มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม

รายงานโครงงานวิศวกรรม

Circular Pick and Place Robot

วิชา FRA263/264: Robotics Studio III

จัดทำโดย

นายทัดชัย สุขสราญ	67340500016
นายธนดล พูลสระคู	67340500017
นายธรรวิทวัส เพ็งนาม	67340500018
นายวราวิชญ์ ศิลายงค์	67340500036
นายภคิน ศักดิ์สิทธิ์พิทักษ์	67340500060
นางสาวศิรินภา สุขบุญส่ง	67340500078

ปีการศึกษา 2568

สารบัญ

1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน 1

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน 1

1.3 ขอบเขตของโครงงาน 1

1.4 ภาพรวมระบบ (System Overview) 2

1.5 สรุป System Requirements 6

2 การออกแบบระบบ (System Design) 8

2.1 การออกแบบเชิงกล (Mechanical Design) 8

2.1.1 สถาปัตยกรรมเชิงกลโดยรวม 8

2.1.2 การคำนวณเพลา (Shaft Calculation) 8

2.1.3 การคำนวณสายพาน (Belt Calculation) 8

2.1.4 การเลือก Bearing 8

2.1.5 การวิเคราะห์การโก่งตัว (Deflection Analysis) 8

2.1.6 Motion Profile การเคลื่อนที่ (S-Curve) 8

2.2 การออกแบบระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics Design) 8

2.2.1 สถาปัตยกรรมไฟฟ้าโดยรวม 8

2.2.2 Schematic ตู้ควบคุม 9

2.2.3 การออกแบบวงจรป้องกัน (Protection Circuit) 9

2.2.4 การออกแบบระบบ Joystick 9

2.3 การออกแบบระบบควบคุม (Control Design) 9

2.3.1 การสร้างแบบจำลองระบบ (System Modeling) 9

2.3.2 การทำ System Identification 12

2.3.3 การออกแบบตัวควบคุม PID ด้วย Root Locus 13

2.3.4 Motion Profile แบบ S-Curve 15

2.3.5 การ Simulation ด้วย State Space Model 17

3 การดำเนินการสร้างและติดตั้งระบบ (Implementation) 18

3.1 การประกอบเชิงกล (Mechanical Assembly) 18

3.1.1 ลำดับขั้นตอนการประกอบ 18

3.1.2 ผลการประกอบชิ้นส่วน 18

3.1.3 การตรวจสอบขนาดจริง 18

3.2 การประกอบตู้ควบคุมไฟฟ้า (Electrical Cabinet Assembly) 18

3.2.1 รายการอุปกรณ์ภายในตู้ 18

3.2.2 ผลการประกอบตู้ควบคุม 18

3.3 สถาปัตยกรรม STM32 Firmware (Firmware Architecture) 18

3.3.1 ภาพรวมสถาปัตยกรรม Firmware 18

3.3.2 โครงสร้างไฟล์และโมดูล (Code Structure) 18
3.3.3 Interrupt Service Routine (ISR) และ Timing 19
3.3.4 การทำงานร่วมกันของโมดูล (Module Interaction) 19
3.3.5 การ Implement S-Curve Motion Profile ใน Firmware 19
3.3.6 Joystick Mode และการ Map ปุ่ม 19

4 การบูรณาการระบบ (System Integration) 19
4.1 สถาปัตยกรรมการบูรณาการ 19
4.2 การเชื่อมต่อ STM32 กับ Motor และ Encoder 19
4.3 การเชื่อมต่อ Joystick 19
4.4 การเชื่อมต่อ Modbus กับ Base System 19
4.5 แผนการทดสอบ End-to-End 19

5 ผลการทดสอบ (Test Results) 19
5.1 ผลการทดสอบ Progress Update 1 19
5.1.1 ผล FEA และการคำนวณ Deflection 19
5.1.2 ผลการคำนวณ Motion Profile (ทฤษฎี) 20
5.2 ผลการทดสอบ Progress Update 2 20
5.2.1 Unit Test: การอ่าน Encoder และ PWM (Deliverable 2) 20
5.2.2 Unit Test: PID Closed-Loop และ S-Curve (Deliverable 3) 20
5.2.3 Unit Test: Joystick ทุกโหมด (Deliverable 4) 20
5.2.4 Unit Test: ตู้ควบคุมไฟฟ้า (Deliverable 1) 20
5.2.5 การทำ System Identification (Deliverable 6) 20
5.2.6 ผล Simulation Simscape 20

6 การตรวจสอบและทวนสอบ (Verification and Validation) 20
6.1 ภาพรวม V&V Framework 20
6.2 ตาราง V&V รวมทั้งหมด (32 Requirements) 20
6.3 ตาราง V&V แยกตาม Category 20
6.3.1 Mechanical Requirements (M1–M10) 20
6.3.2 Performance Requirements (P1–P7) 21
6.3.3 Accuracy Requirements (A1–A5) 21
6.3.4 Electrical Requirements (E1–E9) 21
6.3.5 Joystick Requirements (J1) 21
6.4 สรุปสถานะ V&V ตาม Category 21

7 สรุปผลและแนวทางต่อไป (Conclusion) 21
7.1 สรุปผลงาน Progress Update 1 21
7.2 สรุปผลงาน Progress Update 2 21

7.3 แนวทางและแผนงานต่อไป (Future Work) 21

A รายละเอียดการคำนวณเชิงกล 21

B รายละเอียดการคำนวณ Motion Profile 21

C Schematic ไฟฟ้าฉบับเต็ม 21

D Code Snippet หลักของ STM32 Firmware 21

E ผลการ Simulation Simscape ฉบับเต็ม 22

F Log การทดสอบ Unit Test 22

สารบัญรูป

1 System Architecture ของระบบ Circular Pick and Place Robot แสดง Physical Architecture และ Cyber Architecture 2
2 CAD Assembly ของระบบเชิงกล 8
3 ผล FEA การโก่งตัวของ Arm ที่โหลด 2 kg 8
4 S-Curve Motion Profile ของการเคลื่อนที่ในหนึ่งรอบ 8
5 Electrical Block Diagram ของระบบ 8
6 Electrical Schematic ของตู้ควบคุม 9
7 Block Diagram ของระบบมอเตอร์กระแสตรงพร้อมชุดทดรอบ 10
8 Block Diagram ของ Cascade PID Control พร้อม Feedforward 14
9 Integration Diagram ของระบบทั้งหมด 19
10 ผลการทดสอบการอ่านค่า Encoder และสัญญาณ PWM 19
11 Step Response เบื้องต้นของระบบ PID ก่อนการ Tune 20
12 Electrical Schematic ฉบับเต็ม 21
13 ผล Simulation Simscape ฉบับเต็ม 22
14 Serial Log ขณะทดสอบการอ่านค่า Encoder 22

สารบัญตาราง

1	สรุป System Requirements ทั้ง 32 ข้อ	7
2	สรุปผลการคำนวณเพลา	8
3	สรุปผลการคำนวณสายพาน	8
4	เปรียบเทียบผลการโก่งตัวจากทฤษฎีและ FEA	8
5	สรุปพารามิเตอร์ Motion Profile	8
6	ผลการวัด R_a และ L_a จาก Locked Rotor Test ที่ 12 V	12
7	พารามิเตอร์ที่ได้จาก System Identification	13
8	ผลการ Cross-Validation ของ Model กับข้อมูลประเภทต่าง ๆ	13
9	ข้อกำหนดของระบบควบคุม	14
10	ค่า PID Gain ของระบบควบคุม	15
11	โครงสร้าง S-Curve 7 Phase	16
12	สรุปพารามิเตอร์ Motion Profile สำหรับระยะทางต่าง ๆ	17
13	ผล Simulation เทียบกับ Requirement (S-curve 360°)	18
14	ผลการตรวจสอบขนาดชิ้นส่วนจริง	18
15	Bill of Materials (BOM) ของตู้ควบคุม	18
16	โมดูลหลักใน STM32 Firmware	18
17	ISR และ Task Timing ของ Firmware	19
18	การ Map ปุ่ม Joystick กับคำสั่งระบบ	19
19	ผลการทดสอบ Joystick แต่ละโหมด	19
20	แผนการทดสอบ End-to-End	19
21	ผล FEA เทียบกับเกณฑ์ M3	19
22	ผล Unit Test การอ่าน Encoder และ PWM	20
23	ผล Unit Test Joystick แต่ละโหมด	20
24	ผล System Identification	20
25	ตาราง V&V รวม ทั้ง 32 Requirements	20
26	V&V Table: Mechanical Requirements (M1–M10)	20
27	V&V Table: Performance Requirements (P1–P7)	21
28	V&V Table: Accuracy Requirements (A1–A5)	21
29	V&V Table: Electrical Requirements (E1–E9)	21
30	V&V Table: Joystick Requirements (J1)	21
31	สรุปสถานะ V&V แยกตาม Category	21

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน

บริษัท FIBO จำกัด มีความต้องการจัดสร้างเครื่องจักรสำหรับกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม เพื่อใช้ในการหยิบจับชิ้นงาน (Connection Rod) โดยมีข้อจำกัดด้านพื้นที่และการทำงานที่ชัดเจน คณะผู้จัดทำจึงขอนำเสนอโครงการออกแบบและสร้าง ระบบหุ่นยนต์แขนกลหยิบจับชิ้นงานแบบหมุน

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบแขนกลที่สามารถทำงานร่วมกับชุดหัวจับ (End Effector) ที่ลูกค้ากำหนด โดยออกแบบให้สามารถรับภาระโหลดรวมได้สูงสุดถึง 2 กิโลกรัม และสามารถเคลื่อนที่หยิบวางชิ้นงานได้อย่างแม่นยำด้วยความเร็วสูง เพื่อให้ได้เวลาต่อรอบการทำงาน (Cycle Time) ต่ำกว่า 35 วินาที ภายใต้โครงสร้างทางกลที่มีความแข็งแรง และระบบควบคุมความปลอดภัยทางไฟฟ้าที่ได้มาตรฐานตาม ข้อกำหนดของลูกค้า

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์หลัก 4 ประการ ดังนี้

1. เพื่อออกแบบและสร้างหุ่นยนต์แขนกล 1 แกนแบบหมุน ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสตรง สำหรับงานหยิบจับชิ้นงาน (Connection Rod) ร่วมกับชุดหัวจับที่กำหนด
2. เพื่อพัฒนาระบบควบคุมตำแหน่งที่มีความแม่นยำสูง โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32G474RE เป็นศูนย์กลางการประมวลผล
3. เพื่อสร้างตู้ควบคุมไฟฟ้าที่ได้มาตรฐานความปลอดภัยทางอุตสาหกรรม รองรับแหล่งจ่ายไฟ 220V AC พร้อมระบบป้องกันและปุ่มหยุดฉุกเฉิน
4. เพื่อเชื่อมต่อระบบหุ่นยนต์เข้ากับ Base System ของลูกค้า สำหรับรับคำสั่งควบคุมและส่งกลับค่าสถานะการทำงาน ผ่านโปรโตคอล Modbus

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

โครงการนี้มุ่งเน้นการสร้างระบบหุ่นยนต์หยิบจับชิ้นงานแบบหมุน โดยมีขอบเขตการดำเนินงานหลัก 4 ด้าน ดังนี้

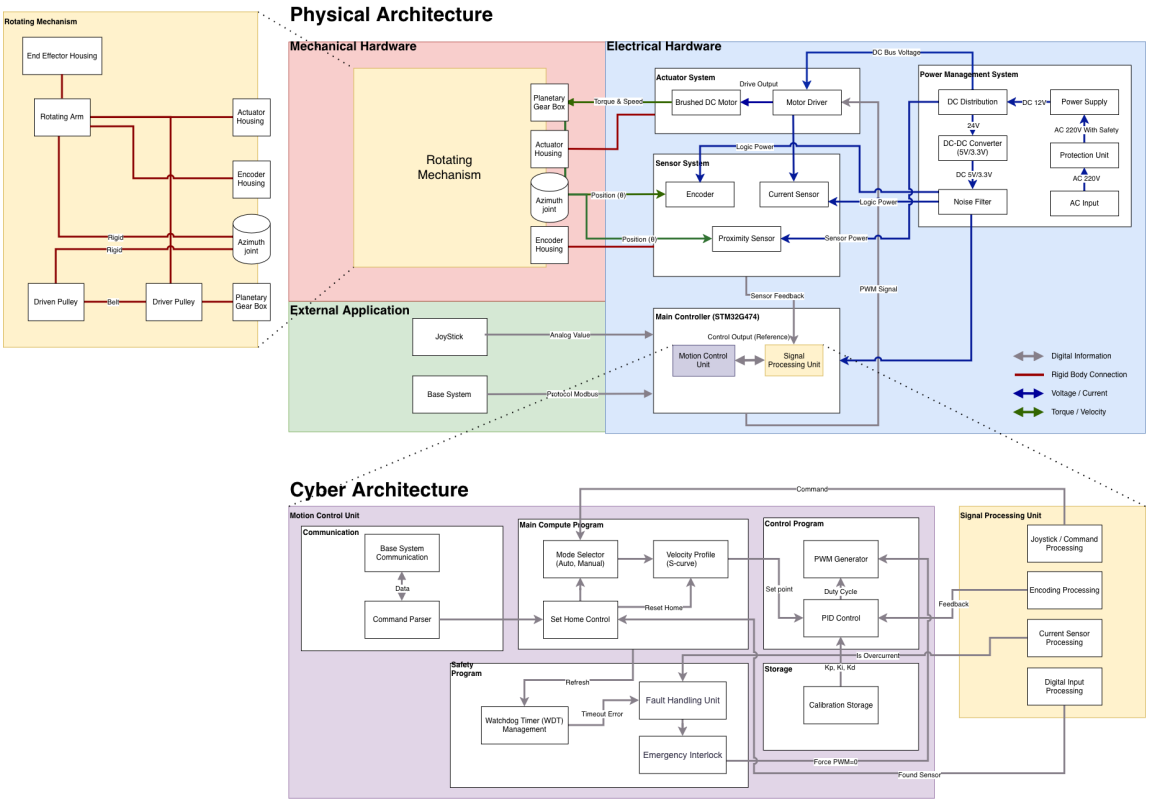
- **ด้านกลไกและโครงสร้าง:** สร้างหุ่นยนต์รัศมีการทำงาน 500 มิลลิเมตร บนพื้นที่ฐาน 200 × 200 มิลลิเมตร ที่สามารถรองรับน้ำหนักบรรทุก 2 กิโลกรัม โดยโครงสร้างส่วนรับแรงต้องใช้วัสดุทางวิศวกรรมมาตรฐาน และมีจุดเชื่อมต่อสำหรับระบบตรวจสอบของลูกค้า
- **ด้านไฟฟ้าและการควบคุม:** พัฒนาตู้ควบคุมมาตรฐานอุตสาหกรรมพร้อมระบบความปลอดภัย และวงจรหยุดฉุกเฉิน (E-Stop) ที่ไม่ตัดไฟระบบหลัก โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นศูนย์กลางสั่งการชุดขับเคลื่อนมอเตอร์
- **ด้าน สมรรถนะ การ ทำงาน:** ระบบ ต้อง สามารถ ประมวล ผล และ เคลื่อนที่ เพื่อ หยิบ วาง ชิ้น งาน 4 ชิ้น ให้สำเร็จสิ้นภายใน 35 วินาที ภายใต้ข้อกำหนดด้านความเร็วและ ควบคุมความคลาดเคลื่อน (Overshoot) ไม่ให้เกิน 1%
- **ด้านการเชื่อมต่อและการสื่อสาร:** พัฒนาระบบให้รองรับการสั่งงานผ่านอุปกรณ์ Joystick และเชื่อม

ต่อข้อมูลกับระบบหลัก (Base System) ด้วยโปรโตคอล Modbus เพื่อให้ครอบคลุมการทำงานทั้งโหมด Manual และ Auto

- **ขอบเขตที่ไม่รวมในโครงงาน:** Base System ของลูกค้า, ชุดหัวจับ (End Effector) ที่ลูกค้ากำหนด, และระบบสายพานลำเลียงชิ้นงานต้นทาง/ปลายทาง ไม่ได้อยู่ในขอบเขตการออกแบบและสร้างของโครงการนี้

1.4 ภาพรวมระบบ (System Overview)

ระบบ Circular Pick and Place Robot ออกแบบโดยแบ่งสถาปัตยกรรมออกเป็น 2 ระดับ ได้แก่ Physical Architecture ซึ่งอธิบายฮาร์ดแวร์จริงของระบบ และ Cyber Architecture ซึ่งอธิบายโครงสร้างซอฟต์แวร์ภายใน STM32G474RE ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1: System Architecture ของระบบ Circular Pick and Place Robot แสดง Physical Architecture และ Cyber Architecture

Physical Architecture

Physical Architecture อธิบายถึงฮาร์ดแวร์จริงของระบบและความสัมพันธ์ระหว่างชิ้นส่วนต่าง ๆ โดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก ดังนี้

Rotating Mechanism (กลไกหมุน) คือส่วนที่แปลงพลังงานไฟฟ้าจากมอเตอร์ให้กลายเป็นการเคลื่อนที่เชิงมุมของแขนกล โดยมีลำดับการส่งกำลังดังนี้

- **มอเตอร์ต้นกำลัง:** ใช้ ZGX60RMM DC Brushed Motor ขนาด 24V 250 RPM ซึ่งเป็นชุด Gearmotor ที่มี Planetary Gearbox ในตัว เมื่อจ่ายไฟ 24V มอเตอร์จะหมุนและส่งแรงบิดออกมาที่เพลา Output
- **ระบบสายพาน HTD5M:** แรงบิดจากเพลา Output ของ Gearmotor ถูกส่งต่อผ่านสายพาน HTD5M (Timing Belt) ซึ่งมีการกำหนดอัตราทดเพิ่มเติมอีก 3:1 โดยใช้ Driver Pulley 24 ฟัน ขับ Driven Pulley 70 ฟัน สายพานชนิดนี้มีฟันที่ขบกับพูลเลย์โดยตรง จึงไม่เกิดการ Slip ไม่ว่าจะรับโหลดเท่าใด และมี Idler Pulley ด้านข้าง Slack Side เพื่อรักษาแรงดึงสายพานให้คงที่ตลอดการทำงาน
- **Azimuth Joint และแขนกล:** กำลังจากสายพานถูกส่งเข้าสู่ Azimuth Joint ซึ่งเป็นแกนหมุนหลักของระบบ ติดตั้ง Taper Bearing และ Single Row Deep Groove Bearing เพื่อรับทั้ง Radial Load จากน้ำหนักแขนกล และ Axial Load จากการหมุน แขนกลที่ยื่นออกจาก Azimuth Joint ทำจาก Galvanized Steel Square Tube ขนาด 25×25 mm ยาว 500 mm เชื่อมต่อกับ End Effector Housing ที่ปลาย ซึ่งรองรับ Gripper ของลูกค้า
- **Encoder ที่ปลายเพลา:** ที่ปลายเพลาหลักด้านบนมีการติดตั้ง Encoder Housing ไว้รองรับ Incremental Encoder (AMT-103) ซึ่งวัดตำแหน่งเชิงมุมโดยตรงที่แกนหมุนหลัก ทำให้ไม่มี Backlash Error สะสมจากระบบส่งกำลัง

Power Management System (PMS) ทำหน้าที่รับไฟฟ้ากระแสสลับจากระบบ และแปลงแจกจ่ายเป็นแรงดันกระแสตรง ที่เหมาะสมสำหรับแต่ละส่วนของระบบ โดยแบ่งออกเป็น 2 วงจรที่แยกจากกันอย่างชัดเจน

- **วงจรป้องกัน AC Input:** ไฟ AC 220V เข้ามาผ่านขั้วต่อ IEC 60320-C14 จากนั้นผ่านฟิวส์และ Circuit Breaker ก่อนถึง Magnetic Contactor ซึ่งเป็นหัวใจของระบบ E-Stop ทางฮาร์ดแวร์ เมื่อกด E-Stop Contactor จะ De-energize และตัดไฟ AC ที่จะไปยัง PSU 24V ทันที ทำให้มอเตอร์หยุดทำงานสมบูรณ์
- **วงจร 24V Power Bus สำหรับมอเตอร์:** PSU 24V/10A แปลงไฟ AC เป็น DC 24V จ่ายตรงไปยัง Motor Driver (Cytron MD10C) ซึ่งจะส่งกำลังต่อไปยังมอเตอร์ วงจรนี้อยู่หลัง Contactor ดังนั้นเมื่อ E-Stop ถูกกด วงจรนี้จะถูกตัดทันที
- **วงจร 5V Logic Power สำหรับ Controller และ Sensor:** PSU 5V/5A แปลงไฟ AC เป็น DC 5V จ่ายให้ STM32 Nucleo Board, ESP32, Encoder, Proximity Sensor และ Relay Module วงจรนี้ต่อตรงจาก AC Input ก่อน Contactor ทำให้เมื่อกด E-Stop ตัว Controller ยังคงมีไฟเลี้ยงอยู่ตามข้อกำหนด E6 และสามารถรับคำสั่ง Reset ได้
- **DC-DC Step-down Converter:** แปลงแรงดันลงมาสำหรับอุปกรณ์ที่ต้องการแรงดันพิเศษ เช่น 3.3V สำหรับ Logic Level บางส่วน หรือ 12V สำหรับอุปกรณ์เสริม ผ่าน Noise Filter ก่อนเข้า Controller เพื่อให้แรงดันสะอาดไม่มีสัญญาณรบกวนจากมอเตอร์

Main Controller (STM32G474RE) บน Nucleo Board ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางในการประมวลผลทั้งหมด โดยเชื่อมต่อกับอุปกรณ์รอบข้างผ่าน Peripheral ต่าง ๆ ดังนี้

- **Timer (Quadrature Mode):** รับสัญญาณ A, B จาก Encoder นับ Pulse เพื่อคำนวณตำแหน่ง

เชิงมุมและความเร็ว

- **Timer (PWM Mode):** สร้างสัญญาณ PWM ส่งไปยัง Motor Driver เพื่อควบคุมความเร็วและทิศทางของมอเตอร์
- **ADC:** อ่านค่าแรงดันจาก Current Sensor เพื่อตรวจสอบกระแสมอเตอร์แบบ Real-time
- **EXTI (External Interrupt):** รับสัญญาณจาก Proximity Sensor เมื่อแขนกลผ่านตำแหน่ง Home Reference
- **UART:** รับ Data Packet จาก ESP32 ที่ถอดรหัสคำสั่งจาก Joystick มาแล้ว
- **GPIO:** ควบคุม Relay Module สำหรับ Solenoid Valve ของ Gripper และอ่านสถานะ Mode Selector Switch

Sensor System ทำหน้าที่เป็นตา-หูของระบบควบคุม ให้ข้อมูล Feedback ที่จำเป็นสำหรับการทำงานแบบ Closed-Loop

- **AMT-103 Incremental Encoder:** ติดตั้งโดยตรงที่เพลาหลักของ Azimuth Joint ให้ค่า Resolution สูง ใช้สำหรับ Position Feedback และ Velocity Estimation ใน Control Loop
- **Proximity Sensor (Inductive Type):** ติดตั้งที่ฐานของ Rotating Mechanism ตรวจจับ Metal Flag บนแขนกลเมื่อผ่านตำแหน่ง Home Reference ใช้สำหรับการ Homing ครั้งแรกและการ Reset ตำแหน่งอ้างอิง
- **Current Sensor:** ต่ออยู่ในวงจร 24V ของมอเตอร์ อ่านค่ากระแสแบบ Real-time ส่งให้ Fault Handling Unit ตรวจสอบว่ากระแสเกินพิกัดหรือไม่ ซึ่งอาจเป็นสัญญาณของการชนหรือ Mechanical Jam

Cyber Architecture

Cyber Architecture อธิบายโครงสร้างซอฟต์แวร์ภายใน STM32G474RE ซึ่งทำงานแบบ Real-time Closed-Loop แบ่งออกเป็น 4 โมดูลที่ทำงานสัมพันธ์กัน

Signal Processing Unit คือชั้นแรกที่รับข้อมูลดิบจากฮาร์ดแวร์และแปลงให้อยู่ในรูปแบบที่โมดูลอื่นนำไปใช้ได้ทันที ประกอบด้วย 4 ส่วนย่อย

- **Encoding Processing:** รับสัญญาณ Quadrature A และ B จาก Encoder ผ่าน Timer ของ STM32 นับ Pulse และแปลงเป็นค่ามุม θ (องศาหรือ Radian) และความเร็วเชิงมุม ω โดยใช้การคำนวณ Differentiation ของตำแหน่ง ค่า θ_{actual} ที่ได้นี้จะถูกส่งไปยัง Summing Junction ของ Control Program เพื่อใช้เป็น Position Feedback
- **Current Sensor Processing:** อ่านค่า ADC จาก Current Sensor แปลงเป็นค่ากระแส (Ampere) และกรองสัญญาณรบกวนด้วย Moving Average Filter ก่อนส่งต่อไปยัง Fault Handling Unit ใน Safety Program
- **Joystick / Command Processing:** รับ Data Packet จาก ESP32 ผ่าน UART ตรวจสอบ

Checksum ของ Packet ถอดรหัสออกเป็นคำสั่งแต่ละประเภท เช่น หมุนซ้าย หมุนขวา Pick Place Home Emergency แล้วส่งต่อไปยัง Command Parser ใน Main Compute Program

- **Digital Input Processing:** อ่านและ Debounce สัญญาณดิจิทัลทั้งหมด ได้แก่ Proximity Sensor (EXTI Interrupt), Mode Selector Switch และ Encoder Index Pulse เพื่อป้องกัน False Trigger จาก Contact Bounce

Main Compute Program คือ Logic หลักของระบบ ทำหน้าที่ตัดสินใจว่าระบบจะทำอะไรในแต่ละขณะ

- **Mode Selector:** อ่านสถานะจาก Mode Selector Switch และคำสั่งจาก Joystick หรือ Modbus เพื่อตัดสินใจว่าระบบอยู่ในโหมด Manual หรือ Auto ในโหมด Manual คำสั่งจะมาจาก Joystick โดยตรง ในโหมด Auto คำสั่งจะมาจาก Base System ผ่าน Modbus
- **Velocity Profile (S-Curve):** เมื่อได้รับคำสั่งให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมาย โมดูลนี้จะสร้าง Trajectory ที่กำหนดว่าแต่ละช่วงเวลา ควรอยู่ที่ตำแหน่งใด โดยใช้ S-Curve Profile ที่จำกัด Jerk ทำให้ความเร็วเพิ่มและลดแบบค่อยเป็นค่อยไป ลด Mechanical Shock และควบคุม Overshoot ค่าที่ Output ออกมาจาก Velocity Profile คือ $\theta_{\text{reference}}$ ณ แต่ละ Timestep ซึ่งถูกส่งไปยัง Summing Junction เป็น Set Point
- **Set Home Control:** เมื่อได้รับคำสั่ง Set Home ระบบจะบันทึกค่า Encoder Count ปัจจุบันลงใน Calibration Storage และกำหนดให้ตำแหน่งนั้นเป็นจุดอ้างอิง (Zero Point) สำหรับการคำนวณตำแหน่งทั้งหมดต่อจากนั้น เมื่อได้รับคำสั่ง Reset Home ระบบจะหมุนแขนกลจนกว่า Proximity Sensor จะตรวจจับ Metal Flag แล้วกำหนดตำแหน่งนั้นเป็น Home
- **Command Parser และ Auto Sequence:** ในโหมด Auto รับคำสั่งจาก Base System ผ่าน Modbus แล้วแปลงเป็น Task ลำดับการทำงาน คือ ตรวจสอบ Home $\rightarrow$ เคลื่อนที่ไปจุดหยิบ $\rightarrow$ Pick $\rightarrow$ เคลื่อนที่ไปจุดวาง $\rightarrow$ Place $\rightarrow$ ทำซ้ำ จนครบ 5 รอบ $\rightarrow$ กลับ Home $\rightarrow$ ส่งสถานะ Complete ไปยัง Base System

Control Program รับ Set Point จาก Main Compute Program และ Feedback จาก Signal Processing Unit เพื่อคำนวณ Output ที่จะส่งไปควบคุมมอเตอร์

- **PID Control:** คำนวณ Error ระหว่าง $\theta_{\text{reference}}$ และ θ_{actual} แล้วคำนวณ Control Output ด้วยอัลกอริทึม PID ที่ออกแบบให้ได้ Settling Time ≤ 0.5 s และ Overshoot $\leq 1\%$ ตามข้อกำหนด P5 และ P6
- **PWM Generator:** แปลงค่า Control Output จาก PID เป็น Duty Cycle ของสัญญาณ PWM ที่ส่งไปยัง Motor Driver เพื่อควบคุมความเร็วและทิศทางการหมุนของมอเตอร์

Safety Program ทำงานอยู่เบื้องหลังตลอดเวลา มีสิทธิ์ Override คำสั่งจากทุกโมดูล เพื่อปกป้องทั้งตัวเครื่องและผู้ปฏิบัติงาน

- **Watchdog Timer (WDT):** WDT เป็น Timer ฮาร์ดแวร์ภายใน STM32 ที่ต้องได้รับการ Reset (Kick) ภายในระยะเวลาที่กำหนดทุก ๆ Cycle ของโปรแกรม หากโปรแกรมหยุดทำงาน ค้าง หรือเข้าสู่

Infinite Loop ด้วยเหตุใดก็ตาม WDT จะหมดเวลาและทำการ Reset STM32 ทั้งระบบโดยอัตโนมัติ ทำให้ระบบกลับสู่สถานะเริ่มต้นที่ปลอดภัย

- **Fault Handling Unit:** ตรวจสอบค่ากระแสจาก Current Sensor Processing ทุก Cycle หากกระแสเกิน Threshold ที่กำหนดไว้ เช่น เกิดการชนหรือ Mechanical Jam จะส่งสัญญาณ Fault ไปยัง Emergency Interlock ทันที พร้อมบันทึกรหัส Error ลงใน Storage เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถตรวจสอบสาเหตุ ในภายหลัง
- **Emergency Interlock:** เป็นจุดรวมของสัญญาณ Fault ทุกประเภท ไม่ว่าจะมาจาก Fault Handling Unit (Overcurrent), WDT Timeout หรือคำสั่ง E-Stop จาก Joystick หรือปุ่มบนตู้ไฟ เมื่อได้รับสัญญาณจากแหล่งใดก็ตาม Emergency Interlock จะบังคับให้ PWM Generator ส่งสัญญาณ Force PWM = 0 ทันที ทำให้มอเตอร์หยุดทำงานโดยไม่รับคำสั่งอื่นใดอีก จนกว่าจะได้รับการ Reset อย่างถูกต้อง

1.5 สรุป System Requirements

เพื่อให้สอดคล้องกับขอบเขตโครงการในหัวข้อ 2.2 คณะผู้จัดทำได้กำหนดข้อกำหนดความต้องการ ทางเทคนิคสำหรับใช้อ้างอิงในการออกแบบและทดสอบระบบ ดังตารางต่อไปนี้ โดยแบ่งออกเป็น 5 หมวดหมู่ ได้แก่ M (Mechanical) = โครงสร้างและกลไก, P (Performance) = สมรรถนะการทำงาน, A (Accuracy & Control) = ความแม่นยำและการควบคุม, E (Electrical & Interface) = ระบบไฟฟ้าและการเชื่อมต่อ, และ J (Joystick) = การควบคุมผ่านจอยสติ๊ก

ตารางที่ 1: สรุป System Requirements ทั้ง 32 ข้อ

Req ID	หมวด	คำอธิบาย
M1	Mechanical	ขนาดฐานไม่เกิน 200×200 mm
M2	Mechanical	Actuator และ Sensor สามารถยื่นออกนอกขนาดฐานได้
M3	Mechanical	End Effector รวมชิ้นงาน รับน้ำหนักได้สูงสุด 2 kg
M4	Mechanical	ใช้ Brushed DC Motor พร้อม Incremental Encoder
M5	Mechanical	อายุใช้งานทนทาน ≥ 3 รอบการทดสอบ (รอบละ 1 ชม.)
M6	Mechanical	ชิ้นส่วนรับแรงห้ามใช้ 3D Print เด็ดขาด
M7	Mechanical	ยึดฐานสแตนเลส AISI304 ลูกค้าด้วยสกรู M8 เหล็กกรมดำ
M8	Mechanical	เพลาต่อ Encoder ลูกค้า $\varnothing$ 8 mm (สูง 400 mm, ยื่นจากตัวเครื่อง $\geq$ 20 mm)
M9	Mechanical	หมุนต่อเนื่องได้ $\geq 540^\circ$ โดยสายไฟไม่พันหรือพันกัน
M10	Mechanical	จุดต่ำสุดของกริปเปอร์ต้องไม่ชนกับ Connection Rod
P1	Performance	ทำงานครบ 1 รอบ (หยิบวาง 5 ชิ้น + กลับ Homing) ใน $\leq$ 35 วินาที
P2	Performance	Gripper ใช้เวลาหยิบ $\sim$2 วินาที และวาง $\sim$2 วินาที
P3	Performance	ความเร็วเชิงมุม (Velocity) ≥ 2.9 rad/s และ ≤ 5.76 rad/s
P4	Performance	ความเร่งเชิงมุม (Acceleration) ≥ 2.0 rad/s^2 และ ≤ 5 rad/s^2
P5	Performance	ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว (Settling Time) ≤ 0.5 วินาที
P6	Performance	การเคลื่อนที่ที่พุ่งเกินเป้าหมาย (Overshoot) $\leq 1\%$
P7	Performance	รองรับการทดสอบทั้งแบบมีโหลด (2 kg) และไม่มีโหลด
A1	Accuracy & Control	ต้องสวมเพลาขนาด 12 mm ลงในรู 14 mm ได้ถูกต้อง
A2	Accuracy & Control	ความแม่นยำซ้ำ 100 รอบ (Precision) คลาดเคลื่อน $\leq \pm 0.1^\circ$
A3	Accuracy & Control	ผู้ใช้สามารถ Set จุด Homing เองได้ หลังตั้งค่าตั้งกับฐาน
A4	Accuracy & Control	สั่งงานได้ 2 แบบ: (1) ระบุองศา (2) ระบุลำดับตำแหน่งจาก Homing
A5	Accuracy & Control	หากสั่งงานนอกระยะ (Out-of-Workspace) ระบบต้องแจ้ง Error หรือป้องกันไว้
E1	Electrical & Interface	สื่อสารผ่าน Modbus
E2	Electrical & Interface	ใช้ STM32 เป็น Controller หลัก (มีตัวรองได้)
E3	Electrical & Interface	สายต่อตู้ไฟ: ท่อลม $\varnothing$ 4 mm (4 เส้น), สาย GX (1 เส้น), สาย Motor (1 เส้น)
E4	Electrical & Interface	ตู้ไฟมาตรฐานอุตสาหกรรม: จัดสายสวยงาม, ติด Label, มี Schematic
E5	Electrical & Interface	หน้าตู้ไฟมีไฟแสดงสถานะ: Power On/Off และ Emergency
E6	Electrical & Interface	E-Stop: ตัดการเคลื่อนที่แต่ Controller หลักยังมีไฟเลี้ยง (Reset ได้)
E7	Electrical & Interface	มีวงจรป้องกัน: ไฟกระชาก, กระแสเกิน, แรงดันตก
E8	Electrical & Interface	สลับโหมดการทำงาน Manual / Auto ได้
E9	Electrical & Interface	สัญญาณ Feedback กริปเปอร์: ขึ้นสุด, ลงสุด, หนีบสำเร็จ, ปล่อยสำเร็จ
J1	Joystick	จอยสติ๊กมีปุ่ม: กลับ Homing, Start, E-Stop

2. การออกแบบระบบ (System Design)

2.1 การออกแบบเชิงกล (Mechanical Design)

2.1.1 สถาปัตยกรรมเชิงกลโดยรวม

รูปที่ 2: CAD Assembly ของระบบเชิงกล

2.1.2 การคำนวณเพลา (Shaft Calculation)

ตารางที่ 2: สรุปผลการคำนวณเพลา

2.1.3 การคำนวณสายพาน (Belt Calculation)

ตารางที่ 3: สรุปผลการคำนวณสายพาน

2.1.4 การเลือก Bearing

2.1.5 การวิเคราะห์การโก่งตัว (Deflection Analysis)

รูปที่ 3: ผล FEA การโก่งตัวของ Arm ที่โหลด 2 kg

ตารางที่ 4: เปรียบเทียบผลการโก่งตัวจากทฤษฎีและ FEA

2.1.6 Motion Profile การเคลื่อนที่ (S-Curve)

รูปที่ 4: S-Curve Motion Profile ของการเคลื่อนที่ในหนึ่งรอบ

ตารางที่ 5: สรุปพารามิเตอร์ Motion Profile

2.2 การออกแบบระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics Design)

2.2.1 สถาปัตยกรรมไฟฟ้าโดยรวม

รูปที่ 5: Electrical Block Diagram ของระบบ

2.2.2 Schematic ตู้ควบคุม

รูปที่ 6: Electrical Schematic ของตู้ควบคุม

2.2.3 การออกแบบวงจรป้องกัน (Protection Circuit)

2.2.4 การออกแบบระบบ Joystick

2.3 การออกแบบระบบควบคุม (Control Design)

2.3.1 การสร้างแบบจำลองระบบ (System Modeling)

แบบจำลองมอเตอร์กระแสตรง ระบบขับเคลื่อนประกอบด้วยมอเตอร์กระแสตรงแบบ Brushed DC Motor ที่ต่อกับชุดทดรอบแบบ 2 ชั้น ได้แก่ Planetary Gearbox และ Belt Drive จากนั้นส่งกำลังไปยัง Arm ของหุ่นยนต์ การสร้างแบบจำลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ วงจรไฟฟ้า (Electrical Subsystem) และระบบกล (Mechanical Subsystem)

วงจรไฟฟ้า (Electrical Subsystem) วงจรสมมูลของ Armature มอเตอร์กระแสตรงประกอบด้วยความต้านทาน R_a ความเหนี่ยวนำ L_a และแรงดันย้อนกลับ (Back-EMF) e_b ดังแสดงใน**??** โดยประยุกต์ใช้ Kirchhoff's Voltage Law (KVL) รอบวงจร Armature ได้สมการ

$$v_{in}(t) = R_a\, i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_b(t) \tag{1}$$

โดยที่ v_{in} คือแรงดันไฟฟ้าอินพุต (V), i_a คือกระแส Armature (A), R_a คือความต้านทาน Armature (Ω), L_a คือความเหนี่ยวนำ Armature (H) และ e_b คือแรงดันย้อนกลับ (V)

แรงดันย้อนกลับมีความสัมพันธ์กับความเร็วเชิงมุมของ Rotor (ω_m) ดังนี้

$$e_b(t) = K_b\, \omega_m(t) \tag{2}$$

โดยที่ K_b คือค่าคงที่ Back-EMF (V·s/rad)

ระบบกล (Mechanical Subsystem) แรงบิดที่มอเตอร์ผลิตได้สัมพันธ์กับกระแส Armature ดังนี้

$$\tau_m(t) = K_t\, i_a(t) \tag{3}$$

โดยที่ K_t คือค่าคงที่แรงบิด (N·m/A)

ชุดทดรอบ 2 ชั้น ระบบใช้ชุดทดรอบแบบ 2 ชั้น ได้แก่ Planetary Gearbox อัตราทดรอบ $N_g = 24$ และ Belt Drive อัตราทดรอบ $N_b = 70/24 = 2.917$ อัตราทดรอบรวมคือ

$$N_{total} = N_g \times N_b = 24 \times \frac{70}{24} = 70 \tag{4}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมและแรงบิดที่ด้าน Output shaft (ω_{arm}, τ_{out}) กับด้าน Motor (ω_m, τ_m) คือ

$$\omega_{arm}(t) = \frac{\omega_m(t)}{N_{total}} \tag{5}$$

$$\tau_{out}(t) = \eta\, N_{total}\, \tau_m(t) \tag{6}$$

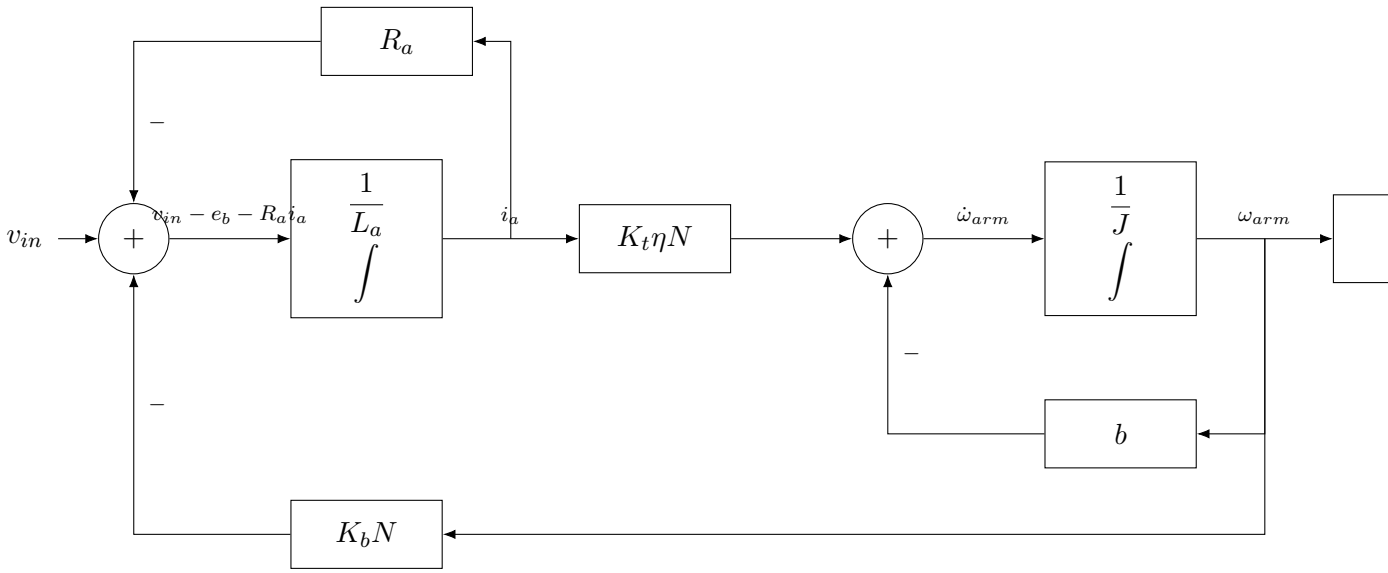
โดยที่ η คือประสิทธิภาพรวมของชุดทดรอบ

นำ สมการ (3) และ สมการ (6) ไปใช้กับ Newton's Second Law ที่ Output shaft

$$J\,\frac{d\omega_{arm}(t)}{dt} = \tau_{out}(t) - b\,\omega_{arm}(t) \tag{7}$$

$$J\,\frac{d\omega_{arm}(t)}{dt} = \eta\, N_{total}\, K_t\, i_a(t) - b\,\omega_{arm}(t) \tag{8}$$

โดยที่ J คือโมเมนต์ความเฉื่อยรวม (kg·m^2) และ b คือสัมประสิทธิ์การหน่วง แบบ Viscous (N·m·s/rad)



รูปที่ 7: Block Diagram ของระบบมอเตอร์กระแสตรงพร้อมชุดทดรอบ

Block Diagram ของระบบ

Transfer Function แปลง สมการ (1), (2) and (8) เป็น Laplace domain โดยสมมติเงื่อนไขเริ่มต้นเป็นศูนย์

$$V_{in}(s) = (R_a + L_a s)\, I_a(s) + K_b\, N_{total}\, \Omega_{arm}(s) \tag{9}$$

$$(Js + b)\, \Omega_{arm}(s) = \eta\, N_{total}\, K_t\, I_a(s) \tag{10}$$

จาก สมการ (10) แทน $I_a(s)$ ลงใน สมการ (9) แล้วจัดรูปได้ Velocity Transfer Function ดังนี้

$$G_{vel}(s) = \frac{\Omega_{arm}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{\eta K_t N_{total}/(L_a J)}{s^2 + \left(\dfrac{R_a}{L_a} + \dfrac{b}{J}\right) s + \dfrac{R_a b + K_b K_t N_{total}^2}{L_a J}} \tag{11}$$

สำหรับ Position Transfer Function เพิ่ม Integrator เนื่องจาก $\Theta_{arm}(s) = \Omega_{arm}(s)/s$

$$G_{pos}(s) = \frac{\Theta_{arm}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{\eta K_t N_{total}/(L_a J)}{s\left[s^2 + \left(\dfrac{R_a}{L_a} + \dfrac{b}{J}\right) s + \dfrac{R_a b + K_b K_t N_{total}^2}{L_a J}\right]} \tag{12}$$

แทนค่าตัวเลขจาก System Identification

$$K_{num} = \frac{\eta K_t N_{total}}{L_a J} = \frac{0.836 \times 0.04065 \times 70}{0.001448 \times 0.728} = \frac{2.376}{0.001054} = 2254$$

$$a_1 = \frac{R_a}{L_a} + \frac{b}{J} = \frac{1.453}{0.001448} + \frac{0.193}{0.728} = 1003.5 + 0.265 = 1003.8$$

$$a_0 = \frac{R_a b + K_b K_t N_{total}^2}{L_a J} = \frac{(1.453)(0.193) + (0.04165)(0.04065)(70)^2}{(0.001448)(0.728)} = \frac{0.280 + 8.297}{0.001054} = 8136$$

ดังนั้น Transfer Function เชิงตัวเลขคือ

$$G_{vel}(s) = \frac{2254}{s^2 + 1003.8\, s + 8136} \tag{13}$$

$$G_{pos}(s) = \frac{2254}{s\,(s^2 + 1003.8\, s + 8136)} \tag{14}$$

2.3.2 การทำ System Identification

พารามิเตอร์ที่วัดโดยตรง: Locked Rotor Test ค่า R_a และ L_a วัดด้วย Locked Rotor Test โดยจ่ายแรงดัน Step ผ่าน Shunt Resistor $R_{sh} = 0.1\,\Omega$ แล้ววัดแรงดันตกคร่อม Shunt ด้วย Oscilloscope เพื่อหา V_{max} และค่าคงเวลา τ สูตรคำนวณคือ

$$R_a = R_{sh}\left(\frac{V_{in}}{V_{sh}} - 1\right), \qquad L_a = R_{sh}\left(\tau\,\frac{V_{in}}{V_{sh}}\right) \tag{15}$$

โดยที่ V_{sh} คือแรงดันตกคร่อม Shunt ที่ Steady State และ τ คือค่าคงเวลาของกระแส ทดสอบที่ $V_{in} = 12$ V จำนวน 3 ครั้ง

ตารางที่ 6: ผลการวัด R_a และ L_a จาก Locked Rotor Test ที่ 12 V

Run	V_{max} (V)	τ (s)	R_a (Ω)	L_a (H)
1	0.740	0.00090	1.52162	0.00146
2	0.780	0.00090	1.43846	0.00138
3	0.800	0.00100	1.40000	0.00150
Mean			**1.45336**	**0.00145**

พารามิเตอร์ที่ Estimate: Parameter Estimation พารามิเตอร์ K_b, K_t, b, J และ η หาได้จาก Simulink Parameter Estimator โดยใช้ข้อมูล Chirp Signal ที่ความถี่ 0.1–2.0 Hz บันทึกจาก Hardware จริง

การ Preprocess ข้อมูล ข้อมูลดิบจาก Hardware มี High-frequency Noise จาก Encoder จึง Filter ด้วย Butterworth Low-pass Filter Order 4 ที่ Cutoff Frequency $f_c = 10$ Hz และใช้ filtfilt เพื่อให้ Phase Shift เป็นศูนย์ก่อนนำไป Estimate

เหตุผลการเลือก $f_c = 10$ Hz คือต้องการให้สัญญาณ Chirp ที่ความถี่สูงสุด 2 Hz ผ่านได้โดยไม่ถูกลดทอน โดยมี Safety margin 5 เท่า คือ $f_c = 5 \times f_{max} = 5 \times 2 = 10$ Hz

ผลการ Estimate และ Cross-Validation ใช้ข้อมูล Chirp 0.1–1.0 Hz (3 runs) เป็นชุด Estimation และ Cross-validate กับ Step Response และ Stair-Step Response

ตารางที่ 7: พารามิเตอร์ที่ได้จาก System Identification

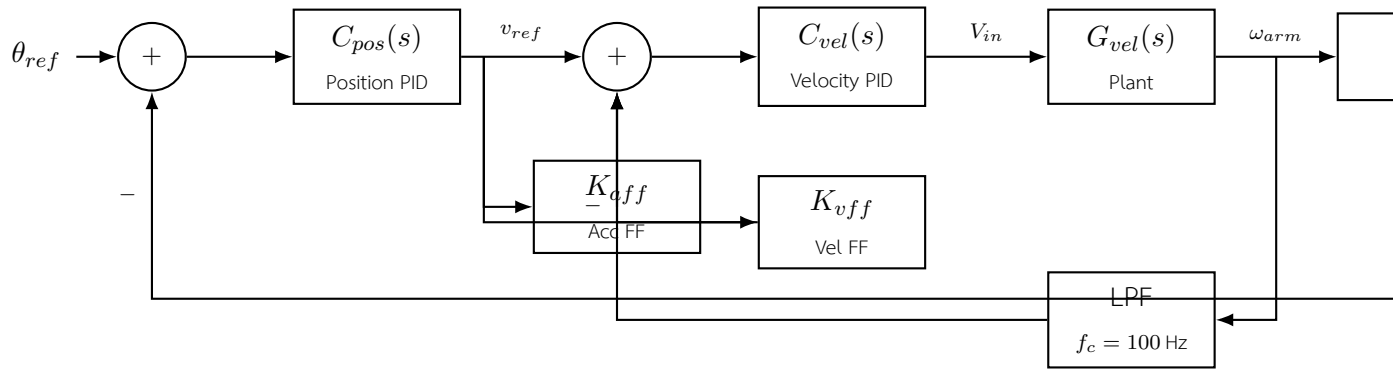
พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย	วิธีการ
Armature Resistance	R_a	1.4534	Ω	Locked Rotor Test
Armature Inductance	L_a	0.001448	H	Locked Rotor Test
Back-EMF Constant	K_b	0.04165	V·s/rad	Parameter Estimation
Torque Constant	K_t	0.04065	N·m/A	Parameter Estimation
Viscous Damping	b	0.19279	N·m·s/rad	Parameter Estimation
Moment of Inertia	J	0.72762	kg·m^2	Parameter Estimation
Gear Ratio (Planetary)	N_g	24	–	Datasheet
Belt Drive Ratio	N_b	2.917	–	การออกแบบ
Total Gear Ratio	N	70	–	$N_g \times N_b$
Efficiency	η	0.836	–	Parameter Estimation

ตารางที่ 8: ผลการ Cross-Validation ของ Model กับข้อมูลประเภทต่าง ๆ

ชุดข้อมูล	Fit Score (%)	NRMSE (%)	ผลการประเมิน
Chirp 0.1–0.5 Hz (3 runs)	92.7 ± 3.5	8.6 ± 2.3	ผ่าน
Chirp 0.1–1.0 Hz (3 runs)	96.6 ± 2.2	5.7 ± 1.8	ผ่าน
Chirp 0.1–2.0 Hz (3 runs)	89.9 ± 7.2	9.4 ± 3.6	ผ่าน
Step 12 V (3 runs)	83.1 ± 7.1	17.8 ± 3.8	ผ่าน
Step 24 V (3 runs)	90.5 ± 5.4	12.8 ± 3.7	ผ่าน
Stair-Step (3 runs)	95.6 ± 0.4	5.8 ± 0.3	ผ่านดีมาก

2.3.3 การออกแบบตัวควบคุม PID ด้วย Root Locus

โครงสร้างระบบควบคุม ระบบควบคุมใช้โครงสร้าง Cascade PID Control ซึ่งประกอบด้วย 2 Loop ซ้อนกัน ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8: Block Diagram ของ Cascade PID Control พร้อม Feedforward

ข้อกำหนดการออกแบบ ข้อกำหนดของระบบควบคุมที่ต้องบรรลุ ได้แก่

ตารางที่ 9: ข้อกำหนดของระบบควบคุม

ข้อกำหนด	สัญลักษณ์	ค่า	รหัส
Settling Time	t_s	≤ 0.5 s	P5
Overshoot	$\%OS$	$\leq 1\%$	P6

การออกแบบ Velocity Inner Loop เป้าหมายการออกแบบ Velocity Loop กำหนดให้

$$\omega_{c,vel} = 47\,\text{rad/s}, \qquad PM_{vel} \geq 70\check{r} \tag{16}$$

โดยที่ $\omega_{c,vel}$ เลือกให้เร็วกว่า Position Loop อย่างน้อย 5 เท่า ($\omega_{c,vel} \geq 5\,\omega_{c,pos} = 5 \times 9.41 = 47.1$ rad/s) เพื่อให้ Separation of Timescales assumption ใช้งานได้

Phase ของ Plant $G_{vel}(s)$ ที่ $\omega = 47$ rad/s คือ

$$\angle G_{vel}(j47) = -\arctan\left(\frac{47 \times 1003.8}{8136 - 47^2}\right) = -\arctan\left(\frac{47156}{5927}\right) = -82.8\check{r} \tag{17}$$

ใช้ pidtune ของ MATLAB ออกแบบ PID Controller ที่ Crossover Frequency $\omega_c = 47$ rad/s และ Phase Margin $PM = 70\check{r}$

การออกแบบ Position Outer Loop เป้าหมายการออกแบบ Position Loop กำหนดจาก Settling Time Requirement

$$\omega_{c,pos} = \frac{4}{\zeta\, t_s} = \frac{4}{0.85 \times 0.5} = 9.41\,\text{rad/s}, \qquad PM_{pos} \geq 80\check{r} \tag{18}$$

โดยเลือก $\zeta = 0.85$ เพื่อให้ได้ Overshoot $\leq 1\%$ เนื่องจาก $\%OS = e^{-\pi\zeta/\sqrt{1-\zeta^2}} \times 100 = 0.43\%$

Position Loop มองเห็น Plant เป็น Integrator $\frac{1}{s}$ เมื่อ Velocity Loop ปิดแล้ว (Separation of Timescales) ใช้ pidtune ออกแบบที่ $\omega_c = 9.41$ rad/s และ $PM = 80$ř

Feedforward Gains เพื่อลด Tracking Error ระหว่างการเคลื่อนที่ตาม Trajectory เพิ่ม Velocity Feedforward K_{vff} และ Acceleration Feedforward K_{aff} โดยคำนวณจาก Exact Inverse Model ของ Plant

$$K_{vff} = \frac{R_a\, b}{K_t\, \eta\, N} + K_b\, N = \frac{1.453 \times 0.193}{0.04065 \times 0.836 \times 70} + 0.04165 \times 70 = 0.118 + 2.916 = 3.034\,\text{V/(rad/s)} \tag{19}$$

$$K_{aff} = \frac{R_a\, J}{K_t\, \eta\, N} = \frac{1.453 \times 0.728}{0.04065 \times 0.836 \times 70} = \frac{1.057}{2.376} = 0.445\,\text{V/(rad/s}^2\text{)} \tag{20}$$

ตารางที่ 10: ค่า PID Gain ของระบบควบคุม

Loop	Gain	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
Velocity	Proportional	$K_{p,vel}$	20.036	V/(rad/s)
	Integral	$K_{i,vel}$	376.923	V/rad
	Derivative	$K_{d,vel}$	0.0325	V·s/rad
	Filter Coeff	N_{vel}	100	–
Position	Proportional	$K_{p,pos}$	9.267	s^{-1}
	Integral	$K_{i,pos}$	10.50	s^{-2}
	Derivative	$K_{d,pos}$	0.08	s
	Filter Coeff	N_{pos}	20	–
Feedforward	Velocity FF	K_{vff}	3.034	V/(rad/s)
	Accel FF	K_{aff}	0.445	V/(rad/s^2)

สรุปค่า PID Gains

2.3.4 Motion Profile แบบ S-Curve

ขีดจำกัดของการเคลื่อนที่ ขีดจำกัดของ Motion Profile คำนวณจาก Hardware Constraints ได้แก่ กระแสสูงสุด $i_{max} = 10$ A และ Back-EMF จากความเร็วสูงสุด ที่วัดได้จาก Step 24 V Test คือ

$\omega_{max} = 8.116$ rad/s

$$v_{max} = 0.9\,\omega_{max} = 0.9 \times 8.116 = 7.304\,\text{rad/s} \tag{21}$$

$$\tau_{out,max} = K_t\,\eta\,N\,i_{max} = 0.04065 \times 0.836 \times 70 \times 10 = 23.80\,\text{N·m} \tag{22}$$

$$a_{max} = 0.9 \times \frac{\tau_{out,max} - b\,\omega_{max}}{J} = 0.9 \times \frac{23.80 - 0.193 \times 8.116}{0.728} = 27.49\,\text{rad/s}^2 \tag{23}$$

$$j_{max} = 0.9\,a_{max}\,\omega_{n,vel} = 0.9 \times 27.49 \times 56.6 = 1400\,\text{rad/s}^3 \tag{24}$$

โดย Safety Factor 0.9 ใช้เพื่อเผื่อ Margin ให้กับ Model Uncertainty

โครงสร้าง S-Curve 7 Phase S-Curve Motion Profile แบ่งออกเป็น 7 Phase ดังแสดงใน**??**

ตารางที่ 11: โครงสร้าง S-Curve 7 Phase

Phase	ชื่อ	Jerk	ระยะเวลา
1	Jerk Up (Acceleration)	$+j_{max}$	t_j
2	Constant Acceleration	0	t_a
3	Jerk Down (Acceleration)	$-j_{max}$	t_j
4	Cruise (Constant Velocity)	0	t_v
5	Jerk Down (Deceleration)	$-j_{max}$	t_j
6	Constant Deceleration	0	t_a
7	Jerk Up (Deceleration)	$+j_{max}$	t_j

การคำนวณเวลาแต่ละ Phase

$$t_j = \frac{a_{max}}{j_{max}} = \frac{27.49}{1400} = 0.01963\,\text{s} \tag{25}$$

$$t_a = \frac{v_{max}}{a_{max}} - t_j = \frac{7.304}{27.49} - 0.01963 = 0.24607\,\text{s} \tag{26}$$

ระยะทางช่วง Acceleration (Phase 1–3) คำนวณแบบ Analytical

$$d_{accel} = v_{max}\,(t_a + t_j) - \frac{a_{max}\,t_j^2}{2} = 7.304(0.246 + 0.01963) - \frac{27.49 \times 0.01963^2}{2} = 1.042\,\text{rad} \tag{27}$$

สำหรับการเคลื่อนที่ระยะ q_{total} เวลา Cruise คือ

$$t_v = \frac{q_{total} - 2\,d_{accel}}{v_{max}} \tag{28}$$

เวลารวมทั้งหมด

$$t_{move} = 4\,t_j + 2\,t_a + t_v \tag{29}$$

ตารางที่ 12: สรุปพารามิเตอร์ Motion Profile สำหรับระยะทางต่าง ๆ

ระยะทาง	q_{total} (rad)	t_v (s)	t_{move} (s)	หมายเหตุ
90°	$\pi/2 = 1.571$	0 (ไม่มี Cruise)	0.571	ปรับ v_{max} ลง
180°	$\pi = 3.142$	0.197	0.748	–
360°	$2\pi = 6.283$	0.575	1.146	Worst Case

ผลการคำนวณ Motion Profile

2.3.5 การ Simulation ด้วย State Space Model

State Space Model สร้างแบบจำลอง State Space 3 State สำหรับ Simulation โดยเลือก State Vector $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_a & \omega_{arm} & \theta_{arm} \end{bmatrix}^T$

$$\dot{\mathbf{x}} = A\mathbf{x} + Bu_{in}, \qquad \mathbf{y} = C\mathbf{x} \tag{30}$$

$$A = \begin{bmatrix} -R_a/L_a & -K_bN/L_a & 0 \\ K_t\eta N/J & -b/J & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1/L_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{31}$$

แทนค่าตัวเลข

$$A = \begin{bmatrix} -1003.5 & -2013.0 & 0 \\ 3.265 & -0.265 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 690.6 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{32}$$

Discrete ด้วยวิธี Zero-Order Hold (ZOH) ที่ Sampling Period $T_s = 0.1$ ms เพื่อให้ $T_s < \tau_{elec}/10 = 0.001/10 = 0.0001$ s

ตารางที่ 13: ผล Simulation เทียบกับ Requirement (S-curve 360°)

พารามิเตอร์	ผล Simulation	Requirement	หน่วย	ผลการตรวจสอบ
Settling Time	0.001	≤ 0.5	s	ผ่าน
Overshoot	0.995	≤ 1	%	ผ่าน
Steady-state Error	0.512	–	deg	–
Max Current	10.00	≤ 10	A	ผ่าน
Current Clamp	0.71	–	%	–
Move Time (360°)	1.146	–	s	–
Cycle Time (4 pcs)	22.58	≤ 35	s	ผ่าน

ผลการ Simulation

3. การดำเนินการสร้างและติดตั้งระบบ (Implementation)

3.1 การประกอบเชิงกล (Mechanical Assembly)

3.1.1 ลำดับขั้นตอนการประกอบ

3.1.2 ผลการประกอบชิ้นส่วน

3.1.3 การตรวจสอบขนาดจริง

ตารางที่ 14: ผลการตรวจสอบขนาดชิ้นส่วนจริง

3.2 การประกอบตู้ควบคุมไฟฟ้า (Electrical Cabinet Assembly)

3.2.1 รายการอุปกรณ์ภายในตู้

ตารางที่ 15: Bill of Materials (BOM) ของตู้ควบคุม

3.2.2 ผลการประกอบตู้ควบคุม

3.3 สถาปัตยกรรม STM32 Firmware (Firmware Architecture)

3.3.1 ภาพรวมสถาปัตยกรรม Firmware

3.3.2 โครงสร้างไฟล์และโมดูล (Code Structure)

ตารางที่ 16: โมดูลหลักใน STM32 Firmware

3.3.3 Interrupt Service Routine (ISR) และ Timing

ตารางที่ 17: ISR และ Task Timing ของ Firmware

3.3.4 การทำงานร่วมกันของโมดูล (Module Interaction)

3.3.5 การ Implement S-Curve Motion Profile ใน Firmware

3.3.6 Joystick Mode และการ Map ปุ่ม

ตารางที่ 18: การ Map ปุ่ม Joystick กับคำสั่งระบบ

4. การบูรณาการระบบ (System Integration)

4.1 สถาปัตยกรรมการบูรณาการ

รูปที่ 9: Integration Diagram ของระบบทั้งหมด

4.2 การเชื่อมต่อ STM32 กับ Motor และ Encoder

รูปที่ 10: ผลการทดสอบการอ่านค่า Encoder และสัญญาณ PWM

4.3 การเชื่อมต่อ Joystick

ตารางที่ 19: ผลการทดสอบ Joystick แต่ละโหมด

4.4 การเชื่อมต่อ Modbus กับ Base System

4.5 แผนการทดสอบ End-to-End

ตารางที่ 20: แผนการทดสอบ End-to-End

5. ผลการทดสอบ (Test Results)

5.1 ผลการทดสอบ Progress Update 1

5.1.1 ผล FEA และการคำนวณ Deflection

ตารางที่ 21: ผล FEA เทียบกับเกณฑ์ M3

5.1.2 ผลการคำนวณ Motion Profile (ทฤษฎี)

5.2 ผลการทดสอบ Progress Update 2

5.2.1 Unit Test: การอ่าน Encoder และ PWM (Deliverable 2)

ตารางที่ 22: ผล Unit Test การอ่าน Encoder และ PWM

5.2.2 Unit Test: PID Closed-Loop และ S-Curve (Deliverable 3)

รูปที่ 11: Step Response เบื้องต้นของระบบ PID ก่อนการ Tune

5.2.3 Unit Test: Joystick ทุกโหมด (Deliverable 4)

ตารางที่ 23: ผล Unit Test Joystick แต่ละโหมด

5.2.4 Unit Test: ตู้ควบคุมไฟฟ้า (Deliverable 1)

5.2.5 การทำ System Identification (Deliverable 6)

ตารางที่ 24: ผล System Identification

5.2.6 ผล Simulation Simscape

6. การตรวจสอบและทวนสอบ (Verification and Validation)

6.1 ภาพรวม V&V Framework

6.2 ตาราง V&V รวมทั้งหมด (32 Requirements)

ตารางที่ 25: ตาราง V&V รวม ทั้ง 32 Requirements

6.3 ตาราง V&V แยกตาม Category

6.3.1 Mechanical Requirements (M1–M10)

ตารางที่ 26: V&V Table: Mechanical Requirements (M1–M10)

6.3.2 Performance Requirements (P1–P7)

ตารางที่ 27: V&V Table: Performance Requirements (P1–P7)

6.3.3 Accuracy Requirements (A1–A5)

ตารางที่ 28: V&V Table: Accuracy Requirements (A1–A5)

6.3.4 Electrical Requirements (E1–E9)

ตารางที่ 29: V&V Table: Electrical Requirements (E1–E9)

6.3.5 Joystick Requirements (J1)

ตารางที่ 30: V&V Table: Joystick Requirements (J1)

6.4 สรุปสถานะ V&V ตาม Category

ตารางที่ 31: สรุปสถานะ V&V แยกตาม Category

7. สรุปผลและแนวทางต่อไป (Conclusion)

7.1 สรุปผลงาน Progress Update 1

7.2 สรุปผลงาน Progress Update 2

7.3 แนวทางและแผนงานต่อไป (Future Work)

A. รายละเอียดการคำนวณเชิงกล

B. รายละเอียดการคำนวณ Motion Profile

C. Schematic ไฟฟ้าฉบับเต็ม

รูปที่ 12: Electrical Schematic ฉบับเต็ม

D. Code Snippet หลักของ STM32 Firmware

```
/* ใส่[ Code จริงของ PID Loop] */
```

Listing 1: ตัวอย่าง PID Control Loop บน STM32

E. ผลการ Simulation Simscape ฉบับเต็ม

รูปที่ 13: ผล Simulation Simscape ฉบับเต็ม

F. Log การทดสอบ Unit Test

รูปที่ 14: Serial Log ขณะทดสอบการอ่านค่า Encoder

หนังสืออ้างอิง

Al Tahtawi, A. R. (2018). Kalman filter algorithm design for HC-SR04 ultrasonic sensor data acquisition system. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 2(1):15–19.

Devore, J. L. (2015). *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*. Cengage Learning.

Elecfreaks (2012). *HC-SR04 ultrasonic ranging module: User manual*. https://www.elecfreaks.com/estore/download/EF03085-HC-SR04_Ultrasonic_Module_User_Guide.pdf.

Massachusetts Institute of Technology (2005). Modeling dynamics and control i (spring 2005) - lecture notes. https://ocw.mit.edu/courses/2-003-modeling-dynamics-and-control-i-spring-2005/57d44d83366ec969c16208c8fac3982d_notesinstalment2.pdf.

MathWorks (2024a). Continuous-discrete conversion methods. https://www.mathworks.com/help/control/ug/continuous-discrete-conversion-methods.html.

MathWorks (2024b). State-space models. https://www.mathworks.com/help/control/ug/state-space-models.html.

MathWorks (2024c). What is discrete-time system? https://www.mathworks.com/help/signal/ug/discrete-time-system-models.html.

Montgomery, D. C. and Runger, G. C. (2018). *Applied Statistics and Probability for Engineers*. John Wiley & Sons.

STMicroelectronics (2023). *STM32G4 Series reference manual (RM0440)*. https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0440.pdf.

Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., and Ye, K. (2016). *Probability and Statistics for Engineers and Scientists*. Pearson.