การพัฒนาแขนกลควบคุมระยะไกลสำหรับการจัดเปลี่ยนต้นกำเนิดรังสีความแรงสูง

นายจิโรภาส เสือแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2539

ISBN 974-636-690-4

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I17432170

DEVELOPMENT OF A REMOTE CONTROLLED ROBOTIC ARM FOR HIGH ACTIVITY SOURCE MANIPULATION

Mr. Jiropast Suakaew

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Nuclear Technology

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1996

ISBN 974-636-690-4

ชื่อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาแขนกลควบคุมระยะไกลสำหรับการจัดเปลี่ยนต้นกำเนิดรังสีความแรงสูง
โดย	นาย จิโรภาส เสือแก้ว
ภาควิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

_____ คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

_____ ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ วิรุฬห์ มังคละวิรัช)

_____ อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

_____ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)

_____ กรรมการ
(อาจารย์ เดโช ทองอร่าม)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

จิโรภาส เสือแก้ว : การพัฒนาแขนกลควบคุมระยะไกลสำหรับการจัดเปลี่ยนต้นกำเนิดรังสีความแรงสูง (DEVELOPMENT OF A REMOTE CONTROLLED ROBOTIC ARM FOR HIGH ACTIVITY SOURCE MANIPULATION) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, อ. ที่ปรึกษาร่วม : อ. อรรถพร ภัทรสุมันต์ , 93 หน้า. ISBN 974-636-690-4.

แขนกลควบคุมระยะไกลสำหรับการจัดเปลี่ยนต้นกำเนิดรังสีความแรงสูงที่ได้พัฒนาขึ้นนี้มีระบบกลแบบอาร์ติคูเลต (Articulated-arm) มีข้อต่อเคลื่อนที่อิสระต่อกัน 5 ข้อ ได้แก่ ส่วนหัวไหล่ ข้อศอก ข้อมือยกขึ้นลง ข้อมือบิดหมุนและมือจับ พร้อมฐานสำหรับขับเคลื่อนแขนให้เข้าสู่บริเวณปฏิบัติงาน ใช้ไฟฟ้าเป็นระบบขับเคลื่อน โดยต้นกำลังขับข้อต่อของแขนกลประกอบด้วยมอเตอร์กระแสตรง 5 ตัวและมอเตอร์สเต็ปปิง 3 ตัว ควบคุมการทำงานด้วยแป้นกดสั่งงานผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น CPAT-32 และพอร์ตเชื่อมโยงสัญญาณ 3 ชุด ส่งสัญญาณควบคุมระยะไกลผ่านทางสายเคเบิล พร้อมติดตามการทำงานด้วยระบบโทรทัศน์วงจรปิด

ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของแขนกลที่พัฒนาขึ้นนี้พบว่า การเคลื่อนที่ของส่วนฐานสามารถปรับวงล้อให้เลี้ยวได้ในมุม $\pm 30^{\circ}$ ส่วนแขนสามารถหมุนได้รอบตัวบนฐาน หัวไหล่และข้อศอกสามารถเคลื่อนไหวได้เป็นมุม 0 ถึง 70° ขณะที่ข้อมือยกขึ้นลงได้ $\pm 70^{\circ}$ และหมุนข้อมือได้ $\pm 15^{\circ}$ ปากของมือจับสามารถเปิดกว้างได้ 8 เซนติเมตร รัศมีการทำงาน 0.5 เมตร โดยสามารถรับน้ำหนักชิ้นงานได้ 200 กรัม ควบคุมการเคลื่อนไหวของข้อต่างๆในการจับสิ่งของรูปทรงต่างๆได้สะดวก

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2539 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

C618669 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY
KEY WORD: ROBOT / MANIPULATION / HIGH ACTIVITY SOURCE / REMOTE CONTROL
JIROPAST SUAKAEW : DEVELOPMENT OF A REMOTE CONTROLLED ROBOTIC ARM FOR HIGH ACTIVITY SOURCE MANIPULATION. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. SUVIT PUNNACHAIYA, THESIS COADVISOR : ATTAPORN PATTARASUMUNT, 93 pp. ISBN 974-636-690-4.

A remote controlled robotic arm for high activity source manipulation was developed in articulated-arm mechanical configuration. This robot has five degrees of joint freedom : waist, shoulder, elbow, pitch, roll and gripper. It sits on a four wheels transporting base enabling the robotic arm to move easily to working area. The actuating devices for energizing the various motion of joints consist of 5 sets of DC motor and 3 sets of stepping motor. The robot operates under the control of command keyboard via CPAT-32 microcontroller with 3 I/O interfacing ports, sending the remotely controlled signals to the actuators through cables while using a close circuit television viewing for operation.

The operating performance was tested and found that; the front wheels of transporting system can be steered in angle of $\pm$ 30 $^{\circ}$ and the ranges of other angular motion are : waist 0-360°, shoulder and elbow 0-70°, pitch $\pm$70° and roll $\pm$15°. The opening range of the gripper is 8 cm. The robotic arm can carry 200 gram load and is easily manipulated by the user with a working range of 0.5 m. radius.

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2539 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีจากการแนะนำ ให้ข้อคิดตลอดจนแนวทางปฏิบัติในการทำวิจัยจากผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์อรรถพร ภัทรสุมันต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้เขียนขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ทั้งสองเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยบางส่วนมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ คุณเกริกพล อุรุพงษ์เศรษฐ์ อดีตผู้บังคับบัญชาผู้ซึ่งสนับสนุนในการศึกษาต่อ

ขอขอบคุณ คุณวันดี แซ่คู ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการพิมพ์วิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเพื่อนทุกท่าน ตลอดจนห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี โดยความดูแลของคุณบัญชา อุนพานิช ที่ให้ความช่วยเหลือด้วยดีเสมอมาในระหว่างศึกษาและการทำวิจัย

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ซึ่งให้การสนับสนุนและคอยเป็นห่วงใยตลอดเวลาเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญภาพ ..... ฐ

บทที่

1. บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ 1

1.2 วัตถุประสงค์ 2

1.3 ขอบเขตการวิจัย 2

1.4 ขั้นตอนการวิจัย 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้ 3

2. ระบบแขนกลสำหรับปฏิบัติงานด้านรังสี 4

2.1 ความจำเป็นในการใช้แขนกลควบคุมระยะไกลในงานด้านรังสี 5

2.1.1 งานด้านวิทยาศาสตร์นิวเคลียร์ 5

2.1.2 งานด้านวิศวกรรมนิวเคลียร์ 6

2.2 การจำแนกประเภทแขนกล 6

2.2.1 เทคนิคการขับเคลื่อน 7

2.2.2 การเคลื่อนที่ข้อต่อ 9

2.2.3 กระบวนการเคลื่อนไหวของแขน 9

2.3 หลักการเคลื่อนไหวของแขนกล 10

2.3.1 ชนิดของแขนกลและการเคลื่อนที่ในแต่ละแกน 10

2.3.2 คุณลักษณะจำเพาะของแขนกล 14

2.3.3 การอ้างอิงมุมของแขนกล 19

2.4 ต้นกำลังสำหรับขับเคลื่อนแขนกล 20

2.4.1 มอเตอร์สเต็ปปิง 20

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.4.1.1 ชนิดของมอเตอร์สเต็ปปิง 20

2.4.1.1.1 ชนิดวาริเอเบิลรีลักแตนซ์ 20

2.4.1.1.2 ชนิดแม่เหล็กถาวร 22

2.4.1.1.3 ชนิดไฮบริด 24

2.4.1.2 การพันขดลวดหรือคอยล์บนมอเตอร์สเต็ปปิง 24

2.4.1.3 โหมดการทำงานของมอเตอร์สเต็ปปิง 25

2.4.1.4 วิธีการกระตุ้นเฟส 27

2.4.2 มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) 29

2.4.2.1 ชนิดของมอเตอร์กระแสตรง 30

2.4.2.2 คุณลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 31

3. การพัฒนาระบบแขนกลควบคุมระยะไกลสำหรับการจัดเปลี่ยนต้นกำเนิดรังสีความแรงสูง 34

3.1 ข้อมูลพื้นฐานของการออกแบบแขนกล 34

3.2 การออกแบบระบบทางกล 35

3.2.1 ส่วนขับเคลื่อนล้อ 35

3.2.2 ชิ้นส่วนกลบริเวณหัวไหล่ 36

3.2.3 ชิ้นส่วนกลบริเวณข้อศอก 37

3.2.4 ชิ้นส่วนกลบริเวณข้อมือยก ขึ้น-ลง 37

3.2.5 ชิ้นส่วนกลบริเวณข้อมือหมุน ทวน-ตามเข็มนาฬิกา 37

3.2.6 ชิ้นส่วนกลบริเวณมือจับ 37

3.3 การออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนไหวของแขนกล 37

3.3.1 โครงสร้างของระบบควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ 37

3.3.2 วงจรเชื่อมโยงสัญญาณ 37

3.3.3 วงจรขับชุดมอเตอร์ 40

3.3.4 วงจรควบคุมทิศทางและตำแหน่งของแขนกล 41

3.4 โปรแกรมควบคุมการทำงาน 42

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.4.1 โปรแกรมกำหนดค่าเริ่มต้นของพอร์ตทางเข้า-ออก 43
3.4.2 โปรแกรมรับข้อมูลจากแป้นควบคุมการขับเคลื่อน 45
3.4.3 โปรแกรมส่งข้อมูลเพื่อควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อน 46
3.4.4 โปรแกรมแสดงผลบนจอ LCD 48
4. ผลการพัฒนาระบบแขนกล 51
4.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ 51
4.2 การทดสอบการจับชิ้นงานและรับโหลด 53
4.2.1 การทดสอบกับชิ้นงานทรงกลม 54
4.2.2 การทดสอบกับชิ้นงานทรงเหลี่ยมจตุรัส 57
4.2.3 การทดสอบกับชิ้นงานทรงผืนผ้า 59
4.2.4 การทดสอบกับชิ้นงานทรงกระบอก 60
4.2.5 การทดสอบความสามารถในการบรรจุชิ้นงานลงท่อ 63
4.2.6 การทดสอบความสามารถในการจับชิ้นงานผ่านกล้องโทรทัศน์ 66
4.3 การทดสอบความสามารถในการรับโหลด 68
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 69
5.1 สรุปผลการวิจัย 69
5.2 ลักษณะพิกัดของแขนกล 70
5.2.1 พิกัดระยะการเคลื่อนไหว 70
5.2.2 พิกัดความเร็วการเคลื่อนไหว 71
5.3 ข้อเสนอแนะ 71
รายการอ้างอิง 72
บรรณานุกรม 73
ภาคผนวก ก 74
ภาคผนวก ข 89
ประวัติผู้เขียน 93

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของระบบขับเคลื่อนแขนกลแบบต่างๆ 8

2.2 ชนิดของแขนกลและลักษณะการเคลื่อนที่ของข้อต่อ 10

2.3 คุณสมบัติจำเพาะพื้นฐานของแขนกลแต่ละชนิด 14

4.1 ผลการทดสอบความสามารถในการรับโหลด 66

5.1 ผลการทดสอบความสามารถการรับน้ำหนักสูงสุด 69

สารบัญภาพ

รูปที่ หน้า

2.1 แผนภาพระบบแขนกลเบื้องต้น 5

2.2 การเคลื่อนที่ของข้อต่อ

ก. การเคลื่อนที่แบบ Revolute 9

ข. การเคลื่อนที่แบบ Prismatic 9

2.3 แขนกลชนิด Cartesian

ก. รูปแบบแขนกลชนิด Cartesian 10

ข. ขอบเขตการทำงานของแขนกลชนิด Cartesian 10

2.4 แขนกลชนิด Cylindrical

ก. รูปแบบแขนกลชนิด Cylindrical 11

ข. ขอบเขตการทำงานของแขนกลชนิด Cylindrical 11

2.5 แขนกลชนิด Spherical

ก. รูปแบบแขนกลชนิด Spherical 11

ข. ขอบเขตการทำงานของแขนกลชนิด Spherical 11

2.6 แขนกลชนิด Scara

ก. รูปแบบแขนกลชนิด Scara 12

ข. ขอบเขตการทำงานของแขนกลชนิด Scara 12

2.7 แขนกลชนิด Articulated

ก. รูปแบบของแขนกลชนิด Articulated 13

ข. ขอบเขตการทำงานของแขนกลชนิด Articulated 13

2.8 โครงสร้างของแขนกลชนิด Cylindrical 13

2.9 โครงสร้างของแขนกลชนิด Articulated 14

2.10 แสดงระยะ Reach และ Stroke 15

2.11 ทิศทางการหมุนของข้อต่อในแบบ Yaw, Pitch และ Roll 16

2.12 แผนภาพของสมการ Direct Kinematic 17

2.13 แผนภาพการทำงานของแขนกลในรูปแบบ 5 ดีกรีออฟฟรีดอม 18

2.14 ตำแหน่ง Home ของแขนกล 18

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.15 แสดงตัวอย่างในการอ้างอิงมุม 18

2.16 เวกเตอร์ที่ตำแหน่งข้อต่อต่างๆของแขนกลชนิด Articulatedแบบ 5 ดีกรี ออฟฟรีดอม 19

2.17 ภาพตัดขวางและการพันขดลวดของ VR มอเตอร์สเต็ปปิงแบบ 3 เฟส 21

2.18 การทำงานเมื่อมีการกระตุ้นเฟสของมอเตอร์สเต็ปปิง

ก. แสดงเส้นแรงแม่เหล็กขณะกระตุ้นเฟส 1 22

ข. แสดงขั้นตอนการหมุนเมื่อมีการกระตุ้นเฟสจาก เฟส 1 ไปยัง เฟส 2 22

2.19 โครงสร้างพื้นฐานภายในของมอเตอร์สเต็ปปิงชนิดแรเอิร์ธเพอร์มาเนนต์แมกเน็ต 23

2.20 ขดลวดมอเตอร์สเต็ปปิงแบบ 4 เฟส

ก. ภาพตัดขวางของ PM มอเตอร์สเต็ปปิงแบบ 4 เฟส 23

ข. วงจรกระตุ้นเฟสพื้นฐาน สำหรับ PM มอเตอร์ 4 เฟส 23

2.21 ลำดับขั้นการหมุนในมอเตอร์ 4 เฟส 24

2.22 แสดงการพันขดลวดบนสเตเตอร์ของมอเตอร์สเต็ปปิง 25

2.23 กราฟแสดงสเต็ปของการหมุนในโหมดการทำงานแบบ

ก. หมุนเป็นสเต็ป 26

ข. หมุนต่อเนื่อง 26

2.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของสเต็ปกับแรงบิดของการทำงาน ทั้ง 2 โหมดของมอเตอร์สเต็ปปิง 26

2.25 ตารางแสดงการกระตุ้นเฟส

ก. แบบเฟสเดี่ยว (Single-phase) 27

ข. แบบเฟสคู่ (Two-phase) 27

ค. แบบกึ่งสเต็ป (Half-phase) 28

2.26 แสดงคุณสมบัติของการกระตุ้นเฟสแบบกึ่งสเต็ปและแบบเฟสคู่

ก. แสดงเส้นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กในการกระตุ้นแบบเฟสคู่ 28

ข. แสดงการเข้าตำแหน่งของโรเตอร์ที่สเต็ปหนึ่งๆ 28

ค. กราฟคุณลักษณะของการกระตุ้นเฟสแบบกึ่งสเต็ปและแบบเฟสคู่ 29

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.27 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
ก. ทุ่นอาร์เมเจอร์ 29
ข. ภาพตัดขวางของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 30
2.28 เส้นกราฟแสดงคุณสมบัติต่างๆของมอเตอร์ขนาน อนุกรมและผสมกระแสตรง 32
3.1 แผนภาพระบบแขนกลที่ออกแบบขึ้น 35
3.2 โครงสร้างของแขนกลที่พัฒนาขึ้น 36
3.3 แผนภาพแสดงระบบควบคุมการเคลื่อนไหวของแขนกล 38
3.4 แผนภาพแสดงโครงสร้างของการจัดหน่วยความจำ 39
3.5 แสดงวงจร Sensor สำหรับระบบแขนกล 40
3.6 แสดงลำดับการจ่ายกระแสไฟชนิด 2 เฟส 41
3.7 วงจรรีเลย์สวิตช์สำหรับควบคุมทิศทางของมอเตอร์กระแสตรง 41
3.8 แผนภาพโครงสร้างของโปรแกรมควบคุมการทำงานของแขนกล 42
3.9 แสดงแผนภาพของพอร์ตทางเข้า/ทางออก 43
3.10 แผนผังโปรแกรมรับค่าจากแป้นควบคุมการขับเคลื่อน 45
3.11 แผนผังโปรแกรมส่งข้อมูลเพื่อควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อน 46
3.12 แผนผังโปรแกรมควบคุมมอเตอร์กระแสตรง 47
3.13 แผนผังโปรแกรมแสดงผลบนจอ LCD 48
3.14 แสดงแขนกลและระบบควบคุม 50
3.15 แสดงระบบควบคุมแขนกล 50
4.1 ภาพแสดงการควบคุมระบบแขนกลในการจับชิ้นงานทดสอบทรงกลม
ก. แสดงแขนกลก่อนจับชิ้นงานทดสอบทรงกลม 54
ข. แสดงแขนกล ขณะจับชิ้นงานทดสอบทรงกลม 54
ค. แสดงแขนกล ขณะจับชิ้นงานทดสอบยกขึ้น 55
ง. แสดงแขนกลหมุนข้อมือ ขณะมีชิ้นงานทดสอบ 55
จ. แสดงแขนกลหมุนข้อต่อฐาน ขณะมีชิ้นงานทดสอบ 56

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.2 ภาพแสดงการควบคุมแขนกลในการจับชิ้นงานทดสอบทรงสี่เหลี่ยมจตุรัส

ก. แสดงแขนกลก่อนจับชิ้นงานทดสอบทรงสี่เหลี่ยมจตุรัส..... 57

ข. แสดงแขนกล ขณะจับชิ้นงานทดสอบทรงสี่เหลี่ยมจตุรัส..... 57

ค. แสดงแขนกลหมุนข้อมือ ขณะมีชิ้นงานทดสอบ..... 58

ง. แสดงแขนกลหมุนข้อต่อศอกยกขึ้น ขณะมีชิ้นงานทดสอบ..... 58

4.3 ภาพแสดงการควบคุมแขนกลในการจับชิ้นงานทดสอบทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ก. แสดงแขนกลก่อน จับชิ้นงานทดสอบทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า..... 59

ข. แสดงแขนกลขณะจับชิ้นงานทดสอบทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า..... 59

4.4 ภาพแสดงการควบคุมแขนกลในการจับชิ้นงานทดสอบทรงกระบอก

ก. แสดงแขนกลขณะจับ ชิ้นงานทดสอบทรงกระบอก..... 60

ข. แสดงแขนกลหมุนข้อมือขึ้น ขณะมีชิ้นงานทดสอบ..... 60

ค. แสดงแขนกลหมุนข้อมือโดยรอบ ขณะมีชิ้นงานทดสอบ..... 61

ง. แสดงแขนกลหมุนข้อต่อศอกยกขึ้น ขณะมีชิ้นงานทดสอบ..... 61

จ. แสดงแขนกลหมุนข้อต่อไหล่ขึ้น ขณะมีชิ้นงานทดสอบ..... 62

4.5 ภาพแสดงการทดสอบความสามารถในการบรรจุชิ้นงานลงท่อ

ก. แสดงแขนกลและชิ้นงานทดสอบทรงกลม ϕ 1.7 ซม., ท่อ ϕ 1.8 ซม..... 63

ข. แสดงแขนกล ขณะจับชิ้นงานทดสอบ..... 63

ค. แสดงแขนกล ขณะจับชิ้นงานทดสอบยกขึ้น..... 64

ง. แสดงแขนกล ขณะจับชิ้นงานทดสอบเข้าหาท่อ..... 64

จ. แสดงแขนกล ขณะจับชิ้นงานทดสอบสู่ปากท่อ..... 65

ฉ. แสดงแขนกลขณะปล่อยชิ้นงานทดสอบ..... 65

4.6 ภาพแสดงการทดสอบความสามารถในการจับชิ้นงานผ่านกล้องโทรทัศน์

ก. แสดงแขนกลขณะทำงานรวมกับกล้องโทรทัศน์..... 66

ข. แสดงชิ้นงานทดสอบทรงกลมบนจอภาพ..... 66

ค. แสดงชิ้นงานทดสอบทรงสี่เหลี่ยมจตุรัสบนจอภาพ..... 67

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

ง. แสดงชิ้นงานทดสอบทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าบนจอภาพ 67

ก.1 โครงสร้างของแขนกลที่พัฒนาขึ้น 74

ก.2 ภาพไอโซเมติกของแขนกล 75

ก.3 ภาพรายละเอียดส่วนประกอบการส่งกำลังแขน 76

ก.4 ภาพรายละเอียดด้านขวาแขนกล 77

ก.5 ภาพรายละเอียดด้านซ้ายแขนกล 78

ก.6 ภาพรายละเอียดด้านหน้าแขนกล 79

ก.7 ภาพรายละเอียดด้านบนแขนกล 80

ก.8 ภาพรายละเอียดฐานรองแขนกล 81

ก.9 ภาพรายละเอียดชิ้นกลหัวไหล่ 82

ก.10 ภาพรายละเอียดชิ้นกลศอก 83

ก.11 ภาพรายละเอียดชิ้นกลมือจับ 84

ก.12 ภาพรายละเอียดมอเตอร์ M_W 85

ก.13 ภาพรายละเอียดมอเตอร์ M_D 86

ก.14 ภาพรายละเอียดมอเตอร์ M_3 87

ก.15 ภาพรายละเอียดมอเตอร์ M_4 87

ก.16 ภาพรายละเอียดมอเตอร์ M_5 88

ก.17 ภาพรายละเอียดมอเตอร์ M_6 88