อุปกรณ์วัดพิกัด 3 มิติที่ใช้ในการตรวจสอบชิ้นงานที่มีพื้นผิวต่อเนื่องและโปรแกรมเชื่อมโยงกับโปรแกรม CATIA

นาย ปัญญา ดีประเสริฐกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-331-812-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

27 ธ.ค. 2545
I19C0204X

A 3-D COORDINATE MEASURING MACHINE FOR INSPECTING OF CONTINUOUS COMPLEX SURFACES AND A PROGRAM FOR INTERFACING WITH CATIA

Mr. Panya Deeprasertkul

A Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic year 1998

ISBN 974-331-812-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อุปกรณ์วัดพิกัด 3 มิติสำหรับงานวัดพื้นผิวเรียบง่ายและไม่ซับซ้อนและโปรแกรมเชื่อมโยงกับโปรแกรม CATIA
โดย	นาย ปัญญา ดีประเสริฐกุล
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดำรงศักดิ์ มลิลา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ)

ปัญญา ดีประเสริฐกุล : อุปกรณ์วัดพิกัด 3 มิติที่ใช้ในการตรวจสอบชิ้นงานที่มีพื้นผิวต่อเนื่องและโปรแกรมเชื่อมโยงกับโปรแกรม CATIA (A 3-D COORDINATE MEASURING MACHINE FOR INSPECTING OF CONTINUOUS COMPLEX SURFACES AND A PROGRAM FOR INTERFACING WITH CATIA) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ ; 120 หน้า. ISBN 974-331-812-7

ในโครงการวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเครื่องวัดพิกัด 3 มิติของพื้นผิวที่มีความสลับซับซ้อนแบบต่อเนื่องแบบอัตโนมัติที่มีโครงสร้างแบบ Fixed-bridge ชนิด 4 แกน โดย 3 แกนแรกมีลักษณะตั้งฉากซึ่งกันและกัน แต่ละแกนขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่านและติดตั้งชุดบอลสกรูระหว่างมอเตอร์กับภาระ ส่วนแกนที่ 4 เป็นแกนหมุนขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวรและชุดเฟืองทดแบบฮาร์โมนิค อัตราทด 100:1 ปริมาตรการทำงานของเครื่องคือ 250x250x240 mm. ระบบควบคุม 3 แกนแรกจะเป็น PID ซึ่งจัดรูปแบบโครงสร้างแบบ Pseudo-Derivative Feedback ส่วนแกนที่ 4 จะเป็น PID+Feedward และได้พัฒนาโปรแกรมควบคุมการทำงานของอุปกรณ์วัดพิกัดซึ่งเขียนด้วยโปรแกรม Visual Basic ทำงานภายใต้ระบบปฏิบัติการวินโดว์ 3.11 สามารถเก็บข้อมูลพิกัดพื้นผิวของชิ้นงานโดยใช้อุปกรณ์วัดระยะด้วยแสงเลเซอร์แบบ Semiconductor Low Power Laser ข้อมูลของพื้นผิวที่ได้มีลักษณะเป็นกลุ่มของจุดในพิกัดคาร์ทีเซียน x, y, z สามารถส่งไปยังโปรแกรม CATIA ได้ ข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปสร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์เพื่อใช้งานต่อไป ความแม่นยำของเครื่องในการเคลื่อนที่แต่ละแกนจะได้ดังนี้ แกน X อยู่ระหว่าง $\pm$15 ไมครอน แกน Y และแกน Z อยู่ระหว่าง $\pm$5 ไมครอน ความละเอียดรวมของเครื่องนั้นได้จากการเปรียบเทียบค่าพิกัดระหว่างแบบจำลองต้นแบบ (จากคอมพิวเตอร์และชิ้นงานตัวอย่าง) และชิ้นงานที่สร้างจริง ค่าพิกัดดังกล่าววัดได้จากเครื่องที่สร้างขึ้นนี้กับเครื่องวัดพิกัดเชิงพาณิชย์ ความละเอียดที่ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะของผิวชิ้นงาน ความต่อเนื่องและความชันของผิวชิ้นงาน ผลที่ได้จากการวัดชิ้นงานรูปแบบต่าง ๆ นั้นแสดงให้เห็นว่าเครื่องที่สร้างขึ้นนี้มีความละเอียดทัดเทียมกับเครื่องวัดพิกัดเชิงพาณิชย์(ที่ใช้หัววัดแบบสัมผัส)ที่อ้างความละเอียดแต่ละแกนที่ 3 ไมครอน

แกนที่ 4 ติดตั้งเอนโคดเดอร์ตรงเพลาต่อกับตัวจับเลเซอร์ ความละเอียดของเอนโคดเดอร์คือ 2500 พัลส์ต่อรอบ ความละเอียดของระบบควบคุมของแกนที่ 4 คือ $\pm$0.288 องศา แกนที่ 4 นี้จะช่วยในการวัดผิวชิ้นงานที่มีความลาดชันมากได้ดี

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต ปัญญา ดีประเสริฐกุล

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2541 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

C816160 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING
KEY WORD: 3-D COORDINATE MEASURING MACHINE
PANYA DEEPRASERTKUL : A 3-D COORDINATE MEASURING MACHINE
FOR INSPECTING OF CONTINUOUS COMPLEX SURFACES AND A
PROGRAM FOR INTERFACING WITH CATIA. THESIS ADVISOR :
ASSOC. PROF. VIBOON SANGVERAPHUNSIRI, Ph.D. 120 pp. ISBN 974-331-812-7

This research is to develop the 4-axis 3-D Automatic Laser Scanning machine with Fixed Bridge structure for digitizing smooth complex surfaces. The first 3-axis is orthogonal and the 4th axis is revolute axis. The first 3-axis are actuated by Brushless D.C servo motors with ball screw connect to the load. The 4th axis actuated by permanent magnet D.C. servo motor with 100:1 ratio harmonic drive. The working volume is 250x250x240 mm. The controller of the first 3-axis is PID with Pseudo-Derivative-Feedback structure controller. And the conventional PID+Feedforward controller is used for the 4th axis. The control program is developed by using Visual Basic under Windows 3.11. Low power semiconductor Laser probe is used for measuring the Z-distance between the sensor and the surface. This Z-distance including the X- and Y-coordinate will be convert to the X-Y-Z coordinate and then export to the CATIA program for further use. The accuracy of each individual axis is as following: X-axis = $\pm$15 micron, Y-axis and Z-axis = $\pm$5 micron. The combining accuracy of the machine is obtained by comparing among the data-point from prototype model (computer models and sample pieces) and real model. The data-point obtaining from the automatic laser scanning machine and the commercial Coordinate Measuring Machine(CMM). The result accuracy depends on the type of surfaces, continuity, slope of the surfaces. It can be shown that the automatic laser scanning machine has equivalent accuracy to the commercial CMM (with touch probe sensor) which claims $\pm$3 micros accuracy for each axis.

The 4th axis, the encoder is mounted to the laser holder shaft. The accuracy of controller is $\pm$0.288 degree. The 4th axis is aiming for measuring the steep surface.

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต ปัญญา ดีประเสริฐกุล
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา วิบูลย์ แสงเวราพันธุ์สิริ
ปีการศึกษา 2541 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์ประกอบการวิจัยต่างๆ และขอขอบคุณบริษัท NSS จำกัด ที่ได้มอบทุนสนับสนุนการศึกษาโดยไม่มีเงื่อนไขใดๆ ทั้งสิ้น นอกจากนี้ขอขอบคุณ พี่ไพรัช ตั้งพรประเสริฐ, พี่สมบูรณ์ อนันตธนะสาร ที่ได้ให้ความช่วยเหลือแนะนำเกี่ยวกับการใช้เครื่องมือและโปรแกรมในการวิจัยนี้ และขอบคุณบริษัทตัวแทนจำหน่ายเครื่อง CMM ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลในการเขียนวิทยานิพนธ์มา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดาซึ่งสนับสนุนทางด้านทุนทรัพย์และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ปัญญา ดีประเสริฐกุล

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ .....ฉ
สารบัญตาราง.....ซ
สารบัญภาพ..... ญ
บทที่
1. บทนำ..... 1
2. โครงสร้างของอุปกรณ์วัดพิกัด 3 มิติและอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์..... 7
3. อุปกรณ์ควบคุมและระบบควบคุม..... 27
4. วิธีการและโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมอุปกรณ์วัดพิกัด..... 42
5. การทดสอบความแม่นยำในการเคลื่อนที่แต่ละแกนและการเปรียบเทียบผลการวัด..... 59
6. สรุปและวิเคราะห์ผล..... 99
รายการอ้างอิง..... 108
ภาคผนวก ก.....109
ภาคผนวก ข.....114
ภาคผนวก ค.....115
ประวัติผู้เขียน.....120

สารบัญตาราง

ตารางที่

5.1 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกน X ในช่วง 0-80 มิลลิเมตร ทดลองทั้งสิ้น 20 ครั้ง..... 60
5.2 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกน X ในช่วง 80-160 มิลลิเมตร ทดลองทั้งสิ้น 20 ครั้ง..... 61
5.3 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกน X ในช่วง 160-240 มิลลิเมตร ทดลองทั้งสิ้น 20 ครั้ง... 62
5.4 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกน Y ในช่วง 0-80 มิลลิเมตร ทดลองทั้งสิ้น 20 ครั้ง..... 60
5.5 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกน Y ในช่วง 80-160 มิลลิเมตร ทดลองทั้งสิ้น 20 ครั้ง..... 61
5.6 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกน Y ในช่วง 160-240 มิลลิเมตร ทดลองทั้งสิ้น 20 ครั้ง... 62
5.7 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกน Z ในช่วง 0-80 มิลลิเมตร ทดลองทั้งสิ้น 20 ครั้ง..... 68
5.8 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกน Z ในช่วง 80-160 มิลลิเมตร ทดลองทั้งสิ้น 20 ครั้ง..... 69
5.9 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกน Z ในช่วง 160-240 มิลลิเมตร ทดลองทั้งสิ้น 20 ครั้ง... 70
5.10 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกนที่ 4 คำสั่ง Step=2° ทดลองทั้งสิ้น 10 ครั้ง.....72
5.11 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกนที่ 4 คำสั่ง Step=3° ทดลองทั้งสิ้น 10 ครั้ง.....72
5.12 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกนที่ 4 คำสั่ง Step=4° ทดลองทั้งสิ้น 10 ครั้ง.....73
5.13 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกนที่ 4 คำสั่ง Step=0-5° ทดลองทั้งสิ้น 10 ครั้ง.....74
5.14 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกนที่ 4 คำสั่ง Step=0-(-5)° ทดลองทั้งสิ้น 10 ครั้ง.....75
5.15 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกนที่ 4 คำสั่ง Step=0-10° ทดลองทั้งสิ้น 10 ครั้ง.....77
5.16 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกนที่ 4 คำสั่ง Step=0-(-10)° ทดลองทั้งสิ้น 10 ครั้ง.....78
5.17 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกนที่ 4 คำสั่ง Step=0-15° ทดลองทั้งสิ้น 10 ครั้ง.....79
5.18 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกนที่ 4 คำสั่ง Step=0-(-15)° ทดลองทั้งสิ้น 10 ครั้ง.....81
5.19 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกนที่ 4 คำสั่ง Step=0-20° ทดลองทั้งสิ้น 10 ครั้ง.....82
5.20 ผลการทดลองเคลื่อนที่แกนที่ 4 คำสั่ง Step=0-(-20)° ทดลองทั้งสิ้น 10 ครั้ง.....83
6.1 สรุปผลการเคลื่อนที่ของแกนหลักทั้ง 3.....99
6.2 สรุปผลการทดสอบการหมุนของแกนที่ 4 ด้วยคำสั่ง step เป็นมุมแคบ
(2°,3°,4°)เปรียบเทียบการเคลื่อนที่แบบกำหนดการเคลื่อนที่ด้วย Profile
กับการเคลื่อนที่แบบไม่มีการกำหนดProfile.....100
6.3 สรุปผลการทดสอบการหมุนของแกนที่ 4 ด้วยคำสั่ง step เป็นมุม
5°,10°,15°,20° ใช้การเคลื่อนที่แบบกำหนดการเคลื่อนที่ด้วยProfile.....100
6.4 สรุปผลการทดสอบการหมุนของแกนที่ 4 ด้วยคำสั่ง step เป็นมุม
-5°,-10°,-15°,-20° ใช้การเคลื่อนที่แบบกำหนดการเคลื่อนที่ด้วย Profile.....100

6.5 สรุปผลการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยอุปกรณ์วัดพิกัดแบบ
3 และ 4แกนกับเครื่อง CMM มาตรฐาน.....101
ก.1 ข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์วัดระยะด้วยแสงเลเซอร์.....110
ก.2 ข้อมูลจำเพาะของตัวขับ BL.....111

สารบัญภาพ

รูปที่

1.1 การวัดขนาดชิ้นงานจริง..... 2
1.2 ต้นแบบที่ได้จาก CAD..... 2
1.3 ตัวอย่างเครื่อง DIGITIZER ที่ปรากฏในเชิงพาณิชย์..... 3
2.1 เครื่องวัดพิกัด 3 มิติที่ไม่ใช้ระบบพิกัดฉาก..... 8
2.2 CMM แบบ Fixed Table Cantilever..... 9
2.3 CMM แบบ Moving Bridge.....10
2.4 CMM แบบ Fixed Bridge.....11
2.5 CMM แบบ Column.....11
2.6 CMM แบบ Moving Ram Horizontal Arm..... 12
2.7 CMM แบบ Moving Table Horizontal Arm..... 12
2.8 CMM แบบ Gantry..... 13
2.9 CMM แบบ L-Shaped Bridge.. 13
2.10 CMM แบบ Fixed Table Horizontal Arm 14
2.11 CMM แบบ Moving Table Cantelever Arm..... 14
2.12 วิธีในการเก็บข้อมูลของวัตถุ..... 16
2.13 Optical triangulation..... 18
2.14 ระบบ Optical triangulation..... 18
2.15 ความผิดพลาดของระบบ Optical triangulation เนื่องจากความไม่ต่อเนื่อง
ของการสะท้อนแสง..... 20
2.16 ความผิดพลาดของระบบ Optical triangulation เนื่องจากรูปร่างของวัตถุ..... 20
2.17 ความผิดพลาดของระบบ Optical triangulation เนื่องจากการสะท้อนแสง
ถูกบังไป บางส่วน..... 21
2.18 ความผิดพลาดของระบบ Optical triangulation เนื่องจากความไม่เป็น
ระเบียบของแสงสะท้อน.....21
2.19 ก) โครงสร้างของเครื่อง CMM ข) ชุดควบคุม 3 แกน X-Y-Z.....22
2.20 แสดงอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์ติดที่ปลายแขน.....24
2.21 แสดงขนาดของชุด Laser วัดพิกัด และมุมรับแสง Laser..... 24
2.22 ก) แสดงชุดต่อแกนที่ 4 และอุปกรณ์ ข) แสดงชุดควบคุมและชุด decoder.....25
3.1 หลักการของ DC motor..... 28
3.2 หลักการของ AC motor -1.....29
3.3 หลักการของ AC motor -2.....29

3.4 แสดงกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสในมอเตอร์แบบ Brushless.....30
3.5 แสดงแผนภาพการทำงานของวงจรควบคุมมอเตอร์แบบ Brushless..... 31
3.6 ก)วัตถุประสงค์ของวงจร DC-SIN conversion circuit
ข) วงจร DC-SIN conversion circuit.....32
3.7 รูปคลื่นสัญญาณจากวงจร Sine wave PWM.....33
3.8 แสดง Integral windup และแสดงผลเมื่อใช้การจำกัดการอินทิเกรต.....35
3.9 แสดงวิธีการควบคุมแบบ PIV&F..... 36
3.10 แสดง Block diagram ของระบบควบคุม PIV 31
3.11 แสดงระบบควบคุมของแกนที่ 4 39
3.10 แสดงโครงร่างของอุปกรณ์วัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์โดยจุดกำเนิด
ของแกน X-Z แทนจุดหมุนของแกนที่ 4 พร้อมทั้งแสดงจุดศูนย์กลางมวลด้วย.....39
4.1 แสดงการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่างๆ..... 42
4.2 ผังงานของการสแกน 3 แกน.....44-47
4.3 ลักษณะทางเดินในการสแกนและพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดในการโปรแกรม..... 49
4.4 ผังงานของการสแกนด้วย 4 แกน..... 51-55
4.5 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการสแกน..... 58
4.6 ตัวอย่างข้อมูลที่เมื่อนำไปเข้าโปรแกรม CATIA เรียบร้อยแล้ว 58
5.1ก) แสดงระยะทางในการทดสอบการเคลื่อนที่แกน X 59
5.2 แสดงตัวอย่างของ Step response ของแกน X-axis ในช่วง 0-80 mm.....60
5.1ข) แสดงระยะทางในการทดสอบการเคลื่อนที่แกน Y 63
5.3 แสดงตัวอย่างของ Step response ของแกน Y-axis ในช่วง 0-80 mm.....63
5.4 แสดงระยะทางในการทดสอบการเคลื่อนที่แกน Z 67
5.5 แสดงตัวอย่างของ Step Response ของแกน Z-axis ในช่วง 0-80 mm..... 67
5.6 แสดงการสร้างสัญญาณ Profile จากคำสั่งอ้างอิงที่เป็น Step 71
5.7 แสดงตัวอย่าง Step Response ของแกนที่ 4 โดยใช้ Step = 0-5°
ก) ccw ข) cw 74
5.8 แสดงตัวอย่าง Step Response ของแกนที่ 4 โดยใช้ Step = 0-(-5)°
ก) ccw ข) cw 75
5.9 แสดงตัวอย่าง Step Response ของแกนที่ 4 โดยใช้
Step = 0-10° ก) ccw ข) cw 76
5.10 แสดงตัวอย่าง Step Response ของแกนที่ 4 โดยใช้
Step = 0-(-10)° ทดลองทั้งสิ้น 10ครั้ง 78

5.11 แสดงตัวอย่าง Step Response ของแกนที่ 4 โดยใช้
Step = 0-15° ก) ccw ข) cw 79
5.12 แสดงตัวอย่าง Step Response ของแกนที่ 4 โดยใช้
Step = 0-(-15)° ก) ccw ข) cw.....80
5.13 แสดงตัวอย่าง Step Response ของแกนที่ 4 โดยใช้
Step = 0-(20)° ก) ccw ข) cw.....82
5.14 แสดงตัวอย่าง Step Response ของแกนที่ 4 โดยใช้
Step = 0-(-20) ° ก) ccw ข) cw.....83
5.15 แสดงตัวอย่างของ 4th-Axis response เมื่อคำสั่งเคลื่อนที่เท่ากับ
5 degree forward..... 84
5.16 แสดงตัวอย่างของ 4th-Axis response เมื่อคำสั่งเคลื่อนที่เท่ากับ
10 degree forward.....85
5.17 แสดงตัวอย่างของ 4th-Axis response เมื่อคำสั่งเคลื่อนที่เท่ากับ
15 degree forward.....85
5.18 แสดงตัวอย่างของ 4th-Axis response เมื่อคำสั่งเคลื่อนที่เท่ากับ
20 degree forward.....86
5.19 แสดงพื้นผิว offset 87
5.20 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยโหมดการทำงานแบบ
3 และ 4 แกน เทียบกับเครื่อง CMM ที่ใช้ในอุตสาหกรรมจริง
(ชิ้นงานรูปที่ 5.23ข)..... 88
5.21 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยโหมดการทำงานแบบ
3 และ 4 แกน เทียบกับเครื่อง CMM ที่ใช้ในอุตสาหกรรมจริง
(ชิ้นงานรูปที่ 5.23ก)..... 91
5.22 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยโหมดการทำงานแบบ
3 และ 4 แกน เทียบกับเครื่อง CMM ที่ใช้ในอุตสาหกรรมจริง
(ชิ้นงานรูปที่ 5.23ง)..... 92
5.23 แสดงข้อมูลที่ได้จากพื้นผิวมือถือโทรศัพท์.....93-94
5.24 แสดงความชันของพื้นผิวชิ้นงานโทรศัพท์.....95
6.1 แสดงการบอกทิศทางการเคลื่อนที่ของแกนที่ 4 ccw+, cw-.....99
6.2 ความผิดพลาดของโครงสร้างเมื่อโต๊ะวางชิ้นงานเคลื่อนที่ในแนวแกน x
เมื่อสมมุติว่า โครงสร้างเป็นวัตถุเกร็ง.....104
6.3 แสดงการเอียงหัววัดเพื่อให้ตั้งฉากกับพื้นผิว.....105
6.4 แสดงขั้นตอนการปรับองศาของหัววัด.....106
ก.1 ขนาดของตัวขับ BL.....112

ก.2 ขนาดของมอเตอร์รุ่น ML-2340.....113
ค.1 หน้าต่างเริ่มต้นของโปรแกรม SCAN.....115
ค.2 หน้าต่างสร้างทางเดินขนานกับแกน X.....116
ค.3 หน้าต่าง SCAN.....117
ค.4 หน้าต่าง PARALLEL TO Y00.....118