS - 232 serial interface
- RS - 232 drivers MAX - 232
- inclinometer mounting area
- power supply system : main switch

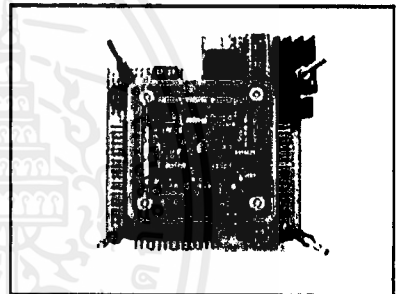
battery terminal

jack adapter

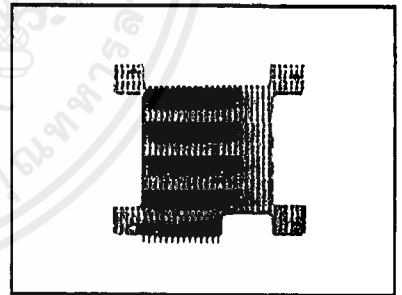
bridge diode

8 V regulator 7808

รูปแสดง junction terminal



รูปแสดง system bus slots



### Functional Description

*junction terminal* เป็นส่วนที่ทำการรวบรวมสายสัญญาณที่มาจาก *leg control board* ของแต่ละขา ให้รวมกันเป็น *system bus* ของหุ่นยนต์ จากนั้นจึงต่อ *bus* เข้ากับ *slots* เพื่อให้สามารถเสียบ *card* ต่าง ๆ เข้ากับหุ่นยนต์ได้ เช่น *core controller board* หรือ *card* อื่น ๆ ที่อาจมีเพิ่มเติมในอนาคตได้

นอกจากนี้ บนบอร์ดยังมีระบบจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ ของหุ่นยนต์ รวมไปถึงจนถึงวงจร RS - 232 *driver* เพื่อการติดต่อสื่อสารแบบอนุกรมตามมาตรฐาน RS - 232 เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลได้ และยังมีบริเวณสำหรับติดตั้ง *sensor* ที่ใช้วัดความลาดเอียงของตัวหุ่นยนต์ (*inclinometer*) ซึ่งจะได้นำไปใช้ในการควบคุมการทรงตัวของหุ่นยนต์ต่อไป

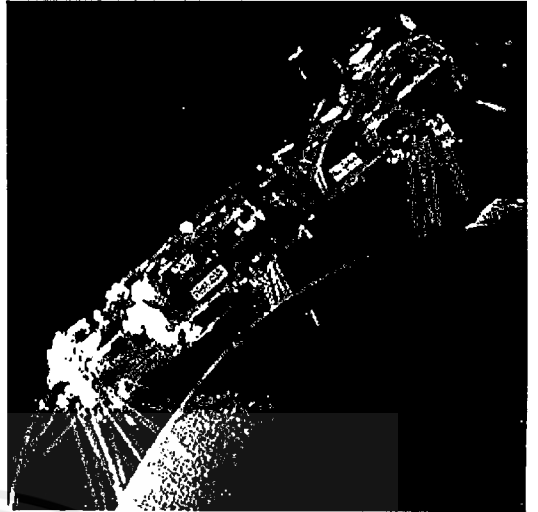


## บทที่ 4

## แนวคิดในการควบคุม และโปรแกรมหุ่นยนต์

*robot control scheme & software design*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การแจ้งให้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่ผู้เผยแพร่เห็นชอบหรือเห็นว่าการคัดลอก  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



'Genghis' หุ่นยนต์เดิน 6 ขาตัวแรกของ MIT

picture appears courtesy of MIT Artificial Intelligence Mobile Robot Lab.  
taken from <http://www.ai.mit.edu/projects/genghis/genghis.html>

## Robot Control Scheme

สิ่งมีชีวิตกับหุ่นยนต์บางส่วนก็มีความคล้ายกัน โดยในหุ่นยนต์  
แมคคานิกส์ (mechanics) ก็เปรียบเสมือนกับอวัยวะของร่างกาย  
อิเล็กทรอนิกส์ (electronics) ก็เปรียบเสมือนกับระบบประสาท  
ระบบควบคุม (controller) ก็เปรียบเสมือนกับสมองของสิ่งมีชีวิต  
เช่นเดียวกับในมนุษย์ หุ่นยนต์ก็มีความสามารถที่จะรับรู้สภาวะ  
แวดล้อมจาก sensor ต่าง ๆ ที่ส่งสัญญาณผ่านไปยัง controller โดย  
controller จะรวบรวมและตีความข้อมูลที่ได้ แล้วจึงส่งสัญญาณเพื่อ  
ไปบังคับให้หุ่นยนต์ปฏิบัติตามต้องการ

การควบคุมนั้นแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ - low - level control

- high - level control

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

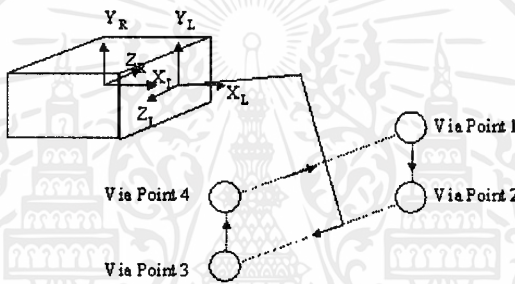
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LOW - LEVEL CONTROL

จะกล่าวถึงการควบคุมการเคลื่อนที่โดยเน้นเฉพาะส่วนขา วิธีหนึ่งที่ใช้ในการเดินของหุ่นยนต์ คือ การดึงตัวหุ่นไปข้างหน้า (หรือถอยหลังขึ้นกับทิศทางที่จะเดิน) ขณะที่ตัวหุ่นยนต์เคลื่อนที่ ขาจะอยู่ติดอยู่กับพื้น จึงสามารถทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปได้ การเดินของหุ่นยนต์จะมีประสิทธิภาพดีถ้าขาของหุ่นยนต์ไม่ลื่นไถลง่าย

Via - Point

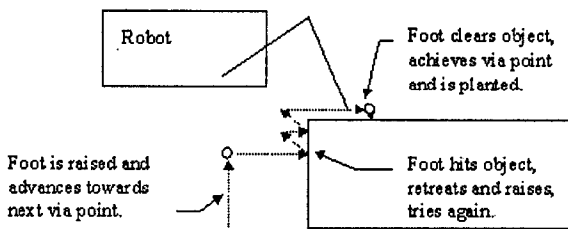
เมื่อเรากำหนดให้การก้าวของแต่ละขามีระยะที่แน่นอน ในการก้าวแต่ละครั้งจะต้องมีการคำนวณตำแหน่งของการก้าวเดินในแต่ละก้าว ซึ่งทำให้ไม่สะดวก วิธีหนึ่งที่จะช่วยลดการคำนวณในแต่ละก้าว คือ การกำหนดเซตของจุดที่แทนตำแหน่งที่ปลายขาจะเคลื่อนผ่าน (via - points) ด้วย matrix เมื่อขาเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการแล้ว ก็จะมีการคำนวณเส้นทางที่จะก้าวเดินต่อไป



รูปแสดงแนวทางการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงของปลายขาโดยพิจารณาเป็น via - points

ในขณะที่ไม่มีสิ่งกีดขวางหุ่นยนต์ก็สามารถเคลื่อนที่ไปตามทิศทางที่ต้องการได้ แต่ก็มีบางสถานการณ์ที่เส้นทางที่เดินไม่ได้เรียบเสมอ เช่น มีหลุมกีดขวางซึ่งเมื่อหุ่นยนต์ก้าวเดินไปอาจทำให้หุ่นยนต์ล้มได้ จากจุดนี้เองทำให้ต้องมีการคำนวณตำแหน่งในการก้าวเดินใหม่

แต่ถ้ามีสิ่งกีดขวางที่มีความสูงไม่มากนัก เช่น บันไดซึ่งหุ่นต้องการจะข้าม เมื่อขาของหุ่นยนต์กระทบวัตถุ ก็จะทำให้ microprocessor รู้และจะสั่งให้ยกขาหาตำแหน่งใหม่และถ้ายังไม่พ้นก็จะทำไปเรื่อย ๆ จนไม่มีวัตถุขวางหรือไม่ก็จนหุ่นยนต์ไม่สามารถยกขาได้



รูปแสดงการข้ามสิ่งกีดขวางเช่นบันได

HIGH - LEVEL CONTROL

มีวิธีการมากมายที่จะทำให้ หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้โดยอัตโนมัติ

บางวิธีก็พัฒนามาจากวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ (artificial intelligence)

บางวิธีก็เลียนแบบการเคลื่อนที่ของอวัยวะของสิ่งมีชีวิต (actual biological organism)

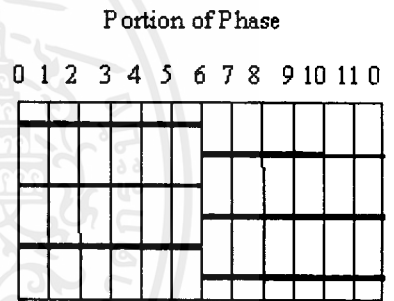
Walking Gait

ในการควบคุมการเดินของหุ่นยนต์ รูปแบบของการก้าวเดิน คือ แบบแผน (pattern) ในการบังคับขาให้เคลื่อนที่เพื่อให้ลำตัวสามารถเคลื่อนที่ตามไปด้วย ประโยชน์ที่เห็นได้ชัดของหุ่นยนต์ที่เดินด้วยขากับหุ่นยนต์ที่ใช้ล้อก็คือเราสามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเดินของหุ่นยนต์ ให้เป็นไปตามสภาพของพื้นที่ได้

สำหรับหุ่นยนต์ 6 ขานั้น จะมีรูปแบบการเดินหลายแบบ แต่เราจะพิจารณาวิธีการเดิน 3 วิธีที่คิดว่าจะเหมาะสมสำหรับการเดินของหุ่นยนต์ในสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน

1. The tripod gait

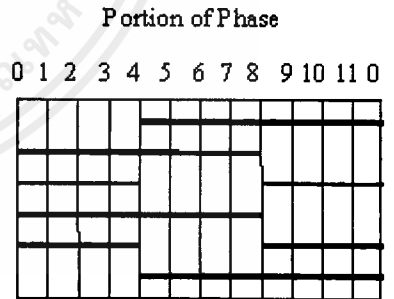
วิธีนี้เหมาะสมกับการเคลื่อนที่ในพื้นที่ที่ค่อนข้างเรียบ ซึ่งความเร็วในการเคลื่อนที่โดยวิธีนี้จะสูงกว่าวิธีอื่น โดยจะแบ่งขาออกเป็น 2 กลุ่ม ในการเดินจะยกขา 3 ขาก้าวไปข้างหน้าโดยมีอีก 3 ขาที่เหลือคอยค้ำไม่ให้ล้ม เมื่อขาที่ค้ำก้าวตามมาแล้ว ส่วนลำตัวจะถูกยกตามมาอยู่ตำแหน่งใหม่และเริ่มเคลื่อนที่อีกครั้ง



รูปแบบการเดินแบบ tripod gait

2. The ripple gait

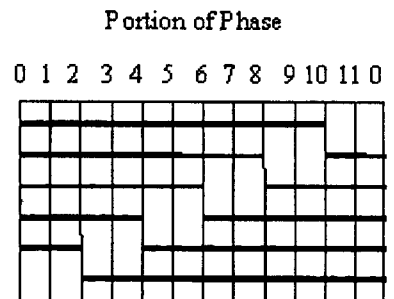
วิธีการเดินแบบนี้หุ่นยนต์จะมีการทรงตัวที่ดีกว่าแบบแรก กล่าวคือ จะมีขา 4 ขาอยู่ติดพื้นเสมอ ในการก้าวจะก้าวทีละ 2 ขา Leg พร้อมกัน โดยขาที่ก้าวนี้จะอยู่คนละด้านกัน เมื่อขาคู่แรกแตะถึงพื้นขาคู่ต่อไปก็จะก้าวตามไป



รูปแบบการเดินแบบ ripple gait

3. The wave gait

จะคล้ายกับ ripple gait แต่จะยกขาก้าวทีละด้าน เช่น เมื่อขาหลังด้านซ้ายก้าว ขาต่อมาก็จะเป็น ขากลางซ้าย จนถึงขาหน้า แล้วจึงค่อย ก้าวขวาขวาลงสุด วิธีนี้จะช้าที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสามวิธีที่ผ่านมา แต่จะเป็นวิธีที่หุ่นยนต์มีเสถียรภาพและการทรงตัวที่ดีที่สุด เหมาะที่จะใช้กับการขึ้นที่สูง



รูปแบบการเดินแบบ wave gait

### Sensory Feedback

เนื่องจากเราใช้เซอร์โวมอเตอร์ในการขับเคลื่อน ที่มีการบ่อนกลับตำแหน่งอยู่ในตัวแล้ว เราจึงสามารถกำหนดตำแหน่งในการเคลื่อนที่ได้แน่นอนโดยการป้อน *pulse code* ที่เหมาะสมให้กับเซอร์โวมอเตอร์ได้โดยตรง ดูรายละเอียดเพิ่มเติมของเซอร์โวมอเตอร์ได้ในภาคผนวก

### Touch Sensing

เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถรู้ได้ว่าขณะนี้ขาของหุ่นยนต์ได้มีการแตะถูกวัตถุแล้ว เราอาจใช้ ไมโครสวิตช์ (*micro switch*) ติดตั้งอยู่บริเวณปลายขา เมื่อหุ่นยนต์จำเป็นต้องเดินไปในพื้นที่ที่มีความสูงไม่เท่ากัน เพื่อหุ่นยนต์จะได้รู้สภาพของเส้นทางที่จะเดินว่ามีสิ่งกีดขวางอย่างไรเพื่อให้หุ่นยนต์สามารถตอบสนองการเคลื่อนที่ได้เหมาะสมว่าจะข้ามวัตถุ นั้นหรือเดินอ้อมวัตถุไป

### Body Orientation

การทรงตัวของหุ่นยนต์เป็นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่ง เพราะเราต้องการให้หุ่นยนต์อยู่ในสมดุลตลอด เช่น เมื่อหุ่นยนต์กำลังจะข้ามสิ่งกีดขวางหรือพื้นเอียง โดยจะมีอุปกรณ์สำหรับวัดความลาดเอียงของตัวหุ่นยนต์ เพื่อการคำนวณตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงให้อยู่ภายในฐาน ถ้าจุดศูนย์ถ่วงอยู่นอกฐานที่รองรับด้วยขาของหุ่นยนต์ จะทำให้หุ่นยนต์ล้มลงได้ หรือเพื่อให้หุ่นยนต์จะสามารถเลือกวิธีการเดิน ที่จะลดความเสี่ยงในการพลิก โดยการเลือกวิธีเดินที่ทำให้มีขาที่สัมผัสกับพื้นผิวมากที่สุด



model 900 Biaxial Inclinometer

picture appears courtesy of Applied Geomechanics, Inc., Santa Cruz, California, USA

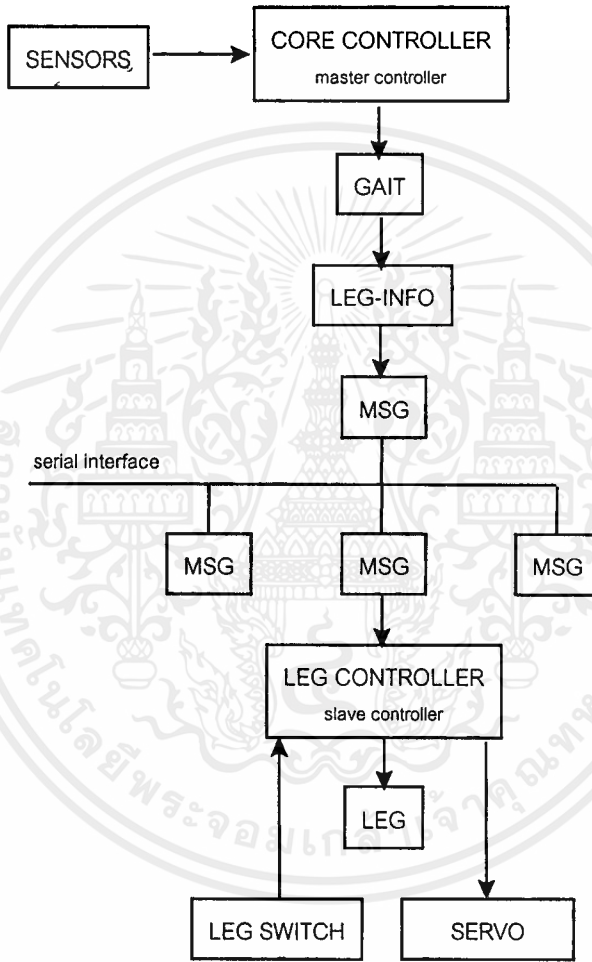
taken from <http://www.geomechanics.com>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ออกทั้งตามมติและนโยบายของสภาวิศวกร และสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SOFTWARE DESIGN

ในการ *design software* เราจะพยายามทำให้เป็น *module* เพื่อความสะดวกในการพัฒนาหุ่นยนต์ในแต่ละส่วน โดยในขาแต่ละขาของหุ่นยนต์จะมี *slave microprocessor* ควบคุมอยู่ขาละ 1 ตัวในทั้ง 6 ขา ซึ่งจะทำงานโดยรอรับคำสั่งจาก *master microprocessor* ผ่านทาง *serial port* ซึ่งช่วยให้เราไม่จำเป็นต้องโปรแกรมคำสั่งการทำงานของ *microprocessor* ทุกตัว ขั้นตอนการสั่งงานเมื่อต้องการให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่จะมีหลักการพื้นฐานดังนี้

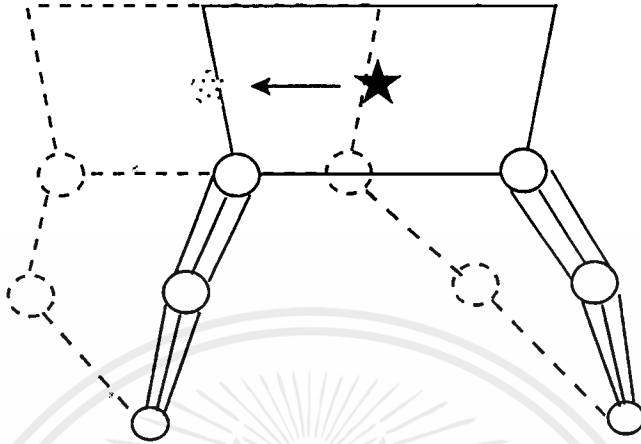


หลักการสั่งงานพื้นฐานของหุ่นยนต์

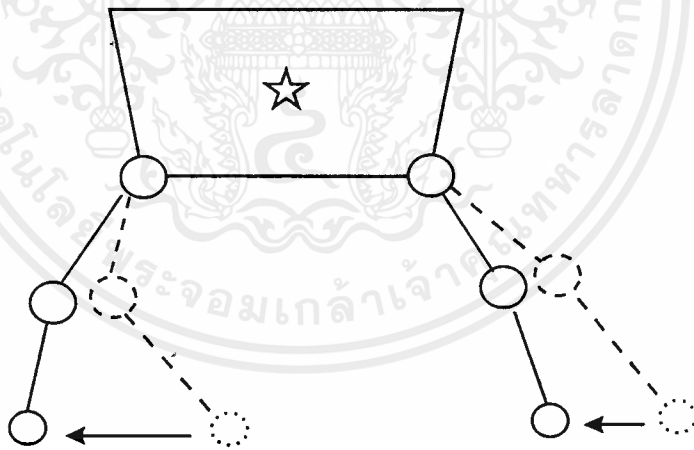
เมื่อ *core controller* ทราบทิศทางที่จะเคลื่อนที่ไปของหุ่นยนต์แล้ว *controller* จะนำข้อมูลจากเซนเซอร์ต่าง ๆ เช่น ลักษณะท่าทางของตัวหุ่นยนต์ (*body orientation*) ที่ได้จาก *inclinometer* หรือลักษณะพื้นผิวที่หุ่นยนต์จะเดินไป (*terrain scanning*) ที่อาจได้จาก *image processing* เพื่อเลือกลำดับการก้าวเดินของขา (*gaits*) ที่เหมาะสมที่สุด พร้อมกับส่งคำสั่งที่เหมาะสมให้กับ *leg controller* ที่ควบคุมขาแต่ละขา

*leg controller* จะขับเซอร์โวมอเตอร์ให้ได้ตำแหน่งปลายขาที่ต้องการ โดย *controller* จะทราบว่าขาแต่ละขาก็กก็ต่อเมื่อมีสัญญาณส่งมาจาก สวิตช์ที่ติดตั้งอยู่บริเวณปลายขา (*leg switch*) ซึ่งแสดงได้ดังแผนภาพ

โดยอาศัยพื้นฐานความรู้ทาง *inverse kinematics* ในแต่ละก้าวของหุ่นยนต์ จะหมายถึงการทำงานสลับกันระหว่างการเคลื่อนตัว และการเคลื่อนปลายขาเพื่อรองรับน้ำหนักตัวที่ได้เคลื่อนไป ดังแสดงในรูป



1. การเคลื่อนตัว แสดงให้เห็นง่าย ๆ ได้ โดยสมมติจุดใด ๆ ขึ้นภายในตัวหุ่นยนต์ การเคลื่อนตัวหมายถึงการเคลื่อนจุดนี้ไปในทิศทางที่ต้องการ โดยเปรียบเสมือนว่าปลายขาที่ใช้รองรับน้ำหนักตัวนั้นอยู่กับที่



2. การเคลื่อนขา เมื่อตัวหุ่นยนต์ได้เคลื่อนไปแล้ว จำเป็นที่จะต้องเคลื่อนขามายังตำแหน่งใหม่ เพื่อรองรับน้ำหนักตัว อันจะทำให้หุ่นยนต์พร้อมในการก้าวครั้งต่อไป ในขั้นตอนนี้จะทำกลับกับขั้นตอนแรก โดยเราจะพิจารณาให้ลำตัวเป็นจุดอยู่กับที่ แล้วจึงเลื่อนปลายขาไป

ในทางปฏิบัติการกระทำทั้งสองลักษณะจะเกิดขึ้นพร้อมกันตลอดเวลา เช่น ในการก้าวเดินแบบ *tripod gait* ในขณะที่ขากลุ่มหนึ่งกำลังทำหน้าที่เคลื่อนตัวขาอีกกลุ่มหนึ่งก็จะทำหน้าที่เคลื่อนขาไปพร้อม ๆ กัน



## บทที่ 5

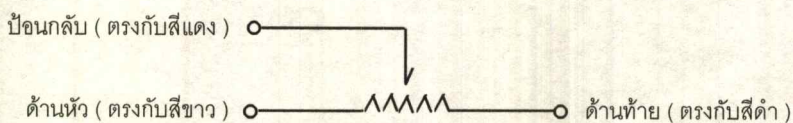
## การทดลองเกี่ยวกับ การดัดแปลงเซอร์โว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ *experimental on modified servo* คำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเคลื่อนที่ของขาในแนวดิ่งของหุ่นยนต์ตัวนี้ เราได้ออกแบบให้ใช้เซอร์โวมอเตอร์ในการขับเคลื่อนเกลิยว โดยได้ดัดแปลงให้เซอร์โวสามารถหมุนได้โดยรอบ ทั้งนี้ให้มีการป้องกันตำแหน่งของการเคลื่อนที่ด้วย R-slideทดแทนของเดิมที่ใช้การป้องกันตำแหน่งด้วย potentiometer

การทดลองนี้ เป็นการทดลองสุ่มหาค่า ( try and error ) ของความต้านทานที่ติดตั้งเพิ่มเติมไปที่ด้านหัวและท้ายของ R-slide เพื่อหาค่าเหมาะสมในการป้องกันตำแหน่งที่ให้ค่าสูงสุด ( ในที่นี้คือระยะเวลาในช่วงตั้งแต่ 0.1 - 4.6 cm ) และมีค่าใกล้เคียงกับของเดิมมากที่สุด ( ค่ากลางที่ 2.3cm ) โดยได้พยายามรักษาการเคลื่อนที่ให้มีความเป็นเชิงเส้นที่สุด

ความต้านทาน ด้านหัว ( ohm )	ความต้านทาน ด้านท้าย ( ohm )	ตำแหน่งที่วัดได้ ( cm )			
		ค่าต่ำสุด	ค่ากลาง	ค่าสูงสุด	
8.9k	5.0k	0.8	2.3	4.0	
8.9k	6.0k	0.4	2.0	3.8	
9.0k	5.0k	0.8	2.2	3.9	
10.0k	5.0k	0.9	2.5	4.3	
10.0k	6.0k	0.4	2.1	4.0	
11.5k	6.5k	0.6	2.3	4.2	
12.0k	7.0k	0.5	2.3	4.3	
13.0k	8.0k	0.4	2.2	4.3	
13.0k	7.0k	-	2.2	4.4	
12.0k	8.0k	0.5	2.4	-	
13.0k	7.5k	-	1.9	4.1	
13.0k	7.5k	0.1	2.3	4.7	* ค่าที่ใช้ได้
13.0k	7.6k	0.0	2.3	4.6	* ค่าที่ใช้ได้
13.0k	7.55k	0.1	2.3	4.6	* ค่าที่ใช้ได้





## สรุปและข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ *conclusion & recommendations* คำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

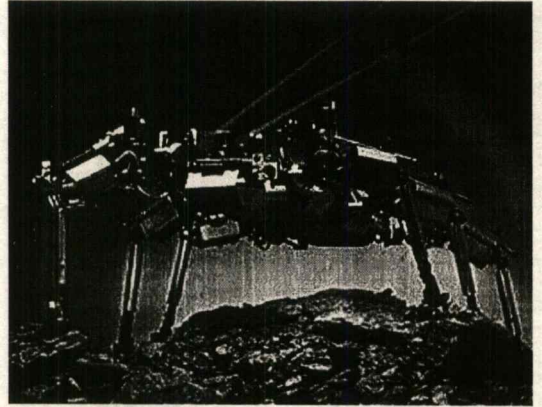
## CONCLUSION &amp; RECOMMENDATIONS

เนื่องจากเป็นโปรเจคใหม่ ที่ต้องมีการออกแบบและสร้าง hardware ที่มีโครงสร้างที่สลับซับซ้อนและมีจำนวนมาก เวลาส่วนใหญ่จึงถูกใช้ไปในการออกแบบและจัดหาอุปกรณ์ เพื่อสร้างตัวหุ่นยนต์ ตลอดจนการสร้างตัวหุ่นยนต์ต้องใช้ฝีมือในการสร้างโดยนักศึกษาเอง ด้วยเวลาอันจำกัดทำให้คณะผู้จัดทำ ไม่สามารถทำหุ่นยนต์ที่มีความสามารถครบตามเป้าหมายที่ได้วางไว้ในภาคการศึกษาที่ 1 ได้

หุ่นยนต์ที่สร้างเสร็จขึ้นนั้น มีคุณลักษณะทางแมคคานิกส์ที่ดีพอที่จะสามารถใช้เป็น platform ในการทดลองควบคุม การเคลื่อนที่ด้วยขาได้ กล่าวคือหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนไหว และรับน้ำหนักของตัวเองเพื่อเคลื่อนไปตามทิศทางต่าง ๆ ได้ แม้จะไม่แข็งแรงมากนัก

ปัญหาทางแมคคานิกส์ที่สำคัญของหุ่นยนต์ คือ การยกขา ทำได้ช้ากว่าที่ควรจะเป็น เมื่อเปรียบเทียบกับเคลื่อนที่ในแนวอื่น อย่างไรก็ตามหุ่นยนต์ตัวนี้ได้ใช้หลักการแยกส่วนประกอบต่าง ๆ ออกเป็นหน่วยย่อย ๆ (modularization) การปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ต่าง ๆ จึงสามารถทำได้โดยง่าย และการเพิ่มเติมในวงจรควบคุมอื่น ๆ ก็สามารถทำได้โดยสะดวกเช่นกัน เนื่องจากมี slot และ system bus เตรียมไว้พร้อมแล้ว

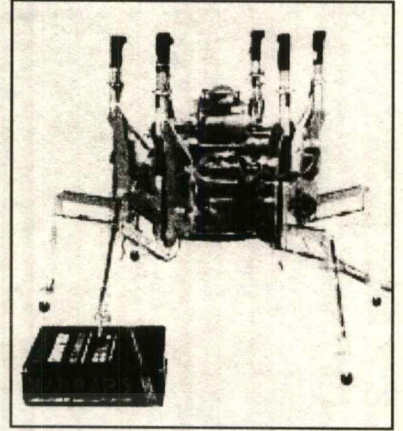
คณะผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะมีการพัฒนาหุ่นยนต์ในลักษณะนี้ต่อไปในอนาคต โดยเฉพาะใน ส่วนควบคุมการเดิน การทรงตัว และ การเคลื่อนที่โดยใช้ขา ซึ่งก็มีความสำคัญไม่ด้อยไปกว่า ด้านแมคคานิกส์ ที่แล้วเสร็จด้วยดี หากมีการพัฒนาโปรเจคนี้ในอนาคตจำเป็นอย่างยิ่งที่ควรจะมีการศึกษา ถึงการสร้างหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่โดยใช้ขาในรูปแบบอื่น ๆ ให้ดีเสียก่อน โดยอาศัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการศึกษา



แสดงการทำงานของ laser rangefinder ที่ติดตั้งอยู่บน 'Hannibal'  
picture appears courtesy of MIT Artificial Intelligence Mobile Robot Lab.  
taken from <http://www.ai.mit.edu/projects/hannibal/hannibal.html>

## ข้อเสนอแนะในการพัฒนาโครงการ

- ปรับปรุงวิธีการยกขาให้หุ่นยนต์สามารถยกขาได้เร็วขึ้น  
ควรปรับปรุงเกียร์ที่ติดตั้งอยู่กับขา เพื่อช่วยให้การเคลื่อนที่ในแนวตั้ง  
ทำได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

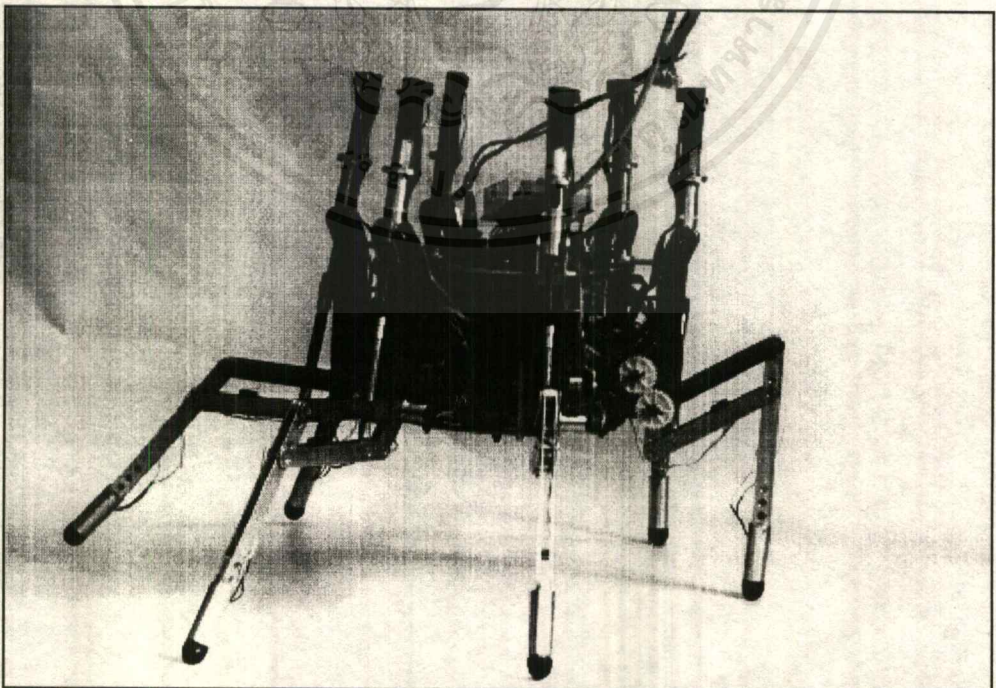


การยกขาข้ามสิ่งกีดขวางของ 'Silix'  
picture appears courtesy of Walking Machine Catalogue  
taken from <http://www.fzi.de/divisions/jpt/WMC/preface/preface.html>

- ปรับโครงสร้างต่าง ๆ ให้มีความแข็งแรงยิ่งขึ้น

ด้วยในตอนต้น ทางคณะผู้จัดทำมีความเป็นห่วงในเรื่องน้ำหนักตัวและกำลังขับของหุ่นยนต์มาก จึงพยายามเลือกและออกแบบให้ทุกชิ้นส่วนมีขนาดเล็กและเบาที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่ภายหลังพบว่า ถึงแม้หุ่นยนต์จะสามารถปฏิบัติงานได้ในระดับหนึ่ง แต่ด้วยความซับซ้อนและความเปราะบางของโครงสร้าง ทำให้หุ่นยนต์ต้องการการซ่อมแซมและการดูแลรักษาที่ถี่กว่าวิธีจากผู้เชี่ยวชาญเท่านั้น

ดังนั้นเพื่อความต่อเนื่องของโครงการ จึงควรที่จะสร้างโครงสร้างของหุ่นยนต์ขึ้นมาใหม่ ที่มีความแข็งแรงทนทานกว่าที่เป็นอยู่ และ ถ้าเป็นไปได้ หากสามารถลดความซับซ้อนของโครงสร้างโดยไม่ลดความสามารถของหุ่นยนต์ ก็เป็นสิ่งที่เหมาะสมอย่างยิ่ง

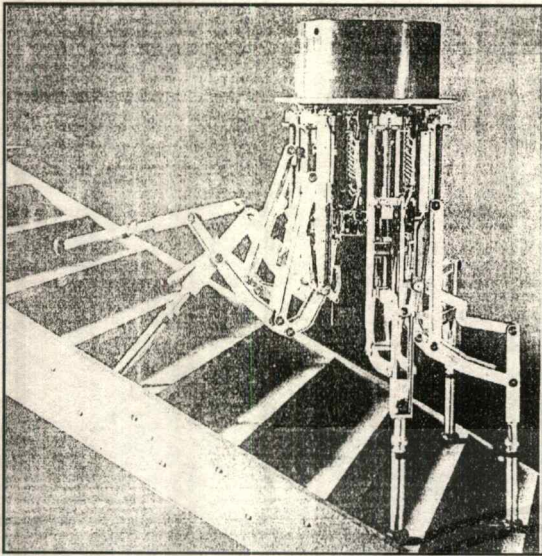


ความสามารถในการทรงตัวของ 'Silix'  
picture appears courtesy of ULB Service des Constructions Mécaniques et Robotique

taken from <http://www.ulb.ac.be/scmero>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่วารณใดๆ ทั้งสน ออกทั้งหามมเหตุดแปลงเนื้อหาและห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แสดงความสามารถในการจับกันไดของ 'Odex I'  
picture appears courtesy of Odetics, Inc., Anaheim, California, USA

- ศึกษาและพัฒนาโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์

เป็นส่วนสำคัญที่จะทำให้หุ่นยนต์มีความสามารถกระทำสิ่งต่าง ๆ ได้ เช่น การปีนป่าย การขึ้นและลงพื้นต่างระดับ การข้ามหรือหลบหลีกสิ่งกีดขวาง ตลอดจนการเดินทางไปในพื้นที่ที่ไม่ราบเรียบ งานเหล่านี้จะเกี่ยวข้องไปถึงการควบคุมตำแหน่งปลายขาและข้อต่อต่าง ๆ การควบคุมจังหวะและลำดับการก้าวเดินของขา การติดต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล การควบคุมหุ่นยนต์โดยใช้ภาษาชั้นสูง เสถียรภาพและการทรงตัวของหุ่นยนต์ ซึ่งหากเราสามารถพัฒนาหุ่นยนต์ถึงขั้นสูงแล้วเราก็จะสามารถนำทฤษฎีต่าง ๆ เช่น PID fuzzy logic neural network หรือ pattern recognition เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ได้

นอกจากนี้การพัฒนาโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์อาจทำได้อีกในลักษณะของ software simulation เพื่อสามารถศึกษาหรือแก้ไข อัลกอริทึมในการทำงานของหุ่นยนต์ได้อย่างสะดวกยิ่งขึ้น

- เพิ่มเติมอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อเพิ่มความสามารถของหุ่นยนต์

เช่น การเพิ่มเติมระบบ sensor ต่าง ๆ

การเพิ่มเติมระบบ terrain scanning

เช่น laser range finder

ultrasonic stereo vision

การเพิ่มเติมระบบ image processing โดยการติดตั้งกล้อง

ไม่ว่าจะเป็น CCD quick cam หรือกล้องระบบอื่น ๆ

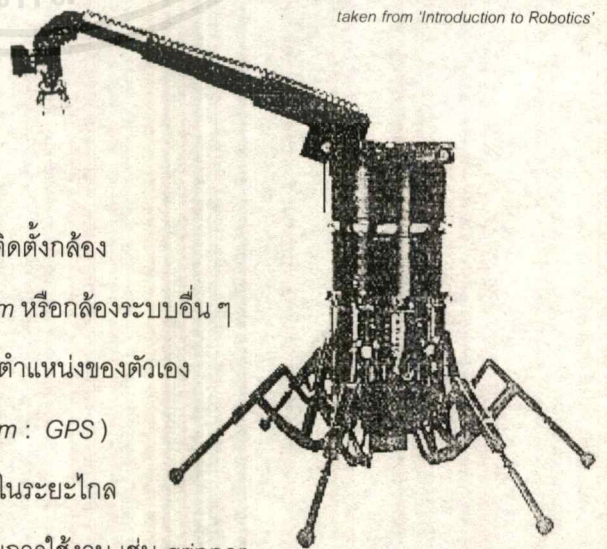
การเพิ่มเติมระบบที่ทำให้หุ่นยนต์สามารถรู้ทราบตำแหน่งของตัวเอง

(Global Positioning System : GPS)

การเพิ่มเติมระบบไร้สายเพื่อการควบคุมหุ่นยนต์ในระยะไกล

การเพิ่มเติม actuator อื่น ๆ ที่เห็นว่าเหมาะสมกับการใช้งาน เช่น gripper

การติดตั้ง gripper บนหุ่นยนต์ 'Robin'  
taken from 'Introduction to Robotics'



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นหากมีเหตุพิเศษขออนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## หนังสืออ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*references*

- [1] *Schilling, Robert J.*  
Fundamentals of robotics : analysis and control  
New Jersey : Prentice-Hall., c.1990.
- [2] *Solant, Michael A.*  
Introduction to robotics  
New York : McGraw-Hill , c 1988
- [3] *Horvath, Dylan / Lee, Jeff / Williams, Stefan*  
SYDE461 - Microprocessor Controlled Autonomous Modular Walking Vehicle  
Hexotica : the design and implementation of a small walking robot  
Waterloo : University of Waterloo , c 1996  
Article found at [http://real.uwaterloo.ca/~robot/4b\\_report/toc.html](http://real.uwaterloo.ca/~robot/4b_report/toc.html)
- [4] *Jones, Joseph L. / Flynn, Anita M.*  
Mobile robots : inspirations to implementation  
Massachusetts : A K Peters , c 1993
- [5] *Rosheim, Mark E.*  
Robot evolution : the development of anthrobotics  
New York : John Wiley , c 1994



**ผนวก ก**

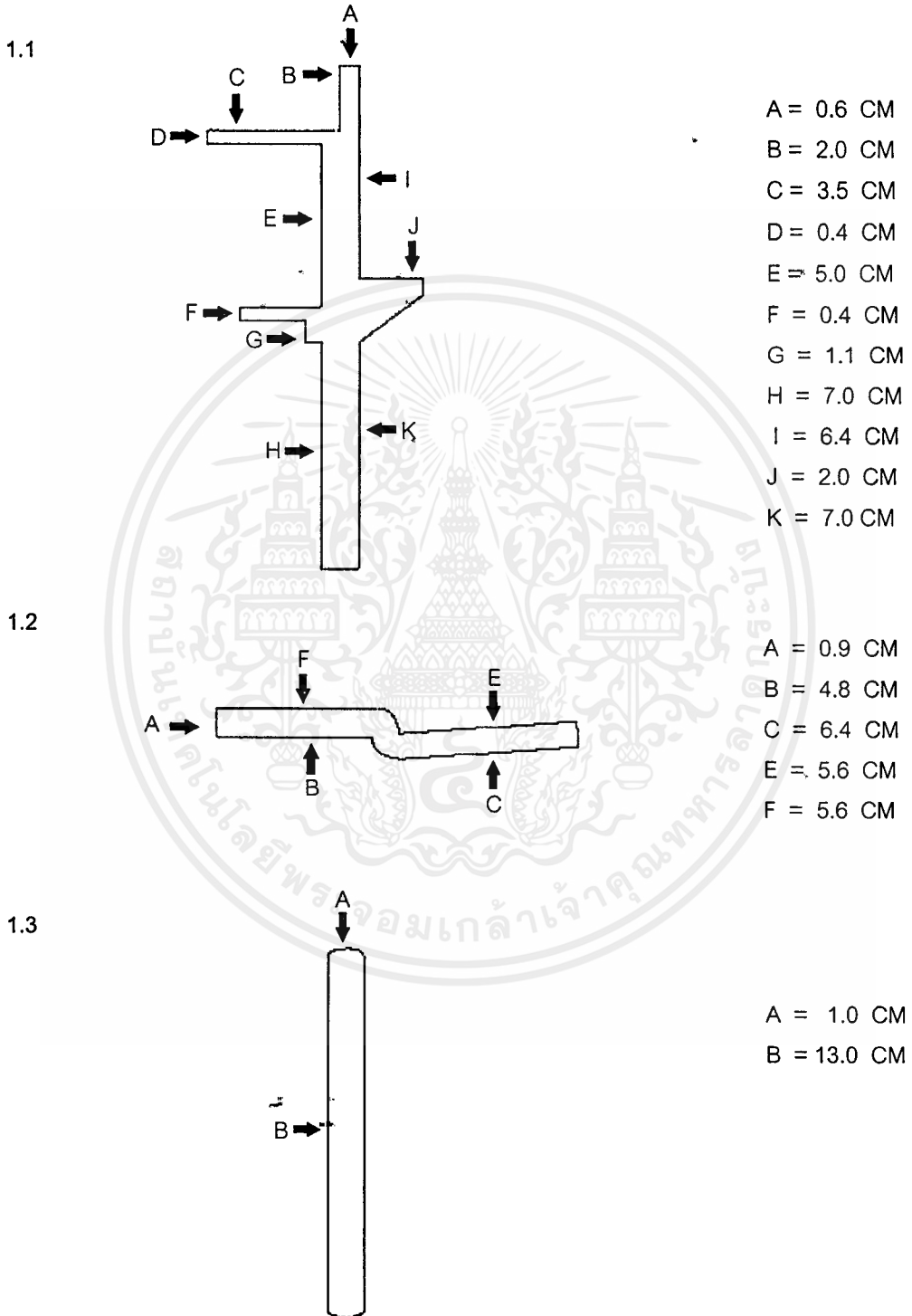
**สัสดส่วนโครงสร้างของหุ่นยนต์**

*appendix A*

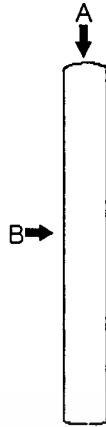
*mechanical layout*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่เชิงพาณิชย์ การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ส่วนประกอบของขา



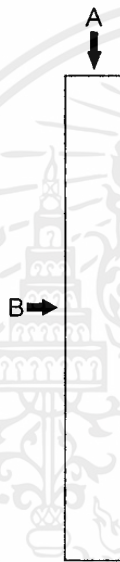
1.4



A = 1.3 CM

B = 12.5 CM

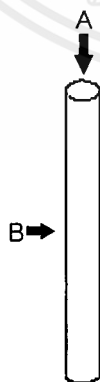
1.5



A = 1.0 CM

B = 16.5 CM

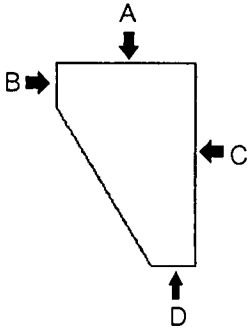
1.6



A = 9.5 CM

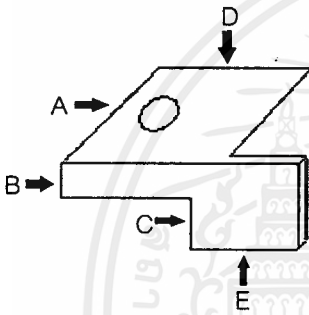
B = 1.0 CM

1.7



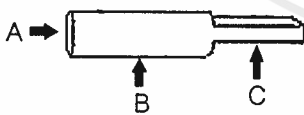
A = 3.1 CM  
B = 1.0 CM  
C = 4.5 CM  
D = 1.0 CM

1.8



A = 2.5 CM  
B = 0.6 CM  
C = 0.8 CM  
D = 3.7 CM

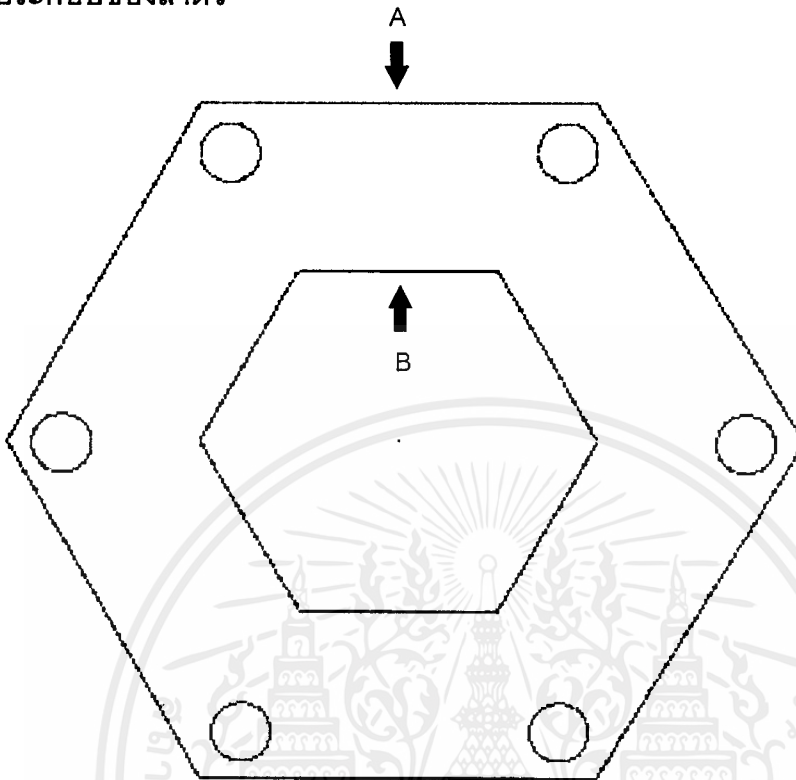
1.9



A = 0.8 CM  
B = 3.0 CM  
C = 2.0 CM

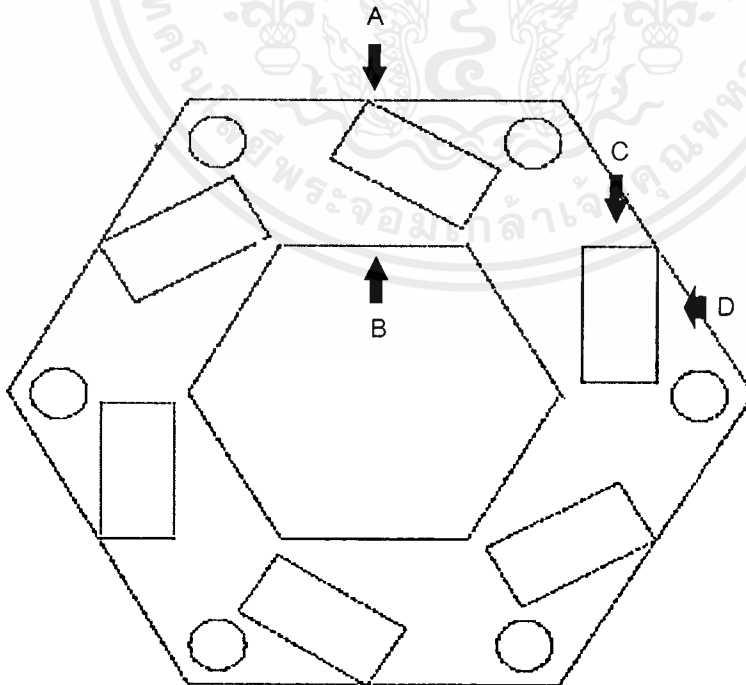
2. ส่วนประกอบของลำตัว

2.1



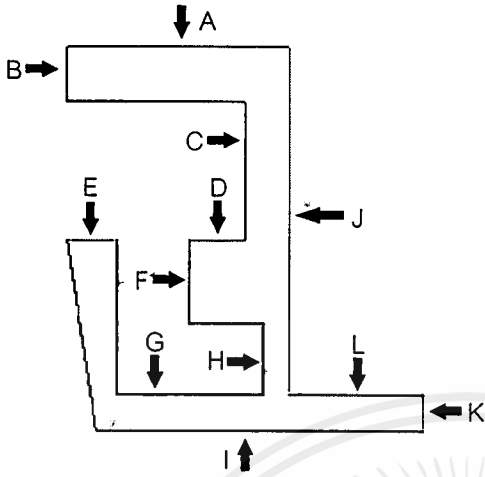
A = 10 CM  
B = 5 CM

2.2



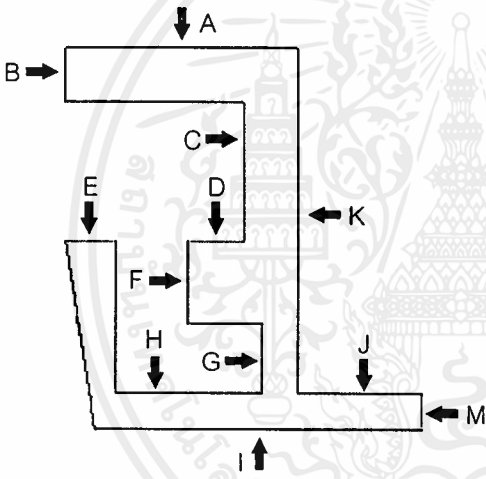
A = 10 CM  
B = 5 CM  
C = 2 CM  
D = 4.1 CM

2.3



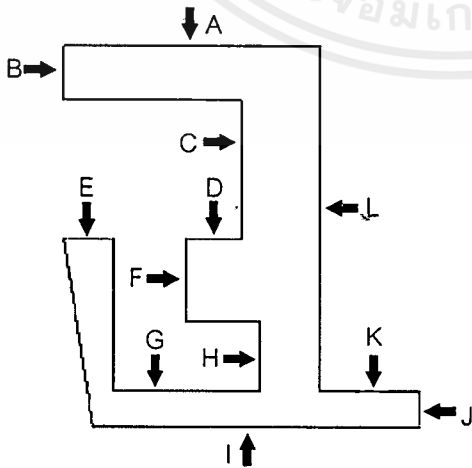
A = 6.2 CM B = 1.5 CM C = 3.9 CM  
D = 1.6 CM E = 1.4 CM F = 2.3 CM  
G = 4.1 CM I = 9.2 CM H = 2.0 CM  
J = 9.7 CM K = 1.0 CM L = 3.8 CM

2.4



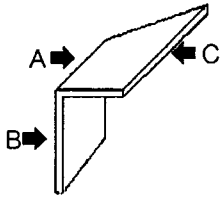
A = 6.5 CM B = 1.5 CM C = 3.9 CM  
D = 1.6 CM E = 1.4 CM M = 1.0 CM  
F = 2.3 CM G = 2.0 CM H = 4.1 CM  
I = 9.2 CM K = 9.7 CM J = 3.5 CM

2.5



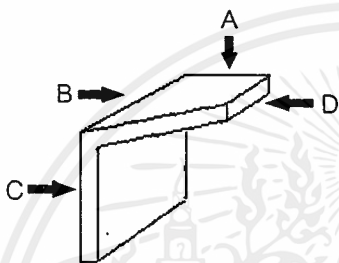
A = 7.2 CM B = 1.5 CM C = 3.9 CM  
D = 1.6 CM E = 1.4 CM F = 2.3 CM  
G = 4.1 CM H = 2.0 CM I = 9.2 CM  
J = 1.0 CM L = 9.7 CM K = 2.8 CM

2.6



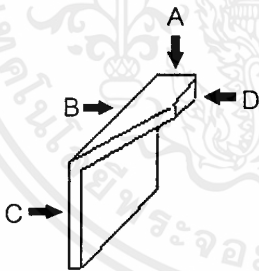
A = 1.6 CM B = 2.3 CM C = 2.6 CM

2.7



A = 1.5 CM C = 2.3 CM  
B = 1.5 CM D = 0.6 CM

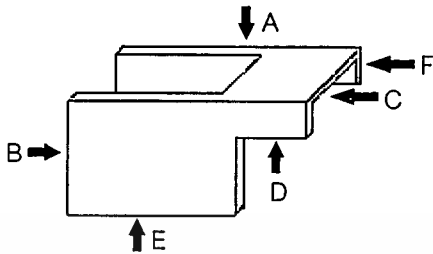
2.8



A = 1.0 CM C = 2.3 CM  
B = 1.6 CM D = 1.0 CM

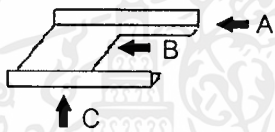
### 3. ส่วนประกอบของ GEAR BOX

3.1



A = 6.7 CM    B = 3.5 CM    C = 2.5 CM  
D = 2.0 CM    E = 4.7 CM    F = 1.0 CM

3.2



A = 0.5 CM    B = 2.0 CM    C = 4.7 CM



## ผนวก ข

## เซอร์โวมอเตอร์

### appendix B

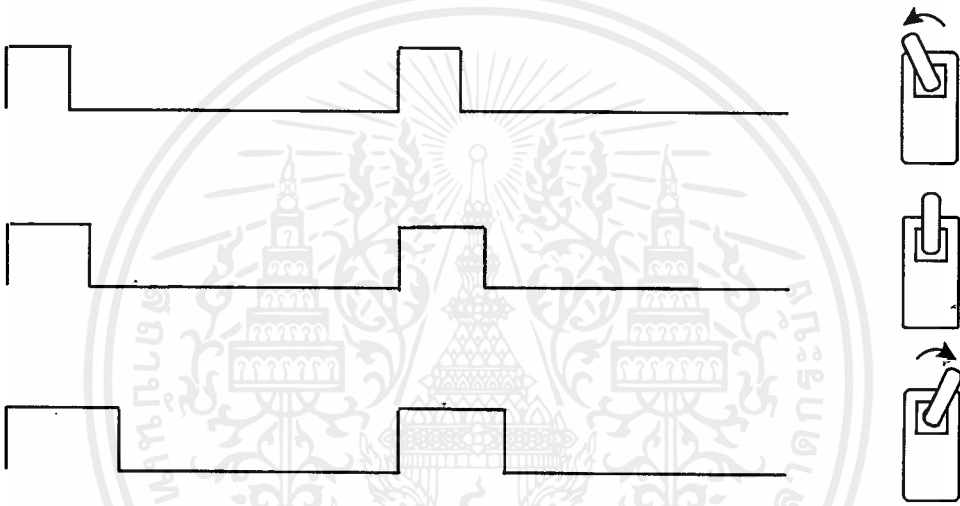
### servo motors

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในสื่อการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R/C servo เป็นมอเตอร์ที่มีการป้อนกลับตำแหน่ง ( *position feedback* ) อยู่ภายในตัว นิยมใช้ในระบบอุปกรณ์ที่บังคับควบคุมด้วยวิทยุ ( *Radio Controlled* ) ซึ่งมีความไม่สูงมากนักและยังง่ายต่อการดัดแปลง ถึงแม้ว่าเซอร์โวมอเตอร์จะมีราคาไม่ถูกเหมือนกับมอเตอร์ชนิดที่ใช้ในของเล่นทั่วไป แต่ข้อดีประการหนึ่งของเซอร์โวมอเตอร์คือสามารถติดตั้งได้ง่าย เนื่องจากว่าเป็นมอเตอร์ที่บรรจุอยู่ในรูปของ *gearbox* ที่ได้มีการทดเฟืองให้แล้ว ซึ่งโดยทั่วไปจะมีอัตราทดประมาณ 143:1 และให้แรงบิดประมาณ 3 *kg-cm* ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดและขนาดของเซอร์โวมอเตอร์ที่ใช้

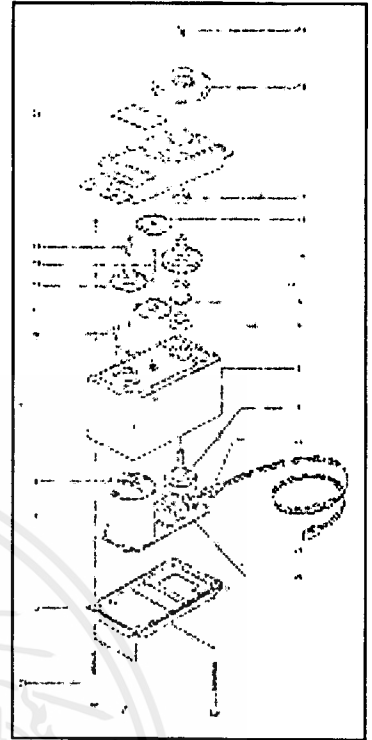
เซอร์โวมอเตอร์ที่ไม่ได้ดัดแปลงจะมีสายไฟ 3 เส้น คือ สายกราวด์ สายไฟเลี้ยง และ สายสัญญาณ *pulse* ควบคุมที่เรียกว่า *pulse code* ซึ่งลักษณะของสัญญาณ *pulse* ที่ใช้ควบคุมตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์จะเป็นการส่ง *pulse* ที่มีความกว้าง ( *pulse width* ) ต่างกัน เพื่อให้เซอร์โวมอเตอร์เคลื่อนไปยังตำแหน่งและทิศทางที่ต่างกันตามต้องการ



สัญญาณ *pulse* เหล่านี้จะถูกส่งซ้ำ ๆ กันในคาบเวลาคาบหนึ่ง ความกว้างของสัญญาณ *pulse* ( *pulse width* ) จะเป็นตัวกำหนดขนาดและทิศทางการหมุนของแกนเซอร์โวมอเตอร์ สำหรับคาบเวลาหรือระยะห่างระหว่าง *pulse* แต่ละลูก ( *pulse duty cycle* ) จะเป็นตัวกำหนดแรงบิด ( *torque* ) สำหรับ เซอร์โวมอเตอร์ที่เราได้เลือกใช้นั่นหากเราป้อนสัญญาณ *pulse* ที่มี *amplitude* ระหว่าง 4.8 - 6.0 โวลต์และมีความกว้าง *pulse* ประมาณ 1.520ms. จะทำให้เซอร์โวมอเตอร์มีตำแหน่งอยู่ตรงกลาง ( *neutral* ) ถ้าจ่ายสัญญาณ *pulse* ที่มีความกว้างมากหรือน้อยกว่าความกว้าง *pulse* คำนี ก็จะทำให้เซอร์โวมอเตอร์หมุนต่างทิศกันทั้งตามเข็มนาฬิกา และทวนเข็มนาฬิกา โดยตำแหน่งของ เซอร์โวมอเตอร์จะเบี่ยงเบนออกจากจุดกลางเป็นสัดส่วนกับความกว้าง *pulse* ที่จ่ายให้ จากการทดลองในเบื้องต้น เพื่อให้ได้แรงบิดที่เหมาะสม เราพบว่า ระยะห่างระหว่าง *pulse* แต่ละลูก ( *pulse duty cycle* ) ไม่ควรจะกว้างกว่า 10 ms.

การกำหนดตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์นี้ มีประโยชน์อย่างมากในงานด้าน *robotics* โดยเฉพาะตามข้อต่อหรือแกนหมุนต่าง ๆ ที่ไม่ต้องการ การหมุนได้โดยรอบ ( *continuous rotation* ) สำหรับข้อต่อหรือแกนหมุนที่ต้องการการหมุนอย่างต่อเนื่อง ( *continuous rotation* ) โดยใช้เซอร์โวมอเตอร์ ก็จำเป็นต้องทำการดัดแปลงดังที่จะกล่าวต่อไป โดยอาศัยหลักการที่ว่าถ้าเราไม่ต่อตัวต้านทานภายนอก เมื่อเซอร์โวมอเตอร์ได้รับสัญญาณ *pulse* มันก็จะหมุนไปเรื่อย ๆ โดยไม่หยุด เนื่องจากไม่มีการป้อนกลับตำแหน่งที่อ้างอิงได้จากศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานที่ต่อไว้

จากลักษณะของฟันเฟือง 4 ชุดที่บรรจุอยู่ใน gearbox เราจะสังเกตเห็น ด้านที่เป็นแกนของ *potentio meter* จะอยู่ด้านเดียวกันกับสายไฟ ส่วน แกนของมอเตอร์จะอยู่ทางด้านตรงข้ามกัน ( ตัวมอเตอร์ และ *potentio meter* บรรจุอยู่ในกล่อง ) ฟันเฟืองอีก 2 ชุดที่เหลือจะส่งกำลังที่จ่าย ออกมาจากด้านที่มีมอเตอร์ไปสู่ด้านที่มีแกนของ *potentio meter* ติดอยู่ที่ แกนของฟันเฟืองด้านนี้ ( หมายเลข 14 ) จะมีเดือยพลาสติกหล่อติดไว้ เพื่อไม่ให้แกนหรือฟันเฟืองหมุนเกินไปจากขอบเขตของ *potentio meter* ที่ติดตั้งอยู่ภายใน เหนือเดือยนี้จะมีลูกปืนเพื่อใช้รองรับ *load* และลดการ สั่นสะเทือน ( หมายเลข 17 )



picture appears courtesy of Futaba, Corp., Chiba

สำหรับการดัดแปลงขั้นแรกให้ตัดเดือยพลาสติกออกก่อนเพื่อให้แกนหมุน ได้โดยรอบ จากนั้นจึงถอดวงแหวนโลหะ ( หมายเลข 5 ) เพื่อนำเอาสลัก พลาสติกขนาดเล็ก ที่ทำหน้าที่ยึดแกนด้านนี้เข้ากับ *potentio meter* ออก ( หมายเลข 7 ) แล้วจึงสวมวงแหวนโลหะกลับเข้าสู่ที่เดิม

การทดลอง ให้ป้อน *pulse* ที่มีความกว้าง 1.520 ms. เพื่อหมุนปรับตั้ง *potentio meter* ด้วยมือให้อยู่ ณ ตำแหน่งปกติ (*neutral position*) โดยจะสังเกตได้จาก แกนของเซอร์โวมอเตอร์หยุดหมุน แล้วจึงประกอบ *gearbox* กลับเข้าที่เดิม ดังนั้นหากต้องการให้เซอร์โวมอเตอร์หมุนทวนหรือตามเข็มนาฬิกา ก็ให้ป้อน *pulse* ที่มีความกว้างกว่าหรือแคบกว่านี้ เซอร์โว ก็จะหมุนไปเรื่อย ๆ เนื่องจาก *potentio meter* ที่ทำหน้าที่ป้อนกลับตำแหน่งไม่ได้หมุนไปตาม ดังนั้นหากว่า เราต้องการให้เซอร์โวหยุดหมุน เราก็สามารถทำได้โดยการป้อน *pulse* ที่มีความกว้างเท่ากับที่ให้ไว้ในตอนแรก เซอร์โว ก็จะหยุดหมุน

หากต้องการให้มีการป้อนกลับตำแหน่งจากความต้านทานภายนอก ขั้นต่อไปให้ถอด *potentio meter* ออก แล้วจึงต่อ สายไฟจากตำแหน่งที่เคยต่ออยู่กับ *potentio meter* เดิม ให้มาต่อกับตัวต้านทานภายนอกที่ติดตั้งขึ้นมาใหม่ สำหรับ หนุ่ยยนต์ตัวนี้เราได้เลือกใช้ตัวต้านทานป้อนกลับภายนอกแบบสไลด์ต่อเข้ากับสกรูเกลียว เพื่อใช้อ้างอิงระดับความสูง ในการยกขาหนุ่ยยนต์

ข้อควรระวังของการใช้การป้อนกลับตำแหน่งจากตัวต้านทานภายนอก คือ ควรต้องให้ค่าของตัวต้านทานใหม่ที่ให้มีค่า ความต้านทานใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าความต้านทานเดิมของ *potentio meter* ที่ได้ถอดออกไป เพื่อลดความผิดพลาด ของการป้อนกลับตำแหน่ง



## ผนวก ค

## ไคเนเมติกส์

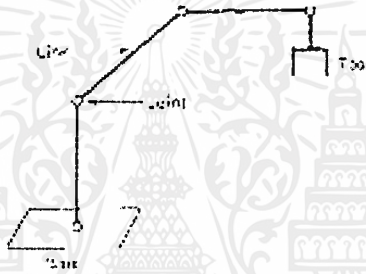
appendix C *direct & inverse kinematics*

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# 1 DIRECT KINEMATIC : The Arm Equation

แขนกลมีลักษณะเป็น Rigid Body เรียกว่า links หลายๆ อันนำมาเชื่อมเข้าด้วยกัน โดยใช้ข้อต่อ (Joint) ปลายข้างหนึ่งของ link ริมสุดจะติดแน่นกับฐาน (Base) ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งของ link ริมสุดที่อยู่คนละด้านจะเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ปลายข้างนี้จะต่อเข้ากับเครื่องมือ (Tool or End - effector) ตามปกติมีข้อต่อ 2 ชนิดที่ใช้เชื่อมต่อ Links

- ข้อต่อหมุน ( Revolute joint ) ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกน
- ข้อต่อเลื่อน ( Prismatic joint ) ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นเลื่อนไปตามแกน



รูป 1 - 1 แขนกลที่มีลักษณะเป็น links

จุดประสงค์ คือ การควบคุมทั้งตำแหน่งและการหมุนของ End - effector ในระนาบ 3 มิติ เพื่อโปรแกรมให้ End - effector เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่ได้กำหนดไว้ ดังนั้นเราจำเป็นต้องคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรข้อต่อกับตำแหน่งและการหมุนของอุปกรณ์ ซึ่งเรียกว่า ปัญหา Direct Kinematic โดยนิยาม ดังนี้

**ปัญหา :** Direct Kinematics คือ การกำหนดเวกเตอร์ของตัวแปรข้อต่อ ( Joint Variable ) ของแขนกล โดยแยกตามลักษณะข้อต่อเป็น

- ข้อต่อหมุน ตัวแปรได้แก่ ค่าองศาหมุนรอบแกนข้อต่อ
- ข้อต่อเลื่อน ตัวแปรได้แก่ ระยะการเคลื่อนที่ไปตามแนวแกนข้อต่อ

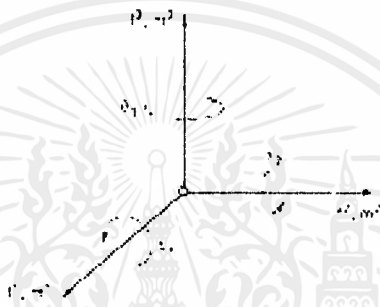
แล้วทำการคำนวณหาตำแหน่ง ( Position ) และการหมุน ( Orientation ) ของ End - effector เทียบกับโครงพิกัดที่ติดอยู่กับฐานของแขนกล

## 1.1 การหมุน (Rotation)

ในการระบุตำแหน่งและการหมุนของ End - effector ในเทอมของโครงพิกัดที่ติดอยู่กับฐานที่อยู่หนึ่ง การถ่ายโอนพิกัดจึงเกี่ยวข้องกับทั้งการหมุนและการเคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่ง

### 1.1.1 การหมุนพื้นฐาน (Fundamental Rotations)

ถ้าโครงพิกัดเคลื่อนที่ M ได้จากการหมุน M รอบยูนิตเวกเตอร์อันหนึ่งของโครงพิกัดอยู่หนึ่ง F ดังนั้นเมตริกซ์ถ่ายโอนพิกัดที่ได้เรียกว่า เมตริกซ์การหมุนพื้นฐาน ในปริภูมิ  $R^3$  มีทางเป็นไปได้ 3 ทาง ดังแสดงในรูป



รูป 1 - 2 การหมุนพื้นฐานใน  $R^3$

ถ้าหมุนโครงพิกัด M รอบแกน  $f^1$  ของโครงพิกัดอยู่หนึ่ง F ให้ เป็นองศาการหมุนวัดตามกฎมือขวา ดังรูป 1 - 3 ให้  $R_1(q)$  เป็นเมตริกซ์ถ่ายโอนพิกัดช่วง M ไป F และเราจะได้

$$R_1(q) = \begin{bmatrix} f^1 \cdot m^1 & f^1 \cdot m^2 & f^1 \cdot m^3 \\ f^2 \cdot m^1 & f^2 \cdot m^2 & f^2 \cdot m^3 \\ f^3 \cdot m^1 & f^3 \cdot m^2 & f^3 \cdot m^3 \end{bmatrix}$$

เนื่องจากเป็นการหมุนรอบแกน  $f^1$  ดังนั้นจะได้ว่า  $f^1 = m^1$  และจากทฤษฎีบทของการหมุนที่ว่า

เมื่อให้  $x$  และ  $y$  เป็นเวกเตอร์ใน  $R^3$  และ  $q$  เป็นมุมจาก  $x$  ไป  $y$  ดังนั้น

$$x \cdot y = |x| \cdot |y| \cos q$$

ดังนั้นจะได้

$$R_1(q) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos q & -\sin q \\ 0 & \sin q & \cos q \end{bmatrix}$$

ในการทำงานเดียวกัน ถ้า  $R_2(q)$  และ  $R_3(q)$  แสดงการหมุนของโครงพิกัด M รอบ  $f^2$  และ  $f^3$  ตามลำดับ จะได้

$$R_2(q) = \begin{bmatrix} \cos q & 0 & \sin q \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin q & 0 & \cos q \end{bmatrix}$$

$$R_3(q) = \begin{bmatrix} \cos q & -\sin q & 0 \\ \sin q & \cos q & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

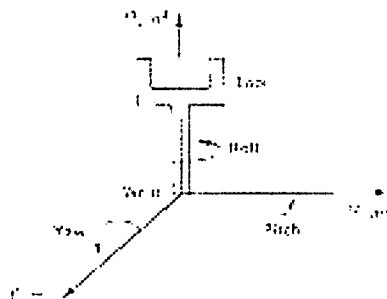
### 1.1.2 การหมุนผสม ( Composite Rotations )

เมื่อคูณเมตริกซ์การหมุนพื้นฐานเข้าด้วยกัน เมตริกซ์ผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงถึงลำดับการหมุนรอบยูนิตเวกเตอร์ เราเรียกเมตริกซ์ที่คูณกันนี้ว่า การหมุนผสม พิจารณาภาพเครื่องมือ (End-effector) แสดงในรูป 1-3 โครงพิกัดเคลื่อนที่  $M = \{m^1, m^2, m^3\}$  หมุนไปกับเครื่องมือ ในขณะที่โครงพิกัดอยู่นิ่ง  $F = \{f^1, f^2, f^3\}$  ติดอยู่ที่โคนของเครื่องมือ ดังนั้นเราจะได้ การหมุนพื้นฐาน 3 อัน คือ

yaw เป็นการหมุนรอบแกน  $f^1$

pitch เป็นการหมุนรอบแกน  $f^2$

roll เป็นการหมุนรอบแกน  $f^3$



รูป 1-3 Yaw , Pitch และ Roll ของเครื่องมือ

การหมุนพื้นฐานแต่ละอันแทนด้วยเมตริกซ์ และเมตริกซ์ไม่มีคุณสมบัติการสลับที่การคูณ ดังนั้นลำดับในการหมุนพื้นฐานจึงมีผลต่อการหมุนผลรวมที่ได้ เพื่อป้องกันความสับสนในการหาเมตริกซ์การหมุนผลรวมจึงควรใช้อัลกอริทึม ต่อไปนี้

### อัลกอริทึมการหมุนผลรวม

1. ให้เมตริกซ์การหมุน  $R = I$  ได้จากเมื่อเริ่มต้นโครงพิกัดจาก  $F$  และ  $M$  ทับกันสนิท
2. ถ้าโครงพิกัดเคลื่อนที่  $M$  ถูกหมุนไป  $q$  รอบยูนิตเวกเตอร์ที่  $k^{\text{th}}$  ของโครงพิกัดอยู่นิ่ง ดังนั้นคุณเข้าทางซ้ายของ  $R$  ด้วย  $R_k(q)$
3. ถ้าโครงพิกัดเคลื่อนที่  $M$  ถูกหมุนไป  $q$  รอบยูนิตเวกเตอร์ที่  $k^{\text{th}}$  ของมันเอง ดังนั้นคุณเข้าทางขวาของ  $R$  ด้วย  $R_k(q)$
4. ถ้ามีการหมุนพื้นฐานหลายครั้งให้กลับไปขั้นตอน 2 มิฉะนั้นก็หยุดผลลัพธ์ที่ได้เป็นเมตริกซ์การหมุนผลรวม  $R$  ที่ใช้ ถ่ายโอนโครงพิกัด  $M$  ไปยัง  $F$

เมื่อมีการทำแบบ yaw pitch และ roll เราสามารถหาเมตริกซ์ถ่ายโอนผลรวม Yaw - Pitch - Roll ได้โดยให้มุม yaw, pitch และ roll แทนด้วยเวกเตอร์ ใน  $R^3$  ดังต่อไปนี้

### ทฤษฎีบทการถ่ายโอน Yaw-Pitch-Roll (Yaw - Pitch - Roll Transformation)

ให้  $YPR(q)$  แทนเมตริกซ์การหมุนผลรวมที่ได้จากการหมุนโครงพิกัดเคลื่อนที่  $M = \{m^1, m^2, m^3\}$  ครั้งแรกรอบแกน  $f^1$  ด้วยมุม yaw  $q$  ต่อมาหมุนรอบแกน  $f^2$  ด้วยมุม pitch  $q$  และท้ายสุดหมุนรอบแกน  $f^3$  ด้วยมุม roll  $q$  เมตริกซ์ผลรวม Yaw - Pitch - Roll  $YPR(q)$  ซึ่งถ่ายพิกัด  $M$  ไป  $F$  หาได้จาก

$$YPR(\theta) = \begin{bmatrix} C_2 C_3 & S_1 S_2 C_3 - C_1 S_3 & C_1 S_2 C_3 + S_1 S_3 \\ C_2 S_3 & S_1 S_2 S_3 + C_1 C_3 & C_1 S_2 S_3 - S_1 C_3 \\ -S_2 & S_1 C_2 & C_1 C_2 \end{bmatrix}$$

โดย  $S_k @ \sin q_k$  และ  $C_k @ \cos q_k$

## 1.2 พิกัดโฮโมจีเนียส ( Homogeneous Coordinates )

ในการหามุมจุดกำเนิดของโครงพิกัดที่ถูกหมุนเป็นตำแหน่งเกี่ยวกับจุดกำเนิดของโครงพิกัดเดิม เราจึงสามารถแสดงการหมุนในปริภูมิ 3 มิติ ได้ด้วยเมตริกซ์  $3 \times 3$  แต่จุดกำเนิดของโครงพิกัดที่เลื่อนตำแหน่ง ( Translation ) ไปนั้นไม่เป็นจุดเดียวกับจุดกำเนิดของโครงพิกัดดั้งเดิม ดังนั้นจึงไม่สามารถแสดงการเลื่อนตำแหน่งใน  $R^3$  ด้วยเมตริกซ์  $3 \times 3$  ได้

### 1. 2.1 เมตริกซ์ถ่ายโอนโฮโมจีเนียส ( Homogeneous Transformation Matrix )

โดยปกติเมตริกซ์ถ่ายโอนโฮโมจีเนียส ( T ) ขนาด  $4 \times 4$  นี้ แบ่งได้เป็นเมตริกซ์ย่อย 4 ส่วน ดังนี้

$$T @ \begin{bmatrix} \text{rotation} & \text{position} \\ R & P \\ h^T & s \\ \text{perspective} & \text{scale} \end{bmatrix}$$

เมตริกซ์ย่อย  $3 \times 3$  : R ในมุมซ้ายบนของ T เป็นเมตริกซ์การหมุนแสดงการหมุนของโครงพิกัดเคลื่อนที่เทียบกับโครงพิกัดอยู่นิ่ง

คอลัมน์เวกเตอร์  $3 \times 1$  : P ในมุมขวาบนของ T เป็นเวกเตอร์การเลื่อน แสดงตำแหน่งจุดกำเนิดของโครงพิกัดเคลื่อนที่เทียบกับโครงพิกัดอยู่นิ่ง

ค่า scale : s ในมุมล่างขวาของ T เป็นสเกลแฟคเตอร์ที่ไม่เป็นศูนย์ ปกติให้เท่ากับ 1

เวกเตอร์แถว  $1 \times 3$  :  $h^T$  ในมุมขาล่างของ T เป็นเวกเตอร์สายตาปกติให้เท่ากับ 0

### 1.2.2 การถ่ายโอนโฮโมจีเนียสผสม ( Composite Homogeneous Transformation )

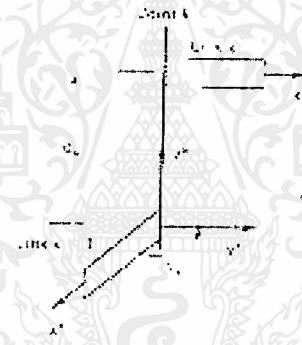
โดยปกติ เมตริกซ์ถ่ายโอนผสมจะแสดงทั้งการหมุนและการเลื่อนตำแหน่งของโครงเคลื่อนที่เทียบกับโครงพิกัดอยู่นิ่ง ลำดับของการหมุนและการเลื่อนแต่ละครั้ง สามารถแสดงได้โดยผลคูณของเมตริกซ์ถ่ายโอนโฮโมจีเนียสพื้นฐาน เนื่องจากเมตริกซ์ไม่มีคุณสมบัติการสลับที่การคูณ ลำดับในการหมุนและการเลื่อนตำแหน่งจึงเป็นสิ่งสำคัญ ดังนั้นในการสร้างเมตริกซ์จึงควรใช้ขั้นตอนของอัลกอริธึมการหมุนผสม

## 1.3 พิกัด Link ( Link Coordinates )

ดังได้กล่าวแล้วว่า แขนกลประกอบด้วย link หลาย ๆ อันมาเชื่อมกันด้วยข้อต่อ จุดประสงค์ในหัวข้อนี้ คือ การกำหนดโครงพิกัดลงบนแต่ละ link จากนั้นจึงทำการหาสมการแขน ( arm equation ) ที่แสดงการเคลื่อนที่ของ link ของแขนกล โดยขั้นแรกจะศึกษาพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบตัวแขนกลก่อน

### 1.3.1 Kinematic Parameters

ตำแหน่งและการหมุนสัมพัทธ์ของ link ที่อยู่ติดกัน แสดงได้ด้วย joint parameters 2 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 1 - 4



รูป 1 - 4 มุมข้อต่อ  $q$  และ ระยะข้อต่อ  $d$

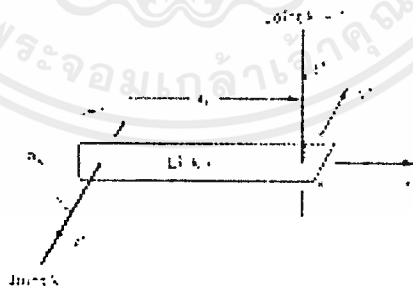
จากรูปข้อต่อ  $k$  เชื่อม link  $k-1$  กับ link  $k$  พารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับข้อต่อ  $k$  ถูกนิยามเทียบกับแกน  $Z^{k-1}$  ซึ่งอยู่ในแนวเดียวกับแกนของข้อต่อ  $k$  joint parameter ตัวแรกเรียกว่า มุมข้อต่อ ( joint angle ) ;  $q_k$  ซึ่งเป็นการหมุนรอบ  $Z^{k-1}$  เพื่อให้แกน  $X^{k-1}$  ขนานกับแกน  $x^k$  joint parameter ตัวที่สองเรียกว่า ระยะข้อต่อ ( joint distance ) ;  $d_k$  ซึ่งเป็นการเลื่อนตามแนว  $Z^{k-1}$  เพื่อให้แกน  $X^{k-1}$  ตัดกับแกน  $X^k$  ดังนั้น  $q_k$  คือ การหมุนรอบแกนข้อต่อ  $k$  และ  $d_k$  คือ การเลื่อนไปตามแกนของข้อต่อ  $k$  ตามปกติแต่ละข้อต่อจะมี joint parameter ตัวหนึ่งมีค่าคงที่ และมีอีกค่าเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของข้อต่อดังแสดงในตาราง 1 - 1

TABLE 2-1 KINEMATIC PARAMETERS

Arm Dimension	Symbol	Revolute Joint: R	Prismatic Joint: P
Joint angle	$\theta$	Variable	Fixed
Link distance	$a'$	Fixed	Variable
Link length	$a$	Fixed	Fixed
Link twist angle	$\alpha$	Fixed	Fixed

ตาราง 1 - 1 Kinematic Parameter

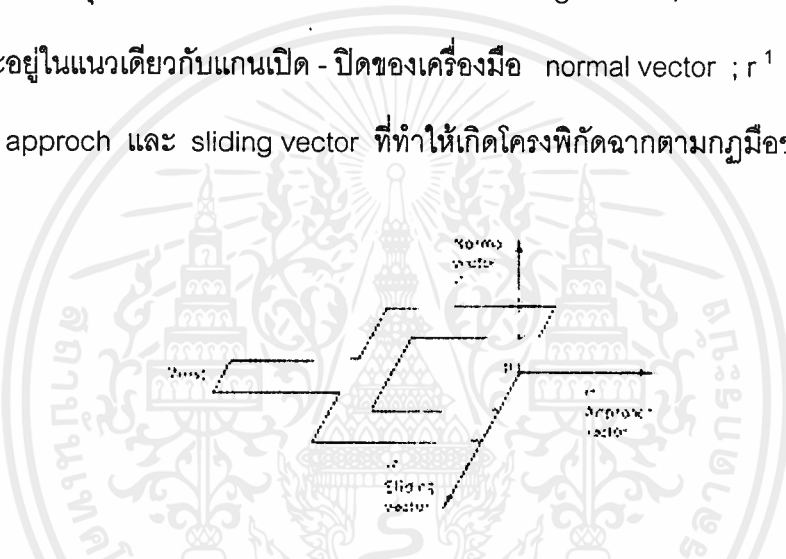
ข้อต่อจะอยู่ระหว่าง link 2 อันที่อยู่ติดกัน ในทางกลับกันจึงมี link หนึ่งอันที่อยู่ระหว่างข้อต่อ 2 อัน ตำแหน่งและการหมุนสัมพัทธ์ของแกนของข้อต่อทั้ง 2 อันแสดงได้ด้วย link parameters ดังแสดงในรูป 1 - 5 link parameter ตัวแรกเรียกว่า ความยาว link ( link length ) ;  $a_k$  ซึ่งเป็นการเลื่อนตำแหน่งไปตามแนว  $X^k$  เพื่อให้แกน  $Z^{k-1}$  ตัดกับแกน  $Z^k$  link parameter ตัวที่สอง เรียกว่า มุมบิด link ( link twist angle ) ;  $\alpha_k$  ซึ่งเป็นการหมุนรอบ  $X^k$  เพื่อให้แกน  $Z^{k-1}$  ขนานกับแกน  $Z^k$



รูป 1 - 5 ความยาวและมุมบิดของ link

### 1.3.2 Normal , Sliding and Approach Vectors

ในการกำหนดโครงพิกัดลงบน link ของแขนกล n แกน ต้องให้ความสนใจเป็นพิเศษกับ link สุดท้ายซึ่งเป็นเครื่องมือ หรือ end - effector การหมุนของเครื่องมือสามารถแสดงในพิกัดฉากได้ด้วยเมตริกซ์การหมุน  $R = \{r^1, r^2, r^3\}$  โดยที่ 3 คอลัมน์ของ R สอดคล้องกับ normal , sliding และ approach vectors ดังแสดงในรูป 1 - 5 approach vector ;  $r^3$  อยู่ในแนวเดียวกับแกนหมุนเครื่องมือ และชี้ออกจากข้อมือ sliding vector ;  $r^2$  ตั้งฉากกับ approach vector และอยู่ในแนวเดียวกับแกนเปิด - ปิดของเครื่องมือ normal vector ;  $r^1$  ตั้งฉากกับระนาบของ approach และ sliding vector ที่ทำให้เกิดโครงพิกัดฉากตามกฎมือขวา



รูป 1 - 6 Normal , Sliding and Approach Vectors ของ End - effector

### 1.3.3 The Denavit - Hartenberg ( D - H ) Representation

เป็นวิธีใช้กำหนดโครงพิกัดฉากตามกฎมือขวาลงบนแต่ละ link ของแขนกล เพื่อให้ถ่ายโอนโครงพิกัดที่อยู่ติดกันด้วยเมตริกซ์ถ่ายโอนพิกัดโฮโมจีเนียส  $4 \times 4$  โดยให้  $L_k$  เป็นโครงพิกัดอยู่ที่ปลาย link k เมื่อ  $0 \leq k \leq n$

#### อัลกอริทึม D - H Representation

0. กำหนดหมายเลขของข้อต่อจาก 1 ถึง n เริ่มจากฐานไปสิ้นสุดที่เครื่องมือไล่ไปตามการหมุน คือ yaw , pitch และ roll

1. กำหนดโครงพิกัดฉากตามกฎมือขวา  $L_n$  ลงบนฐานแขนกล โดยให้แกน  $Z_0$  อยู่แนวเดียวกับแกนข้อต่อ 1 ให้  $k = 1$

2. วางแกน  $Z^k$  ให้อยู่ในแนวเดียวกับแกนข้อต่อ  $k + 1$
3. กำหนดจุดกำเนิดของ  $L^k$  ที่จุดตัดกันของแกน  $Z^k$  และ  $Z^{k-1}$  ถ้าไม่ตัดกันให้ใช้จุดตัดระหว่าง  $Z^k$  กับ common normal ของ  $Z^k$  กับ  $Z^{k-1}$
4. เลือกแกน  $X^k$  ให้ตั้งฉากกับทั้งแกน  $Z^k$  และ  $Z^{k-1}$  ถ้า  $Z^k$  และ  $Z^{k-1}$  ขนานกัน ให้แกน  $X^k$  ชี้ออกจาก  $Z^{k-1}$
5. เลือก  $Y^k$  ให้ถูกตามกฎมือขวาของโครงพิงก์ดจาก  $L_k$
6. ให้  $k = k + 1$  ถ้า  $k < n$  กลับไปทำขั้นตอนที่ 2 มิฉะนั้นทำตามขั้นตอนต่อไป
7. กำหนดจุดกำเนิดของ  $L_n$  ให้อยู่ที่ปลายเครื่องมือ  
โดยให้  $Z^n$  อยู่ในแนวเดียวกับ approach vector  
 $Y^n$  อยู่ในแนวเดียวกับ sliding vector  
 $X^n$  อยู่ในแนวเดียวกับ normal vector  
กำหนดให้  $k = 1$
8. กำหนดจุด  $b^k$  ที่จุดตัดกันของแกน  $X^k$  และ  $Z^{k-1}$  ถ้าไม่ตัดกันให้ใช้จุดตัดระหว่าง  $X^k$  กับ common normal ของ  $X^k$  กับ  $Z^{k-1}$
9. คำนวณ  $q_k$  ซึ่งเป็นมุมจากการหมุนแกน  $X^{k-1}$  ไปยังแกน  $X^k$  โดยวัดรอบแกน  $Z^{k-1}$
10. คำนวณ  $d_k$  ซึ่งเป็นระยะจากจุดกำเนิดของโครง  $L_{k-1}$  ไปยังจุด  $b^k$  วัดตามแนว  $Z^{k-1}$
11. คำนวณ  $a_k$  ซึ่งเป็นระยะจากจุด  $b_{k-1}$  ไปยังจุดกำเนิดของโครง  $L_k$  วัดตามแนว  $X^k$
12. คำนวณ  $a_k$  ซึ่งเป็นมุมจากการหมุนแกน  $Z^{k-1}$  ไปยังแกน  $Z^k$  โดยวัดรอบแกน  $X^k$
13. ให้  $k = k + 1$  ถ้า  $k = n$  กลับไปทำขั้นตอนที่ 8 มิฉะนั้นก็หยุด

## 1.4 สมการแขน ( Arm Equation )

เมื่อกำหนดโครงพิกัดลงบน link ได้แล้ว ก็ทำการย้ายโครงพิกัด  $k$  ไปยังโครงพิกัด  $k-1$  โดยใช้เมตริกซ์การถ่ายโอนพิกัดโฮโมจีเนียส เมื่อเรานำเมตริกซ์ที่ได้มาคูณกันทั้งหมด ก็จะได้เมตริกซ์ที่แสดงการย้ายพิกัดของเครื่องมือเทียบกับพิกัดฐาน โดยเมตริกซ์ที่ได้นี้ เราเรียกว่าเมตริกซ์แขน ( arm matrix )

### 1.4.1 การถ่ายโอนโครงพิกัด ( Link - Coordinate Transformation )

การสร้างเมตริกซ์ถ่ายโอนโฮโมจีเนียสจากโครงพิกัด  $k$  มา  $k-1$  แต่ละขั้นตอนจะเกี่ยวข้องกับ kinematic parameter หนึ่งตัว ในการพิจารณาเราจะทำการหมุนและเลื่อนตำแหน่ง โครงพิกัด  $k-1$  จนมันทับกันสนิทกับโครงพิกัด  $k$

#### ทฤษฎีบทการถ่ายโอนโครงพิกัด ( Link - Coordinate Transformation )

ให้  $\{L_0, L_1, \dots, L_n\}$  เป็นเซตของโครงพิกัดที่ได้จากอัลกอริทึม D - H Representation  $[q]^k$  และ  $[q]^{k-1}$  เป็นพิกัดโฮโมจีเนียสของจุด  $q$  เทียบกับโครง  $L^k$  และ  $L^{k-1}$  สำหรับ  $1 \leq k \leq n$  จะได้  $[q]^{k-1} = T_{k-1}^k [q]^k$  โดย

$$T_{k-1}^k = \begin{bmatrix} C\theta_k & -C\alpha_k S\theta_k & S\alpha_k S\theta_k & a_k C\theta_k \\ S\theta_k & C\alpha_k C\theta_k & -S\alpha_k S\theta_k & a_k S\theta_k \\ 0 & S\alpha_k & C\alpha_k & d_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$T_{k-1}^k$  คือการถ่ายโอนจากโครงพิกัด  $k$  ไปยังโครงพิกัด  $k-1$

ในการแก้ปัญหา direct kinematics เราต้องพิจารณตำแหน่งและการหมุนของเครื่องมือเทียบกับโครงพิกัดที่ติดอยู่กับฐาน การถ่ายโอนจากพิกัดเครื่องมือไปยังพิกัดฐานจะเริ่มจากปลายเครื่องมือถ่ายโอนย้อนกลับไปที่ละโครงจนถึงฐาน ถ้า  $T_{base}^{tool}$  แสดงการถ่ายโอนจากพิกัดปลายเครื่องมือ ( link  $n$  ) ไปยังพิกัดฐาน ( link  $0$  ) ดังนั้น

$$T_{base}^{tool} = T_0^1(q_1)T_1^2(q_2) \dots T_{n-1}^n(q_n) = T_0^n(q) \quad (1.4.1)$$

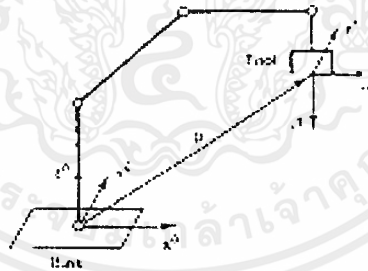
### 1.4.2 สมการแขน ( Arm Equation )

จากสมการ ( 1.4.1 ) เราจะได้เมตริกซ์แขน  $T_{base}^{tool}(q)$  เมื่อแทนค่าลงไป เราจะได้สมการแขน ( arm equation ) ดังนี้

$$T_{base}^{tool}(q) = \left[ \begin{array}{ccc|c} R(q) & & & P(q) \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

โดย  $R(q)$  เป็นเมตริกซ์ย่อย  $3 \times 3$  แสดงการหมุนของเครื่อง คอลัมน์ทั้งสามของ  $R$  แสดงทิศทางของยูนิตเวกเตอร์  $\{r^1, r^2, r^3\}$  ของโครงเครื่องมือเทียบกับโครงฐาน

$P(q)$  เป็นเมตริกซ์ย่อย  $3 \times 1$  แสดงตำแหน่งของปลายเครื่องมือเป็นพิกัดของปลายเครื่องมือเทียบกับโครงฐาน ดังแสดงในรูป 1 - 7



รูป 1 - 7 ตำแหน่งและการหมุนของเครื่องมือในพิกัดฐาน

## 2 INVERSE KINEMATIC

ในหัวข้อที่แล้วเราได้ทำการหาตำแหน่งและการหมุนของเครื่องมือแขนกลจกตัวแปรข้อต่อที่กำหนดให้ แต่ในหัวข้อนี้เราจะพิจารณาย้อนกลับ คือการหาตัวแปรข้อต่อจากตำแหน่งและการหมุนของเครื่องมือที่กำหนดให้ ปัญหา Inverse Kinematics นี้มีความสำคัญ และนำไปใช้งานจริงในการแก้สมการแขน (Solve The Arm Equation) และยากกว่าปัญหา Direct Kinematic เนื่องจากไม่มีขั้นตอนที่แน่นอน และคำตอบที่ได้มักมีหลายคำตอบ

**ปัญหา :** Inverse Kinematics เป็นการกำหนดตำแหน่ง P และการหมุน R ของเครื่องมือเทียบกับโครงฟิวด์อ้างอิง แล้วทำการคำนวณหาตัวแปรข้อต่อ  $q$  ที่สอดคล้องกับสมการแขน

### 2.1 คุณสมบัติทั่วไปของคำตอบ (General Properties Of Solution)

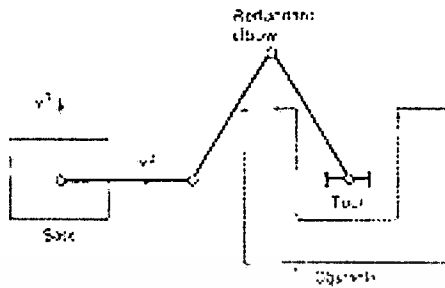
ดังได้กล่าวแล้วว่า การแก้ปัญหา Inverse Kinematics ไม่มีขั้นตอนที่แน่นอนขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะของแขนกล แต่คำตอบที่ได้ก็ยังมีลักษณะบางประการที่เหมือนกัน

#### 2.1.1 การมีอยู่ของคำตอบ (Existence Of Solutions)

พิจารณาในสภาวะที่คำตอบของ Inverse Kinematics มีอยู่จริง คือ ตำแหน่งปลายเครื่องมือ P อยู่ภายในขอบเขตการทำงาน และการหมุนเครื่องมือไม่เกินลิมิตของตัวแปรข้อต่อจากสมการแขน

#### 2.1.2 ความเป็นหนึ่งของคำตอบ (Uniqueness Of Solutions)

เมื่อเราหาคำตอบของ Inverse Kinematics ได้แล้ว คำตอบที่ได้มักมีหลายคำตอบ เช่น แขนกล  $n$  แกน เมื่อ  $n \geq 6$  คำตอบที่ได้มักจะมีมากมาย เราเรียกหุ่นยนต์ที่มีมากกว่า 6 แกนว่า Kinematically Redundant Robots เพราะมี Degree of Freedom มากกว่าความจำเป็นในการกำหนดตำแหน่งและการหมุนของเครื่องมือที่ต้องการ Degree of Freedom ที่เกินมานั้นช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับแขนกล เช่น ใช้หลบหลีกสิ่งกีดขวาง ดังรูป 2 - 1



รูป 2 - 1 Redundant Robot หลบหลีกเลี่ยงกีดขวาง

## 2.2 Tool Configuration

ในการแก้ปัญหา Inverse Kinematics เราต้องกำหนดสถานะภาพที่ต้องการ โดยเรา กำหนดให้สถานะภาพถูกแทนโดย  $\{ p, R \}$  ซึ่ง  $p$  แทนตำแหน่งของเครื่องมือโดยเทียบกับฐานและ  $R$  แทนทิศทางของเครื่องมือโดยเทียบกับฐาน

### ทฤษฎีบทเวกเตอร์กำหนดสถานะภาพ

ให้  $p$  และ  $R$  แทนตำแหน่งและทิศทางของโครงพิกัดเครื่องมือเทียบกับโครงพิกัดฐาน โดยที่  $q_n$  แทนมุม roll ของเครื่องมือ ดังนั้นเวกเตอร์กำหนดสถานะภาพ :  $w$  ถูกกำหนดเป็น

$$w = \begin{bmatrix} w^1 \\ \text{-----} \\ w^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p \\ \text{-----} \\ [\exp(q_n / p)]r^3 \end{bmatrix}$$

จากทฤษฎีบทเราสามารถหามุม roll ได้จาก  $q_n = p \ln(w_4^2 + w_5^2 + w_6^2)^{1/2}$



**ผนวก ง**

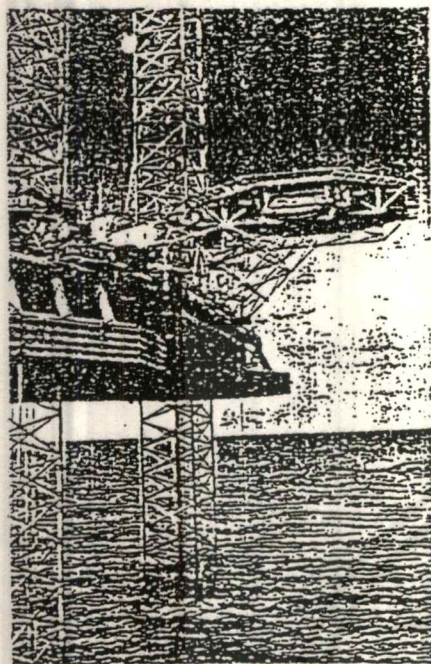
**ข้อมูลทางเทคนิคอื่น**

**appendix D**

**datasheets**

เอกสารฉบับนี้เผยแพร่ฟรีสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เชิงพาณิชย์หรือการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Determine pitch, roll and level

The dual-axis Model 900 is an inexpensive, gravity-referenced clinometer (tiltmeter) with wide dynamic range. Its small size and high precision make it a versatile choice for many measurement and control applications.

Model 900 measures angular position with respect to the stablest of all external references: the vertical gravity vector. Its advanced design assures high repeatability over a standard 40 degree measurement span (90 degree optional span). Model 900 also features a wide input voltage range and signal conditioned analog



Motion control for factory automation

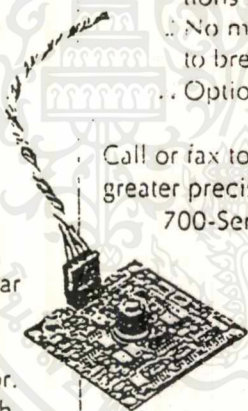
outputs. Just install Model 900 and connect it to your voltmeter or data acquisition system. You are ready to begin your measurements!

The sensing element within Model 900 is a glass vial half-filled with a conductive liquid. When the sensor is level, fluid covers five internal electrodes to equal depths. When the sensor tilts, the depth of fluid on each electrode changes, altering the electrical resistance between matched pairs of electrodes. Model 900's surface-mount electronics measure these changes, converting them to DC outputs proportional to the tilt angle.

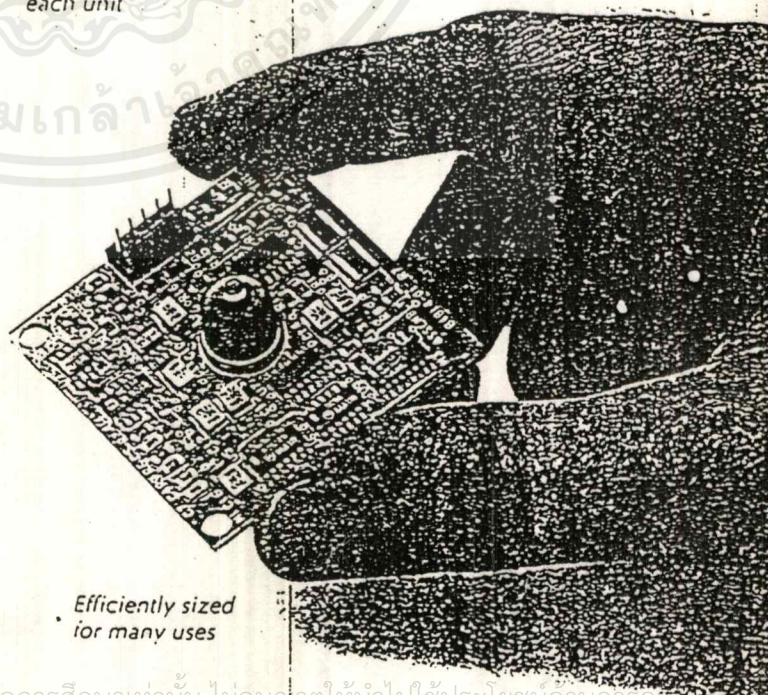
Key features include:

- ▣ Measures rotation in two orthogonal vertical planes
- ▣ Detailed 21-point calibrations supplied for each axis
- ▣ No mechanical moving parts to break or wear out
- ▣ Optional temperature sensor.

Call or fax today for a quotation. For greater precision, ask about our 700-Series tiltmeters.



Prewired connector supplied with each unit



Efficiently sized for many uses

# APPLIED GEOMECHANICS

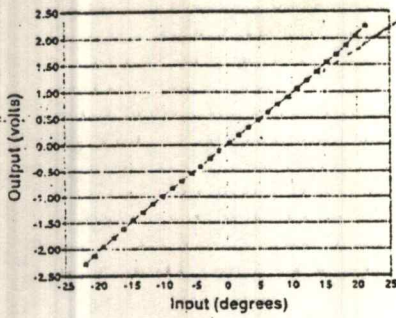
## Model 900 Biaxial Clinometer

Use Model 900 for:

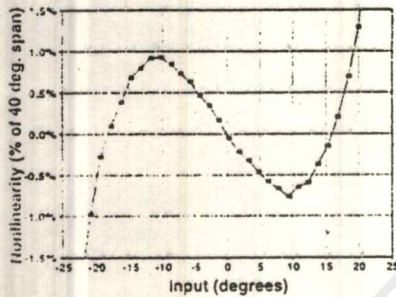
- ▣ Factory automation and robotics
- ▣ Drilling and mining machinery
- ▣ Construction equipment
- ▣ Ships, buoys, ROVs, towfish
- ▣ Land vehicles
- ▣ Aircraft
- ▣ Antennae
- ▣ Any machine or structure

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

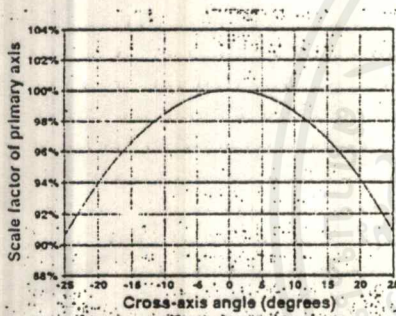
# Specifications



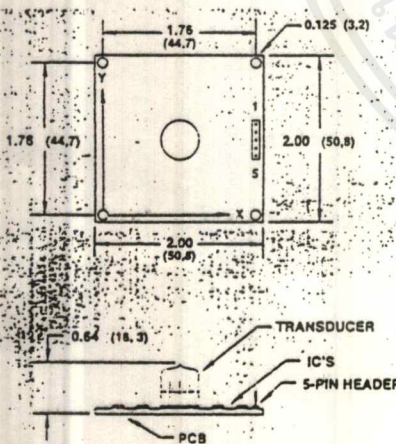
Typical calibration



Typical nonlinearity



Cross-axis effect on scale factor



Model 900 dimensions, inches (mm)

OUTPUT CHANNELS	$\pm 2.5$ VDC per channel (single-ended); 0-5 VDC available. Optional temperature channel, -0.4 to +1.0 VDC
ANGULAR RANGE	Model 900: $\pm 20$ degrees (40 degree span) or greater. Model 900-45: $\pm 45$ degrees (90 degree span) or greater
RESOLUTION	0.01 degree of arc
REPEATABILITY	$< 0.02$ degree of arc at constant temperature
HYSTERESIS	$< 0.02$ degree of arc
LINEARITY	Model 900: 1% over half span; 2.5% over full span. Model 900-45: 6% of full span. Factory polynomials improve linearity by 10x.
TEMPERATURE COEF.	0.05% of reading per $^{\circ}\text{C}$ typical
SCALE FACTORS	Model 900: 10 degrees/volt typical. Model 900-45: 45 degrees/volt typical. Temperature: 0.1 $^{\circ}\text{C}/\text{mV}$ , $\pm 0.75^{\circ}\text{C}$ accuracy
TIME CONSTANT, $\tau$	0.25 second; output is proportional to $1 - e^{-t/\tau} = 0.9331e^{-0.4t}$ where $t$ is time in seconds
NATURAL FREQUENCY	10 Hz
OUTPUT IMPEDANCE	270 ohms, short circuit protected
POWER REQUIREMENTS	+8 to +24 VDC @ 7 mA, 250 mV peak-to-peak ripple max., reverse polarity protected
ENVIRONMENTAL	-10 $^{\circ}$ to +50 $^{\circ}\text{C}$ operating and storage, 0-80% humidity
SIZE & WEIGHT	2 x 2 x 0.64 inches (51 x 51 x 17 mm), 0.5 oz (15 grams); 18 inch (450 mm) cable with connector
MOUNTING	Four 0.125 inch (3.2 mm) no. 4 mounting holes, one in each corner
MATERIALS	Liquid-filled glass sensor, fiberglass PCB board, unpotted assembly

## Angle conversion chart

	radians	degrees	arc minutes	arc seconds	gradians
radians	1	57.30	3438	206265	$10^6$
degrees	0.01745	1	60	3600	17453
arc minutes	$2.909 \times 10^{-4}$	0.01667	1	60	290.9
arc seconds	$4.848 \times 10^{-6}$	$2.778 \times 10^{-4}$	0.01667	1	4.848
gradians	$10^{-6}$	$5.730 \times 10^{-5}$	$3.438 \times 10^{-3}$	0.2063	1

## Ordering Information

Model 900	$\pm 20$ degree range
Model 900-T	Adds temperature sensor
Model 900-45	$\pm 45$ degree range
Model 900-45T	Adds temperature sensor

Position masts and booms



# APPLIED GEOMECHANICS

1336 Brommer Street  
Santa Cruz, CA 95062 U.S.A.  
Telephone: (408) 462-2801  
FAX: (408) 462-4418

This document is accurate as of the time of publication. Applied Geomechanics may modify specifications without prior notice to reflect ongoing technical developments.

© 1995 by Applied Geomechanics Inc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังบริษัทอื่นด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**SPECIFICATION: Model 900 Biaxial Clinometer**

Model 900 is a low-cost biaxial clinometer for a wide variety of industrial and scientific applications. A precision electrolytic transducer comprises the sensing element. The clinometer consists of a printed circuit assembly with four mounting holes. It is designed for easy mounting or repackaging in customer products or systems. Linear and polynomial calibrations for both tilt axes are provided with each clinometer. A temperature sensor, mounted in the circuit, is available as an option.

<b>OUTPUT CHANNELS</b>	Two orthogonal tilt angles, $\pm 2$ VDC per channel (single-ended); one temperature channel (optional), $-0.4$ to $+1.0$ VDC
<b>ANGULAR RANGE</b>	Standard: $\pm 20$ degrees (40 deg. span). Optional: $\pm 45$ degrees (90 deg. span)
<b>RESOLUTION</b>	0.01 degree of arc
<b>REPEATABILITY</b>	$< 0.02$ degree of arc at constant temperature
<b>HYSTERESIS</b>	$< 0.02$ degree of arc
<b>LINEARITY</b>	$\pm 20$ degree unit: 1% over half span; 2.5% over full span. Use of factory-supplied polynomials can improve linearity by factor of 10
<b>TEMPERATURE COEF.</b>	Span: $-0.05\%$ of voltage reading per $^{\circ}\text{C}$ typical
<b>SCALE FACTORS</b>	Tilt ( $\pm 20$ degree unit): 10 degrees/volt $\pm 20\%$ . Temperature: $0.1^{\circ}\text{C}/\text{mV}$ , $\pm 0.75^{\circ}\text{C}$ accuracy
<b>TIME CONSTANT, T</b>	0.25 second; output is proportional to $1 - e^{-t/T} - 0.001e^{-t/5000T}$ where $t$ is time in seconds
<b>NATURAL FREQUENCY</b>	10 Hz
<b>OUTPUT IMPEDANCE</b>	270 ohms, short circuit protected
<b>POWER REQUIREMENTS</b>	$+8$ to $+24$ VDC @ 7 mA, 250 mV peak-to-peak ripple max., reverse polarity protected
<b>ENVIRONMENTAL</b>	$-10^{\circ}$ to $+50^{\circ}\text{C}$ operating and storage, 0-80% humidity
<b>SIZE &amp; WEIGHT</b>	2 x 2 x 0.64 inches (51 x 51 x 17 mm), 0.5 oz (15 grams); 18 inch (450 mm) cable with connector
<b>MOUNTING</b>	Four 0.125 inch (3.2 mm) no. 4 mounting holes, one in each corner
<b>MATERIALS</b>	Liquid-filled glass sensor, fiberglass PC board, unpotted assembly

**ANGLE CONVERSION CHART**

	radians	degrees	arc minutes	arc seconds	$\mu$ radians
radians	1	57.30	3438	206265	$10^6$
degrees	0.01745	1	60	3600	17453
arc minutes	$2.909 \times 10^{-4}$	0.01667	1	60	290.9
arc seconds	$4.848 \times 10^{-6}$	$2.778 \times 10^{-4}$	0.01667	1	4.848
$\mu$ radians	$10^{-6}$	$5.730 \times 10^{-5}$	$3.438 \times 10^{-3}$	0.2063	1

**REORDERING INFORMATION**

Model 900	$\pm 20$ degree range
Model 900-T	Adds temperature sensor
Model 900-45	$\pm 45$ degree range
Model 900-45T	Adds temperature sensor

**APPLIED**  
**GEOMECHANICS**

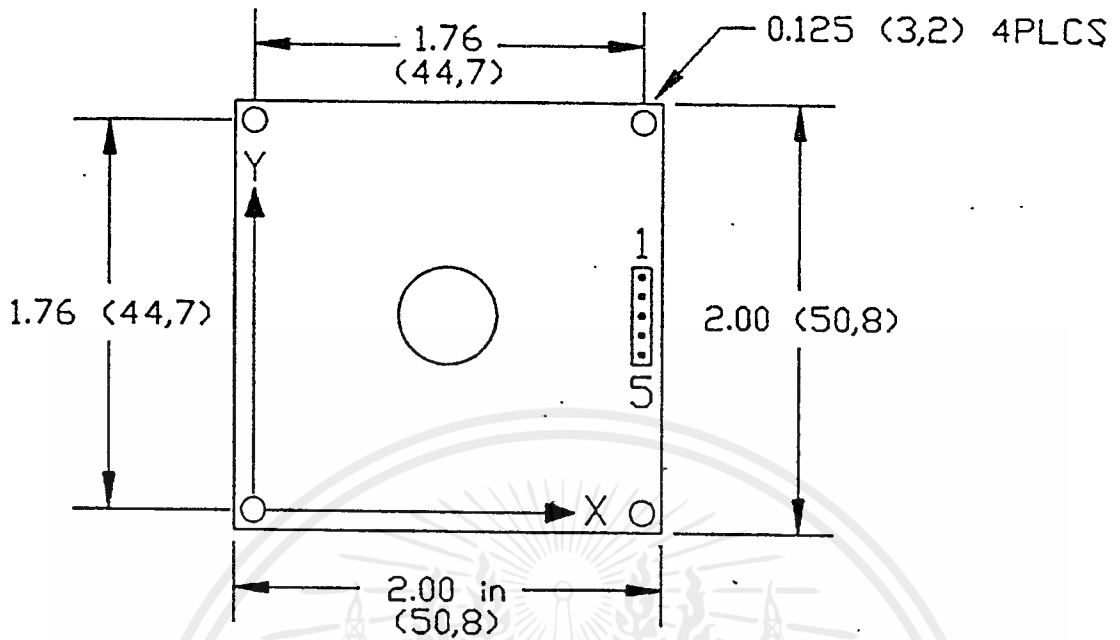
Automated Deformation-Sensing Systems  
System Installation and Training  
Tiltmeters and Inclinometers

- Monitoring of Structural and Ground Behavior
- Hydraulic-Fracture Evaluation
- Well Testing

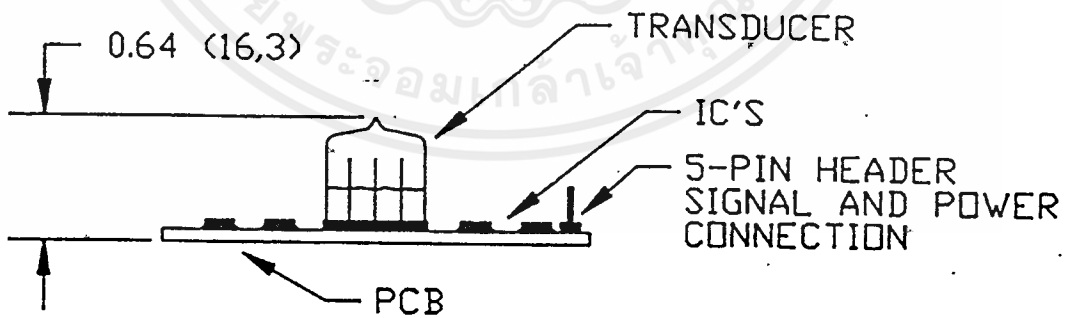
1336 Brommer Street, Santa Cruz, CA 95062, USA • Tel: (408)462-2801, FAX: (408)462-4418

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# TOP VIEW



Pin #	Signal	Color
1	POWER	RED
2	GROUND	BLACK
3	X-OUTPUT	GREEN
4	Y-OUTPUT	BLUE
5	(TEMPERATURE)	YELLOW



APPLIED  
MECHANICS  
CORPORATED

MODEL 900 BIAxIAL CLINOMETER

DWG. No.

DATE

REV.

DRAWN

CHECKED

HNE

GRH

SCALE

D-93-1025

3-10-93

B

SHOWN

© 1993

APPLIED GEOMECHANICS INC.  
 CALIBRATION CERTIFICATE  
 Model 900-45, Serial Number 2452  
 Date: 11-22-1997

X-AXIS CALIBRATION			Y-AXIS CALIBRATION		
Theta	X-OUTPUT	Y-OUTPUT	Theta	X-OUTPUT	Y-OUTPUT
-52.241	-2.0188	-0.0139	-47.7742	-0.0139	-1.858
-48.739	-1.7954	-0.0047	-44.2943	-0.0229	-1.637
-45.235	-1.6007	0.0011	-40.7732	-0.0232	-1.453
-41.733	-1.4281	0.0089	-37.2713	-0.0255	-1.273
-38.228	-1.2702	0.0150	-33.7639	-0.0301	-1.119
-34.707	-1.1239	0.0198	-30.2538	-0.0335	-0.975
-31.213	-0.9891	0.0249	-26.7546	-0.0340	-0.847
-27.709	-0.8630	0.0290	-23.2610	-0.0370	-0.722
-24.210	-0.7419	0.0332	-19.7563	-0.0417	-0.595
-20.697	-0.6285	0.0372	-16.2435	-0.0425	-0.490
-17.197	-0.5177	0.0388	-12.7580	-0.0445	-0.380
-13.698	-0.4074	0.0423	-9.2342	-0.0475	-0.272
-10.177	-0.3023	0.0452	-5.7103	-0.0500	-0.167
-6.659	-0.1953	0.0487	-2.2057	-0.0512	-0.061
-3.132	-0.0937	0.0507	1.3457	-0.0542	0.036
0.394	0.0121	0.0537	4.8338	-0.0542	0.139
3.924	0.1169	0.0558	8.3494	-0.0576	0.246
7.420	0.2206	0.0574	11.8815	-0.0617	0.352
10.925	0.3293	0.0630	15.3889	-0.0619	0.454
14.418	0.4378	0.0629	18.8826	-0.0640	0.568
17.912	0.5534	0.0644	22.3790	-0.0648	0.676
21.419	0.6685	0.0637	25.8644	-0.0684	0.792
24.902	0.7940	0.0701	29.3608	-0.0682	0.913
28.393	0.9247	0.0693	32.8462	-0.0709	1.044
31.881	1.0645	0.0741	36.3371	-0.0725	1.186
35.372	1.2170	0.0770	39.8253	-0.0751	1.329
38.860	1.3818	0.0798	43.3134	-0.0782	1.502
42.351	1.5649	0.0814	46.8153	-0.0783	1.677
45.839	1.7747	0.0839	50.2897	-0.0842	1.874
49.327	2.0192	0.0867	53.7724	-0.0858	2.123

Theta is reported in: Arc Degrees  
 X and Y outputs are reported in Volts.  
 X-Axis calibration temperature = 16.9 deg. C  
 Y-Axis calibration temperature = 17.3 deg. C

Scale Factors are determined by linear regression of all data points for each axis of calibration.

X-AXIS SCALE FACTOR = 28.06 Arc Degrees/volt  
 Maximum nonlinearity (% of full span), X-AXIS = 6.6632

Y-AXIS SCALE FACTOR = 28.46 Arc Degrees/volt  
 Maximum nonlinearity (% of full span), Y-AXIS = 6.6772

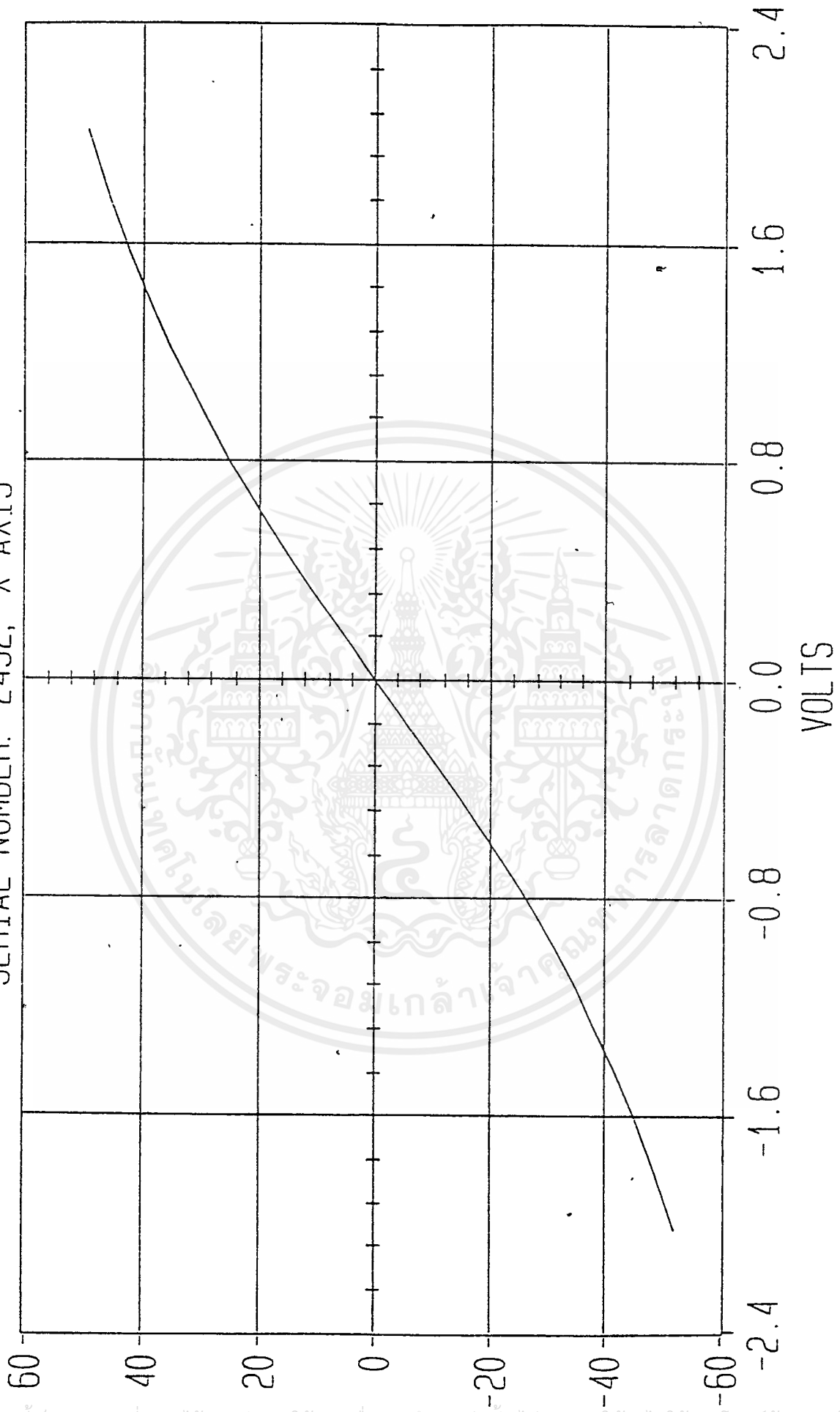
Calibration curves fit a polynomial of form:  
 $\Theta = a + bV + cV^2 + dV^3 + eV^4 + fV^5$  where  $V = X$  or  $Y$  output

	a	b	c	d	e	f
X-AXIS	0.0000	33.6400	-0.6142	-2.9105	0.0655	0.2045
Y-AXIS	0.0000	34.0946	0.5126	-3.0173	-0.0611	0.2164

ไม่ว่ากรณีใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CALIBRATION CURVE.

SERIAL NUMBER: 2452, X-AXIS



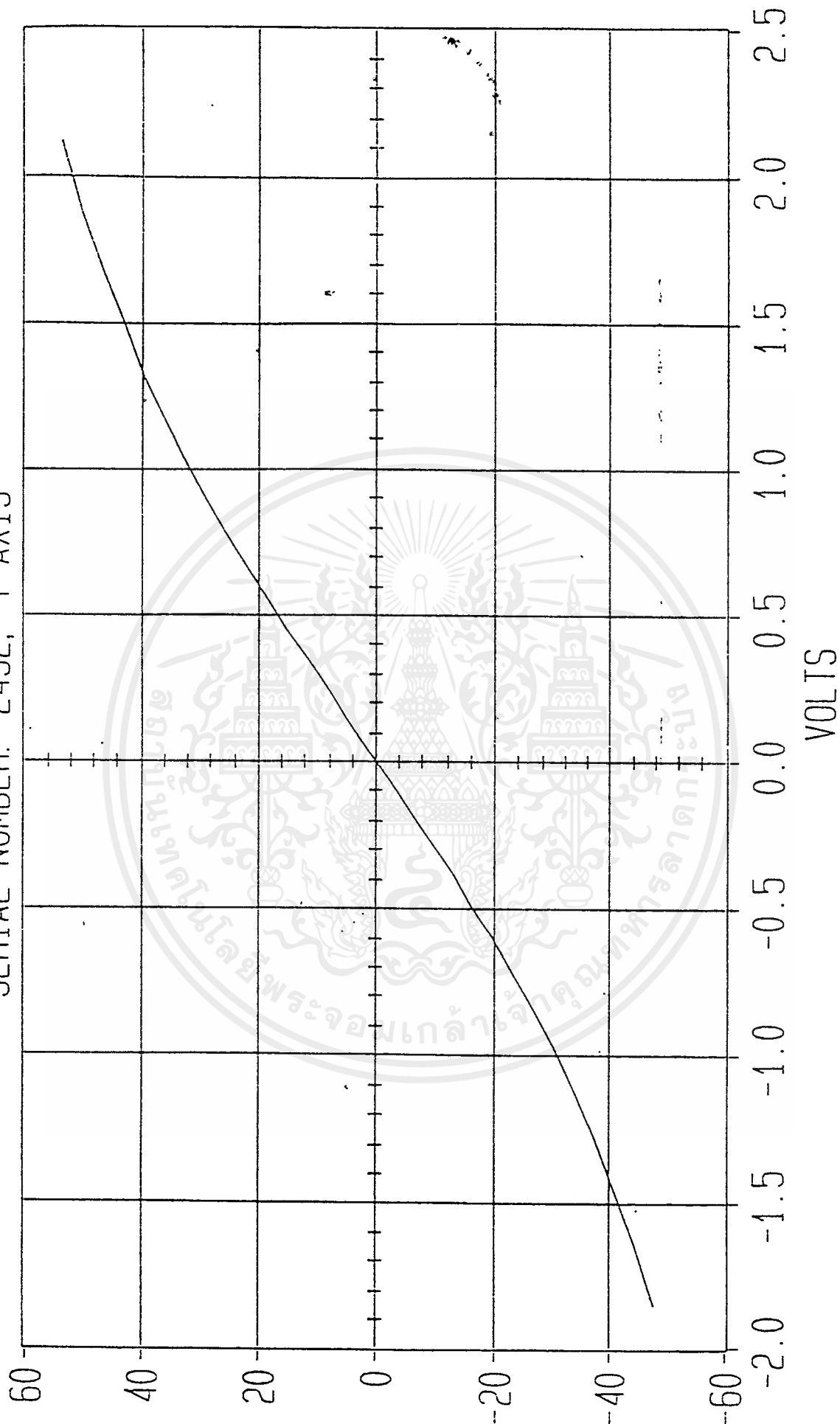
Series 900-45

11-22-1997

12:40:58

# CALIBRATION CURVE

SERIAL NUMBER: 2452, Y-AXIS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ท่านนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

Series 900-45

11-22-1997

12:40:58