เอกสารประกอบการสอน

หุ่นยนต์ในระบบงานอุตสาหกรรม

Industrial Robots

ชื่อผู้เรียน: _____

หมู่เรียน: _____

ภาคเรียน/ปีการศึกษา: _____

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

สารบัญ

1 บทที่ 8 การควบคุม การเขียนโปรแกรม และการบำรุงรักษาหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 1

1.1 1. แนวคิดสำคัญของบท . . . 1

1.2 2. ความรู้พื้นฐานก่อนเรียน . . . 1

1.3 3. คำสำคัญประจำบท . . . 2

1.4 4. ผลลัพธ์การเรียนรู้ประจำบท . . . 2

1.4.1 ตาราง 8.1 ความสอดคล้องระหว่างผลลัพธ์ เนื้อหา กิจกรรม และการประเมิน . . . 2

1.5 5. แผนผังเนื้อหาของบท . . . 3

1.6 6. บทนำ . . . 3

1.7 7. เนื้อหาหลัก . . . 4

1.8 7.1 ระบบพิกัดในหุ่นยนต์อุตสาหกรรม . . . 4

1.8.1 7.1.1 เหตุผลที่ต้องมีหลายระบบพิกัด . . . 4

1.8.2 7.1.2 Joint Coordinate System . . . 4

1.8.3 7.1.3 World หรือ Base Coordinate System . . . 4

1.8.4 7.1.4 Tool Coordinate System และ Tool Center Point . . . 5

1.8.5 7.1.5 User Coordinate System หรือ Work Object . . . 5

1.8.6 7.1.6 การแปลงกรอบอ้างอิง . . . 6

1.8.7 ตัวอย่างที่ 8.1 การคำนวณ Offset ของถาดใน User Frame . . . 6

1.8.8 ตาราง 8.2 แนวทางเลือกระบบพิกัด . . . 7

1.9 7.2 วิธีการสอนตำแหน่งหุ่นยนต์ . . . 7

1.9.1 7.2.1 Online Teaching ด้วย Teach Pendant . . . 7

1.9.2 7.2.2 Lead-through Programming . . . 8

1.9.3 7.2.3 Offline Programming . . . 8

1.9.4 ตาราง 8.3 เปรียบเทียบ Online, Lead-through และ Offline Programming . . . 9

1.9.5 7.2.4 การกำหนดคุณภาพของจุดสอน . . . 9

1.9.6 Checklist ก่อนบันทึกจุด . . . 10

1.10 7.3 Motion Commands และการวางแผนเส้นทาง . . . 10

1.10.1 7.3.1 ความแตกต่างระหว่าง Path และ Trajectory . . . 10

1.10.2 7.3.2 Point-to-Point Motion: PTP . . . 10

1.10.3 7.3.3 Linear Motion: LIN . . . 11

1.10.4 7.3.4 Circular Motion: CIRC/ARC . . . 11

1.10.5 7.3.5 Blending, Zone และ CNT . . . 12

1.10.6 ตัวอย่างที่ 8.2 ผลของการหยุดต่อ Cycle Time . . . 12

1.10.7 7.3.6 ปัจจัยที่มีผลต่อ Path Planning . . . 12

1.10.8 ตาราง 8.4 แนวทางเลือก Motion ตามงาน . . . 13

1.11 7.4 โครงสร้างโปรแกรมหุ่นยนต์เบื้องต้น . . . 13

1.11.1 7.4.1 องค์ประกอบของโปรแกรมที่อ่านและบำรุงรักษาได้ . . . 13

1.11.2 7.4.2 ตัวอย่างโปรแกรม Pick and Place แบบ FANUC TP-like . . . 14

1.11.3 7.4.3 ลำดับ Handshake กับ PLC . . . 15
1.11.4 7.4.4 โครงสร้างควบคุมการไหล . . . 15
1.11.5 7.4.5 ตัวอย่างโปรแกรมวางชิ้นงาน 2 × 5 ช่องแบบ Pseudocode . . . 16
1.11.6 7.4.6 การจัดการ Timeout และ Fault . . . 17
1.11.7 7.4.7 การตรวจสอบโปรแกรมก่อนใช้งานจริง . . . 17
1.12 7.5 การบำรุงรักษาหุ่นยนต์อุตสาหกรรม . . . 18
1.12.1 7.5.1 เป้าหมายของการบำรุงรักษา . . . 18
1.12.2 7.5.2 หลักการสร้างแผน PM . . . 18
1.12.3 ตาราง 8.5 แผน Preventive Maintenance ตัวอย่าง . . . 19
1.12.4 7.5.3 Daily Check . . . 19
1.12.5 7.5.4 การตรวจ Bolt และการใช้ Torque . . . 19
1.12.6 7.5.5 Encoder Backup Battery และข้อมูลตำแหน่ง . . . 20
1.12.7 ตัวอย่างที่ 8.3 การวางแผนเปลี่ยน Battery . . . 20
1.12.8 7.5.6 Calibration และ Mastering . . . 20
1.12.9 7.5.7 Zero Position และ Mastering Marks . . . 20
1.12.10 7.5.8 การทวนสอบหลังซ่อมบำรุง . . . 21
1.12.11 7.5.9 ตัวชี้วัดด้านการบำรุงรักษา . . . 21
1.12.12 ตัวอย่างที่ 8.4 การคำนวณ Availability . . . 22
1.13 7.6 การแก้ไขปัญหาเบื้องต้น . . . 22
1.13.1 7.6.1 หลักการ Troubleshooting . . . 22
1.13.2 7.6.2 การจำแนกปัญหา . . . 23
1.13.3 7.6.3 การอ่าน Alarm อย่างเป็นระบบ . . . 23
1.13.4 ตาราง 8.6 ตัวอย่าง Alarm Code ตามขอบเขตที่กำหนด . . . 24
1.13.5 7.6.4 Fault Isolation . . . 24
1.13.6 7.6.5 Safe Recovery . . . 24
1.14 7.7 ความปลอดภัยในการทำงานกับหุ่นยนต์ . . . 25
1.14.1 7.7.1 กรอบมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง . . . 25
1.14.2 7.7.2 ลำดับชั้นการลดความเสี่ยง . . . 25
1.14.3 7.7.3 Operating Modes และการสอน . . . 26
1.14.4 7.7.4 Safety Distance . . . 26
1.14.5 ตัวอย่างที่ 8.5 การคำนวณระยะป้องกันตามข้อมูลโจทย์ . . . 26
1.14.6 7.7.5 Warning Zone และ Protective Zone . . . 27
1.14.7 7.7.6 LOTO สำหรับงานบำรุงรักษา . . . 27
1.14.8 7.7.7 ขั้นตอนก่อนเข้าสู่พื้นที่ Safeguarded Space . . . 27
1.15 7.8 เปรียบเทียบภาษาโปรแกรมและซอฟต์แวร์จากผู้ผลิต . . . 27
1.15.1 ตาราง 8.7 ภาษาโปรแกรมหุ่นยนต์จากผู้ผลิตชั้นนำ . . . 28
1.15.2 ตาราง 8.8 แนวคิดที่เทียบเคียงข้ามผู้ผลิต . . . 28
1.16 7.9 กิจกรรมปฏิบัติการประจำบท . . . 28
1.17 กิจกรรมปฏิบัติการที่ 8-1: การสอนตำแหน่งและเขียนโปรแกรม Pick-and-Place . . . 28
1.17.1 1. วัตถุประสงค์ . . . 28

1.17.2 2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 29
1.17.3 3. อุปกรณ์ เครื่องมือ และซอฟต์แวร์ 29
1.17.4 4. แผนภาพหรือชุดทดลอง 29
1.17.5 5. ข้อควรระวังด้านความปลอดภัย 29
1.17.6 6. ขั้นตอนการปฏิบัติ 29
1.17.7 7. ตารางบันทึกผล 30
1.17.8 8. การคำนวณและวิเคราะห์ผล 30
1.17.9 9. การเปรียบเทียบผลจริงกับทฤษฎีหรือแบบจำลอง 31
1.17.10 10. คำถามหลังการทดลอง 31
1.17.11 11. เกณฑ์การประเมิน 31
1.18 กิจกรรมปฏิบัติการที่ 8-2: Daily Check และการจัดทำแผน Preventive Maintenance 31
1.18.1 1. วัตถุประสงค์ 31
1.18.2 2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 31
1.18.3 3. อุปกรณ์ เครื่องมือ และซอฟต์แวร์ 31
1.18.4 4. แผนภาพหรือวงจร 31
1.18.5 5. ข้อควรระวังด้านความปลอดภัย 32
1.18.6 6. ขั้นตอนการปฏิบัติ 32
1.18.7 7. ตารางบันทึกผล 32
1.18.8 8. การคำนวณและวิเคราะห์ผล 32
1.18.9 9. การเปรียบเทียบผลจริงกับทฤษฎีหรือแบบจำลอง 33
1.18.10 10. คำถามหลังการทดลอง 33
1.18.11 11. เกณฑ์การประเมิน 33
1.19 กิจกรรมปฏิบัติการที่ 8-3: การอ่าน Alarm และ Troubleshooting ด้วยสถานการณ์จำลอง 33
1.19.1 1. วัตถุประสงค์ 33
1.19.2 2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 33
1.19.3 3. อุปกรณ์ เครื่องมือ และซอฟต์แวร์ 33
1.19.4 4. แผนภาพหรือวงจร 33
1.19.5 5. ข้อควรระวังด้านความปลอดภัย 34
1.19.6 6. ขั้นตอนการปฏิบัติ 34
1.19.7 7. ตารางบันทึกผล 34
1.19.8 8. การคำนวณและวิเคราะห์ผล 34
1.19.9 9. การเปรียบเทียบผลจริงกับทฤษฎีหรือแบบจำลอง 35
1.19.10 10. คำถามหลังการทดลอง 35
1.19.11 11. เกณฑ์การประเมิน 35
1.20 8. ความเข้าใจผิดที่พบบ่อย 35
1.20.1 8.1 “จุดปลายเหมือนกัน จึงใช้ PTP หรือ LIN ก็เหมือนกัน” 35
1.20.2 8.2 “TCP คือปลายโลหะของ Tool เสมอ” 35
1.20.3 8.3 “User Frame เปลี่ยนแล้วทุกจุดจะถูกต้องโดยอัตโนมัติ” 35
1.20.4 8.4 “CNT 100 หมายถึงหุ่นยนต์ผ่านจุดด้วยความเร็วสูงสุดเสมอ” 35
1.20.5 8.5 “Simulation ไม่ชน แปลว่าระบบจริงไม่ชน” 36

1.20.6 8.6 “Emergency Stop ใช้แทน LOTO ได้” . . . 36
1.20.7 8.7 “Alarm หายหลัง Reset แปลว่าปัญหาจบแล้ว” . . . 36
1.20.8 8.8 “ต้องเติม Grease ทุก 3 เดือนสำหรับหุ่นยนต์ทุกตัว” . . . 36
1.20.9 8.9 “เปลี่ยน Servo Motor แล้วสอน TCP ใหม่ก็เพียงพอ” . . . 36
1.20.10 8.10 “Cobot ปลอดภัยโดยไม่ต้องมีการประเมินความเสี่ยง” . . . 36
1.21 9. การประยุกต์ใช้ในงานจริง . . . 36
1.21.1 9.1 งานเชื่อมอาร์ก . . . 36
1.21.2 9.2 งานหยิบวางจาก Conveyor . . . 36
1.21.3 9.3 งาน Machine Tending . . . 37
1.21.4 9.4 งานพ่นสีหรือเดินกาว . . . 37
1.21.5 9.5 งานประกอบ . . . 37
1.21.6 9.6 การบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ . . . 37
1.22 10. สรุปท้ายบท . . . 37
1.23 11. คำถามทบทวนท้ายบท . . . 37
1.24 12. แบบฝึกหัดท้ายบท . . . 38
1.24.1 12.1 ระดับพื้นฐาน . . . 38
1.24.2 12.2 ระดับวิเคราะห์ . . . 39
1.24.3 12.3 ระดับประยุกต์ใช้ . . . 39
1.25 12.4 แนวคำตอบสำหรับผู้สอน . . . 40
1.25.1 เฉลยข้อ 1 . . . 40
1.25.2 เฉลยข้อ 2 . . . 40
1.25.3 เฉลยข้อ 3 . . . 40
1.25.4 เฉลยข้อ 4 . . . 40
1.25.5 เฉลยข้อ 5 . . . 40
1.25.6 เฉลยข้อ 6 . . . 41
1.25.7 เฉลยข้อ 7 . . . 41
1.25.8 เฉลยข้อ 8 . . . 42
1.25.9 เฉลยข้อ 9 . . . 42
1.25.10 เฉลยข้อ 10 . . . 42
1.25.11 เฉลยข้อ 11 . . . 42
1.25.12 เฉลยข้อ 12 . . . 43
1.25.13 เฉลยข้อ 13 . . . 43
1.26 13. ข้อเสนอแนะสำหรับผู้สอน . . . 44
1.26.1 13.1 ลำดับการสอนที่แนะนำ . . . 44
1.26.2 13.2 จุดที่ผู้เรียนมักมีปัญหา . . . 44
1.26.3 13.3 วิธีปรับระดับกิจกรรมตามพื้นฐานผู้เรียน . . . 45
1.26.4 13.4 การประเมินระหว่างเรียน . . . 45
1.26.5 13.5 Rubric ภาพรวมของบท . . . 46
1.27 14. สื่อและแหล่งเรียนรู้เพิ่มเติม . . . 46
1.27.1 14.1 สื่อจากผู้ผลิต . . . 46

1.27.2 14.2 แนวทางใช้สื่อในชั้นเรียน 46
1.28 15. เอกสารอ้างอิง 46
1.28.1 15.1 หนังสือและตำรา 46
1.28.2 15.2 มาตรฐานความปลอดภัย 47
1.28.3 15.3 คู่มือและเอกสารทางเทคนิคจากผู้ผลิต 47
1.28.4 15.4 หน่วยงานด้านความปลอดภัย 47
1.28.5 15.5 หมายเหตุเกี่ยวกับคู่มือที่ผู้ใช้ระบุ 47
1.29 ภาคผนวก ก แบบฟอร์ม Daily Check 48
1.30 ภาคผนวก ข แบบฟอร์ม PM Record 48
1.31 ภาคผนวก ค แบบฟอร์ม Troubleshooting Report 48
1.31.1 1. ข้อมูลเหตุการณ์ 49
1.31.2 2. การทำให้ระบบปลอดภัย 49
1.31.3 3. Fault Isolation 49
1.31.4 4. ผลสรุป 49
1.32 ภาคผนวก ง Checklist ตรวจโปรแกรมก่อน Automatic Mode 49
1.33 ภาคผนวก จ Prompt ภาพประกอบรวม 50
1.33.1 รูปที่ 8.1 Coordinate Systems 50
1.33.2 รูปที่ 8.2 PTP vs LIN 50
1.33.3 รูปที่ 8.3 Zone/CNT Blending 50
1.33.4 รูปที่ 8.4 PM Schedule 50
1.33.5 รูปที่ 8.5 Mastering Marks 51
1.33.6 รูปที่ 8.6 Safety Zone 51
1.33.7 รูปที่ 8.7 Troubleshooting Flowchart 51

1 บทที่ 8 การควบคุม การเขียนโปรแกรม และการบำรุงรักษาหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

ชื่อบทภาษาอังกฤษ: Automation Systems and Industrial Robot Applications
รายวิชา: หุ่นยนต์ในระบบงานอุตสาหกรรม (Industrial Robots)
รหัสวิชา: 5574506
หน่วยกิต: 3(1-4-4)

1.1 1. แนวคิดสำคัญของบท

หุ่นยนต์อุตสาหกรรมจะสร้างคุณค่าให้กระบวนการผลิตได้ต่อเมื่อผู้ใช้งานสามารถกำหนดตำแหน่งและทิศทางของเครื่องมือ วางแผนเส้นทาง เขียนลำดับการทำงาน เชื่อมต่อสัญญาณกับอุปกรณ์ภายนอก และตรวจสอบความปลอดภัยได้อย่างเป็นระบบ การเขียนโปรแกรมหุ่นยนต์จึงไม่ใช่เพียงการบันทึกจุดแล้วสั่งให้เคลื่อนที่ แต่เป็นการประสานความรู้ด้านระบบพิกัด จลนศาสตร์ การควบคุมการเคลื่อนที่ ลอจิก โปรแกรม PLC อุปกรณ์จับยึด และข้อกำหนดด้านความปลอดภัย

ในอีกด้านหนึ่ง หุ่นยนต์อุตสาหกรรมเป็นสินทรัพย์ที่มีอายุใช้งานยาวนาน โดยทั่วไปอาจถูกใช้งานต่อเนื่องเป็นเวลาหลายปีภายใต้สภาพโหลด รอบการทำงาน และสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance: PM) การติดตามสภาพ (Condition Monitoring) การจัดเก็บประวัติ Alarm และการทวนสอบ Calibration จึงมีผลโดยตรงต่อความพร้อมใช้งาน ความแม่นยำ คุณภาพผลิตภัณฑ์ และความปลอดภัย

สาระสำคัญของบทประกอบด้วย 7 แกนหลัก ได้แก่

1. การเลือกและใช้งานระบบพิกัดของหุ่นยนต์
2. การสอนตำแหน่งด้วย Teach Pendant และการเขียนโปรแกรมแบบ Offline
3. การเลือก Motion Command และการวางแผนเส้นทาง
4. การสร้างโปรแกรม Motion, I/O และ Logic ที่ตรวจสอบได้
5. การจัดทำแผน PM และบันทึกประวัติการบำรุงรักษา
6. การวิเคราะห์ Alarm และแก้ไขปัญหาอย่างเป็นระบบ
7. การควบคุมความเสี่ยงตามมาตรฐานความปลอดภัยของหุ่นยนต์และเครื่องจักร

1.2 2. ความรู้พื้นฐานก่อนเรียน

ก่อนเรียนบทนี้ นักศึกษาควรมีความรู้หรือทักษะดังต่อไปนี้

- โครงสร้างหุ่นยนต์อุตสาหกรรมแบบหลายแกน ข้อต่อ และแกนการเคลื่อนที่
- ความหมายของ Position, Orientation, Joint และ End Effector
- หลักการพื้นฐานของ Forward Kinematics และ Inverse Kinematics
- การทำงานของ Servo Motor, Encoder, Brake และ Robot Controller
- สัญญาณ Digital Input/Output และหลักการ Interlock
- หลักการใช้ Emergency Stop, Safety Gate และ Enabling Device
- พื้นฐานการอ่าน Wiring Diagram และการตรวจสอบ Connector
- การใช้หน่วย SI เช่น มิลลิเมตร องศา วินาที นิวตัน และกิโลกรัม

หากผู้เรียนยังไม่เคยใช้หุ่นยนต์จริง ควรเริ่มจากซอฟต์แวร์จำลองหรือโหมดฝึกอบรมของ Controller ก่อนเข้าสู่การ Jog และการทดสอบโปรแกรมบนหุ่นยนต์จริง

1.3 3. คำสำคัญประจำบท

คำศัพท์ภาษาไทย	คำศัพท์ภาษาอังกฤษ	ความหมายโดยย่อ
ระบบพิกัดข้อต่อ	Joint Coordinate System	ระบบพิกัดที่อธิบายตำแหน่งด้วยค่ามุมหรือระยะของแต่ละ Joint
ระบบพิกัดฐาน/โลก	Base/World Coordinate System	ระบบพิกัดคาร์ทีเซียนที่อ้างอิงกับฐานหรือกรอบอ้างอิงหลักของหุ่นยนต์
ระบบพิกัดเครื่องมือ	Tool Coordinate System	ระบบพิกัดที่ผูกกับเครื่องมือ โดยจุดกำเนิดมักอยู่ที่ TCP
ระบบพิกัดผู้ใช้	User/Work Object Coordinate System	ระบบพิกัดที่ผู้ใช้กำหนดให้สัมพันธ์กับ Fixture หรือชิ้นงาน
จุดศูนย์กลางเครื่องมือ	Tool Center Point: TCP	จุดอ้างอิงของ End Effector ที่ใช้คำนวณตำแหน่งและเส้นทาง
การสอนตำแหน่ง	Teaching	การนำหุ่นยนต์ไปยัง Pose ที่ต้องการและบันทึกเป็นจุดในโปรแกรม
แผงสอน	Teach Pendant	อุปกรณ์ควบคุมสำหรับ Jog ตั้งค่า สอนตำแหน่ง และทดสอบโปรแกรม
การนำแขนด้วยมือ	Lead-through/Hand Guiding	การนำหุ่นยนต์ไปตามท่าหรือเส้นทางด้วยแรงจากผู้ใช้ในโหมดที่รองรับ
การเขียนโปรแกรมนอกสายการผลิต	Offline Programming: OLP	การสร้างและจำลองโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์โดยไม่ครอบครองหุ่นยนต์จริง
การเคลื่อนที่แบบจุดต่อจุด	Point-to-Point: PTP	การเคลื่อนที่ที่วางแผนใน Joint Space โดยไม่รับประกันเส้นทาง TCP
การเคลื่อนที่เชิงเส้น	Linear Motion: LIN	การเคลื่อนที่ที่ควบคุมให้ TCP เคลื่อนเป็นเส้นตรงใน Cartesian Space
การเคลื่อนที่เป็นวงโค้ง	Circular Motion: CIRC	การเคลื่อนที่ที่ให้ TCP ผ่านจุดกลางและจุดปลายเป็นส่วนโค้ง
การกลมมุม	Blending/Zone/CNT	การไม่หยุดสนิทที่จุดผ่านเพื่อให้เส้นทางต่อเนื่องและลด Cycle Time
ตำแหน่งละเอียด	Fine Point	จุดที่กำหนดให้หุ่นยนต์เข้าใกล้เป้าหมายตามเกณฑ์ก่อนทำคำสั่งถัดไป
สัญญาณประสานงาน	Handshake Signal	ชุดสัญญาณ Request, Ready, Busy, Complete และ Fault ระหว่างอุปกรณ์
การทำ Mastering	Mastering	การกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่าตำแหน่ง Encoder กับตำแหน่งอ้างอิงของแกน
การสอบเทียบ	Calibration	การตรวจสอบและปรับความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ระบบรายงานกับตำแหน่งจริง
การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน	Preventive Maintenance: PM	การบำรุงรักษาตามเวลา ชั่วโมงทำงาน หรือรอบการทำงานก่อนเกิดความขัดข้อง
การบำรุงรักษาตามสภาพ	Condition-based Maintenance	การบำรุงรักษาเมื่อข้อมูลสภาพบ่งชี้แนวโน้มเสื่อมสภาพ
การแก้ไขปัญหา	Troubleshooting	กระบวนการระบุสาเหตุ ทดสอบสมมติฐาน แก้ไข และยืนยันผลอย่างเป็นระบบ
การล็อกและติดป้าย	Lockout/Tagout: LOTO	การแยกแหล่งพลังงาน ล็อกอุปกรณ์ และติดป้ายก่อนงานซ่อมบำรุง
ระยะป้องกัน	Safeguard Separation Distance	ระยะขั้นต่ำระหว่างอุปกรณ์ตรวจจับ/รั้วกับอันตรายตามเวลาหยุดและการเข้าถึง
เขตเตือน	Warning Zone	เขตที่ระบบแจ้งเตือนหรือจำกัดพฤติกรรมก่อนถึงเขตอันตราย
เขตป้องกัน	Protective Zone	เขตที่การบุกรุกต้องทำให้เกิด Protective Stop หรือมาตรการที่กำหนด
ความพร้อมใช้งาน	Availability	สัดส่วนเวลาที่ระบบพร้อมทำงานเทียบกับเวลาที่วางแผนให้ทำงาน

1.4 4. ผลลัพธ์การเรียนรู้ประจำบท

เมื่อเรียนจบบทนี้ นักศึกษาสามารถ...

1. **อธิบายและเลือกใช้** Joint, World/Base, Tool และ User/Work Object Coordinate System ให้เหมาะกับภารกิจได้
2. **สอนตำแหน่งและทวนสอบ** TCP, User Frame และจุดทำงานด้วย Teach Pendant ในโหมดที่ปลอดภัยได้
3. **เขียนและตรวจสอบ** โปรแกรมหุ่นยนต์เบื้องต้นที่ใช้ Motion, I/O, Logic, Subroutine และ Interlock ได้
4. **วิเคราะห์และเลือก** PTP, Linear, Circular และ Blending ให้เหมาะกับความแม่นยำ คุณภาพเส้นทาง และ Cycle Time ได้
5. **จัดทำและประเมิน** แผน Preventive Maintenance พร้อมแบบบันทึกและเกณฑ์ติดตามสภาพได้
6. **วิเคราะห์ Alarm และดำเนินการ Troubleshooting** โดยไม่สร้างความเสี่ยงเพิ่มเติมแก่บุคลากรหรืออุปกรณ์ได้
7. **ปฏิบัติตาม** หลัก Safeguarding, Reduced-speed Teaching และ LOTO ในการใช้งานและบำรุงรักษาหุ่นยนต์ได้

1.4.1 ตาราง 8.1 ความสอดคล้องระหว่างผลลัพธ์ เนื้อหา กิจกรรม และการประเมิน

CLO	เนื้อหาที่เกี่ยวข้อง	กิจกรรมการเรียนรู้	วิธีประเมิน	หลักฐานการเรียนรู้
CLO1	ระบบพิกัดและการแปลงกรอบอ้างอิง	วิเคราะห์ภาพ Coordinate และเลือกกรอบอ้างอิง	แบบทดสอบสั้นและคำถามปากเปล่า	ตารางเลือก Coordinate พร้อมเหตุผล
CLO2	TCP Calibration, User Frame, Teaching	ใบงาน 8-1 สอนตำแหน่ง 5 จุด	สังเกตการปฏิบัติและตรวจจุด	Point List, ค่า Frame และ Checklist
CLO3	Motion, I/O, Logic, Handshake	เขียน Pick-and-Place และ Dry Run	ตรวจโปรแกรมและทดสอบใน T1	ไฟล์โปรแกรมและผลทดสอบ
CLO4	PTP, LIN, CIRC, FINE, CNT/Zone	เปรียบเทียบเส้นทางและ Cycle Time	วิเคราะห์กรณีศึกษา	ตารางเลือก Motion และค่าปรับ
CLO5	PM Schedule, Record, Calibration	ใบงาน 8-2 ตรวจสภาพและวางแผน PM	ตรวจแบบฟอร์มและ Rubric	Daily Checklist และ PM Record
CLO6	Alarm, Root Cause, Verification	ใบงาน 8-3 จำลอง Alarm อย่างปลอดภัย	ประเมินขั้นตอนและรายงาน	Troubleshooting Report
CLO7	ISO 10218, ISO 13855, LOTO	Pre-job Briefing และ Safety Walkdown	Practical Safety Check	แบบประเมินความปลอดภัยและ LOTO Checklist

1.5 5. แผนผังเนื้อหาของบท

ระบบพิกัดและ TCP

|

การ Jog และการสอนตำแหน่ง

|

Motion Command และ Path Planning

|

โครงสร้างโปรแกรม Motion–I/O–Logic

|

Simulation / Dry Run / Validation

|

การใช้งานจริงและการเก็บข้อมูล

|

Preventive Maintenance และ Calibration

|

Troubleshooting และ Safe Recovery

|

Safeguarding, Risk Assessment และ LOTO

ลำดับดังกล่าวสะท้อนวงจรชีวิตของโปรแกรมหุ่นยนต์ ตั้งแต่การกำหนดกรอบอ้างอิง การสร้างเส้นทาง การทดสอบ การใช้งาน การบำรุงรักษา ไปจนถึงการกู้คืนระบบหลังเกิดความผิดปกติ

1.6 6. บทนำ

ในสายการผลิตสมัยใหม่ หุ่นยนต์อุตสาหกรรมมักทำงานร่วมกับ Conveyor, Vision System, PLC, Safety PLC, Gripper, Welding Power Source, Positioner และเครื่องจักรอื่น โปรแกรมหุ่นยนต์จึงต้องตอบคำถามสำคัญอย่างน้อย 5 ข้อ ได้แก่

1. **หุ่นยนต์ต้องไปที่ใด** — กำหนดด้วย Position, Orientation และ Coordinate Frame
2. **ต้องไปอย่างไร** — เลือก PTP, Linear, Circular, Speed, Acceleration และ Blending
3. **ไปเมื่อใด** — กำหนดด้วย I/O, Interlock, Wait, Timer และ State ของกระบวนการ
4. **เมื่อผิดปกติจะทำอย่างไร** — กำหนด Alarm Handling, Recovery Position และเงื่อนไข Restart
5. **จะรักษาความปลอดภัยและความพร้อมใช้งานอย่างไร** — ใช้ Safeguarding, PM, Calibration, Backup และ LOTO

ตัวอย่างเช่น งานหยิบชิ้นงานจาก Conveyor ไม่สามารถใช้เพียงคำสั่งเคลื่อนที่ไปยังจุด Pick ได้ โปรแกรมต้องตรวจว่ามีชิ้นงานจริง Gripper พร้อมทำงาน พื้นที่ปลายทางว่าง และระบบ Safety อยู่ในสถานะอนุญาต เมื่อตรวจครบแล้วจึงเคลื่อนที่ไปยังจุด Approach ลดความเร็วเข้าสู่จุด Pick สั่งจับ รอสัญญาณ Gripper Confirm ถอยออกตามแนวปลอดภัย และส่งสถานะ Complete ให้ PLC หากสัญญาณยืนยันไม่มาในเวลาที่กำหนด โปรแกรมต้องหยุดอย่างควบคุม แจ้ง Alarm และไม่เคลื่อนต่อโดยคาดเดาว่าจับชิ้นงานสำเร็จ

แนวคิดสำคัญจึงอยู่ที่การทำให้ **ตำแหน่ง เส้นทาง ลอจิก การบำรุงรักษา และความปลอดภัย** เป็นระบบเดียวกัน ไม่ใช่ส่วนแยกจากกัน

1.7 7. เนื้อหาหลัก

1.8 7.1 ระบบพิกัดในหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

1.8.1 7.1.1 เหตุผลที่ต้องมีหลายระบบพิกัด

หุ่นยนต์ 6 แกนสามารถอธิบายท่าทางเดียวกันได้หลายรูปแบบ เช่น อธิบายด้วยมุม Joint ทั้งหก หรืออธิบายด้วยพิกัด X, Y, Z และมุม Orientation ของ TCP เมื่อผู้ปฏิบัติงาน Jog หุ่นยนต์ สิ่งที่ต้องการควบคุมอาจเป็น “หมุนเฉพาะแกน 2” “เลื่อนไปทางแกน Z ของฐาน” “เดินหัวเชื่อมไปข้างหน้าตามแกนของ Torch” หรือ “เลื่อนตามแนวขอบ Fixture” การมี Coordinate System หลายแบบทำให้คำสั่งสอดคล้องกับเจตนาของงาน

1.8.2 7.1.2 Joint Coordinate System

Joint Coordinate System กำหนดสถานะของหุ่นยนต์ด้วยเวกเตอร์ค่าข้อต่อ

$$\mathbf{q} = [q_1, q_2, \ldots, q_n]^T$$

สำหรับหุ่นยนต์หมุน 6 แกน มักเขียนเป็น

$$\mathbf{q} = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6]^T$$

โดย θ_i คือมุมของ Joint ที่ i หน่วยองศาหรือเรเดียนตามระบบ Controller

ลักษณะสำคัญ

- ปุ่ม Jog แต่ละปุ่มสั่งแกนใดแกนหนึ่งหรือหลายแกนตามโหมดของ Controller
- เหมาะสำหรับหลบสิ่งกีดขวาง แก้ท่าทางใกล้ Singularity และกลับสู่ท่าอ้างอิง
- เส้นทาง TCP ระหว่างจุดเริ่มและจุดปลายอาจเป็นเส้นโค้งที่คาดเดาได้ยาก
- การเคลื่อน Joint หนึ่งแกนอาจทำให้ TCP เคลื่อนที่เป็นระยะมาก โดยเฉพาะแกนใกล้ฐาน

ข้อควรระวัง: การ Jog ใน Joint Coordinate ต้องมองทั้งแขน ไม่ใช่มองเฉพาะ TCP เพราะส่วน Elbow, Wrist หรือสาย Dress Pack อาจเข้าใกล้โครงสร้างอื่นก่อนที่ TCP จะถึงสิ่งกีดขวาง

1.8.3 7.1.3 World หรือ Base Coordinate System

World/Base Coordinate System เป็นกรอบพิกัดคาร์ทีเซียนที่ผูกกับฐานหุ่นยนต์หรือกรอบหลักของเซลล์ ตำแหน่ง TCP เขียนได้เป็น

$$\mathbf{x} = [x, y, z, \alpha, \beta, \gamma]^T$$

โดย x, y, z เป็นตำแหน่ง หน่วยมิลลิเมตรหรือเมตร และ α, β, γ เป็นตัวแทน Orientation ซึ่งรูปแบบจริงอาจเป็น Euler Angle, Roll–Pitch–Yaw, Quaternion หรือ Axis–Angle ตามผู้ผลิต

เหมาะสำหรับ

- เคลื่อนที่ขึ้น–ลงหรือซ้าย–ขวาตามโครงสร้างเซลล์
- ตรวจสอบ Working Envelope และตำแหน่งสัมพันธ์กับรั้วหรือเครื่องจักร
- การประสานหลายอุปกรณ์เมื่อทุกอุปกรณ์อ้างอิงกรอบกลางเดียวกัน

ข้อจำกัด: หาก Fixture ถูกย้าย การแก้จุดทุกจุดใน World Frame อาจใช้เวลามาก จึงควรสร้าง User Frame ให้ผูกกับ Fixture

1.8.4 7.1.4 Tool Coordinate System และ Tool Center Point

Tool Coordinate System ผูกกับ End Effector จุดกำเนิดมักกำหนดที่ **Tool Center Point (TCP)** เช่น ปลายลวดเชื่อม จุดกึ่งกลางหัวพ่น หรือจุดกึ่งกลางระหว่างนิ้ว Gripper

การ Jog ใน Tool Coordinate มีประโยชน์อย่างมากเมื่อผู้ปฏิบัติงานต้องการ

- เดินหัวเชื่อมตามแกนของ Torch
- เลื่อนหัวเจาะเข้า–ออกตามแนวแกนดอกสว่าน
- ถอย Gripper ออกจากชิ้นงานตามแนวปลอดภัย
- ปรับ Standoff Distance ของหัวพ่นหรือกล้อง

หาก TCP กำหนดผิด การเคลื่อนที่ Linear อาจทำให้จุดที่ต้องการใช้งานจริงไม่เดินตามเส้นตรง แม้ Controller จะคำนวณเส้นทางของ TCP ที่กำหนดไว้ได้ถูกต้องก็ตาม

แนวทาง TCP Calibration ที่พบบ่อย

1. **Three-point/Four-point method:** นำปลายเครื่องมือแตะจุดอ้างอิงเดียวกันด้วย Orientation หลายค่าเพื่อหาตำแหน่ง TCP
2. **Six-point method:** ใช้หลาย Pose เพื่อคำนวณทั้งตำแหน่งและ Orientation ของ Tool Frame
3. **Direct entry:** ป้อนค่าจาก CAD หรือ Drawing เมื่อมิติและการติดตั้งมีความน่าเชื่อถือ
4. **External measurement:** ใช้ Jig, Probe, Laser Tracker หรือ Metrology System ในงานที่ต้องการความแม่นยำสูง

1.8.5 7.1.5 User Coordinate System หรือ Work Object

User Frame หรือ Work Object เป็นกรอบพิกัดที่ผูกกับ Fixture, Pallet, Table หรือชิ้นงาน โปรแกรมที่สร้างจุดสัมพันธ์กับกรอบนี้สามารถย้ายตาม Fixture ได้โดยแก้ค่ากรอบเพียงชุดเดียว แทนการแก้ทุกจุด

ตัวอย่างเช่น โปรแกรมวางชิ้นงานลงถาด 2 × 5 ช่อง สามารถกำหนดจุดเริ่มต้น P_{00} และระยะ Pitch ตามแกนของ User Frame ดังนี้

$$\mathbf{p}_{ij} = \mathbf{p}_{00} + i\Delta x\hat{\mathbf{x}}_U + j\Delta y\hat{\mathbf{y}}_U$$

เมื่อ

- i คือดัชนีคอลัมน์
- j คือดัชนีแถว
- Δx คือระยะห่างคอลัมน์
- Δy คือระยะห่างแถว
- $\hat{\mathbf{x}}_U, \hat{\mathbf{y}}_U$ คือเวกเตอร์หน่วยของ User Frame

หากถาดถูกเลื่อนหรือหมุน สามารถสอน User Frame ใหม่โดยไม่ต้องแก้สูตร Offset ของทุกช่อง

1.8.6 7.1.6 การแปลงกรอบอ้างอิง

ความสัมพันธ์ระหว่างกรอบพิกัดนิยมเขียนด้วย Homogeneous Transformation Matrix ขนาด 4×4

$$ {}^{A}\mathsf{T}_{B} = \begin{bmatrix} {}^{A}\mathsf{R}_{B} & {}^{A}\mathsf{p}_{B} \\ \mathsf{0}^{T} & 1 \end{bmatrix} $$

โดย

- ${}^{A}\mathsf{R}_{B}$ คือเมทริกซ์การหมุนของกรอบ B เมื่อมองจากกรอบ A
- ${}^{A}\mathsf{p}_{B}$ คือเวกเตอร์ตำแหน่งจุดกำเนิดของกรอบ B เมื่อมองจากกรอบ A

หากทราบตำแหน่ง User Frame เทียบกับ Base และทราบ TCP เทียบกับ User Frame จะหาตำแหน่ง TCP เทียบกับ Base ได้จาก

$$ {}^{B}\mathsf{T}_{TCP} = {}^{B}\mathsf{T}_{U}\,{}^{U}\mathsf{T}_{TCP} $$

สมการนี้อธิบายเหตุผลที่การแก้ ${}^{B}\mathsf{T}_{U}$ เพียงค่าเดียวสามารถย้ายจุดทั้งหมดที่สอนใน User Frame ไปพร้อมกัน

สมมติฐานและข้อจำกัด

- กรอบทุกกรอบต้องกำหนดตาม Convention เดียวกับ Controller
- ลำดับการหมุนมีผลต่อค่า Orientation
- ความคลาดเคลื่อนของ Tool Frame และ User Frame จะสะสมเข้าสู่ตำแหน่ง TCP
- การแปลงกรอบถูกต้องทางคณิตศาสตร์ไม่ได้รับประกันว่าหุ่นยนต์จะเข้าถึง Pose ได้หรือไม่ชนสิ่งกีดขวาง

1.8.7 ตัวอย่างที่ 8.1 การคำนวณ Offset ของถาดใน User Frame

ตัวอย่างเพิ่มเติมเพื่อการเรียนรู้

ถาดมี 2 แถว 5 คอลัมน์ จุดแรกอยู่ที่ $(x, y, z) = (100, 50, 20)$ mm ใน User Frame ระยะห่างคอลัมน์ 40 mm และระยะห่างแถว 60 mm จงหาตำแหน่งช่องแถวที่ 2 คอลัมน์ที่ 4 โดยกำหนดดัชนีเริ่มที่ศูนย์

วิเคราะห์โจทย์

- แถวที่ 2 ให้ $j = 1$
- คอลัมน์ที่ 4 ให้ $i = 3$
- $\Delta x = 40$ mm และ $\Delta y = 60$ mm

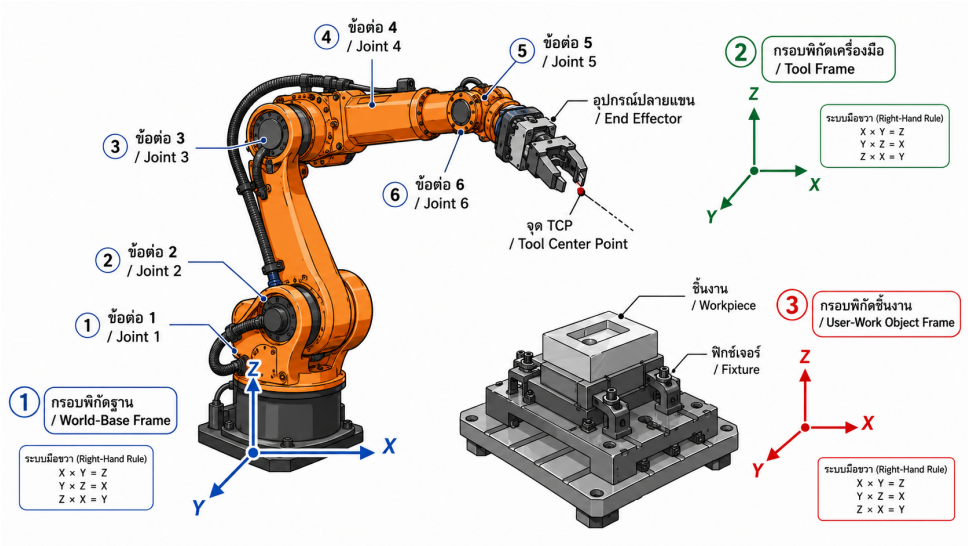
$$ \mathsf{p}_{31} = \begin{bmatrix} 100 \\ 50 \\ 20 \end{bmatrix} + 3 \begin{bmatrix} 40 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + 1 \begin{bmatrix} 0 \\ 60 \\ 0 \end{bmatrix} $$

ดังนั้น

$$ \mathsf{p}_{31} = \begin{bmatrix} 220 \\ 110 \\ 20 \end{bmatrix} \text{ mm} $$

ตรวจสอบความสมเหตุสมผล: คอลัมน์เพิ่ม 3 ช่วงจึงเพิ่ม 120 mm และแถวเพิ่ม 1 ช่วงจึงเพิ่ม 60 mm ค่า z คงเดิม

งานที่ต้องทำ	Coordinate ที่เหมาะสม	เหตุผล
หลบ Elbow ออกจากโครงสร้าง	Joint	ควบคุมแกนเฉพาะและเห็นผลต่อท่าทางแขน
ยก TCP ขึ้นในแนวดิ่งของเซลล์	World/Base	เคลื่อนตามแกนคงที่ของพื้นที่ทำงาน
เดินหัวเชื่อมเข้า–ออกตามแนว Torch	Tool	แกนเคลื่อนที่ติดกับ Orientation ของเครื่องมือ
สอนจุดบน Fixture ที่อาจถูกย้าย	User/Work Object	แก้ Frame แทนการแก้ทุก Point
กลับท่า Home ที่กำหนดเป็นค่าข้อต่อ	Joint	ท่าหุ่นยนต์กำหนดชัดเจนด้วยค่า Joint
วาง Pattern บนถาด	User + Offset	สร้างจุดจาก Pitch ของถาดได้ง่าย



รูปที่ 1: ระบบพิกัด World, Tool และ User บนหุ่นยนต์ 6 แกน

1.8.8 ตาราง 8.2 แนวทางเลือกระบบพิกัด

1.9 7.2 วิธีการสอนตำแหน่งหุ่นยนต์

1.9.1 7.2.1 Online Teaching ด้วย Teach Pendant

Online Teaching คือการใช้ Controller และหุ่นยนต์จริงเพื่อสอนจุดหรือปรับโปรแกรมโดยตรง วิธีนี้ให้ข้อมูลจากระบบจริง เช่น Reachability, Joint Limit, Cable Routing, Fixture Clearance และพฤติกรรมของ End Effector แต่ทำให้เซลล์ไม่สามารถผลิตได้ในช่วงที่สอนและมีความเสี่ยงจากการเคลื่อนที่จริง

ลำดับการสอนตำแหน่งที่แนะนำมีดังนี้

1. **ตรวจสอบพื้นที่และสถานะระบบ** — ไม่มีบุคคลหรือสิ่งของที่ไม่เกี่ยวข้องในพื้นที่ กำหนดผู้ควบคุม Teach Pendant เพียงคนเดียว
2. **เลือก Operating Mode ที่เหมาะสม** — ใช้โหมด Manual/Teach แบบลดความเร็วตามข้อกำหนดของระบบฝึก
3. **ตรวจสอบ Enabling Device** — ผู้สอนต้องเข้าใจตำแหน่งปล่อย กดกึ่งกลาง และกดสุดของอุปกรณ์
4. **เลือก Tool และ User Frame** — ตรวจหมายเลข Tool/User ที่ Active ก่อน Jog
5. **เลือก Coordinate System** — Joint, World, Tool หรือ User ตามเจตนาการเคลื่อนที่
6. **เริ่มด้วยความเร็วต่ำ** — โดยเฉพาะเมื่ออยู่ใกล้ Fixture, Tool, Cable หรือ Singularity
7. **Jog ไปยัง Approach Position** — ใช้จุดเหนือหรือห่างจากชิ้นงานก่อนเข้าสู่ตำแหน่งทำงาน
8. **เข้าสู่ Work Position อย่างควบคุม** — ใช้ Tool หรือ User Coordinate เพื่อรักษาทิศทางที่เข้าใจง่าย
9. **บันทึก Point** — ตั้งชื่อหรือหมายเลขให้สื่อความหมาย เช่น P_PICK_APP, P_PICK, P_PLACE_APP

10. **ตรวจสอบค่าที่บันทึก** — Frame, Tool, Configuration, Turn Number และ Motion Type
11. **ทดสอบแบบ Step/Single Block** — เริ่มจากความเร็ว Override ต่ำและไม่มีชิ้นงาน
12. **บันทึก Backup** — หลังการแก้โปรแกรมหรือ Frame ที่ผ่านการทวนสอบ

แนวคิด Approach–Process–Retreat

การสอนจุดหนึ่งงานควรแยกอย่างน้อยเป็น 3 กลุ่ม

- **Approach Point:** จุดปลอดภัยก่อนเข้าใกล้ชิ้นงาน
- **Process Point:** จุดที่ทำงานจริง เช่น Pick, Weld Start หรือ Inspection
- **Retreat Point:** จุดถอยออกจากชิ้นงานตามแนวที่ลดโอกาสชน

การใช้จุดเดียวทั้งเข้าและออกอาจเหมาะกับงานง่าย แต่ในงานที่มี Fixture ลึกหรือมีชิ้นส่วนยื่น การแยกจุดช่วยให้ Recovery และการวิเคราะห์ Collision ทำได้ชัดเจนกว่า

1.9.2 7.2.2 Lead-through Programming

Lead-through หรือ Hand Guiding คือการนำแขนหุ่นยนต์ด้วยมือในระบบที่ได้รับการออกแบบให้รองรับ เช่น Collaborative Robot หรือหุ่นยนต์ที่มีโหมด Hand Guiding และแรงชดเชยน้ำหนักจากผู้ผลิต การใช้งานทั่วไปประกอบด้วย

1. เลือกโหมด Hand Guiding ที่ได้รับอนุญาต
2. ตรวจสอบ Tool Payload, Center of Gravity และ TCP
3. กดอุปกรณ์อนุญาตหรือปุ่ม Freedrive ตามระบบ
4. นำ TCP ไปยัง Pose ที่ต้องการ
5. บันทึก Waypoint หรือบันทึกเส้นทาง
6. ปรับ Speed, Acceleration, Blend และ Orientation ในโปรแกรม
7. จำลองหรือเล่นกลับที่ความเร็วต่ำ

ข้อจำกัดสำคัญ

- ไม่ใช่หุ่นยนต์ทุกชนิดที่อนุญาตให้ปลด Brake แล้วดึงแขนด้วยมือ
- การปลด Brake เพื่อ Service ไม่เท่ากับโหมด Hand Guiding สำหรับ Programming
- เส้นทางที่บันทึกด้วยมืออาจมี Noise จุดมากเกินไป หรือ Orientation ไม่สม่ำเสมอ
- ต้องประเมิน Pinch Point, Tool Hazard และแรงจาก Payload แม้เป็น Cobot

1.9.3 7.2.3 Offline Programming

Offline Programming (OLP) คือการสร้างโปรแกรม เส้นทาง และ Cell Layout บนคอมพิวเตอร์ โดยใช้ Robot Model และ Virtual Controller เมื่อเหมาะสม ตัวอย่างซอฟต์แวร์จากผู้ผลิต ได้แก่ FANUC ROBOGUIDE, ABB RobotStudio, KUKA.Sim หรือแพลตฟอร์มรุ่นใหม่ของ KUKA, Yaskawa MotoSim, Mitsubishi RT ToolBox3 และ Universal Robots URSim

ขั้นตอน OLP ที่เป็นระบบ

1. นำเข้า CAD ของหุ่นยนต์ Fixture เครื่องจักร Tool และชิ้นงาน
2. กำหนด Robot Base, External Axis และ Tool Geometry
3. กำหนด TCP, Payload และ Work Object/User Frame
4. สร้าง Targets และ Path

5. เลือก Motion Type, Speed, Zone/Blend และ Process Parameters
6. ตรวจ Reachability, Joint Limit, Singularity และ Collision
7. ประมาณ Cycle Time
8. สร้างหรือ Synchronize Program กับ Virtual Controller
9. Export โปรแกรมตามรูปแบบที่ Controller รองรับ
10. ทำ On-site Touch-up เพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อนระหว่าง CAD กับระบบจริง
11. ทดสอบใน Manual Reduced-speed ก่อน Automatic Mode

ข้อดี

- ลดเวลาที่ต้องหยุดสายการผลิต
- ตรวจ Collision และ Reachability ก่อนติดตั้งจริง
- ทดลอง Layout หลายทางเลือกได้
- ใช้สร้างสื่อการสอนและฝึกผู้เรียนโดยไม่เสี่ยงต่ออุปกรณ์จริง
- สนับสนุน Virtual Commissioning และการประเมิน Cycle Time

ข้อจำกัด

- คุณภาพผลลัพธ์ขึ้นกับความถูกต้องของ CAD, Tool, Payload, Base และ Calibration
- Flexible Cable, Backlash, Thermal Drift และ Fixture Tolerance อาจไม่ถูกจำลองครบ
- Collision-free ใน Simulation ไม่ได้หมายความว่าปลอดภัยในระบบจริง
- Controller Option และ Software Version ต้องสอดคล้องกับหุ่นยนต์จริง

1.9.4 ตาราง 8.3 เปรียบเทียบ Online, Lead-through และ Offline Programming

วิธี	จุดเด่น	ข้อจำกัด	งานที่เหมาะสม
Teach Pendant	สอดคล้องกับระบบจริง เห็น Clearance จริง	ใช้เวลาหุ่นยนต์จริงและมีความเสี่ยง	Touch-up, Recovery, งานจุดไม่มาก
Lead-through	เรียนรู้ง่าย เหมาะกับท่าทางเชิงสาธิต	ขึ้นกับรุ่นหุ่นยนต์และอาจได้เส้นทางไม่เรียบ	Cobot, งานสาธิต, งาน Path แบบง่าย
Offline Programming	ลด Downtime ตรวจ Collision และ Cycle Time	ต้องมี Model และ Calibration ที่ดี	Welding, Painting, Machining, Cell ใหม่

1.9.5 7.2.4 การกำหนดคุณภาพของจุดสอน

จุดที่ดีไม่ได้หมายถึงเพียง TCP อยู่ตำแหน่งถูกต้อง แต่ต้องมีองค์ประกอบต่อไปนี้

- Tool Frame และ User Frame ถูกต้อง
- Orientation เหมาะกับกระบวนการ
- Robot Configuration ไม่เปลี่ยนโดยไม่ตั้งใจ
- มีระยะเผื่อจาก Joint Limit และ Singularity
- สาย Tool และ Dress Pack ไม่บิดตึง
- Approach/Retreat ไม่ตัดผ่าน Fixture
- สามารถ Recover ได้เมื่อหยุดกลาง Cycle

- ชื่อ Point และ Comment สื่อความหมาย
- Point สำคัญที่ต้องสัมผัสชิ้นงานใช้ Fine/Exact Stop ตามความจำเป็น
- จุดผ่านที่ใช้เพิ่มความต่อเนื่องไม่ทำให้ Path เบี่ยงเข้าหาสิ่งกีดขวาง

1.9.6 Checklist ก่อนบันทึกจุด

[ ] Tool Number ถูกต้อง

[ ] User/Work Object Number ถูกต้อง

[ ] Coordinate System ตรงกับงาน

[ ] Speed Override อยู่ในระดับปลอดภัย

[ ] TCP และส่วนอื่นของแขนมี Clearance

[ ] Orientation ไม่ทำให้สายบิด

[ ] Joint อยู่ห่างจาก Limit และ Singularity

[ ] ตั้งชื่อ Point และ Comment แล้ว

[ ] กำหนด Motion Type และ Termination เหมาะสม

1.10 7.3 Motion Commands และการวางแผนเส้นทาง

1.10.1 7.3.1 ความแตกต่างระหว่าง Path และ Trajectory

- **Path** คือรูปร่างทางเรขาคณิตที่ TCP หรือ Joint เคลื่อนผ่าน โดยยังไม่ระบุเวลา
- **Trajectory** คือ Path ที่กำหนดเวลา ความเร็ว ความเร่ง และอาจรวม Jerk

โปรแกรมอาจกำหนดจุดต้นและจุดปลายเหมือนกัน แต่ให้ Trajectory ต่างกันจาก Motion Type, Speed, Acceleration, Payload และ Blending ดังนั้นการประเมินคุณภาพต้องพิจารณาทั้งตำแหน่งและพฤติกรรมตามเวลา

1.10.2 7.3.2 Point-to-Point Motion: PTP

PTP วางแผนการเคลื่อนที่ใน Joint Space โดยให้แต่ละ Joint เปลี่ยนจากค่าเริ่มต้นไปยังค่าปลาย หุ่นยนต์จะประสานเวลาให้แกนต่าง ๆ ถึงเป้าหมายตามแผนของ Controller รูปแบบเชิงแนวคิดเขียนได้เป็น

$$q_i(t) = q_{i,0} + s(t)(q_{i,f} - q_{i,0})$$

เมื่อ

- $q_{i,0}$ คือค่าข้อต่อเริ่มต้น
- $q_{i,f}$ คือค่าข้อต่อปลาย
- $s(t)$ คือฟังก์ชันการเคลื่อนที่ที่เปลี่ยนจาก 0 เป็น 1

Controller จริงอาจใช้โปรไฟล์ความเร็วแบบ Trapezoidal, S-curve หรือวิธีเฉพาะของผู้ผลิต

ข้อดี

- คำนวณได้มีประสิทธิภาพและมักเคลื่อนที่ได้เร็ว
- เหมาะสำหรับการเคลื่อนระหว่างจุดที่ไม่ต้องควบคุมรูปร่างเส้นทาง
- ใช้สำหรับ Home, Transfer หรือ Approach ที่มีพื้นที่ว่างเพียงพอ

ข้อจำกัด

- เส้นทาง TCP ไม่รับประกันเป็นเส้นตรง
- ส่วนต่าง ๆ ของแขนอาจกวาดผ่านพื้นที่กว้าง
- ไม่เหมาะกับงานเชื่อม เดินกาว ตัด หรือพ่นที่ต้องควบคุม Path

ตัวอย่างคำสั่ง

```
FANUC: J P[1] 100% FINE
ABB:   MoveJ Target1, v1000, fine, tool1;
KUKA:  PTP P1
Yaskawa: MOVJ P001 VJ=50.00
URScript: movej(q_target, a=1.2, v=0.8)
```

รูปแบบคำสั่งเป็นตัวอย่างเชิงการเรียนรู้ ต้องตรวจ Syntax, Unit และ Option จากคู่มือ Controller รุ่นที่ใช้งาน

1.10.3 7.3.3 Linear Motion: LIN

Linear Motion ควบคุมให้ TCP เคลื่อนตามเส้นตรงจากตำแหน่งเริ่ม $\mathbf{p}_0$ ไปยังตำแหน่งปลาย $\mathbf{p}_f$

$$\mathbf{p}(t) = \mathbf{p}_0 + s(t)(\mathbf{p}_f - \mathbf{p}_0)$$

Controller ต้องคำนวณ Inverse Kinematics หลายครั้งตามเส้นทาง เพื่อหาค่า Joint ที่ทำให้ TCP อยู่บนเส้นตรงและ Orientation เปลี่ยนตามกฎที่กำหนด

เหมาะสำหรับ

- เข้า–ออกชิ้นงานตามแนว Tool
- งานเชื่อมแนวตรง เดินกาว ตัด และตรวจสอบ
- งานหยิบวางที่ต้องหลีกเลี่ยงขอบ Fixture
- การเคลื่อนชิ้นงานที่ต้องรักษาระดับหรือ Orientation

ข้อจำกัด

- อาจผ่าน Singularity หรือ Joint Limit แม้จุดต้นและปลายเข้าถึงได้
- ความเร็ว TCP สูงอาจต้องการความเร็ว Joint สูงมากในบางท่าทาง
- ใช้ทรัพยากรการคำนวณและข้อจำกัดของ Controller มากกว่า PTP

```
FANUC: L P[2] 500mm/sec FINE
ABB:   MoveL Target2, v500, z10, tool1;
KUKA:  LIN P2
Yaskawa: MOVL P002 V=500.0
URScript: movel(p_target, a=0.5, v=0.25)
```

1.10.4 7.3.4 Circular Motion: CIRC/ARC

การเคลื่อนที่เป็นวงโค้งต้องมีอย่างน้อยจุดเริ่ม จุดผ่าน และจุดปลาย เพื่อกำหนดระนาบและส่วนโค้ง

```
FANUC: C P[3] P[4] 500mm/sec FINE
ABB:   MoveC CirPoint, Target3, v500, z10, tool1;
KUKA:  CIRC P3, P4
Yaskawa: MOVC P003 V=300.0
URScript: movec(p_via, p_to, a=0.5, v=0.2)
```

การประยุกต์ใช้ ได้แก่ การเชื่อมตามท่อ งานขัดขอบโค้ง งานพ่นสี และการเคลื่อนรอบชิ้นงานทรงกระบอก

ข้อควรระวัง

- จุดทั้งสามต้องไม่เกือบอยู่บนเส้นตรงเดียวกัน
- Orientation ระหว่างจุดต้องถูกกำหนดให้เหมาะสมกับกระบวนการ
- หาก Arc ใหญ่หรือซับซ้อน ควรแบ่งเป็นหลายส่วนและตรวจ Continuity

1.10.5 7.3.5 Blending, Zone และ CNT

หากกำหนดจุดเป็น Fine/Exact Stop หุ่นยนต์จะลดความเร็วจนเข้าเกณฑ์ตำแหน่งก่อนเริ่ม Motion ถัดไป การหยุดทุกจุดเพิ่ม Cycle Time และทำให้ความเร่งเปลี่ยนบ่อย ในทางกลับกัน Blending ทำให้ Controller เริ่มเบี่ยงจากจุดเดิมเพื่อเชื่อมกับเส้นทางถัดไปอย่างต่อเนื่อง

ค่าตัวอย่าง	พฤติกรรมโดยแนวคิด	ผลต่อ Cycle Time	ผลต่อความแม่นยำผ่านจุด
FINE / fine	เข้าเป้าหมายตามเกณฑ์แล้วจึงไปต่อ	สูง	สูง
CNT 0 หรือ Zone ใกล้ศูนย์	เกือบหยุดหรือเบี่ยงน้อย	ค่อนข้างสูง	ค่อนข้างสูง
CNT 50 / Zone ปานกลาง	กลมมุมระดับกลาง	ลดลง	จุดผ่านคลาดมากขึ้น
CNT 100 / Zone ใหญ่	ต่อเนื่องสูง เบี่ยงจากจุดมาก	ต่ำ	ไม่เหมาะกับจุดกระบวนการสำคัญ

หลักการเลือก

- จุด Pick, Place, Tool Change, Probe และจุดที่รอสัญญาณควรใช้ Fine หรือ Zone ต่ำ
- จุดผ่านกลางอากาศที่มี Clearance มากอาจใช้ Blend สูง
- ห้ามเพิ่ม Blend โดยดูเฉพาะ Cycle Time ต้องตรวจ Swept Volume ของ TCP และทุก Link
- Path ที่มุมแหลมมากอาจไม่สามารถรักษาความเร็วคงที่ได้ แม้กำหนด Blend

1.10.6 ตัวอย่างที่ 8.2 ผลของการหยุดต่อ Cycle Time

ตัวอย่างเพิ่มเติมเพื่อการเรียนรู้

โปรแกรมมีจุดผ่านกลางอากาศ 4 จุด หากใช้ Fine ทุกจุด หุ่นยนต์ใช้เวลาเร่งและลดความเร็วเพิ่มจุดละ 0.25 s เมื่อเปลี่ยนจุดผ่านทั้ง 4 เป็น Blend ที่ผ่านการตรวจ Collision แล้ว จะลดเวลาได้โดยประมาณเท่าใด

$$\Delta t = 4(0.25) = 1.00 \text{ s/cycle}$$

ถ้าผลิต 3,600 Cycle ต่อวัน เวลาที่ลดได้คือ

$$1.00 \times 3600 = 3600 \text{ s} = 60 \text{ min/day}$$

การแปลความหมาย: การปรับ Motion Termination ที่จุดไม่สำคัญสามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้มาก แต่ต้องยืนยันว่า Path ใหม่ไม่เข้าใกล้คน อุปกรณ์ หรือชิ้นงานเกินเกณฑ์

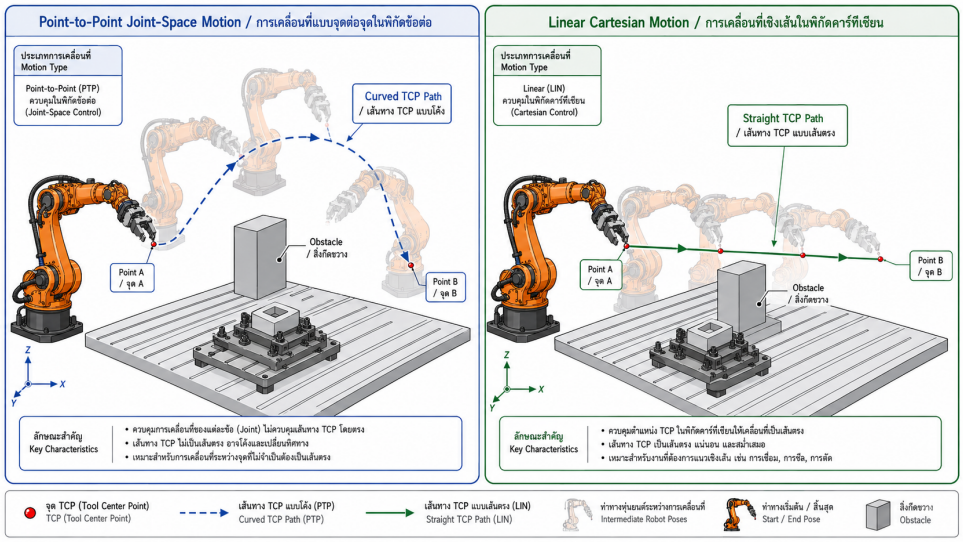
1.10.7 7.3.6 ปัจจัยที่มีผลต่อ Path Planning

1. **Reachability:** จุดต้องอยู่ใน Working Envelope และไม่เกิน Joint Limit
2. **Robot Configuration:** Shoulder, Elbow, Wrist และ Turn Number ต้องสอดคล้องตลอดเส้นทาง
3. **Singularity:** ควรหลีกเลี่ยงท่าที่ต้องการความเร็ว Joint สูงผิดปกติ
4. **Payload และ Center of Gravity:** มีผลต่อ Acceleration, Braking และ Alarm Overload
5. **Tool Geometry:** ต้องตรวจทั้ง TCP และ Volume ของ Tool

6. **Dress Pack:** สายไฟ สายลม และสายเชื่อมต้องไม่ตึงหรือเสียดสี
7. **Fixture Clearance:** ต้องรวม Tolerance, Deflection และตำแหน่งชิ้นงานจริง
8. **Process Requirement:** งานเชื่อมและพ่นต้องควบคุม Speed และ Orientation ต่อเนื่อง
9. **Recovery:** ต้องมีจุดหรือขั้นตอนถอยออกเมื่อ Cycle หยุดกลางทาง
10. **Safety Zone:** เส้นทางต้องอยู่ภายในข้อจำกัดของ Safety Function และพื้นที่อนุญาต

1.10.8 ตาราง 8.4 แนวทางเลือก Motion ตามงาน

สถานการณ์	Motion แนะนำ	Termination	เหตุผล
เคลื่อนจาก Home ไปเหนือจุด Pick	PTP/J	Blend ปานกลางเมื่อมี Clearance	ลด Cycle Time
ลงจับชิ้นงานใน Fixture	Linear	Fine	รักษาแนวเข้าและตำแหน่งจับ
ถอย Gripper ออกจากชิ้นงาน	Linear	Blend ต่ำหรือ Fine	ลดการเฉี่ยวชิ้นงาน
เคลื่อนระหว่างพื้นที่ว่าง	PTP/J	Blend สูงตามการตรวจสอบ	เร็วและใช้เส้นทาง Joint
เชื่อมแนวตรง	Linear	Zone ต่อเนื่องตาม Process	รักษาความเร็วและแนวเชื่อม
เชื่อมแนวโค้ง	Circular	Zone ที่ไม่ทำลายรูปทรง	รักษา Arc และความต่อเนื่อง
เข้า Tool Changer	Linear	Fine	ต้องจัดแนวและล็อกอย่างแม่นยำ



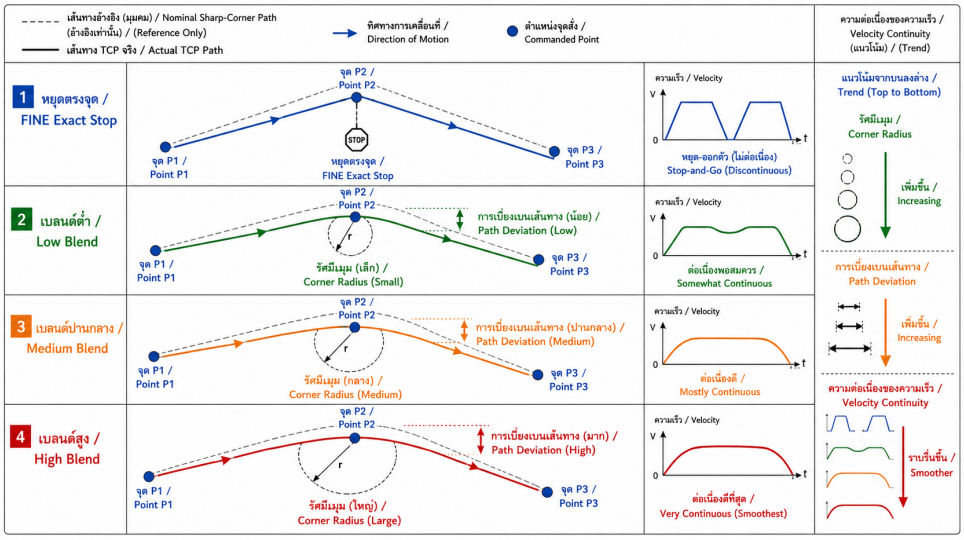
รูปที่ 2: เปรียบเทียบเส้นทาง PTP และ Linear

1.11 7.4 โครงสร้างโปรแกรมหุ่นยนต์เบื้องต้น

1.11.1 7.4.1 องค์ประกอบของโปรแกรมที่อ่านและบำรุงรักษาได้

โปรแกรมหุ่นยนต์ที่ดีควรแยกองค์ประกอบต่อไปนี้

1. **Configuration:** หมายเลข Tool, User Frame, Payload, Speed Override และ Process Mode
2. **Position Data:** Home, Approach, Process, Retreat, Recovery และ Maintenance Position
3. **Motion Logic:** ลำดับ J/L/C หรือ MoveJ/MoveL/MoveC
4. **I/O Logic:** Gripper, Clamp, Sensor, Conveyor, Machine Ready และ Safety-permissive interface



รูปที่ 3: ผลของ FINE และ CNT/Zone Blending

5. **Control Flow:** IF, SELECT, LOOP, FOR, CALL, WAIT, TIMER และ Label
6. **Fault Handling:** Timeout, Retry Limit, Alarm Message และ Safe Stop
7. **Production Data:** Counter, Recipe, Part Type และ Result
8. **Comments and Revision:** ผู้แก้ไข วันที่ เหตุผล และ Version

1.11.2 7.4.2 ตัวอย่างโปรแกรม Pick and Place แบบ FANUC TP-like

```
1:  !--- PICK AND PLACE PROGRAM --- ;
2:  UFRAME_NUM=1 ;
3:  UTOOL_NUM=1 ;
4:  ! Verify cell conditions ;
5:  WAIT DI[1:CELL_READY]=ON ;
6:  WAIT DI[2:PART_PRESENT]=ON ;
7:  WAIT DI[3:PLACE_CLEAR]=ON ;
8:  ;
9:  !--- HOME POSITION --- ;
10: J P[1:HOME] 50% FINE ;
11: ;
12: !--- APPROACH PICK --- ;
13: J P[2:PICK_APP] 50% CNT50 ;
14: L P[3:PICK] 150mm/sec FINE ;
15: DO[1:GRIP_CLOSE]=ON ;
16: WAIT DI[4:GRIP_OK]=ON TIMEOUT,LBL[900] ;
17: L P[2:PICK_APP] 200mm/sec CNT20 ;
18: ;
19: !--- MOVE TO PLACE --- ;
20: J P[4:PLACE_APP] 50% CNT50 ;
21: L P[5:PLACE] 150mm/sec FINE ;
22: DO[1:GRIP_CLOSE]=OFF ;
23: WAIT DI[5:GRIP_OPEN]=ON TIMEOUT,LBL[910] ;
```

```
24: L P[4:PLACE_APP] 200mm/sec CNT20 ;
25: J P[1:HOME] 50% FINE ;
26: DO[2:CYCLE_COMPLETE]=ON ;
27: WAIT 0.10(sec) ;
28: DO[2:CYCLE_COMPLETE]=OFF ;
29: END ;
30: ;
31: LBL[900] ;
32: CALL GRIP_FAULT ;
33: END ;
34: LBL[910] ;
35: CALL RELEASE_FAULT ;
36: END ;
```

โค้ดนี้เป็นตัวอย่างเพื่ออธิบายโครงสร้าง ไม่ใช่ไฟล์ที่รับรองว่าสามารถโหลดได้กับ Controller ทุก Version ชื่อคำสั่ง Timeout และรูปแบบ Label ต้องปรับตามคู่มือจริง

1.11.3 7.4.3 ลำดับ Handshake กับ PLC

การเชื่อมต่อหุ่นยนต์กับ PLC ควรใช้ State หรือ Handshake ที่ตรวจสอบได้ ไม่ควรใช้ Pulse สั้นโดยไม่มีการยืนยัน ตัวอย่างสัญญาณ ได้แก่

สัญญาณจาก PLC ไป Robot	ความหมาย
CELL_READY	อุปกรณ์รอบเซลล์อยู่ในสถานะพร้อม
START_REQUEST	ขอให้หุ่นยนต์เริ่ม Cycle
PART_PRESENT	มีชิ้นงานที่จุด Pick
PLACE_CLEAR	ตำแหน่งวางว่างและปลอดภัย
RESET_REQUEST	ขอ Reset หลังเงื่อนไขปลอดภัยครบ

สัญญาณจาก Robot ไป PLC	ความหมาย
ROBOT_READY	Robot อยู่ Home/Ready และไม่มี Fault
ROBOT_BUSY	กำลังทำ Cycle
CYCLE_COMPLETE	Cycle สำเร็จ
ROBOT_FAULT	มี Fault ต้องดำเนินการ
GRIP_RESULT	ผลการจับชิ้นงาน

ตัวอย่าง Sequence

```
PLC: START_REQUEST = ON
Robot: ตรวจ CELL_READY, PART_PRESENT, PLACE_CLEAR
Robot: ROBOT_BUSY = ON
Robot: ทำ Pick and Place
Robot: CYCLE_COMPLETE = ON
PLC: START_REQUEST = OFF และรับ Complete
Robot: CYCLE_COMPLETE = OFF, ROBOT_BUSY = OFF
```

การออกแบบต้องกำหนดพฤติกรรมเมื่อสัญญาณค้าง สัญญาณหายระหว่าง Cycle หรือ Controller Restart เพื่อป้องกันการเริ่มซ้ำโดยไม่ตั้งใจ

1.11.4 7.4.4 โครงสร้างควบคุมการไหล

```
!--- IF CONDITION ---
```

```
IF DI[1:PART_OK] = ON THEN
  CALL PICK_ROUTINE
ELSE
  CALL EJECT_ROUTINE
ENDIF

!--- FOR LOOP ---
FOR R[1:INDEX] = 1 TO 10
  CALL CYCLE_ROUTINE
  R[2:GOOD_COUNT] = R[2:GOOD_COUNT] + 1
ENDFOR

!--- WAIT WITH TIMEOUT ---
WAIT DI[2:CLAMP_OK] = ON TIMEOUT LBL[100]
```

ข้อควรระวังของ Loop

- ต้องมีเงื่อนไขออกจาก Loop ที่ตรวจสอบได้
- ไม่ควร Retry การจับชิ้นงานไม่จำกัดครั้ง
- Counter ต้องถูก Initial เมื่อเริ่ม Lot หรือหลัง Recovery ตามกติกาที่ชัดเจน
- การ Restart ต้องรู้ว่า Cycle อยู่ State ใด ไม่ควรกลับไปเริ่มต้นโดยอัตโนมัติทุกกรณี

1.11.5 7.4.5 ตัวอย่างโปรแกรมวางชิ้นงาน 2 × 5 ช่องแบบ Pseudocode

```
SET ROWS = 2
SET COLS = 5
SET PITCH_X = 40 mm
SET PITCH_Y = 60 mm

FOR row = 0 TO ROWS-1
  FOR col = 0 TO COLS-1
    WAIT part_present = TRUE
    CALL PickPart()

    IF gripper_confirm = FALSE THEN
      RAISE "GRIPPER NOT CONFIRMED"
      STOP CYCLE
    ENDIF

    target = tray_origin
           + col * PITCH_X along User-X
           + row * PITCH_Y along User-Y

    MoveJ target_approach WITH blend
    MoveL target WITH fine
    OpenGripper()
    WAIT gripper_open = TRUE WITH timeout
    MoveL target_approach WITH low_blend
```

```
  ENDFOR
ENDFOR
```

จุดเด่นของแนวทางนี้คือใช้จุดต้นเพียงจุดเดียวร่วมกับ Offset จึงลดจำนวน Point และทำให้ปรับ Pitch ได้ง่าย แต่ต้องตรวจว่า Offset ทุกจุดอยู่ใน Reach, ไม่เกิด Singularity และไม่ชนขอบถาด

1.11.6 7.4.6 การจัดการ Timeout และ Fault

การใช้ WAIT โดยไม่มี Timeout อาจทำให้โปรแกรมค้างโดยไม่ทราบสาเหตุ แนวทางที่ดีกว่าคือ

1. เริ่ม Timer เมื่อส่งคำสั่งไปยังอุปกรณ์
2. รอสัญญาณตอบกลับภายในเวลาที่กำหนด
3. หากครบเวลา ให้หยุด Sequence ที่ปลอดภัย
4. ปิด Output ที่อาจทำให้เกิดการเคลื่อนที่ต่อ
5. แสดง Alarm ที่ระบุอุปกรณ์และ State
6. ให้ผู้ปฏิบัติงานตรวจสาเหตุ
7. อนุญาต Retry เมื่อเงื่อนไขปลอดภัยครบและจำนวนครั้งไม่เกินกำหนด
8. บันทึกเหตุการณ์เพื่อวิเคราะห์ซ้ำ

1.11.7 7.4.7 การตรวจสอบโปรแกรมก่อนใช้งานจริง

ระดับที่ 1: Static Review

- Tool/User Frame ถูกต้อง
- Point Name และ Comment ชัดเจน
- Speed และ Termination เหมาะสม
- I/O Address ไม่ซ้ำหรือกลับ Logic
- Timeout และ Fault Path ครบ
- ไม่มี Jump/Label ที่ทำให้ข้าม Interlock

ระดับที่ 2: Simulation

- Reachability และ Joint Limit
- Collision ของ Robot, Tool, Workpiece และ Fixture
- Cycle Time และ Bottleneck
- Singularity และ Configuration Change

ระดับที่ 3: Dry Run บนหุ่นยนต์จริง

- ใช้ Manual Reduced-speed และ Step Mode
- ไม่มีชิ้นงานหรือใช้ชิ้นงานจำลองที่ปลอดภัย
- ผู้ควบคุมถือ Teach Pendant และสังเกต Clearance
- ตรวจทิศทาง Gripper/Actuator ก่อนจ่ายพลังงานเต็ม

ระดับที่ 4: Process Validation

- ทดสอบด้วยชิ้นงานจริงภายใต้การควบคุม
- วัดคุณภาพ ตำแหน่ง Cycle Time และ Repeatability
- ทดสอบ Fault Scenario ที่ได้รับอนุญาต
- บันทึก Version และ Backup หลังอนุมัติ

1.12 7.5 การบำรุงรักษาหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

1.12.1 7.5.1 เป้าหมายของการบำรุงรักษา

การบำรุงรักษาไม่ได้มีเป้าหมายเพียง “ซ่อมให้กลับมาทำงาน” แต่ต้องรักษาคุณลักษณะสำคัญของระบบ ได้แก่

- ความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน
- ความพร้อมใช้งานของเซลล์
- ความแม่นยำและ Repeatability
- คุณภาพของกระบวนการ
- อายุของ Gear, Bearing, Brake, Cable และ Seal
- ความสมบูรณ์ของ Backup, Calibration และ Safety Configuration
- ความสามารถในการติดตามประวัติและวิเคราะห์สาเหตุซ้ำ

ประเภทการบำรุงรักษาที่พบ ได้แก่

1. **Corrective Maintenance:** ซ่อมหลังเกิดความขัดข้อง
2. **Preventive Maintenance:** ทำตามเวลา ชั่วโมงทำงาน หรือจำนวน Cycle
3. **Condition-based Maintenance:** ทำเมื่อข้อมูลสภาพ เช่น อุณหภูมิ กระแสมอเตอร์ การสั่น หรือ Alarm Trend เปลี่ยน
4. **Predictive Maintenance:** ใช้ข้อมูลและแบบจำลองคาดการณ์แนวโน้มความเสียหายก่อนหยุดเครื่อง

ในห้องปฏิบัติการควรเน้น Preventive Maintenance และการตรวจสภาพพื้นฐาน ส่วนงาน Predictive Maintenance อาจสาธิตด้วยข้อมูล Trend หรือซอฟต์แวร์ Monitoring โดยไม่ดัดแปลงระบบจริง

1.12.2 7.5.2 หลักการสร้างแผน PM

แผน PM ที่ดีต้องตอบคำถาม 6 ข้อ

1. **ตรวจอะไร** — เช่น Cable, Grease Leakage, Bolt, Fan, Filter, Battery และ Safety Device
2. **ตรวจเมื่อใด** — รายวัน รายสัปดาห์ รายเดือน รายปี ชั่วโมงทำงาน หรือ Condition-based
3. **ตรวจอย่างไร** — Visual, Torque Check, Functional Test, Measurement หรือ Trend Analysis
4. **เกณฑ์ผ่านคืออะไร** — Normal/Abnormal, ค่าพิกัด, Tolerance หรือคำแนะนำผู้ผลิต
5. **ใครรับผิดชอบ** — Operator, Maintenance Technician, Safety Specialist หรือผู้ผลิต
6. **บันทึกที่ใด** — Checklist, CMMS, Logbook หรือระบบ Digital Maintenance

ข้อควรระวัง: ระยะเปลี่ยน Grease, Battery, Belt, Seal และ Oil แตกต่างกันมากตามรุ่น ชั่วโมงทำงาน โหลด อุณหภูมิ และสภาพแวดล้อม ตารางต่อไปนี้เป็นโครงสร้างตัวอย่างเพื่อการเรียนรู้ ไม่ใช่คำสั่งบำรุงรักษาแทนคู่มือผู้ผลิต

ความถี่ตัวอย่าง	กิจกรรม	รายละเอียดและเกณฑ์เบื้องต้น	ผู้รับผิดชอบ
ก่อนเริ่มงานทุกวัน	Daily Visual Check	ตรวจรอยรั่ว Cable Damage ฝาครอบหลวม Tool หลวม เสียงผิดปกติ Air Pressure และ Alarm ค้าง	Operator
ทุกสัปดาห์	Functional Check	ทดสอบ Gripper Sensor, Interlock, Indicator และทำความสะอาดพื้นที่โดยไม่รบกวนอุปกรณ์นิรภัย	Operator/Technician
ทุก 1–3 เดือน	Condition Inspection	ตรวจ Connector, Dress Pack, Fan/Filter, Bolt Mark, Backlash ที่สังเกตได้ และแนวโน้ม Alarm	Technician
ตามชั่วโมงหรือคู่มือ	Lubrication Service	ใช้ชนิด ปริมาณ ตำแหน่ง และวิธีเติมตามคู่มือรุ่นนั้น ห้ามผสม Grease โดยไม่ยืนยันความเข้ากันได้	Qualified Technician
ทุกปีหรือรอบที่กำหนด	Annual Inspection	ตรวจ Brake, Cable, Safety Function, Calibration Status, Backup, Battery Condition และ Mechanical Wear	Qualified Technician
ตามอายุ/สถานะ	Encoder/SMB Battery	เปลี่ยนตามคู่มือและขั้นตอนรักษาข้อมูลตำแหน่ง ห้ามตัดไฟผิดวิธี	Qualified Technician
หลัง Crash/Repair	Re-mastering and Validation	ตรวจ Mastering, TCP, User Frame, Accuracy, Safety Zone และทดลองเส้นทาง	Engineer/Integrator
Major Service	Gearbox/Wrist/Reducer Service	ดำเนินการตามคู่มือหรือศูนย์บริการ เนื่องจากต้องใช้เครื่องมือและวิธีเฉพาะ	Manufacturer/Authorized Service

1.12.3 ตาราง 8.5 แผน Preventive Maintenance ตัวอย่าง

1.12.4 7.5.3 Daily Check

รายการตรวจประจำวันควรสั้น ชัดเจน และทำได้ก่อนเริ่มผลิต ตัวอย่าง

[ ] ไม่มี Alarm หรือ Warning ค้างจากกะก่อน

[ ] ไม่มีรอยน้ำมัน/จาระบีรั่วผิดปกติ

[ ] สายไฟ สายลม และ Dress Pack ไม่ฉีก ขูด หักพับ หรือตึง

[ ] End Effector และชิ้นส่วนยึดไม่มีการคลายตัว

[ ] Air Pressure และ Vacuum อยู่ในช่วงที่กำหนด

[ ] เสียง การสั่น และอุณหภูมิภายนอกไม่ผิดปกติ

[ ] Safety Gate, Interlock, E-stop และ Indicator พร้อมตามขั้นตอนทดสอบที่อนุมัติ

[ ] พื้นที่ทำงานไม่มีวัตถุหลุด เครื่องมือ หรือสิ่งกีดขวาง

[ ] Backup/Log ล่าสุดพร้อมใช้งานตามนโยบายหน่วยงาน

[ ] บันทึกชื่อผู้ตรวจ เวลา และผลการตรวจแล้ว

การพบคราบ Grease เล็กน้อยไม่ได้แปลว่า Gearbox เสียเสมอ แต่ต้องเปรียบเทียบกับสภาพปกติของรุ่นนั้น ตรวจแหล่งที่มา ปริมาณ แนวโน้ม และคำแนะนำผู้ผลิต ห้ามเติม Grease เพิ่มทันทีโดยไม่มีข้อมูล เพราะการเติมเกินอาจเพิ่มแรงดัน ทำให้ Seal เสีย หรือทำให้ความร้อนสูงขึ้น

1.12.5 7.5.4 การตรวจ Bolt และการใช้ Torque

Torque ของน็อตขึ้นกับขนาด เกรด วัสดุ สารหล่อลื่น และคำแนะนำผู้ผลิต การปฏิบัติที่เหมาะสมคือ

- ตรวจ Torque Mark หรือรอยเลื่อนก่อนใช้ประแจ
- ใช้ Torque Wrench ที่สอบเทียบและช่วงเหมาะสม
- ใช้ค่าจาก Product Manual หรือ Assembly Drawing
- ไม่ “ขันเผื่อ” เกินค่าเพื่อป้องกันคลาย
- เปลี่ยนน็อตแบบใช้ครั้งเดียวหรือสารล็อกเกลียวตามข้อกำหนด
- บันทึกค่าที่กำหนด ค่าที่ตรวจ วันที่ และหมายเลขเครื่องมือ

ในกิจกรรมการศึกษา หากไม่มีค่าจากคู่มือ ให้ฝึกเฉพาะการอ่าน Torque Mark และการจัดทำแบบฟอร์ม ไม่ควรให้นักศึกษาทดลองขันโครงสร้างหุ่นยนต์จริงด้วยค่าที่คาดเดา

1.12.6 7.5.5 Encoder Backup Battery และข้อมูลตำแหน่ง

หุ่นยนต์หลายรุ่นใช้ Battery เพื่อรักษาข้อมูลตำแหน่งของ Encoder/Resolver หรือ Serial Measurement Board เมื่อปิดกำลังหลัก ประเภท Battery ขั้นตอนเปลี่ยน และเงื่อนไขเปิด/ปิด Controller แตกต่างกันตามรุ่น

หลักการทั่วไป

1. ตรวจ Alarm หรือสถานะ Battery ตามคู่มือ
2. เตรียม Battery Part Number ที่ถูกต้อง
3. ทำ Backup ของ Controller และ Mastering Data
4. จัดท่า Robot ตามคำแนะนำเพื่อ Recovery
5. ปฏิบัติตามขั้นตอน Energized/De-energized ที่ผู้ผลิตกำหนด
6. เปลี่ยน Battery โดยไม่ทำให้ Connector หลุดผิดตำแหน่ง
7. ตรวจ Alarm และตำแหน่งหลังเปลี่ยน
8. บันทึกวันที่ Lot/Part Number และกำหนดรอบถัดไป

ห้ามสรุปว่า Battery เป็น Li-ion เสมอ เพราะหลายระบบใช้ Battery Pack ชนิดอื่นตามการออกแบบของผู้ผลิต

1.12.7 ตัวอย่างที่ 8.3 การวางแผนเปลี่ยน Battery

ตัวอย่างเพิ่มเติมเพื่อการเรียนรู้

กำหนดนโยบายฝึกอบรมให้เปลี่ยน Encoder Backup Battery ทุก 3 ปี หุ่นยนต์มีอายุ 7.5 ปี และเริ่มใช้งานด้วย Battery ใหม่ รอบเปลี่ยนตามอายุคือปีที่ 3, 6, 9, 12, … ดังนั้น ณ อายุ 7.5 ปี

- ควรเปลี่ยนแล้ว **2 ครั้ง** ที่ปี 3 และปี 6
- ครั้งต่อไปคือปีที่ **9** หรืออีก **1.5 ปี**

ข้อจำกัด: คำตอบนี้ใช้รอบเวลาในโจทย์เท่านั้น การใช้งานจริงต้องอ้างคู่มือและ Alarm/Condition ของ Battery

1.12.8 7.5.6 Calibration และ Mastering

Mastering กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่าตำแหน่งของ Encoder กับตำแหน่งอ้างอิงทางกลของแต่ละแกน ส่วน **Calibration** ใช้ตรวจหรือกำหนดความสัมพันธ์ของระบบกับตำแหน่งจริง เช่น TCP, Base, User Frame หรือความแม่นยำของ Path

สถานการณ์ที่อาจต้องตรวจ Mastering/Calibration ได้แก่

- เปลี่ยน Servo Motor, Encoder, Resolver หรืออุปกรณ์วัดตำแหน่ง
- เปลี่ยน Gearbox, Reducer, Wrist Unit หรือชิ้นส่วนที่กระทบแนวแกน
- สูญเสีย Mastering Data หรือ Battery Alarm ที่ทำให้ข้อมูลตำแหน่งไม่น่าเชื่อถือ
- Robot Crash หรือเกิดแรงกระแทกสูง
- ย้ายฐานหุ่นยนต์หรือย้าย Fixture
- เปลี่ยน Tool Geometry หรือ End Effector
- พบความคลาดเคลื่อนตำแหน่งสูงกว่าปกติ

1.12.9 7.5.7 Zero Position และ Mastering Marks

หุ่นยนต์หลายรุ่นมี Mastering Marks, Witness Marks หรือ Calibration Fixtures สำหรับจัดแกนเข้าสู่ตำแหน่งอ้างอิง ขั้นตอนเชิงแนวคิดคือ

1. แยกอันตรายและเตรียมพื้นที่ตามคู่มือ
2. นำแต่ละแกนเข้าใกล้ตำแหน่งอ้างอิงที่ผู้ผลิตกำหนด
3. ใช้ Mark, Pin, Dial Gauge หรือ Calibration Tool ตามวิธีของรุ่นนั้น
4. บันทึกค่า Master/Resolver/Encoder ใน Controller
5. ทำ Calibration Command หรือ Update Reference
6. ตรวจ Zero Position และทิศทาง Jog
7. ทวนสอบ TCP, User Frame และจุดมาตรฐาน
8. ทดสอบ Repeatability/Accuracy ด้วยวิธีที่เหมาะสม

ชื่อเมนู เช่น Zero Position Mastering, Quick Mastering, Single Axis Mastering หรือ Axis Calibration เป็นคำเฉพาะของผู้ผลิตและ Controller ไม่ควรนำลำดับของยี่ห้อหนึ่งไปใช้กับอีกยี่ห้อโดยตรง

1.12.10 7.5.8 การทวนสอบหลังซ่อมบำรุง

หลังงานซ่อมบำรุงต้องมีขั้นตอน Return to Service

- ตรวจว่าเครื่องมือ เศษวัสดุ และอุปกรณ์ล็อกชั่วคราวถูกนำออกครบ
- ตรวจ Connector, Cover, Guard และ Fastener
- ตรวจ LOTO Release ตามผู้มีอำนาจ
- เปิดระบบและตรวจ Alarm โดยไม่เริ่ม Automatic ทันที
- Jog ทีละแกนที่ความเร็วต่ำและตรวจทิศทาง
- ตรวจ Home, TCP, User Frame และ Recovery Point
- ทดสอบ Safety Function ตามแผนที่อนุมัติ
- Dry Run โปรแกรมด้วย Step Mode
- ทดสอบ Process และคุณภาพ
- บันทึกผล ผู้อนุมัติ และ Backup Version

1.12.11 7.5.9 ตัวชี้วัดด้านการบำรุงรักษา

ตัวชี้วัดที่ใช้ติดตามระบบ ได้แก่

Mean Time Between Failures

$$MTBF = \frac{\text{เวลาทำงานรวม}}{\text{จำนวนความขัดข้อง}}$$

Mean Time To Repair

$$MTTR = \frac{\text{เวลาซ่อมรวม}}{\text{จำนวนครั้งที่ซ่อม}}$$

Availability เชิงพื้นฐาน

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

ตัวชี้วัดเหล่านี้ช่วยเปรียบเทียบแนวโน้ม แต่ต้องกำหนดนิยาม Failure, Downtime และ Planned Maintenance ให้สม่ำเสมอ มิฉะนั้นข้อมูลต่างช่วงเวลาไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้

1.12.12 ตัวอย่างที่ 8.4 การคำนวณ Availability

ตัวอย่างเพิ่มเติมเพื่อการเรียนรู้

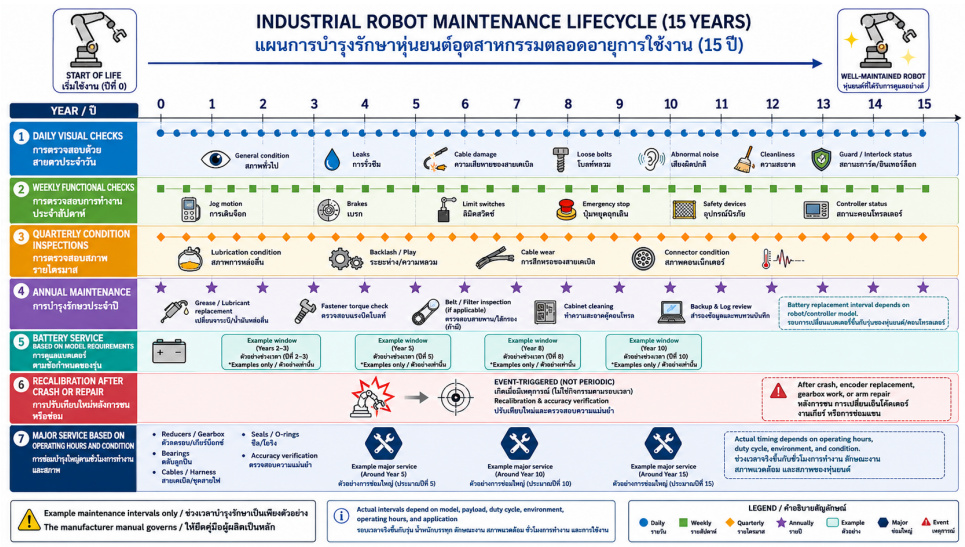
ในรอบหนึ่งเดือน เซลล์มีเวลาทำงาน 720 ชั่วโมง เกิดความขัดข้อง 4 ครั้ง รวมเวลาซ่อม 8 ชั่วโมง

$$MTBF = \frac{720}{4} = 180 \text{ h}$$

$$MTTR = \frac{8}{4} = 2 \text{ h}$$

$$A = \frac{180}{180 + 2} = 0.9890 \approx 98.90\%$$

การแปลความหมาย: ระบบมี Availability เชิงคำนวณประมาณ 98.9% ภายใต้นิยามข้อมูลที่กำหนด แต่ยังต้องพิจารณา Planned Downtime และผลกระทบด้านคุณภาพร่วมด้วย



รูปที่ 4: แผน PM ตลอดวงจรชีวิตหุ่นยนต์

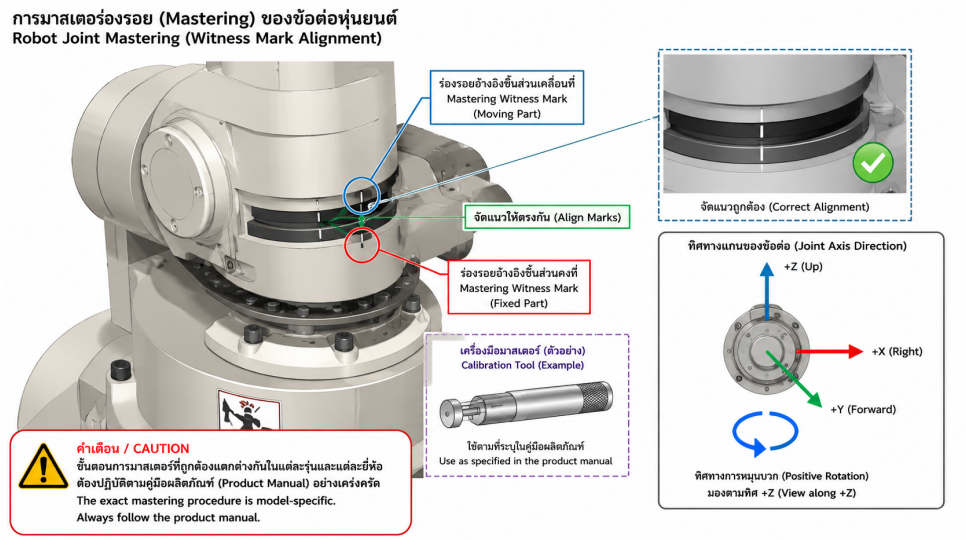
1.13 7.6 การแก้ไขปัญหาเบื้องต้น

1.13.1 7.6.1 หลักการ Troubleshooting

Troubleshooting ที่มีประสิทธิภาพต้องแยก “อาการ” ออกจาก “สาเหตุ” ตัวอย่างเช่น หุ่นยนต์หยุดที่จุด Pick เป็นอาการ สาเหตุอาจเป็น Sensor ไม่มา Air Pressure ต่ำ โปรแกรมรอสัญญาณผิด Address Gripper จับไม่สำเร็จ หรือ Safety Stop จากอุปกรณ์อื่น การเปลี่ยน Parameter โดยยังไม่ระบุสาเหตุอาจทำให้ปัญหาซับซ้อนและสร้างความเสี่ยง

กระบวนการพื้นฐาน 6 ขั้น

1. **สังเกตอาการ** — เกิดเมื่อใด จุดใด เกิดซ้ำหรือไม่ และเกิดหลังการเปลี่ยนแปลงใด
2. **อ่านข้อมูลระบบ** — Alarm Code, Event Log, Program Line, I/O State และ Axis Data



รูปที่ 5: Mastering Marks และการตั้งตำแหน่งอ้างอิง

3. **ทำให้ระบบปลอดภัย** — หยุด Cycle แยกพลังงานเมื่อจำเป็น และห้าม Reset ซ้ำโดยไม่เข้าใจเงื่อนไข
4. **สร้างสมมติฐาน** — จัดลำดับสาเหตุจากเป็นไปได้สูงและตรวจง่ายไปต่ำ
5. **ทดสอบทีละส่วน** — เปลี่ยนตัวแปรครั้งละหนึ่งอย่างและบันทึกผล
6. **ยืนยันและป้องกันซ้ำ** — ทดสอบหลาย Cycle คืนค่า Guard/Parameter บันทึก Root Cause และ Action

1.13.2 7.6.2 การจำแนกปัญหา

กลุ่มปัญหา	ตัวอย่างอาการ	ข้อมูลที่ควรตรวจ
Safety	Protective Stop, Gate Open, Chain Fault	Safety PLC, Gate Switch, E-stop, Scanner Zone, Reset Sequence
Servo/Drive	Overcurrent, Overload, Overtemperature	Payload, Collision, Brake, Cable, Axis Load, Speed/ Acceleration
Position Feedback	Encoder Alarm, Position Lost	Encoder Cable, Battery, Connector, Mastering Status
Mechanical	เสียง สั่น Backlash รั่ว	Gearbox, Bearing, Fastener, Tool, Dress Pack
I/O/Peripheral	Wait ค้าง Gripper ไม่ตอบ	Input State, Output Voltage, Air/Vacuum, Sensor Alignment
Program/Logic	Jump ผิด Loop ไม่จบ	Program Pointer, Register, Label, Timeout, Recipe
Communication	PLC/Fieldbus Disconnect	Network Status, Node, Cable, Address, Watchdog
Process	Weld Fault, Pick Fail, Quality Drift	Process Parameter, Consumable, Tool Wear, Part Tolerance

1.13.3 7.6.3 การอ่าน Alarm อย่างเป็นระบบ

เมื่อพบ Alarm ควรบันทึก

- วันและเวลา
- รหัสและข้อความเต็ม
- Program และ Line ที่เกิด
- Operating Mode
- ตำแหน่ง Joint/TCP
- I/O และ State ของอุปกรณ์
- Payload/Recipe ที่ใช้งาน

- การเปลี่ยนแปลงก่อนเกิด Alarm
- การดำเนินการที่ทำและผลลัพธ์

การ Reset Alarm โดยไม่บันทึกข้อมูลทำให้สูญเสียหลักฐานสำคัญและอาจทำให้ความผิดปกติเกิดซ้ำ

1.13.4 ตาราง 8.6 ตัวอย่าง Alarm Code ตามขอบเขตที่กำหนด

Error Code	ความหมายที่ใช้ในตัวอย่าง	แนวทางตรวจสอบเบื้องต้น
SRVO-003	Encoder Disconnect	ทำให้ระบบปลอดภัย ตรวจ Connector และสาย Feedback ตามคู่มือ
SRVO-006	Overcurrent	ตรวจการชน โหลด Brake สายมอเตอร์ และค่าความเร่ง ห้าม Reset ซ้ำต่อเนื่อง
SRVO-012	Overload	ตรวจ Payload, Center of Gravity, Duty Cycle และกลไกติดขัด
SRVO-062	Pulse/Position-related mismatch ตามตัวอย่าง	ตรวจข้อความ Alarm ฉบับเต็ม Battery และ Mastering Status ก่อนทำ Mastering
SRVO-064	Over-speed-related alarm ตามตัวอย่าง	ตรวจคำสั่ง Speed, Parameter, Feedback และสภาพกลไกตาม Manual
SRVO-230	Safety chain-related fault ตามตัวอย่าง	ตรวจ Safety Chain, Gate, E-stop และ Safety Hardware โดยผู้มีความสามารถ

ข้อจำกัดของตาราง: รหัส Alarm และความหมายอาจแตกต่างตาม Controller Family, Software Option และ Revision ตารางนี้คงรายการตามขอบเขตบทเพื่อการฝึกวิเคราะห์เท่านั้น ก่อนปฏิบัติจริงต้องเปิด Alarm Code Manual ของ Controller และใช้ข้อความ Alarm เต็มจากหน้าจอเป็นแหล่งอ้างอิงหลัก

1.13.5 7.6.4 Fault Isolation

การแยกสาเหตุควรเริ่มจากหลักฐาน ไม่ใช่การเปลี่ยนอะไหล่โดยคาดเดา ตัวอย่างกรณี Gripper ไม่ยืนยัน

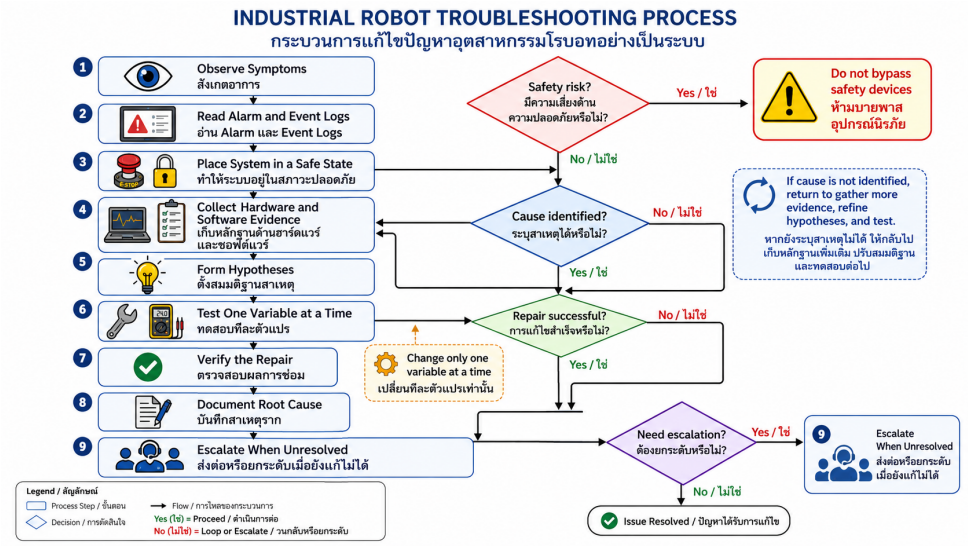
```
อาการ: WAIT GRIP_OK ค้าง
  |-- Output GRIP_CLOSE ไม่ ON -> ตรวจ Program/Interlock/Output Module
  |-- Output ON แต่ Solenoid ไม่ทำงาน -> ตรวจแรงดัน สาย วาล์ว
  |-- Solenoid ทำงานแต่ Gripper ไม่ขยับ -> ตรวจ Air Pressure/กลไกติดขัด
  |-- Gripper ขยับแต่ Sensor ไม่ ON -> ตรวจตำแหน่ง Sensor/สาย/Input
  `-- Input ON ที่ Module แต่ Robot ไม่เห็น -> ตรวจ Mapping/Fieldbus
```

การไล่ตามลำดับดังกล่าวลดการถอดอุปกรณ์โดยไม่จำเป็นและทำให้รายงาน Root Cause ชัดเจน

1.13.6 7.6.5 Safe Recovery

หลังแก้สาเหตุ ต้องวางแผน Recovery ตาม State ของระบบ

1. ยืนยันว่าบุคลากรออกจากพื้นที่อันตราย
2. คืน Guard, Connector และ Safety Device ครบ
3. ตรวจว่าหุ่นยนต์ถือชิ้นงานหรือไม่
4. ตรวจว่า Clamp, Machine Door, Conveyor และ Tool อยู่สถานะใด
5. เลือก Recovery Routine หรือ Jog ไปยัง Safe Pose ที่กำหนด
6. หลีกเลี่ยงการ Jump ข้ามคำสั่งที่ทำให้ I/O ไม่สอดคล้องกับสภาพจริง
7. Reset Counter/State เฉพาะค่าที่จำเป็น
8. Dry Run หนึ่ง Cycle ที่ความเร็วต่ำ
9. จึงคืน Automatic Mode ตามขั้นตอนอนุมัติ



รูปที่ 6: Flowchart การ Troubleshooting หุ่นยนต์

1.14 7.7 ความปลอดภัยในการทำงานกับหุ่นยนต์

1.14.1 7.7.1 กรอบมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

การจัดการความปลอดภัยของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมต้องพิจารณาทั้งตัวหุ่นยนต์และการรวมเป็นเซลล์

- **ISO 10218-1:2025** ครอบคลุมข้อกำหนดด้านการออกแบบและการลดความเสี่ยงของ Industrial Robot
- **ISO 10218-2:2025** ครอบคลุม Robot Application, Integration, Commissioning, Operation และ Maintenance ของ Robot Cell
- **ISO 12100:2010** ให้หลัก Risk Assessment และ Risk Reduction ของเครื่องจักร
- **ISO 13855:2024** ใช้พิจารณาตำแหน่งและมิติของ Safeguard ตามการเข้าถึงของร่างกาย
- **ISO 13849-1:2023** ให้หลักการออกแบบ Safety-related Parts of Control Systems และ Performance Level
- **ISO 11161:2007/Amd 1:2010** ยังเป็นมาตรฐานปัจจุบันสำหรับ Integrated Manufacturing Systems ณ วันที่จัดทำเอกสาร แต่มีฉบับใหม่อยู่ระหว่างกระบวนการแทนที่
- **ข้อกำหนด LOTO ของสถานประกอบการและกฎหมายที่ใช้บังคับ** ต้องนำมาใช้กับงานซ่อมบำรุงและการควบคุมพลังงานอันตราย

การกล่าวว่า Safety PLC เป็น “SIL 2–3 หรือ PL d–e” โดยไม่ทำ Risk Assessment และ Validation ไม่เพียงพอ ระดับที่ต้องการต้องได้จากการประเมินความเสี่ยงและการออกแบบ Safety Function แต่ละฟังก์ชัน

1.14.2 7.7.2 ลำดับชั้นการลดความเสี่ยง

แนวทางตาม ISO 12100 เริ่มจาก

1. **Inherently Safe Design:** ลดอันตรายด้วยการออกแบบ เช่น ลดขอบคม ลดแรง/ความเร็ว หรือจำกัดช่วงเคลื่อนที่
2. **Safeguarding and Protective Measures:** รั้ว Interlock, Light Curtain, Scanner, Pressure Mat และ Safety Function
3. **Information for Use:** Warning, Procedure, Training, PPE และ Sign

PPE และป้ายเตือนไม่สามารถทดแทน Guard หรือการแยกพลังงานเมื่อยังมีอันตรายจากการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

1.14.3 7.7.3 Operating Modes และการสอน

ระบบหุ่นยนต์อาจมี Automatic, Manual Reduced-speed และโหมดอื่นตามผู้ผลิต ในห้องปฏิบัติการควรกำหนดว่า

- การสอนและ Touch-up ใช้ Manual Reduced-speed เท่านั้น
- ใช้ Enabling Device ตามการออกแบบของ Teach Pendant
- มีผู้ควบคุม Pendant คนเดียวและมีอำนาจหยุดการทดลอง
- ห้ามผู้เรียนอยู่ในพื้นที่พร้อมกันหลายคนโดยไม่มีบทบาทชัดเจน
- ห้ามใช้ Automatic เมื่อประตูเปิดหรือ Safeguard ถูก Bypass
- ค่า 250 mm/s มักพบเป็นขีดจำกัดอ้างอิงสำหรับการเคลื่อนที่แบบ Manual Reduced-speed ในระบบอุตสาหกรรมหลายชนิด แต่ต้องใช้ค่าที่มาตรฐานและผู้ผลิตกำหนดสำหรับระบบจริง ไม่ควรตั้งค่าโดยอาศัยตัวเลขนี้เพียงอย่างเดียว

1.14.4 7.7.4 Safety Distance

รูปแบบสมการพื้นฐานที่ใช้ในบทเรียนคือ

$$S = K \times T + C$$

เมื่อ

- S คือระยะต่ำสุดจาก Detection Zone ถึง Hazard Zone หน่วย mm
- K คือความเร็วเข้าหาที่มาตรฐานกำหนด หน่วย mm/s
- T คือ **เวลาตอบสนองรวมของระบบ** หน่วย s
- C คือระยะเพิ่มที่สัมพันธ์กับการเข้าถึงหรือการทะลุผ่านอุปกรณ์ตรวจจับ หน่วย mm

เวลารวม T ต้องรวมองค์ประกอบที่เกี่ยวข้อง เช่น

$$T = T_{sensor} + T_{logic} + T_{network} + T_{machine\ stop} + T_{margin}$$

การใช้เฉพาะ Response Time ของ Light Curtain โดยไม่รวมเวลาหยุดของหุ่นยนต์จะทำให้ระยะที่คำนวณต่ำเกินจริง

1.14.5 ตัวอย่างที่ 8.5 การคำนวณระยะป้องกันตามข้อมูลโจทย์

ตัวอย่างเพิ่มเติมเพื่อการเรียนรู้

กำหนด $K = 2{,}000$ mm/s, $T = 15$ ms และ $C = 850$ mm โดยสมมติว่า 15 ms เป็นเวลารวมทั้งหมดตามโจทย์

แปลงหน่วย

$$T = 15 \text{ ms} = 0.015 \text{ s}$$

คำนวณ

$$S = (2{,}000)(0.015) + 850 = 30 + 850 = 880 \text{ mm}$$

ดังนั้นระยะต่ำสุดตามสมมติฐานของโจทย์คือ **880 mm**

ข้อควรระวังในการออกแบบจริง: หาก 15 ms เป็นเพียงเวลาของ Sensor ต้องวัดหรือใช้ค่า Stop Time รวมของ Robot Cell แล้วคำนวณใหม่ รวมทั้งตรวจสูตรและค่าคงที่สำหรับชนิดอุปกรณ์ตาม ISO 13855:2024 และคู่มือผู้ผลิต

1.14.6 7.7.5 Warning Zone และ Protective Zone

Area Scanner สามารถกำหนดหลาย Zone เช่น

- **Warning Zone:** ตรวจพบบุคคลแล้วเตือน ลดความเร็ว หรือเตรียมหยุดตามการออกแบบ
- **Protective Zone:** การบุกรุกทำให้เกิด Protective Stop ที่ผ่านการออกแบบและ Validation
- **Restart Interlock:** ระบบต้องไม่เริ่มใหม่โดยอัตโนมัติเมื่อพื้นที่กลับมาว่าง หากยังมีความเป็นไปได้ว่าบุคคลอยู่ในพื้นที่อันตรายหรือเงื่อนไข Reset ไม่ครบ

การกำหนด Zone ต้องพิจารณา Stop Time, Scanner Resolution, Field Tolerance, Floor Reflection, Blind Spot, Tool Extension และตำแหน่งทุกแกน ไม่ใช่ดูเฉพาะฐานหุ่นยนต์

1.14.7 7.7.6 LOTO สำหรับงานบำรุงรักษา

ขั้นตอนทั่วไปของ LOTO

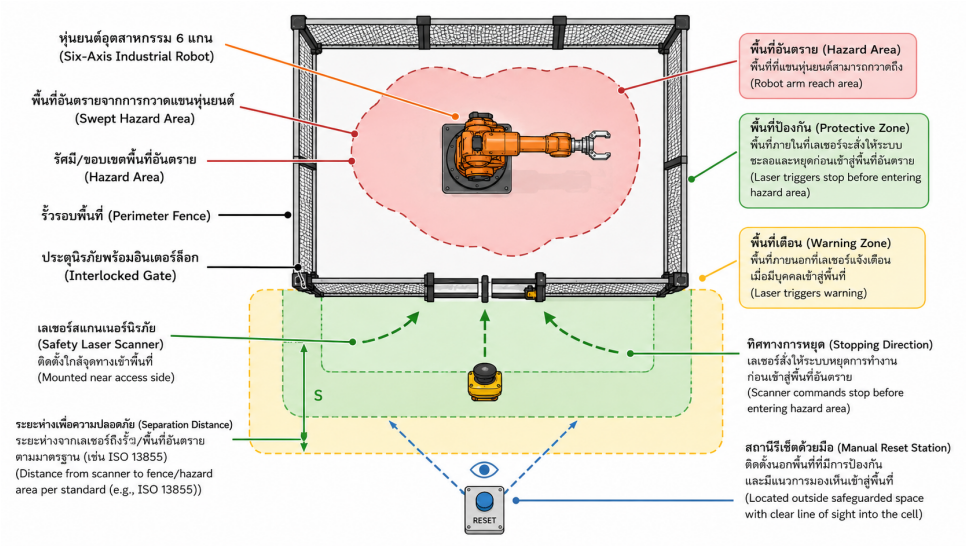
1. แจ้งผู้เกี่ยวข้องและระบุขอบเขตงาน
2. หยุดระบบด้วยวิธีปกติ
3. ระบุแหล่งพลังงานทั้งหมด เช่น ไฟฟ้า Pneumatic, Hydraulic, Gravity, Spring และ Stored Energy
4. แยกแหล่งพลังงานด้วย Disconnect/Valve ที่เหมาะสม
5. ล็อกและติดป้ายโดยผู้ปฏิบัติงานแต่ละคน
6. ระบายหรือควบคุม Stored Energy
7. ยืนยัน Zero-energy State ตามวิธีที่กำหนด
8. ดำเนินงาน
9. ตรวจพื้นที่และประกอบ Guard/Connector กลับ
10. นำ Lock ออกโดยผู้เป็นเจ้าของตาม Procedure
11. แจ้งผู้เกี่ยวข้องและคืนระบบอย่างควบคุม

การกด Hold, Cycle Stop หรือ Emergency Stop **ไม่เท่ากับ LOTO** เพราะพลังงานยังอาจคงอยู่และระบบอาจถูก Reset ได้

1.14.8 7.7.7 ขั้นตอนก่อนเข้าสู่พื้นที่ Safeguarded Space

1. หยุด Cycle ตามขั้นตอนที่อนุมัติ
2. ยืนยันสถานะหุ่นยนต์และอุปกรณ์รอบข้าง
3. เปิด Gate ผ่าน Interlock โดยไม่ Bypass
4. หากเป็นงานซ่อม/ปรับแต่งที่สัมผัสอันตราย ให้ทำ LOTO
5. หากเป็นงาน Teaching ที่ได้รับอนุญาต ใช้ Manual Reduced-speed และ Enabling Device
6. นำ Teach Pendant เข้าไปกับผู้ควบคุม ห้ามวางไว้นอกพื้นที่ให้ผู้อื่นสั่ง
7. ตรวจ Escape Path และ Pinch/Crush Zone
8. สื่อสารบทบาทของทุกคนก่อนเริ่มเคลื่อนที่

1.15 7.8 เปรียบเทียบภาษาโปรแกรมและซอฟต์แวร์จากผู้ผลิต



รูปที่ 7: Warning Zone และ Protective Zone ของเซลล์หุ่นยนต์

ผู้ผลิต	ภาษา/สภาพแวดล้อม	Extension ตัวอย่าง	คำสั่งเคลื่อนที่หลัก	ซอฟต์แวร์ Offline/Simulation
FANUC	TP Language / KAREL	.LS, .TP, .KL	J, L, C	ROBOGUIDE
ABB	RAPID	.MOD	MoveJ, MoveL, MoveC	RobotStudio
KUKA	KRL	.SRC, .DAT	PTP, LIN, CIRC	KUKA.Sim หรือแพลตฟอร์มวิศวกรรมที่รองรับรุ่นนั้น
Yaskawa	INFORM	.JBI	MOVJ, MOVL, MOVC	MotoSim EG-VRC
Mitsubishi	MELFA-BASIC	.MB5 หรือรูปแบบตาม Controller	MOV, MVS, MVR	RT ToolBox3
Universal Robots	PolyScope / URScript	.URP, .script	movej, movel, movec	URSim/PolyScope Simulation

1.15.1 ตาราง 8.7 ภาษาโปรแกรมหุ่นยนต์จากผู้ผลิตชั้นนำ

ตารางนี้ใช้เพื่อเปรียบเทียบแนวคิด ไม่ควรสรุปว่าคำสั่งต่างยี่ห้อมีพฤติกรรมเหมือนกันทุกประการ ความหมายของ Speed, Zone, Orientation Interpolation, Configuration และ Error Handling ต่างกันตามระบบ

1.15.2 ตาราง 8.8 แนวคิดที่เทียบเคียงข้ามผู้ผลิต

แนวคิด	FANUC	ABB	KUKA	Universal Robots
Joint Motion	J	MoveJ	PTP	movej
Linear TCP Motion	L	MoveL	LIN	movel
Circular TCP Motion	C	MoveC	CIRC	movec
Exact Stop	FINE	fine	Approximation off/exact target	Blend radius r=0 โดยแนวคิด
Blending	CNT	z10, z50, ...	$APO/Approximation	Blend radius r
User Frame	UFRAME	wobjdata	Base	Feature/Plane
Tool Frame	UTOOL	tooldata	Tool	TCP

1.16 7.9 กิจกรรมปฏิบัติการประจำบท

1.17 กิจกรรมปฏิบัติการที่ 8-1: การสอนตำแหน่งและเขียนโปรแกรม Pick-and-Place

1.17.1 1. วัตถุประสงค์

เมื่อจบกิจกรรม นักศึกษาสามารถ

- เลือก Joint, World, Tool และ User Coordinate ในการ Jog ได้เหมาะสม
- สอน Home, Approach, Pick, Place และ Retreat Point ได้
- เขียนโปรแกรม Motion, Gripper I/O, Wait และ Timeout ได้
- เปรียบเทียบผลของ Fine กับ Blending ต่อ Path และ Cycle Time ได้
- ปฏิบัติงานใน Manual Reduced-speed โดยใช้ Enabling Device ได้ถูกต้อง

1.17.2 2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

กิจกรรมใช้หลัก Coordinate Frame, TCP, Approach–Process–Retreat, PTP/Linear Motion, Digital I/O และ Handshake โปรแกรมต้องแยกจุด Approach ออกจากจุด Pick/Place และต้องรอสัญญาณ Gripper Confirm ก่อนยกชิ้นงาน

1.17.3 3. อุปกรณ์ เครื่องมือ และซอฟต์แวร์

รายการ	จำนวน	ข้อกำหนด
ชุดหุ่นยนต์เพื่อการศึกษา	1 ชุด/กลุ่ม	มี Teach Pendant, Guard และ Manual Mode
Gripper ที่ติดตั้งและตรวจสอบแล้ว	1 ชุด	ใช้แรง/แรงดันตามระบบฝึก
ชิ้นงานจำลองน้ำหนักเบา	3–5 ชิ้น	ไม่มีขอบคม แตกง่าย หรืออันตราย
ถาด Pick และ Place	อย่างละ 1	ยึดกับโต๊ะหรือ Fixture
Checklist ความปลอดภัย	1 ชุด/กลุ่ม	ใช้ก่อนเปิด Motion
Stopwatch/Controller Cycle Timer	1	ใช้วัดเวลาเทียบ
ซอฟต์แวร์จำลอง ถ้ามี	1 License/กลุ่ม	ใช้ตรวจเส้นทางก่อนหุ่นยนต์จริง

1.17.4 4. แผนภาพหรือชุดทดลอง

```
Pick Tray -> P_PICK_APP -> P_PICK
                | Gripper Close + Confirm
P_PLACE_APP -> P_PLACE -> Place Tray
                | Gripper Open + Confirm
Return -> P_HOME
```

1.17.5 5. ข้อควรระวังด้านความปลอดภัย

- ผู้ควบคุม Teach Pendant มีเพียงคนเดียวต่อรอบ
- เริ่มจาก Simulation หรือ Robot ไม่มีชิ้นงาน
- ใช้ Manual Reduced-speed และ Step/Single Block
- ห้ามเข้า Automatic ขณะ Gate เปิด
- ห้ามจับแขนหรือ End Effector ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมทั่วไปด้วยมือ
- ห้าม Bypass Gripper Sensor หรือ Safety Interlock เพื่อให้กิจกรรมผ่าน
- หากมีการเคลื่อนที่ผิดทิศ ให้ปล่อย Enabling Device หรือใช้วิธีหยุดที่ได้รับการฝึกทันที

1.17.6 6. ขั้นตอนการปฏิบัติ

1. ทำ Pre-job Briefing และตรวจ Checklist ความปลอดภัย
2. เปิดระบบตาม Standard Operating Procedure ของห้องปฏิบัติการ
3. เลือก Tool Frame และ User Frame ที่อาจารย์กำหนด

4. ตรวจ TCP ด้วยจุดอ้างอิงโดยไม่ชนหรือกด Tool ลงบน Jig
5. Jog ด้วย Joint Coordinate ไปยัง P_HOME
6. ใช้ World Coordinate ไปยังบริเวณเหนือ Pick Fixture
7. ใช้ Tool/User Coordinate สอน P_PICK_APP และ P_PICK
8. สอน P_PLACE_APP และ P_PLACE
9. เขียนโปรแกรมเริ่มต้นโดยใช้ Fine ทุกจุด
10. เพิ่ม Gripper Close/Open และ Wait Confirm พร้อม Timeout
11. ตรวจโปรแกรมด้วย Static Review
12. ทดสอบแบบ Step โดยไม่ใช้ชิ้นงาน
13. ทดสอบด้วยชิ้นงานจำลองเมื่ออาจารย์อนุญาต
14. วัด Cycle Time จำนวน 3 รอบ
15. เปลี่ยนเฉพาะจุดผ่านกลางอากาศเป็น Blend ระดับต่ำหรือกลาง
16. ทดสอบ Path และ Clearance อีกครั้ง
17. วัด Cycle Time 3 รอบและเปรียบเทียบ
18. Backup โปรแกรมและส่ง Point List

1.17.7 7. ตารางบันทึกผล

จุด	Coordinate ที่ใช้สอน	Motion	Speed	Fine/Blend	Tool/User No.	ผลการตรวจ Clearance
HOME						
PICK_APP						
PICK						
PLACE_APP						
PLACE						

การทดลอง	Cycle 1 (s)	Cycle 2 (s)	Cycle 3 (s)	ค่าเฉลี่ย (s)	หมายเหตุ
Fine ทุกจุด					
Blend เฉพาะจุดผ่าน					

1.17.8 8. การคำนวณและวิเคราะห์ผล

ค่าเฉลี่ย Cycle Time

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3}$$

ร้อยละการลด Cycle Time

$$\%\text{Reduction} = \frac{\bar{t}_{Fine} - \bar{t}_{Blend}}{\bar{t}_{Fine}} \times 100$$

นักศึกษาต้องอธิบายว่าการลดเวลามาจากจุดใด และ Path Deviation ที่เพิ่มขึ้นยังอยู่ใน Clearance ที่ยอมรับได้หรือไม่

1.17.9 9. การเปรียบเทียบผลจริงกับทฤษฎีหรือแบบจำลอง

หากใช้ OLP ให้เปรียบเทียบ Cycle Time และ Path จาก Simulation กับระบบจริง พร้อมอธิบายความต่างจาก Acceleration Limit, Controller Option, Payload, I/O Delay และ Gripper Response

1.17.10 10. คำถามหลังการทดลอง

1. เหตุใดจุด Pick และ Place จึงควรใช้ Fine มากกว่าจุดผ่านกลางอากาศ
2. หากเปลี่ยน User Frame แล้วไม่สอนจุดใหม่ จุดทั้งหมดควรเปลี่ยนอย่างไร
3. หาก GRIP_OK ไม่มา โปรแกรมควรหยุดที่ State ใด
4. จุดใดควรใช้ Linear Motion และเหตุใด
5. Blending ที่มากเกินไปอาจทำให้เกิดความเสี่ยงใด

1.17.11 11. เกณฑ์การประเมิน

เกณฑ์	คะแนน
ความปลอดภัยและการใช้ Teach Pendant	25
ความถูกต้องของ Tool/User Frame และ Point	20
โปรแกรม Motion, I/O, Timeout	25
การวัดและวิเคราะห์ Cycle Time	15
การตั้งชื่อ Comment และ Backup	10
การตอบคำถามหลังทดลอง	5
รวม	**100**

1.18 กิจกรรมปฏิบัติการที่ 8-2: Daily Check และการจัดทำแผน Preventive Maintenance

1.18.1 1. วัตถุประสงค์

- ตรวจสภาพภายนอกของหุ่นยนต์และ End Effector ได้อย่างเป็นระบบ
- แยก Normal Condition, Observation และ Defect ได้
- จัดทำ PM Schedule ตาม Manual-based, Time-based และ Condition-based ได้
- บันทึกหลักฐานโดยไม่แต่งค่าที่ไม่ได้วัด

1.18.2 2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

PM ใช้การตรวจซ้ำตามรอบและเกณฑ์ที่กำหนด การสังเกตต้องอ้างอิง Baseline หรือคู่มือ ไม่ควรสรุปสาเหตุจากลักษณะภายนอกเพียงอย่างเดียว

1.18.3 3. อุปกรณ์ เครื่องมือ และซอฟต์แวร์

1.18.4 4. แผนภาพหรือวงจร

ใช้รูปที่ 8.4 และแผนผังตำแหน่งตรวจของหุ่นยนต์รุ่นที่ห้องปฏิบัติการใช้งาน

รายการ	จำนวน	ข้อกำหนด
หุ่นยนต์ที่หยุดและจัดสภาพปลอดภัย	1 ชุด	ไม่อนุญาต Motion ระหว่าง Visual Check
ไฟฉายแรงดันต่ำ	1	ใช้ส่องตรวจ ไม่สอดมือเข้า Pinch Point
กระจกตรวจ	1	ด้ามยาว ไม่มีขอบคม
Torque Mark Reference	1 ชุด	ใช้สังเกต ไม่ขันจริงหากไม่มีค่าคู่มือ
แบบฟอร์ม Daily/PM Record	1 ชุด/กลุ่ม	มีช่องผู้ตรวจและหลักฐาน
กล้องถ่ายภาพของหน่วยงาน	1	ไม่ถ่ายข้อมูลลับหรือ Serial ตามนโยบาย
Product Manual ของรุ่นฝึก	1	ใช้หาค่ารอบและข้อกำหนด

1.18.5 5. ข้อควรระวังด้านความปลอดภัย

- หยุดระบบและใช้วิธีแยกพลังงานตามขอบเขตงาน
- ไม่เปิด Cover หรือถอด Connector ในกิจกรรมพื้นฐาน
- ไม่เติม Grease ไม่ขัน Bolt และไม่เปลี่ยน Battery หากไม่มีคู่มือ เครื่องมือ และผู้ควบคุมที่ได้รับอนุญาต
- ห้ามยืนใต้ Payload หรือส่วนที่อาจตกจากแรงโน้มถ่วง
- ไม่ใช้มือสัมผัสบริเวณที่สงสัยว่าร้อนหรือมีรอยรั่ว

1.18.6 6. ขั้นตอนการปฏิบัติ

1. อ่าน Manual หัวข้อ Maintenance Schedule ของรุ่นฝึก
2. ระบุจุดตรวจรอบ Robot Base, Arm, Wrist, Tool และ Dress Pack
3. ตรวจรอยรั่ว รอยแตก รอยขูด การบิดสาย และ Fastener Mark
4. ตรวจ End Effector, Air Hose, Sensor และ Fixture
5. ตรวจ Fan/Filter หรือ Controller Cabinet เฉพาะจุดที่อนุญาต
6. ตรวจประวัติ Alarm และ PM ครั้งก่อนจากข้อมูลตัวอย่าง
7. จัดประเภทผลเป็น OK, Monitor, Action Required, Not Inspected
8. จัดทำแผน PM 1 ปี โดยอ้าง Manual และเพิ่ม Condition Check ที่เหมาะสม
9. เสนอผู้รับผิดชอบและหลักฐานของแต่ละงาน
10. นำเสนอ 5 นาทีต่อกลุ่ม

1.18.7 7. ตารางบันทึกผล

จุดตรวจ	สภาพที่คาดหวัง	ผลตรวจ	หลักฐาน/ภาพ	ระดับ	การดำเนินการ
Robot Base	ไม่มีการคลาย/รอยเคลื่อน				
Axis 1–3	ไม่มีรอยรั่วหรือเสียงผิดปกติที่รายงาน				
Wrist Axis 4–6	Cable ไม่บิดและ Cover สมบูรณ์				
Dress Pack	ไม่มีรอยขูด หักพับ หรือตึง				
End Effector	Fastener/Sensor/Hose สมบูรณ์				
Controller	Indicator/Fan/Filter ตามข้อกำหนด				
Safety Device	สถานะตาม Functional Test Procedure				

1.18.8 8. การคำนวณและวิเคราะห์ผล

ให้นักศึกษาสร้าง Priority Number เชิงการศึกษา

$$P = S \times O \times D$$

โดย S คือความรุนแรง O คือโอกาสเกิด และ D คือความยากในการตรวจพบ ให้คะแนน 1–5 ตัวชี้วัดนี้ใช้จัดลำดับการติดตามในกิจกรรมเท่านั้น ไม่แทน Risk Assessment ตามมาตรฐาน

1.18.9 9. การเปรียบเทียบผลจริงกับทฤษฎีหรือแบบจำลอง

เปรียบเทียบ PM Schedule ที่กลุ่มสร้างกับคู่มือผู้ผลิต ระบุรายการที่เป็น Mandatory, Recommended และ Condition-based เพิ่มเติม

1.18.10 10. คำถามหลังการทดลอง

1. เหตุใดรอบ PM จึงไม่ควรคัดลอกจากหุ่นยนต์คนละรุ่น
2. รอย Grease ใดควรจัดเป็น Monitor และข้อมูลใดต้องเก็บเพิ่ม
3. หาก Torque Mark เลื่อน ควรทำอย่างไรก่อนขัน
4. ประวัติ Alarm ช่วยวางแผน PM อย่างไร
5. หลักฐานใดทำให้ PM Record ตรวจสอบย้อนหลังได้

1.18.11 11. เกณฑ์การประเมิน

เกณฑ์	**คะแนน**
ปฏิบัติตาม Safety Boundary	25
ความครบถ้วนของ Visual Check	20
การใช้คู่มือและไม่คาดเดาค่า	20
คุณภาพ PM Schedule	20
หลักฐานและการสื่อสาร	15
รวม	**100**

1.19 กิจกรรมปฏิบัติการที่ 8-3: การอ่าน Alarm และ Troubleshooting ด้วยสถานการณ์จำลอง

1.19.1 1. วัตถุประสงค์

- อ่าน Alarm Code, Event Log, Program Line และ I/O State ได้
- สร้างแผน Fault Isolation ที่ตรวจทีละตัวแปรได้
- เลือก Safe Recovery และบันทึก Root Cause ได้
- แยกการ Reset, Repair, Mastering และ Escalation ได้

1.19.2 2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ใช้กระบวนการ Symptoms → Safe State → Evidence → Hypothesis → Test → Verify → Record การทดลองนี้มุ่งฝึกวิเคราะห์ ไม่มุ่งสร้าง Fault ทางกายภาพที่อาจทำให้อุปกรณ์เสียหาย

1.19.3 3. อุปกรณ์ เครื่องมือ และซอฟต์แวร์

1.19.4 4. แผนภาพหรือวงจร

ใช้รูปที่ 8.7 และ Block Diagram I/O Trainer

รายการ	จำนวน	ข้อกำหนด
Robot Simulator หรือ Virtual Controller	1 ชุด/กลุ่ม	ใช้ Fault/Alarm ที่ซอฟต์แวร์รองรับ
ชุด I/O Trainer แรงดันต่ำ	1 ชุด	ใช้จำลอง Sensor ON/OFF อย่างปลอดภัย
Alarm Screenshot/Log ที่อาจารย์เตรียม	3–5 กรณี	ลบข้อมูลลับและระบุ Controller Version
Troubleshooting Worksheet	1 ชุด/กลุ่ม	มีช่อง Evidence และ Test Result
Multimeter	ตามความจำเป็น	ใช้เฉพาะวงจรฝึกแรงดันต่ำและภายใต้การกำกับ

1.19.5 5. ข้อควรระวังด้านความปลอดภัย

- **ห้ามถอด Encoder Connector ของหุ่นยนต์จริงขณะมีพลังงาน**
- **ห้ามเพิ่ม Payload เกิน Specification เพื่อสร้าง Overload Alarm**
- ใช้ Simulation, Alarm Log หรือ Fault Injection ที่ผู้ผลิต/อาจารย์กำหนด
- ไม่เปลี่ยน Safety Parameter, Servo Parameter หรือ Mastering Data เพื่อการทดลอง
- การวัดไฟฟ้าทำเฉพาะชุดฝึกแรงดันต่ำที่แยกจากวงจรหุ่นยนต์จริง

1.19.6 6. ขั้นตอนการปฏิบัติ

1. รับ Case File จากอาจารย์ เช่น Gripper Timeout, Fieldbus Disconnect หรือ Position-related Alarm Log
2. บันทึก Symptoms และข้อมูลที่มี
3. ระบุอันตรายและวิธีทำให้ระบบปลอดภัย
4. แยกสาเหตุที่เป็นไปได้อย่างน้อย 3 ข้อ
5. จัดลำดับ Test จากไม่รบกวนระบบและมีความเสี่ยงต่ำ
6. ตรวจ I/O, Program, Log หรือ Simulation ตาม Case
7. บันทึกผลการทดสอบทุกขั้น
8. ระบุ Root Cause หรือระดับความเชื่อมั่น
9. เสนอ Corrective Action และ Preventive Action
10. เขียน Safe Recovery Sequence
11. แลก Case กับอีกกลุ่มเพื่อตรวจทาน

1.19.7 7. ตารางบันทึกผล

ลำดับ	Evidence/อาการ	สมมติฐาน	วิธีทดสอบ	ผลทดสอบ	สรุป
1					
2					
3					
4					

Root Cause	Corrective Action	Preventive Action	Verification	ผู้อนุมัติ

1.19.8 8. การคำนวณและวิเคราะห์ผล

หาก Case มีข้อมูล Downtime ให้วิเคราะห์ MTTR และเวลาที่เสียจากการ Reset โดยไม่มีการวิเคราะห์ เปรียบเทียบกับขั้นตอน Fault Isolation ที่เป็นระบบ

1.19.9 9. การเปรียบเทียบผลจริงกับทฤษฎีหรือแบบจำลอง

อธิบายว่าข้อมูลใน Simulator หรือ Screenshot ใดอาจไม่สะท้อน Hardware จริง เช่น Contact Resistance, Intermittent Cable หรือ Mechanical Binding

1.19.10 10. คำถามหลังการทดลอง

1. เหตุใดการ Reset Alarm ซ้ำจึงอาจทำให้ข้อมูลวิเคราะห์หาย
2. หลักฐานใดแยก Sensor Fault ออกจาก I/O Mapping Fault
3. เมื่อใดควร Escalate ให้ผู้ผลิตหรือผู้มีความสามารถเฉพาะ
4. Safe Recovery ต่างจากการเริ่ม Program ใหม่อย่างไร
5. Corrective Action และ Preventive Action ต่างกันอย่างไร

1.19.11 11. เกณฑ์การประเมิน

เกณฑ์	**คะแนน**
การทำให้ระบบปลอดภัย	25
การเก็บ Evidence	20
คุณภาพ Fault Isolation	25
Root Cause/Action/Verification	20
รายงานและการตรวจทานข้ามกลุ่ม	10
รวม	**100**

1.20 8. ความเข้าใจผิดที่พบบ่อย

1.20.1 8.1 “จุดปลายเหมือนกัน จึงใช้ PTP หรือ LIN ก็เหมือนกัน”

ไม่ถูกต้อง เพราะ PTP วางแผนใน Joint Space และไม่รับประกันเส้นทาง TCP ขณะที่ LIN ควบคุมให้ TCP เดินเป็นเส้นตรง จุดต้นและปลายเหมือนกันอาจให้ Swept Volume, Singularity Risk และ Cycle Time ต่างกัน

1.20.2 8.2 “TCP คือปลายโลหะของ Tool เสมอ”

TCP เป็นจุดอ้างอิงที่ผู้ใช้กำหนด อาจอยู่ที่ปลายลวดเชื่อม กึ่งกลางนิ้วจับ จุดโฟกัสของกล้อง หรือจุดเสมือนนอกตัว Tool ได้ สิ่งสำคัญคือ TCP ต้องสัมพันธ์กับงานและได้รับการ Calibration

1.20.3 8.3 “User Frame เปลี่ยนแล้วทุกจุดจะถูกต้องโดยอัตโนมัติ”

จุดที่บันทึกสัมพันธ์กับ User Frame จะย้ายตาม Frame แต่ความถูกต้องขึ้นกับการสอน Frame, Convention, Tool และ Fixture จริง หาก Frame ผิด จุดทั้งหมดจะผิดอย่างเป็นระบบ

1.20.4 8.4 “CNT 100 หมายถึงหุ่นยนต์ผ่านจุดด้วยความเร็วสูงสุดเสมอ”

CNT/Zone กำหนดระดับการต่อเนื่องหรือการเบี่ยงจากจุด ไม่ใช่คำสั่งให้ใช้ความเร็วสูงสุดโดยตรง ความเร็วจริงขึ้นกับ Speed Command, Acceleration, Geometry, Payload และข้อจำกัดของ Controller

1.20.5 8.5 “Simulation ไม่ชน แปลว่าระบบจริงไม่ชน”

Simulation ใช้ Model ที่อาจไม่มีสายยืดหยุ่น ความคลาดเคลื่อน Fixture, Tool Deflection, Backlash, Thermal Effect หรือวัตถุชั่วคราว จึงยังต้องทำ On-site Validation ที่ความเร็วต่ำ

1.20.6 8.6 “Emergency Stop ใช้แทน LOTO ได้”

Emergency Stop เป็นคำสั่งหยุดฉุกเฉิน แต่ไม่ได้แยกพลังงานทุกชนิดและอาจถูก Reset ได้ งานซ่อมบำรุงที่มีการสัมผัสอันตรายต้องใช้ขั้นตอนควบคุมพลังงานตาม LOTO

1.20.7 8.7 “Alarm หายหลัง Reset แปลว่าปัญหาจบแล้ว”

Alarm บางชนิดเกิดเป็นระยะหรือกลับมาเมื่อโหลดซ้ำ การแก้ไขต้องยืนยัน Root Cause ทดสอบหลาย Cycle และติดตาม Trend ไม่ใช่พิจารณาเพียงว่าไฟ Alarm ดับ

1.20.8 8.8 “ต้องเติม Grease ทุก 3 เดือนสำหรับหุ่นยนต์ทุกตัว”

ไม่มีรอบสากลเดียว ระยะและวิธีหล่อลื่นขึ้นกับรุ่น ชั่วโมงทำงาน โหลด ตำแหน่งติดตั้ง และชนิด Grease การเติมผิดชนิดหรือเกินปริมาณอาจทำให้เสียหาย

1.20.9 8.9 “เปลี่ยน Servo Motor แล้วสอน TCP ใหม่ก็เพียงพอ”

การเปลี่ยน Motor/Encoder อาจกระทบ Mastering ของแกน ต้องทำขั้นตอนอ้างอิงตำแหน่งตามผู้ผลิตก่อน แล้วจึงตรวจ TCP, User Frame และจุดกระบวนการ

1.20.10 8.10 “Cobot ปลอดภัยโดยไม่ต้องมีการประเมินความเสี่ยง”

Cobot เป็นองค์ประกอบหนึ่งของระบบ ความเสี่ยงยังขึ้นกับ Tool, Workpiece, Speed, Force, Pinch Point และ Process เช่น ของร้อนหรือคม ต้องประเมิน Robot Application ทั้งระบบ

1.21 9. การประยุกต์ใช้ในงานจริง

1.21.1 9.1 งานเชื่อมอาร์ก

ลำดับที่เหมาะสมอาจใช้ Joint Motion ไปยัง Approach, Linear Motion เข้า Weld Start, Linear/Circular Motion ตามแนวเชื่อม และ Blend ที่รักษาความเร็วต่อเนื่อง Tool Frame ต้องผูกกับปลายลวดเชื่อม ส่วน User Frame ผูกกับชิ้นงานหรือ Positioner หากชิ้นงานหมุนต้องใช้การ Calibration และ Coordinated Motion ที่เหมาะสม

ข้อมูลสำคัญนอกจาก Motion ได้แก่ Welding Schedule, Arc Start Confirmation, Gas/Current Fault, Touch Sensing และ Recovery หลัง Arc Fault การเพิ่ม Speed โดยไม่ปรับ Process Parameter อาจทำให้คุณภาพแนวเชื่อมเปลี่ยน

1.21.2 9.2 งานหยิบวางจาก Conveyor

โปรแกรมต้องประสาน Vision/Encoder Conveyor, Part Tracking, Gripper Confirm และ Place Clear จุด Pick อาจเปลี่ยนตามตำแหน่งชิ้นงานแบบ Real-time จึงต้องใช้ Frame Transformation และ Tracking Function ของ Controller การทดสอบต้องรวมกรณีชิ้นงานขาด ชิ้นงานซ้อน Sensor ล่าช้า และ Gripper จับไม่เต็ม

1.21.3 9.3 งาน Machine Tending

หุ่นยนต์ทำงานร่วมกับประตูเครื่องจักร Chuck/Clamp และ Cycle Start Handshake จุดสำคัญคือการไม่เข้าเครื่องจนกว่า Spindle หยุดและประตูเปิดยืนยัน รวมทั้งห้ามเริ่ม Machine Cycle จนหุ่นยนต์ออกจากพื้นที่และส่ง Robot Clear การ Recover หลัง Cycle หยุดต้องรู้ว่าชิ้นงานอยู่ที่ Gripper, Chuck หรือ Fixture

1.21.4 9.4 งานพ่นสีหรือเดินกาว

ต้องควบคุม TCP Speed, Orientation และ Standoff Distance ต่อเนื่อง ใช้ Linear/Circular/Spline ตามความสามารถของระบบ จุดมากเกินไปทำให้โปรแกรมซับซ้อน ส่วนจุดน้อยเกินไปทำให้ Path ไม่ตามผิว ควรใช้ OLP จาก CAD และตรวจ Flow/Trigger Delay ของอุปกรณ์ Process

1.21.5 9.5 งานประกอบ

งานประกอบต้องรักษาแนวเข้า ลดความเร็วใกล้ Contact และอาจใช้ Force/Torque Control หรือ Compliance ฟังก์ชันเหล่านี้ไม่ควรถูกใช้แทน Fixture ที่ออกแบบไม่ดี การวิเคราะห์ Jam ต้องแยกความผิดพลาดจากตำแหน่ง Part, Tool Wear, Sensor และ Programming

1.21.6 9.6 การบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์

ระบบสมัยใหม่สามารถเก็บข้อมูล Motor Load, Temperature, Alarm Frequency, Cycle Count และ Stop Pattern เพื่อระบุแนวโน้ม การตีความต้องมี Baseline และ Context ตัวอย่างเช่น Motor Load สูงขึ้นอาจเกิดจาก Payload เปลี่ยน Grease หนืดขึ้น กลไกติดขัด หรือเส้นทางใหม่ ไม่ควรสรุปว่า Gearbox เสียจากตัวแปรเดียว

1.22 10. สรุปท้ายบท

การควบคุมและเขียนโปรแกรมหุ่นยนต์อุตสาหกรรมเริ่มจากการกำหนดกรอบอ้างอิงที่ถูกต้อง Joint Coordinate เหมาะกับการควบคุมท่าทางแกน World/Base Coordinate เหมาะกับการเคลื่อนตามพื้นที่ Tool Coordinate เหมาะกับการเคลื่อนตามแนวเครื่องมือ และ User/Work Object Coordinate ช่วยให้โปรแกรมสัมพันธ์กับ Fixture หรือชิ้นงาน

การสอนตำแหน่งต้องตรวจ Tool, Frame, Configuration, Clearance และ Singularity จุดทำงานควรจัดตามแนวคิด Approach–Process–Retreat ส่วนการเลือก Motion ต้องพิจารณาความต้องการของ Path: PTP เหมาะกับการเคลื่อนย้ายในพื้นที่ว่าง LIN เหมาะกับเส้นตรง และ CIRC เหมาะกับส่วนโค้ง Blending ลด Cycle Time แต่เพิ่มการเบี่ยงจากจุด จึงใช้เฉพาะบริเวณที่ตรวจ Clearance แล้ว

โปรแกรมที่ดีต้องรวม Motion, I/O, Logic, Timeout, Fault Handling และ Recovery ไม่ควรใช้ WAIT แบบไม่มีขอบเขตหรือ Restart โดยไม่รู้ State ของชิ้นงาน การทดสอบควรผ่าน Static Review, Simulation, Dry Run และ Process Validation ตามลำดับ

การบำรุงรักษาต้องอ้างอิงคู่มือของรุ่นจริง ตาราง PM ทั่วไปใช้ได้เพียงเป็นโครงสร้างสำหรับวางแผน ระยะ Grease, Battery และ Major Service ไม่ควรถูกกำหนดจากการคาดเดา หลัง Crash หรือการเปลี่ยนอุปกรณ์วัดตำแหน่งต้องตรวจ Mastering, Calibration, TCP, User Frame และ Safety Configuration

Troubleshooting ที่ดีเริ่มจากทำให้ระบบปลอดภัย เก็บ Alarm/Log แยกอาการจากสาเหตุ ทดสอบทีละตัวแปร และยืนยันผลก่อนคืน Automatic Mode การ Reset ไม่ใช่ Root Cause Analysis

ด้านความปลอดภัย การออกแบบและใช้งาน Robot Cell ต้องพิจารณา ISO 10218-1:2025, ISO 10218-2:2025, ISO 12100, ISO 13855 และมาตรฐานควบคุมที่เกี่ยวข้อง ระยะป้องกันต้องใช้เวลาหยุดรวมของระบบ การกด Emergency Stop ไม่เท่ากับ LOTO และการเข้า Safeguarded Space ต้องเป็นไปตามขั้นตอนที่ผ่าน Risk Assessment

---

1.23 11. คำถามทบทวนท้ายบท

1. อธิบายความแตกต่างระหว่าง Joint Coordinate และ World Coordinate ในการ Jog หุ่นยนต์
2. Tool Coordinate ช่วยให้การสอนจุด Approach และ Retreat ดีขึ้นอย่างไร

3. เพราะเหตุใด TCP Calibration ที่ผิดจึงกระทบ Linear Path
4. User Frame ช่วยลดเวลาปรับโปรแกรมเมื่อ Fixture ถูกย้ายอย่างไร
5. เปรียบเทียบ Online Teaching, Lead-through และ Offline Programming
6. PTP Motion และ Linear Motion เหมาะกับงานประเภทใด และมีข้อจำกัดต่างกันอย่างไร
7. Circular Motion ต้องใช้ข้อมูลจุดใดบ้าง และมีกรณีใดที่คำนวณ Arc ไม่ได้ดี
8. FINE และ CNT/Zone มีผลต่อ Cycle Time และความแม่นยำผ่านจุดอย่างไร
9. เหตุใดโปรแกรม Gripper จึงควรใช้ Confirm Signal และ Timeout
10. Handshake ที่ดีระหว่าง PLC กับ Robot ควรมี State ใดบ้าง
11. Mastering และ TCP Calibration แตกต่างกันอย่างไร
12. ระบุเหตุการณ์อย่างน้อย 4 กรณีที่ต้องตรวจ Mastering หรือ Calibration
13. เหตุใด PM Schedule จึงต้องอ้างอิงรุ่นและชั่วโมงทำงาน
14. อธิบายขั้นตอน Troubleshooting ตั้งแต่เกิดอาการจนถึงคืนระบบ
15. Safe Recovery ต่างจากการกด Reset แล้วเริ่มโปรแกรมใหม่อย่างไร
16. อธิบายความหมายของ $S = KT + C$ และเหตุใด T ต้องเป็นเวลารวม
17. Emergency Stop และ LOTO แตกต่างกันอย่างไร
18. เหตุใด Cobot ยังต้องมี Risk Assessment ระดับ Application

1.24 12. แบบฝึกหัดท้ายบท

1.24.1 12.1 ระดับพื้นฐาน

ข้อ 1 จงเลือก Coordinate System ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสถานการณ์ต่อไปนี้ พร้อมให้เหตุผล

1. หมุน Axis 2 เพื่อยก Elbow หลบ Fixture
2. เลื่อนปลายหัวเชื่อมออกตามแกนของ Torch 50 mm
3. ยก TCP ขึ้นด้านบนของเซลล์ 100 mm
4. วางจุดบนถาดที่สามารถย้ายตำแหน่งได้
5. กลับไปยัง Home ที่กำหนดด้วยค่า Joint

ข้อ 2 จงอธิบายความหมายของ TCP และระบุผลกระทบอย่างน้อย 3 ข้อเมื่อ TCP Calibration ผิด

ข้อ 3 จงจับคู่ Motion กับงาน

- PTP
- Linear
- Circular

งาน: เคลื่อน Home ไป Approach, เชื่อมแนวตรง, เชื่อมรอบท่อ, เข้า Tool Changer, เคลื่อนผ่านพื้นที่ว่าง

ข้อ 4 โปรแกรมมีคำสั่ง WAIT DI[GRIP_OK]=ON โดยไม่มี Timeout จงอธิบายความเสี่ยงและเสนอรูปแบบที่เหมาะสมกว่า

ข้อ 5 จงจำแนกรายการต่อไปนี้เป็น Daily Check, Periodic PM, Condition-based Maintenance หรือ Corrective Maintenance

1. ตรวจสาย Dress Pack ก่อนเริ่มกะ
2. เปลี่ยนชิ้นส่วนหลัง Gearbox เสีย
3. ตรวจแนวโน้ม Motor Load เพิ่มขึ้น
4. เปลี่ยน Battery ตามรอบของคู่มือ
5. ตรวจ Alarm ค้างจากกะก่อน

1.24.2 12.2 ระดับวิเคราะห์

ข้อ 6 ถาดมี 2 แถว 5 คอลัมน์ จุดแรกใน User Frame คือ $(120, 80, 30)$ mm ระยะ Pitch ตามแกน X_U เท่ากับ 45 mm และตามแกน Y_U เท่ากับ 70 mm จงหาพิกัดช่องแถวที่ 2 คอลัมน์ที่ 5 โดยดัชนีเริ่มจากศูนย์

ข้อ 7 โปรแกรม Pick-and-Place มีลำดับดังนี้

```
J HOME
L PICK
DO GRIP_CLOSE = ON
L PLACE
DO GRIP_CLOSE = OFF
J HOME
```

จงวิเคราะห์ข้อบกพร่องอย่างน้อย 6 ประเด็น และเขียนลำดับที่ปรับปรุงแล้ว

ข้อ 8 โปรแกรมเดิมใช้ Fine ที่จุดผ่านกลางอากาศ 6 จุด แต่ละจุดเพิ่มเวลาเร่ง/ลดความเร็ว 0.18 s หากปรับเป็น Blend อย่างปลอดภัย จงประมาณเวลาที่ลดได้ต่อ Cycle และต่อ 2,400 Cycle

ข้อ 9 ข้อมูลหนึ่งเดือน: เวลาทำงานรวม 960 h เกิด Failure 6 ครั้ง เวลาซ่อมรวม 15 h จงหา MTBF, MTTR และ Availability เชิงพื้นฐาน

ข้อ 10 วิเคราะห์กรณี GRIP_OK ไม่มา โดยสร้าง Fault Tree อย่างน้อย 4 กิ่ง ครอบคลุม Program, Electrical I/O, Pneumatic และ Mechanical

1.24.3 12.3 ระดับประยุกต์ใช้

ข้อ 11 จงออกแบบโปรแกรมหุ่นยนต์สำหรับหยิบชิ้นงาน 10 ชิ้นจากตำแหน่งรับและวางลงถาด 2 × 5 ช่อง โดยมีเงื่อนไข

- ใช้ User Frame ของถาด
- ใช้ Offset จากจุดต้นแทนการสอนครบ 10 จุด
- ตรวจ PART_PRESENT, PLACE_CLEAR และ GRIP_OK
- มี Timeout และ Fault Routine
- จุด Pick/Place ใช้ Fine
- จุดผ่านกลางอากาศใช้ Blend ที่เหมาะสม
- หลัง Fault ต้องไม่เริ่มซ้ำโดยอัตโนมัติ

ให้เขียนเป็น Pseudocode หรือภาษาหุ่นยนต์ที่เลือก พร้อมอธิบาย State และ I/O

ข้อ 12 กำหนดแผนฝึกอบรมให้เปลี่ยน Encoder Battery ทุก 3 ปี หุ่นยนต์มีอายุ 7.5 ปี จงหาจำนวนครั้งที่ควรเปลี่ยนแล้ว ครั้งต่อไป และออกแบบข้อมูลอย่างน้อย 6 ช่องที่ต้องบันทึกใน Battery Replacement Record

ข้อ 13 Light Curtain มี Response Time 15 ms, Safety Logic และ Network รวม 20 ms, Robot Stop Time ที่วัดได้ 320 ms และใช้ค่าตามแบบฝึก $K = 2{,}000$ mm/s, $C = 850$ mm, Safety Margin เพิ่ม 30 ms จงคำนวณระยะ S และเปรียบเทียบกับการคำนวณที่ใช้ 15 ms เพียงค่าเดียว

1.25 12.4 แนวคำตอบสำหรับผู้สอน

1.25.1 เฉลยข้อ 1

1. Joint — ต้องการควบคุม Axis 2 โดยตรง
2. Tool — ต้องการเคลื่อนตามแกนของ Torch
3. World/Base — ต้องการยกตามแกนคงที่ของเซลล์
4. User/Work Object — จุดสัมพันธ์กับถาดที่อาจย้าย
5. Joint — Home ถูกกำหนดด้วยค่าแกน

1.25.2 เฉลยข้อ 2

TCP คือจุดอ้างอิงของเครื่องมือที่ Controller ใช้คำนวณ Position และ Path ผลกระทบเมื่อผิด ได้แก่

- จุด Pick/Place คลาด
- Linear Motion ของจุดใช้งานจริงไม่เป็นเส้นตรงตามต้องการ
- Orientation และ Standoff Distance ผิด
- Collision Check จาก Tool Model ไม่ตรงระบบจริง
- Program ที่ใช้ User Frame/Offset มีความคลาดเคลื่อนทั้งชุด

1.25.3 เฉลยข้อ 3

- PTP: Home ไป Approach และเคลื่อนผ่านพื้นที่ว่าง
- Linear: เชื่อมแนวตรงและเข้า Tool Changer
- Circular: เชื่อมรอบท่อ

Tool Changer อาจใช้ PTP ไปยัง Approach แล้วใช้ Linear เข้า Coupling

1.25.4 เฉลยข้อ 4

ความเสี่ยงคือโปรแกรมค้างไม่มีกำหนด ผู้ปฏิบัติงานอาจพยายาม Bypass Sensor หรือ Restart โดยไม่ทราบ State ควรใช้ Wait with Timeout แล้วเข้าสู่ Fault Routine ที่ปิด Output ตามความเหมาะสม แสดง Alarm และรอการยืนยันก่อน Retry

1.25.5 เฉลยข้อ 5

1. Daily Check
2. Corrective Maintenance

3. Condition-based Maintenance
4. Periodic PM ตามรอบคู่มือ
5. Daily Check

1.25.6 เฉลยข้อ 6

แถวที่ 2 ให้ $j = 1$ คอลัมน์ที่ 5 ให้ $i = 4$

$$\mathbf{p}_{41} = \begin{bmatrix} 120 \\ 80 \\ 30 \end{bmatrix} + 4 \begin{bmatrix} 45 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + 1 \begin{bmatrix} 0 \\ 70 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{p}_{41} = \begin{bmatrix} 300 \\ 150 \\ 30 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

1.25.7 เฉลยข้อ 7

ข้อบกพร่องตัวอย่าง

1. ไม่มี Tool/User Frame
2. ไม่มี Approach/Retreat
3. ใช้ Linear จาก Home ไป Pick ซึ่งอาจไม่เหมาะ
4. ไม่มี PART_PRESENT
5. ไม่มี PLACE_CLEAR
6. ไม่มี GRIP_OK
7. ไม่มี Gripper Open Confirm
8. ไม่มี Timeout/Fault
9. ไม่กำหนด Speed/Termination
10. อาจลากชิ้นงานผ่าน Fixture

ลำดับที่ปรับปรุง

Set Tool/User

Wait CELL_READY, PART_PRESENT, PLACE_CLEAR

MoveJ HOME fine

MoveJ PICK_APP blend

MoveL PICK fine

Close Gripper

Wait GRIP_OK with timeout -> fault

MoveL PICK_APP low_blend

MoveJ PLACE_APP blend

MoveL PLACE fine

Open Gripper

Wait GRIP_OPEN with timeout -> fault

MoveL PLACE_APP low_blend

```
MoveJ HOME fine
Signal COMPLETE
```

1.25.8 เฉลยข้อ 8

$$\Delta t = 6(0.18) = 1.08 \text{ s/cycle}$$

สำหรับ 2,400 Cycle

$$1.08(2400) = 2592 \text{ s} = 43.2 \text{ min}$$

ลดได้ประมาณ 43.2 นาทีภายใต้สมมติฐานว่า Blend ไม่เพิ่มเวลาส่วนอื่นและผ่านการตรวจ Safety/Collision

1.25.9 เฉลยข้อ 9

$$MTBF = \frac{960}{6} = 160 \text{ h}$$

$$MTTR = \frac{15}{6} = 2.5 \text{ h}$$

$$A = \frac{160}{160 + 2.5} = 0.9846 \approx 98.46\%$$

1.25.10 เฉลยข้อ 10

Fault Tree ตัวอย่าง

- Program: Output ไม่ถูกสั่ง, Address ผิด, Interlock ไม่ครบ
- Electrical/I/O: Output Module, Solenoid Coil, Input Module, Fieldbus Mapping
- Pneumatic: Air Pressure ต่ำ, Valve ไม่ทำงาน, Hose รั่ว
- Mechanical: Gripper ติดขัด ชิ้นงานขนาดผิด Sensor Bracket เคลื่อน

ควรทดสอบจาก I/O State และหลักฐานก่อนถอดอุปกรณ์

1.25.11 เฉลยข้อ 11

ตัวอย่าง Pseudocode

```
STATE = INIT
SetTool(1)
SetUserFrame(TRAY_FRAME)
MoveJ(HOME, fine)

FOR row = 0 TO 1
  FOR col = 0 TO 4
    STATE = WAIT_PART
    WAIT PART_PRESENT AND PLACE_CLEAR WITH TIMEOUT -> CELL_FAULT

    STATE = PICK
    MoveJ(PICK_APP, blend)
```

```
    MoveL(PICK, fine)
    CloseGripper()
    WAIT GRIP_OK WITH TIMEOUT -> GRIP_FAULT
    MoveL(PICK_APP, low_blend)

    STATE = PLACE
    target = TRAY_ORIGIN + Offset(col*PitchX, row*PitchY, 0)
    MoveJ(Approach(target), blend)
    MoveL(target, fine)
    OpenGripper()
    WAIT GRIP_OPEN WITH TIMEOUT -> RELEASE_FAULT
    MoveL(Approach(target), low_blend)
  ENDFOR
ENDFOR

MoveJ(HOME, fine)
Signal COMPLETE
STATE = COMPLETE
STOP AND WAIT FOR NEW AUTHORIZED START
```

Fault Routine ต้องหยุด Motion ใน State ที่ปลอดภัย เก็บสถานะชิ้นงาน และรอ Reset ที่มีเงื่อนไข ไม่ Jump กลับ INIT อัตโนมัติ

1.25.12 เฉลยข้อ 12

เปลี่ยนแล้วที่ปี 3 และ 6 รวม 2 ครั้ง ครั้งต่อไปปี 9 หรืออีก 1.5 ปี

ข้อมูลใน Record อย่างน้อย

1. Robot ID/Serial
2. Controller Model/Software
3. วันที่และชั่วโมงทำงาน
4. Battery Part Number/Lot
5. Alarm/Condition ก่อนเปลี่ยน
6. Backup Reference
7. ขั้นตอนที่ใช้และผู้ปฏิบัติ
8. ผลตรวจ Mastering/Position หลังเปลี่ยน
9. วันที่รอบถัดไป
10. ผู้ตรวจรับ

1.25.13 เฉลยข้อ 13

เวลารวม

$$T = 0.015 + 0.020 + 0.320 + 0.030 = 0.385 \text{ s}$$

$$S = 2000(0.385) + 850 = 770 + 850 = 1620 \text{ mm}$$

หากใช้เฉพาะ 15 ms

$$S_{sensor} = 2000(0.015) + 850 = 880 \text{ mm}$$

ผลต่าง

$$1620 - 880 = 740 \text{ mm}$$

การใช้ Sensor Time เพียงอย่างเดียวทำให้ระยะต่ำกว่าตัวอย่างที่รวม Stop Time ถึง 740 mm แสดงว่าการวัดเวลาหยุดรวมมีความสำคัญมาก ทั้งนี้การออกแบบจริงต้องใช้สูตรและค่าพารามิเตอร์ตาม ISO 13855:2024 และอุปกรณ์จริง

1.26 13. ข้อเสนอแนะสำหรับผู้สอน

1.26.1 13.1 ลำดับการสอนที่แนะนำ

ช่วงที่ 1: Coordinate และ Teaching

1. ใช้หุ่นยนต์จำลองหรือภาพ 3 มิติอธิบาย Joint, World, Tool และ User
2. ให้ผู้เรียนคาดการณ์ทิศทางก่อนกด Jog
3. สาธิตความแตกต่างระหว่าง TCP ที่ถูกและผิด
4. ให้ผู้เรียนสร้าง Point List ก่อนจับ Teach Pendant

ช่วงที่ 2: Motion และ Program Logic

1. เปรียบเทียบ PTP กับ LIN ด้วยจุดต้น–ปลายเดียวกัน
2. สาธิต Fine กับ Blend โดยใช้ Speed ต่ำและพื้นที่ว่าง
3. แยก Motion Logic ออกจาก I/O Handshake
4. ให้ผู้เรียนเพิ่ม Timeout และ Fault Path จากโปรแกรมที่ตั้งใจเขียนไม่ครบ

ช่วงที่ 3: PM และ Troubleshooting

1. ใช้ Product Manual จริงของรุ่นฝึกเพื่อค้น Maintenance Schedule
2. แสดงตัวอย่าง PM Record ที่ดีและไม่ดี
3. ใช้ Alarm Log/Screenshot ให้ผู้เรียนวิเคราะห์ก่อนเปิดเฉลย
4. ย้ำการเก็บ Evidence ก่อน Reset

ช่วงที่ 4: Safety Integration

1. ทำ Safety Walkdown รอบ Cell
2. ให้นักศึกษาแยก Normal Stop, Protective Stop, Emergency Stop และ LOTO
3. คำนวณ Safety Distance จากเวลารวมหลายองค์ประกอบ
4. ทบทวนว่าตัวเลขคำนวณในชั้นเรียนไม่แทนการออกแบบและ Validation จริง

1.26.2 13.2 จุดที่ผู้เรียนมักมีปัญหา

- สับสนทิศทาง Tool Frame เมื่อ Tool หมุน

- ลืมตรวจ Tool/User Number ก่อนสอนจุด
- มองเฉพาะ TCP และไม่มอง Elbow/Wrist/Dress Pack
- ใช้ Linear Motion ทุกช่วงเพราะคิดว่าปลอดภัยกว่าเสมอ
- เพิ่ม CNT/Zone โดยไม่ตรวจ Path Deviation
- ใช้ WAIT โดยไม่มี Timeout
- Reset Register หรือ Counter จน State ของงานหาย
- เชื่อว่า Alarm Code หนึ่งมีสาเหตุเดียว
- ใช้ตาราง PM ทั่วไปแทน Product Manual
- เข้าใจว่า E-stop คือการตัดพลังงานแบบ LOTO

1.26.3 13.3 วิธีปรับระดับกิจกรรมตามพื้นฐานผู้เรียน

ผู้เรียนพื้นฐานน้อย

- ใช้ Simulator และ Point ที่จัดเตรียมไว้
- ให้แก้เฉพาะ Speed, Motion Type และ Comment
- ใช้ Flowchart แทน Syntax ของผู้ผลิต
- ให้ Fault Tree แบบเติมคำ

ผู้เรียนระดับกลาง

- สอน TCP/User Frame เอง
- เขียน Handshake และ Timeout
- คำนวณ Offset ถาดและ Cycle Time
- วิเคราะห์ Alarm จาก Log หลายแหล่ง

ผู้เรียนระดับสูง

- เปรียบเทียบโปรแกรมสองผู้ผลิต
- วิเคราะห์ Singularity/Configuration Change
- ออกแบบ State Machine และ Recovery
- สร้าง PM Dashboard จากข้อมูล Cycle/Alarm
- ออกแบบ Validation Plan ของ Safety Function ในระดับแนวคิด

1.26.4 13.4 การประเมินระหว่างเรียน

วิธีประเมิน	เวลา	สิ่งที่วัด
Exit Ticket เลือก Coordinate	5 นาที	CLO1
Predict-before-Jog	10 นาที	การคิดเชิงพื้นที่และ Safety Awareness
Code Review คู่	15 นาที	CLO3–CLO4
Fault Tree กลุ่ม	20 นาที	CLO6
PM Checklist Audit	20 นาที	CLO5
Safety Distance Calculation	15 นาที	CLO7

1.26.5 13.5 Rubric ภาพรวมของบท

ด้าน	ดีเยี่ยม	ผ่าน	ต้องปรับปรุง
Coordinate/Teaching	เลือก Frame ถูก ตรวจ TCP/Configuration/ clearance ครบ	สอนจุดได้แต่ต้องเตือนบางรายการ	เลือก Frame ผิดหรือไม่ตรวจความปลอดภัย
Programming	Motion, I/O, Timeout, Fault และ Comment ครบ	โปรแกรมทำงานพื้นฐานได้	ไม่มี Interlock/Timeout หรือ State ไม่ชัด
Path Planning	ให้เหตุผลด้าน Path, Cycle Time, Singularity และ Blend	เลือก Motion ถูกส่วนใหญ่	เลือกจากความเร็วอย่างเดียว
Maintenance	อ้าง Manual มีเกณฑ์และ Record	มี Schedule พื้นฐาน	คาดเดารอบหรือไม่มีหลักฐาน
Troubleshooting	เก็บ Evidence ทดสอบทีละตัวแปร ยืนยันผล	หาสาเหตุได้แต่บันทึกไม่ครบ	Reset/เปลี่ยนอะไหล่โดยไม่มีสมมติฐาน
Safety	ปฏิบัติตาม Mode, Enabling, Guard และ LOTO	มีข้อผิดพลาดเล็กน้อยที่แก้ทันที	Bypass หรือเข้าใจ Stop/LOTO ผิด

1.27 14. สื่อและแหล่งเรียนรู้เพิ่มเติม

1.27.1 14.1 สื่อจากผู้ผลิต

องค์กร/ผู้จัดทำ	หัวข้อที่ควรค้น	คำค้นแนะนำ	จุดประสงค์	ช่วงเวลาที่ใช้
FANUC America Tech Transfer	User Frame, Teach Pendant, CNT, Mastering	FANUC user frame, FANUC CNT, FANUC mastering	ดูแนวคิดและหน้าจอจริงของ FANUC	ก่อนใบงาน 8-1 และ 8-3
ABB Robotics	RobotStudio, WorkObject, RAPID MoveJ/MoveL/MoveC	ABB RobotStudio workobject, RAPID MoveL	ฝึก OLP และเปรียบเทียบ RAPID	หลังหัวข้อ OLP
KUKA	KRL Motion, PTP/LIN/CIRC, Simulation	KUKA KRL PTP LIN CIRC, KUKA simulation	เปรียบเทียบ Syntax และ Path	หลังตารางภาษาโปรแกรม
Universal Robots	TCP, Feature, MoveJ/MoveL, Service	UR TCP feature, UR MoveL, UR service manual	เชื่อมโยง Hand Guiding และ Feature	ก่อนอภิปราย Cobot
OSHA Robotics	Robot Hazards, Safeguarding, LOTO	OSHA robotics safeguarding, robot lockout tagout	วิเคราะห์อุบัติเหตุและการควบคุมพลังงาน	ก่อนหัวข้อความปลอดภัย
ISO	ISO 10218, ISO 13855, ISO 12100	ISO 10218 2025, ISO 13855 2024	ตรวจสถานะและขอบเขตมาตรฐาน	ก่อนทำกรณีศึกษา Safety

ผู้สอนควรเปิดสื่อจากเว็บไซต์ทางการและตรวจ Software Version ก่อนใช้ เนื่องจากหน้าจอ เมนู และคำสั่งเปลี่ยนแปลงได้

1.27.2 14.2 แนวทางใช้สื่อในชั้นเรียน

- ใช้วิดีโอสั้นไม่เกิน 5–10 นาทีแล้วตามด้วยคำถามที่มีภารกิจชัดเจน
- หยุดภาพก่อน Motion แล้วให้นักศึกษาคาดการณ์ Path
- เปรียบเทียบคู่มือสองผู้ผลิตเฉพาะแนวคิด ไม่บังคับให้จำ Syntax ทุกยี่ห้อ
- ใช้ Screenshot Alarm ที่ระบุ Controller Version
- หลีกเลี่ยงวิดีโอที่แสดงการ Bypass Safety หรือเข้า Cell โดยไม่อธิบายบริบท

1.28 15. เอกสารอ้างอิง

1.28.1 15.1 หนังสือและตำรา

Craig, J. J. (2018). *Introduction to robotics: Mechanics and control* (4th ed.). Pearson.

Niku, S. B. (2011). *Introduction to robotics: Analysis, control, applications* (2nd ed.). Wiley.

Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., & Oriolo, G. (2009). *Robotics: Modelling, planning and control*. Springer.

1.28.2 15.2 มาตรฐานความปลอดภัย

International Organization for Standardization. (2010). *ISO 12100:2010 Safety of machinery—General principles for design—Risk assessment and risk reduction*.

International Organization for Standardization. (2023). *ISO 13849-1:2023 Safety of machinery—Safety-related parts of control systems—Part 1: General principles for design*.

International Organization for Standardization. (2024). *ISO 13855:2024 Safety of machinery—Positioning of safeguards with respect to the approach of the human body*.

International Organization for Standardization. (2025). *ISO 10218-1:2025 Robotics—Safety requirements—Part 1: Industrial robots*.

International Organization for Standardization. (2025). *ISO 10218-2:2025 Robotics—Safety requirements—Part 2: Industrial robot applications and robot cells*.

International Organization for Standardization. (2007). *ISO 11161:2007 Safety of machinery: Integrated manufacturing systems, Basic requirements* (including Amendment 1:2010). ฉบับนี้ได้รับการยืนยันสถานะในปี 2023 และมีฉบับทดแทนอยู่ระหว่างกระบวนการจัดทำ ณ วันที่จัดทำเอกสาร.

1.28.3 15.3 คู่มือและเอกสารทางเทคนิคจากผู้ผลิต

ABB Robotics. (2026). *Operating manual—RobotStudio* (Document ID 3HAC032104-001, Revision BB).

ABB Robotics. (2026). *Technical reference manual—RAPID overview* (Document ID 3HAC050947-001).

ABB Robotics. (2026). *Product manual—IRB 2400* (Document ID 3HAC022031-001, Revision Y). ใช้เป็นตัวอย่างว่ารอบบำรุงรักษา Battery, Lubrication และ Calibration ต้องอ้างอิงรุ่น.

FANUC America Corporation. (2026). *FANUC Tech Transfer learning resources: Programming, user frames, maintenance and robot training*. แหล่งเรียนรู้อย่างเป็นทางการ; หัวข้อและวันเผยแพร่ให้ตรวจสอบก่อนนำไปอ้างในงานวิชาการ.

Universal Robots. (2026). *PolyScope user manual and script manual, software series 5.x*. ใช้ตรวจ MoveJ, MoveL, Feature และ TCP ตาม Software Version.

Universal Robots. (2026). *e-Series service manual*. ใช้ตรวจขั้นตอน Service และ Troubleshooting ตามรุ่น.

KUKA Deutschland GmbH. (n.d.). *KUKA robot programming and simulation documentation*. ให้ตรวจชื่อ Software, Controller และ Revision ที่ใช้จริงก่อนเผยแพร่.

1.28.4 15.4 หน่วยงานด้านความปลอดภัย

Occupational Safety and Health Administration. (n.d.). *Robotics: Standards, hazard evaluation and solutions*.

Occupational Safety and Health Administration. (n.d.). *The control of hazardous energy—Lockout/Tagout, 29 CFR 1910.147*.

1.28.5 15.5 หมายเหตุเกี่ยวกับคู่มือที่ผู้ใช้ระบุ

รายการต่อไปนี้ควรตรวจสอบ Document Number, Revision และสิทธิ์การเข้าถึงจากระบบเอกสารของผู้ผลิตก่อนเผยแพร่เป็นบรรณานุกรมฉบับสุดท้าย

- FANUC Robot Series R-30iB/R-30iB Plus Controller KAREL Reference Manual
- ABB RAPID Language Reference Manual
- KUKA System Software Operating and Programming Manual สำหรับ KSS Version ที่ใช้
- Yaskawa INFORM Programming Manual สำหรับ Controller ที่ใช้
- Mitsubishi MELFA-BASIC Programming Manual สำหรับ Controller ที่ใช้

1.29 ภาคผนวก ก แบบฟอร์ม Daily Check

Robot ID: _____
Cell/Location: _____
วันที่/เวลา: _____
ผู้ตรวจ: _____
ชั่วโมงทำงาน/Cycle Count: _____

รายการ	OK	Monitor	Action	N/A	หมายเหตุ/เลขใบงาน
Alarm/Warning ค้าง					
รอยรั่ว/คราบผิดปกติ					
Cable และ Dress Pack					
End Effector/Tool					
Air/Vacuum					
เสียง/การสั่น					
Fixture/พื้นที่ทำงาน					
Guard/Interlock ตาม Test Procedure					
Controller Indicator/Fan					
Backup/Log Status					

ผลการตัดสิน: ☐ พร้อมใช้งาน ☐ ใช้งานแบบเฝ้าระวัง ☐ ห้ามใช้งาน
ผู้อนุมัติ: _____

1.30 ภาคผนวก ข แบบฟอร์ม PM Record

รายการ	รายละเอียด
Robot/Controller Model	
Serial/Asset ID	
Software Version	
วันที่/ชั่วโมงทำงาน	
Work Order	
ขอบเขต PM	
คู่มือ/Revision ที่อ้างอิง	
เครื่องมือวัดและวันสอบเทียบ	
อะไหล่/วัสดุ/Part Number	
ค่า Before	
ค่า After	
Alarm ก่อน/หลัง	
Backup File/Location	
Mastering/Calibration Check	
Safety Function Check	
Dry Run Result	
Process Validation Result	
ผู้ปฏิบัติ/ผู้ตรวจรับ	
รอบถัดไป	

1.31 ภาคผนวก ค แบบฟอร์ม Troubleshooting Report

1.31.1 1. ข้อมูลเหตุการณ์

- Robot/Cell: _____
- วันที่/เวลา: _____
- Program/Line: _____
- Mode: _____
- Alarm Code/Full Message: _____
- อาการ: _____
- การเปลี่ยนแปลงก่อนเกิดเหตุ: _____

1.31.2 2. การทำให้ระบบปลอดภัย

[ ] Cycle Stop/Hold ตามขั้นตอน

[ ] บุคลากรออกจากพื้นที่

[ ] Guard/Interlock อยู่ในสภาพควบคุม

[ ] LOTO เมื่อขอบเขตงานต้องสัมผัสอันตราย

[ ] Stored Energy ถูกควบคุม

1.31.3 3. Fault Isolation

ลำดับ	สมมติฐาน	Evidence ที่ต้องใช้	การทดสอบ	ผล	สถานะ
1					
2					
3					
4					

1.31.4 4. ผลสรุป

- Root Cause: _____
- Corrective Action: _____
- Preventive Action: _____
- Verification Cycles: _____
- Safe Recovery Method: _____
- Backup/Change Record: _____
- ผู้ปฏิบัติ/ผู้อนุมัติ: _____

1.32 ภาคผนวก ง Checklist ตรวจโปรแกรมก่อน Automatic Mode

[ ] Tool, User/Work Object และ Payload ถูกต้อง

[ ] จุด Home/Approach/Process/Retreat ผ่านการตรวจ

[ ] Motion Type, Speed, Acceleration และ Blend เหมาะสม

[ ] Robot Configuration และ Singularity ได้รับการตรวจ

[ ] Tool, Workpiece, Fixture และ Dress Pack ไม่มี Collision

[ ] I/O Handshake และ Timeout ผ่านการทดสอบ

[ ] Fault Routine และ Recovery ผ่านการทดสอบ

[ ] Counter/Recipe/State เริ่มต้นถูกต้อง

[ ] Guard, Gate, Scanner และ Safety Function อยู่ในสถานะพร้อม

[ ] ไม่มี Bypass หรือ Temporary Jumper ค้าง

[ ] Dry Run เสร็จสมบูรณ์

[ ] Process Validation และคุณภาพผ่าน

[ ] Backup และ Revision Record บันทึกแล้ว

[ ] ผู้มีอำนาจอนุมัติ Automatic Mode แล้ว

1.33 ภาคผนวก จ Prompt ภาพประกอบรวม

1.33.1 รูปที่ 8.1 Coordinate Systems

Engineering textbook technical illustration of a six-axis industrial robot with three clearly distinguished coordinate frames: World/Base frame at the robot base, Tool frame at the gripper TCP, and User/Work Object frame attached to a fixture. Show X, Y, Z axes using the right-hand convention, label joints 1 to 6, end effector, TCP, fixture and workpiece. Clean white background, precise vector lines, bilingual Thai-English labels, no decorative elements, 16:9.

1.33.2 รูปที่ 8.2 PTP vs LIN

Clean engineering textbook comparison of a six-axis industrial robot moving between the same point A and point B. Left panel shows point-to-point joint-space motion with a curved and uncontrolled TCP path. Right panel shows linear Cartesian motion with a straight TCP path. Include intermediate robot poses, an obstacle for clearance context, arrows and bilingual Thai-English labels. White background, precise vector style, 16:9.

1.33.3 รูปที่ 8.3 Zone/CNT Blending

Engineering path diagram showing a robot TCP moving through three points P1, P2 and P3 with a sharp corner at P2. Compare four trajectories: FINE exact stop, low blend, medium blend and high blend. Show increasing corner radius, path deviation and smoother velocity continuity. Clean white background, precise vector lines, bilingual Thai-English labels, 16:9.

1.33.4 รูปที่ 8.4 PM Schedule

Engineering maintenance timeline for an industrial robot across a 15-year lifecycle. Show recurring daily visual checks, weekly functional checks, quarterly condition inspections, annual maintenance, battery service based on model requirements, recalibration after crash or repair, and major service based on hours and condition. Clearly label that intervals are examples and the manufacturer manual governs. Clean white background, professional vector infographic, bilingual Thai-English labels, 16:9.

1.33.5 รูปที่ 8.5 Mastering Marks

Close-up engineering textbook illustration of an industrial robot joint showing two mastering witness marks that must be aligned. Include axis direction arrow, a generic calibration tool reference, and a clear caution that the exact mastering procedure is model-specific and must follow the product manual. White background, realistic technical vector style, bilingual Thai-English labels, 16:9.

1.33.6 รูปที่ 8.6 Safety Zone

Top-view industrial robot cell safety diagram with a six-axis robot, swept hazard area, perimeter fence, interlocked gate, safety laser scanner, outer warning zone, inner protective zone, and a manual reset station located outside the safeguarded space with clear visibility. Show separation distance and stopping direction arrows. Clean engineering vector style, bilingual Thai-English labels, white background, 16:9.

1.33.7 รูปที่ 8.7 Troubleshooting Flowchart

Systematic industrial robot troubleshooting flowchart: observe symptoms, read alarm and event logs, place system in a safe state, collect hardware and software evidence, form hypotheses, test one variable at a time, verify the repair, document root cause, and escalate when unresolved. Include decision loops and a warning not to bypass safety. Clean engineering textbook vector style, bilingual Thai-English labels, white background, 16:9.

สิ้นสุดบทที่ 8