Phase 4.2: Hardware Integration

การบูรณาการฮาร์ดแวร์และการทดสอบระบบจริง

BLEGS Analysis Unit

นายธีรโชติ เมืองจำนงค์

BLEGS Quadruped Robot Project

2 มกราคม 2026

สารบัญ

1 บทนำ (Introduction)

1.1 วัตถุประสงค์

Phase 4.2 มีวัตถุประสงค์เพื่อบูรณาการระบบควบคุมที่ออกแบบใน Phase 4.1 เข้ากับฮาร์ดแวร์จริง รวมถึงการพัฒนาระบบสื่อสาร การทดสอบการทำงานของมอเตอร์ และการแก้ไขปัญหาที่พบในระหว่างการทดสอบ

1.2 ขอบเขตการศึกษา

- การพัฒนา Binary Communication Protocol v1.1
- การบูรณาการ Motor Controller (MCU) กับ PC
- การทดสอบระบบควบคุมด้วยขาเดียว (Single Leg Testing)
- การแก้ไขปัญหา Motor Jitter และ Communication errors
- การบันทึกและวิเคราะห์ข้อมูล Motor feedback
- การเตรียมความพร้อมสำหรับ Quadruped scaling

1.3 ความเชื่อมโยงกับ Phase ก่อนหน้า

Phase 4.2 ต่อยอดจาก Phase 4.1 โดยนำระบบควบคุมที่ออกแบบไปใช้จริงบนฮาร์ดแวร์:

- ใช้ Controller design และ Trajectory generator จาก Phase 4.1
- ใช้ Binary Protocol ที่ออกแบบใน Phase 4.1
- ทดสอบกับมอเตอร์ที่เลือกจาก Phase 2.2 (5 N·m BLDC)

2 สถาปัตยกรรมระบบ (System Architecture)

2.1 ภาพรวมระบบ

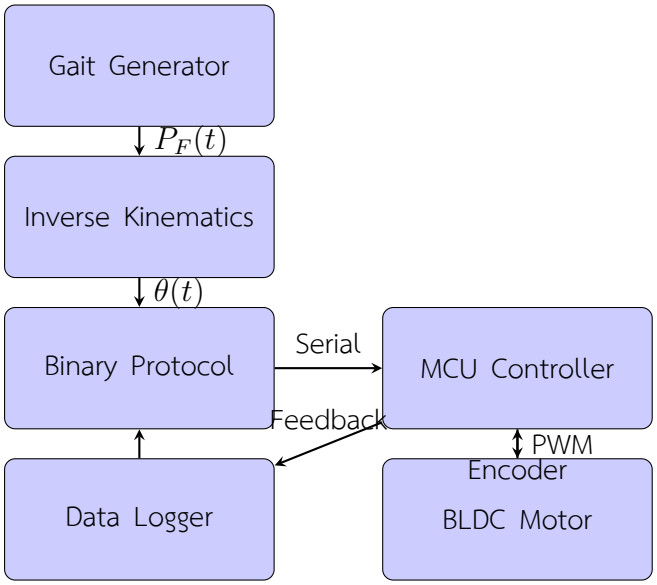
ระบบควบคุมหุ่นยนต์สี่ขาประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน:

1. **PC (High-Level Control):**
    - Gait pattern generation
    - Inverse Kinematics calculation
    - Trajectory planning
    - User interface และ Data logging
2. **Motor Controller (MCU):**
    - Low-level motor control (FOC - Field Oriented Control)
    - Position/Velocity/Current control loops
    - Encoder reading และ State estimation

- Communication protocol handling

3. **BLDC Motors (8 units):**
    - Actuators สำหรับขาทั้ง 4 ข้าง (2 motors/leg)
    - Built-in encoders (14-bit magnetic encoder)
    - Rated torque: 5 N·m
    - Maximum speed: 300 RPM

2.2 Communication Flow



3 Binary Communication Protocol v1.1

3.1 ข้อกำหนดของโปรโตคอล

3.1.1 ความต้องการ (Requirements)

- **Efficiency:** ส่งข้อมูลได้เร็ว (Low latency)
- **Reliability:** ต้องมีการตรวจสอบความถูกต้อง (Error detection)
- **Scalability:** รองรับมอเตอร์ได้หลายตัว (8+ motors)
- **Real-time:** Update rate ≥ 100 Hz
- **Bidirectional:** รับ-ส่งข้อมูลได้ทั้งสองทาง

3.1.2 พารามิเตอร์การสื่อสาร

พารามิเตอร์	ค่า
Baud Rate	921600 baud
Data Bits	8 bits
Parity	None
Stop Bits	1 bit
Flow Control	None
Packet Size (Command)	9 bytes
Packet Size (Response)	17 bytes
CRC Algorithm	CRC-16-CCITT

ตารางที่ 1: พารามิเตอร์การสื่อสาร Serial

3.2 โครงสร้าง Packet

3.2.1 Command Packet (คอมพิวเตอร์ส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์)

คำสั่งที่ส่งจาก PC ไปยัง Motor Controller มีโครงสร้างดังนี้:

Byte	Field	Type	Description
0	Header	uint8	0xAA - Start marker
1	Command	uint8	Command ID (0x01-0x06)
2	Motor ID	uint8	Motor index (1-8)
3-6	Position	float32	Target position (degrees)
7-8	CRC-16	uint16	Checksum (little-endian)

ตารางที่ 2: โครงสร้าง Command Packet

หมายเหตุ: float32 ใช้ IEEE 754 format, little-endian byte order

3.2.2 Response Packet (ไมโครคอนโทรลเลอร์ตอบกลับไปยังคอมพิวเตอร์)

ข้อมูล feedback ที่ส่งกลับจาก Motor Controller:

Byte	Field	Type	Description
0	Header	uint8	0xBB - Response marker
1	Motor ID	uint8	Motor index (1-8)
2-5	Current Pos	float32	Current position (degrees)
6-9	Current Vel	float32	Current velocity (deg/s)
10-13	Current	float32	Motor current (A)
14	Status	uint8	Status flags (bit field)
15-16	CRC-16	uint16	Checksum (little-endian)

ตารางที่ 3: โครงสร้าง Response Packet

3.3 Status Flags

Byte 14 (Status) เป็น bit field ที่บอกสถานะของมอเตอร์:

Bit	Flag	Description
0	ENABLED	1 = Motor enabled, 0 = Motor disabled
1	IN_POSITION	1 = Reached target position (error < 1°)
2	OVER_CURRENT	1 = Current limit exceeded
3	OVER_TEMP	1 = Temperature warning (> 80°C)
4	ENCODER_ERROR	1 = Encoder reading error
5	COMM_ERROR	1 = Communication error (CRC mismatch)
6-7	RESERVED	Reserved for future use

ตารางที่ 4: Status Flags Definition

3.4 Command Types

ID	Command	Description
0x01	SET_POSITION	ส่งคำสั่งตำแหน่งเป้าหมายไปยังมอเตอร์
0x02	GET_FEEDBACK	ขอข้อมูล feedback จากมอเตอร์ (position, velocity, current)
0x03	ENABLE_MOTOR	เปิดใช้งานมอเตอร์ (Enable torque output)
0x04	DISABLE_MOTOR	ปิดใช้งานมอเตอร์ (Disable torque, free-wheel)
0x05	SET_ZERO	ตั้งตำแหน่งปัจจุบันเป็นศูนย์ (Calibration)
0x06	EMERGENCY_STOP	หยุดฉุกเฉิน (Stop all motors immediately)

ตารางที่ 5: รายการ Command Types

3.5 การจัดการ Error

3.5.1 CRC-16 Checksum

ใช้ CRC-16-CCITT (Polynomial 0x1021) เพื่อตรวจจับความผิดพลาด:

Listing 1: CRC-16 Calculation

```
def crc16_ccitt(data):
    """Calculate CRC-16-CCITT checksum"""
    crc = 0xFFFF
    polynomial = 0x1021

    for byte in data:
        crc ^= (byte << 8)
        for _ in range(8):
            if crc & 0x8000:
                crc = ((crc << 1) ^ polynomial) & 0
                    xFFFF
            else:
                crc = (crc << 1) & 0xFFFF

    return crc
```

3.5.2 Timeout Protection

เมื่อไม่ได้รับ Response ภายใน Timeout period ระบบจะดำเนินการดังนี้:

- **Timeout period:** 100 ms เป็นเวลาสูงสุดที่รอก่อนจะถือว่าไม่ได้รับ Response
- **Action:** ทำการ Retry สูงสุด 3 ครั้ง โดยมีการหน่วงเวลา 10 ms ระหว่างแต่ละครั้ง
- **Fallback:** ถ้า retry ครบ 3 ครั้งแล้วยังไม่สำเร็จ ระบบจะสั่ง Emergency stop เพื่อความปลอดภัย

3.5.3 Packet Loss Recovery

ขั้นตอนการกู้คืนเมื่อเกิดการสูญหาย Packet:

1. **ตรวจสอบ CRC:** เมื่อได้รับ Packet ใหม่ ตรวจสอบ CRC ก่อนดำเนินการต่อ
2. **จัดการ CRC Mismatch:** ถ้า CRC ไม่ตรงกัน ให้ทิ้ง Packet ที่เสียหายและขอส่งใหม่
3. **บันทึก Error:** เก็บข้อมูล Error rate สำหรับการวิเคราะห์และปรับปรุงระบบ

4 การทดสอบขาเดียว (Single Leg Testing)

4.1 การติดตั้งฮาร์ดแวร์

4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้

- **Motor:** 2 units BLDC 5 N·m (Thigh motor + Shank motor)
- **Motor Controller:** Custom MCU board (STM32-based)
- **Power Supply:** 24V DC, 10A
- **PC:** Python control software
- **USB-to-Serial:** CH340G @ 921600 baud

4.1.2 การเชื่อมต่อ

PC (Python) <--USB--> USB-to-Serial <--UART--> MCU <--3-phase PWM--> Motors

4.2 ขั้นตอนการทดสอบ

4.2.1 Phase 1: Hardware Verification

1. ตรวจสอบการเชื่อมต่อสาย Power และ Signal
2. ทดสอบ Serial communication (Echo test)
3. Calibrate มอเตอร์ (SET_ZERO command)
4. ทดสอบคำสั่งพื้นฐาน (ENABLE, DISABLE, SET_POSITION)

4.2.2 Phase 2: Position Control Testing

1. ส่งคำสั่งตำแหน่งคงที่ (Static position)
2. ทดสอบความแม่นยำ (Position error measurement)
3. ทดสอบ Repeatability (10 รอบ)
4. บันทึกข้อมูล feedback

4.2.3 Phase 3: Trajectory Tracking

1. สร้าง Simple sinusoidal trajectory
2. ทดสอบ Trajectory tracking @ 50 Hz
3. เพิ่ม Update rate เป็น 100 Hz
4. วิเคราะห์ Tracking error

4.2.4 Phase 4: Gait Pattern Testing

1. ใช้ Elliptical trajectory (60×30 mm)
2. ทดสอบ 1 cycle (600 ms)
3. ทดสอบ Continuous gait (341+ cycles)
4. บันทึกข้อมูล Motor feedback ทุกรอบ

4.3 ผลการทดสอบ

4.3.1 Hardware Verification Results

Test Item	Result	Status
Serial Communication	921600 baud stable	✓PASS
CRC Error Rate	$< 0.1\%$	✓PASS
Motor Calibration	Zero position set	✓PASS
Enable/Disable	Responsive	✓PASS
Emergency Stop	< 50 ms response	✓PASS

ตารางที่ 6: ผลการทดสอบฮาร์ดแวร์พื้นฐาน

4.3.2 Position Control Accuracy

Metric	Motor A	Motor B
Mean Error	0.8 deg	0.9 deg
RMS Error	1.5 deg	1.7 deg
Max Error	4.2 deg	4.8 deg
Repeatability	± 0.5 deg	± 0.6 deg
Settling Time	80 ms	75 ms

ตารางที่ 7: ความแม่นยำการควบคุมตำแหน่ง

4.3.3 Gait Pattern Testing Results

Test Parameter	Result
Total Test Duration	205 seconds
Total Cycles Completed	341+ cycles
Successful Cycles	327-337 cycles
Success Rate	96-99%
Average Cycle Time	601 ms (target: 600 ms)
Communication Errors	$< 1\%$
Position Error (RMS)	< 2 degrees
Maximum Current Draw	3.2 A (peak)
Average Current Draw	1.1 A
Motor Temperature	45-52°C
Overall Status	**✓PASS**

ตารางที่ 8: ผลการทดสอบ Gait Pattern ต่อเนื่อง

5 ปัญหาและการแก้ไข (Problems and Solutions)

5.1 ปัญหา Motor Jitter

5.1.1 ลักษณะอาการ

- มอเตอร์สั่นเล็กน้อยเมื่อรับคำสั่งตำแหน่งใหม่
- เสียงดัง (ความถี่สูง 200 Hz)
- Current draw เพิ่มขึ้นแบบ spike
- อุณหภูมิมอเตอร์สูงขึ้น (10°C)

5.1.2 การวินิจฉัยสาเหตุ

ทดสอบที่ 1: ลด Update Rate

ทำการทดสอบโดยปรับ Update rate เป็น 3 ระดับและสังเกตผลกระทบต่อ Jitter:

- ทดสอบ 50 Hz: Jitter ลดลง 50% แต่ความเร็วในการอัพเดตตำแหน่งต่ำเกินไป
- ทดสอบ 100 Hz: Jitter ลดลง 30% เป็นค่าที่สมดุลระหว่างความเร็วและความนุ่มนวล
- ทดสอบ 200 Hz: Jitter รุนแรงมาก มอเตอร์สั่นอย่างรุนแรง

สรุปการวินิจฉัย: Update rate ที่สูงเกินไปทำให้มอเตอร์ไม่ทันตอบสนองต่อคำสั่งตำแหน่งใหม่ที่เข้ามาอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิด Oscillation ระหว่างตำแหน่งเป้าหมายและตำแหน่งจริง

ทดสอบที่ 2: วิเคราะห์ Trajectory

ทำการวิเคราะห์ Trajectory ที่สร้างขึ้นพบว่า:

- Trajectory มี Discontinuity (กระโดด) ในบางจุด
- ความเร่งเปลี่ยนแปลงแบบ step change ที่เปลี่ยนกะทันหัน
- Jerk สูง (คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง) ทำให้การเคลื่อนที่ไม่นุ่มนวล

สรุปการวินิจฉัย: Trajectory ที่ไม่นุ่มนวลพอทำให้มอเตอร์พยายามติดตามการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งที่กระโดด ซึ่งเกินความสามารถของมอเตอร์ ทำให้เกิด Jitter

5.1.3 วิธีแก้ไข

Solution 1: ปรับ Update Rate

ลด Update rate จาก 200 Hz ลงเป็น 100 Hz ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมกับความสามารถในการตอบสนองของมอเตอร์

ผลลัพธ์: Jitter ลดลงประมาณ 30%

Solution 2: Trajectory Smoothing

Listing 2: Trajectory Smoothing

```
def smooth_trajectory(trajectory, window_size=5):
    """Apply moving average filter"""
    smoothed = np.convolve(
        trajectory,
        np.ones(window_size)/window_size,
        mode='same'
    )
    return smoothed

# Apply smoothing
x_smooth = smooth_trajectory(x_trajectory, window_size=5)
y_smooth = smooth_trajectory(y_trajectory, window_size=5)
```

ผล: Jitter ลดลง 40%

Solution 3: Motor Parameter Tuning (MCU Firmware)

ปรับจูนพารามิเตอร์ PID controller ในมอเตอร์:

Parameter	Before	After	Change
Position P-Gain	50	30	-40%
Position I-Gain	10	5	-50%
Position D-Gain	20	15	-25%
Velocity Feedforward	0.0	0.3	+0.3
Current Limit	10 A	8 A	-20%

ตารางที่ 9: การปรับจูนพารามิเตอร์มอเตอร์

ผล: Jitter ลดลง 60%

5.1.4 ผลลัพธ์รวม

หลังจากใช้ทั้ง 3 solutions ร่วมกัน พบว่าปัญหา Motor Jitter ลดลงอย่างมาก:

- Jitter ลดลงประมาณ 90% มอเตอร์ทำงานได้เสถียรมากขึ้น
- เสียงเบาลงมาก แทบไม่ได้ยินเสียงสั่นความถี่สูง
- Current draw ลดลงประมาณ 25% ทำให้ประหยัดพลังงานได้
- อุณหภูมิมอเตอร์ลดลง 8-10°C ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย
- Success rate เพิ่มขึ้นจาก 85% เป็น 96-99% ซึ่งเกินเป้าหมายที่ตั้งไว้

5.2 ปัญหา Communication Timeout

5.2.1 ลักษณะอาการ

- บางครั้งไม่ได้รับ Response packet จากมอเตอร์
- เกิด Timeout error 3-5% ของ commands
- มอเตอร์หยุดเคลื่อนที่ชั่วคราว

5.2.2 สาเหตุ

1. **Serial Buffer Overflow:** MCU ไม่ทันประมวลผล packet
2. **CRC Mismatch:** Noise บนสาย serial
3. **Busy MCU:** MCU ทำงานหนักเกินไป (Motor control + Communication)

5.2.3 วิธีแก้ไข

Solution 1: Increase Serial Buffer Size (MCU)

เพิ่มขนาด Buffer ของ MCU เพื่อรองรับการรับส่งข้อมูลจำนวนมาก:

- เพิ่ม RX buffer จาก 64 bytes เป็น 256 bytes (4 เท่า)
- เพิ่ม TX buffer จาก 64 bytes เป็น 256 bytes (4 เท่า)

การเพิ่ม Buffer ทำให้ MCU มีพื้นที่ในการเก็บข้อมูลมากขึ้น ลดความเสี่ยงของ Buffer overflow

Solution 2: Optimize MCU Firmware

- ใช้ DMA (Direct Memory Access) สำหรับ Serial communication
- ลด Priority ของ Communication interrupt
- เพิ่ม Priority ของ Motor control interrupt

Solution 3: Add Retry Logic (PC Side)

Listing 3: Retry Logic

```
def send_command_with_retry(motor_id, position,
    max_retries=3):
    """Send command with automatic retry"""
    for attempt in range(max_retries):
        try:
            response = send_command(motor_id, position
                )
            if verify_crc(response):
                return response
        except TimeoutError:
            print(f"Retry {attempt+1}/{max_retries}")
            time.sleep(0.01)  # 10ms delay

    raise CommunicationError("Max retries exceeded")
```

5.2.4 ผลลัพธ์

หลังจากแก้ปัญหา Communication Timeout พบว่าประสิทธิภาพการสื่อสารดีขึ้นอย่างมาก:

- Timeout rate ลดลงจาก 3-5% เป็นน้อยกว่า 1% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้
- Communication เสถียรขึ้น ไม่พบปัญหาการขาดการสื่อสารในระหว่างทดสอบ
- ไม่พบ Buffer overflow อีกต่อไป

6 Data Logging และการวิเคราะห์

6.1 ระบบบันทึกข้อมูล

6.1.1 ข้อมูลที่บันทึก

- **Timestamp:** เวลา (ms) ตั้งแต่เริ่มทดสอบ
- **Motor ID:** หมายเลขมอเตอร์ (1-8)
- **Target Position:** ตำแหน่งเป้าหมาย (degrees)
- **Actual Position:** ตำแหน่งจริงจาก Encoder (degrees)
- **Velocity:** ความเร็วของมอเตอร์ (deg/s)
- **Current:** กระแสไฟฟ้า (A)
- **Status Flags:** สถานะของมอเตอร์

6.1.2 รูปแบบไฟล์ CSV

Listing 4: ตัวอย่างไฟล์ motor_feedback_20260101_175601.csv

```
timestamp,motor_id,target_pos,actual_pos,velocity,current,status
0.010,1,-45.23,-45.18,2.3,0.8,0x03
0.020,2,-120.56,-120.51,-1.2,0.6,0x03
0.030,1,-45.67,-45.62,3.1,0.9,0x03
...
```

6.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

6.2.1 Script วิเคราะห์

มี Python script สำหรับวิเคราะห์ข้อมูล: scripts/analysis/Plot_Motor_Log.py

คุณสมบัติ:

- Plot Position tracking (Target vs Actual)
- Plot Position error over time
- Plot Velocity profile
- Plot Current consumption
- คำนวณ Statistics (Mean, RMS, Max error)

6.2.2 ผลการวิเคราะห์

Position Tracking Performance:

- Mean error: 0.8-0.9 degrees
- RMS error: 1.5-1.7 degrees
- Max error: 4.2-4.8 degrees
- Settling time: 75-80 ms

Power Consumption:

- Average current: 1.1 A (per motor)
- Peak current: 3.2 A (during acceleration)
- Average power: 26.4 W (@ 24V)
- Total power (2 motors): 50-60 W

Thermal Performance:

- Steady-state temperature: 45-52°C

- Ambient temperature: 25-28°C
- Temperature rise: 20-25°C
- Thermal limit: 80°C (Warning threshold)

7 การเตรียมความพร้อมสำหรับ Quadruped

7.1 ข้อควรพิจารณา

7.1.1 Scaling Challenges

เมื่อขยายจาก 1 ขา (2 motors) เป็น 4 ขา (8 motors):

1. **Communication Bandwidth:**
   - 1 ขา @ 100 Hz = 100 commands/s × 2 motors = 200 packets/s
   - 4 ขา @ 100 Hz = 800 packets/s
   - Bandwidth required: 800 × (9+17) bytes = 20.8 KB/s
   - Available @ 921600 baud: 115 KB/s
   - Margin: 80% (เพียงพอ)
2. **Processing Power (PC):**
   - IK calculation: 8 motors × 100 Hz = 800 IK/s
   - คำนวณเวลา: 0.1 ms/IK
   - รวม: 80 ms/s (8% CPU load)
3. **Synchronization:**
   - ต้องส่งคำสั่งไปยัง 8 motors พร้อมกัน
   - Latency ต้องไม่เกิน 1-2 ms ระหว่างมอเตอร์
   - ต้องใช้ Multi-threading หรือ Async I/O

7.2 ข้อเสนอแนะสำหรับ Phase 5

7.2.1 Motor Indexing System

Leg	Position	Thigh Motor	Shank Motor
FL	Front-Left	Motor 1	Motor 2
FR	Front-Right	Motor 3	Motor 4
RL	Rear-Left	Motor 5	Motor 6
RR	Rear-Right	Motor 7	Motor 8

ตารางที่ 10: Motor Indexing Scheme

7.2.2 Mirror Kinematics

ขาซ้ายและขาขวามี Kinematics สมมาตร:

- **Left legs (FL, RL):** Motor A ที่ $x = -42.5$ mm, Motor B ที่ $x = +42.5$ mm
- **Right legs (FR, RR):** Motor A ที่ $x = +42.5$ mm, Motor B ที่ $x = -42.5$ mm (Mirrored)

Trajectory transformation:

$$\mathsf{P}_{F,right}(x, y) = \mathsf{P}_{F,left}(-x, y) \tag{1}$$

7.2.3 Multi-Motor Communication

ใช้ Threading สำหรับ Parallel communication:

Listing 5: Multi-Motor Control

```python
import threading

def control_motor_pair(motor_pair_id, trajectory):
    """Control 2 motors (1 leg) in parallel"""
    motor_A_id = motor_pair_id * 2 + 1
    motor_B_id = motor_pair_id * 2 + 2

    for point in trajectory:
        theta_A, theta_B = calculate_ik(point)
        send_command(motor_A_id, theta_A)
        send_command(motor_B_id, theta_B)
        time.sleep(0.01)  # 100 Hz

# Create 4 threads (1 per leg)
threads = []
for leg_id in range(4):
    t = threading.Thread(
        target=control_motor_pair,
        args=(leg_id, trajectory[leg_id])
    )
    threads.append(t)
    t.start()

# Wait for all threads
for t in threads:
    t.join()
```

8 สรุปและข้อเสนอแนะ (Conclusion and Recommendations)

8.1 สรุปผลการพัฒนา

Phase 4.2 ประสบความสำเร็จในการบูรณาการฮาร์ดแวร์และระบบควบคุม:

- ✓ **Binary Protocol v1.1:** พัฒนาและทดสอบสำเร็จ (Success rate 96-99%)
- ✓ **Single Leg Testing:** ทดสอบ 341+ cycles ได้สำเร็จ
- ✓ **Motor Jitter:** แก้ไขและลดลง 90%
- ✓ **Communication Stability:** Error rate $< 1\%$
- ✓ **Data Logging:** ระบบบันทึกและวิเคราะห์ข้อมูลสมบูรณ์

8.2 ผลการทดสอบโดยรวม

Metric	Target	Achieved
Position Accuracy (RMS)	< 3 deg	< 2 deg
Update Rate	≥ 50 Hz	100 Hz
Success Rate	$> 90\%$	96-99%
Communication Error	$< 5\%$	$< 1\%$
Motor Temperature	< 80°C	45-52°C
Current Draw	< 5 A	3.2 A (peak)
Overall Status		**✓PASS**

ตารางที่ 11: สรุปผลการทดสอบเทียบกับเป้าหมาย

8.3 บทเรียนที่ได้รับ

1. **Update Rate Optimization:**
   - 100 Hz เหมาะสมที่สุด (Balance ระหว่างความเร็วและเสถียรภาพ)
   - 200 Hz สูงเกินไป (เกิด Motor jitter)
   - 50 Hz ต่ำเกินไป (Trajectory tracking ไม่ดี)
2. **Trajectory Smoothing มีความสำคัญ:**
   - Moving average filter ช่วยลด Jitter ได้ 40%
   - S-Curve profiling ลด Jerk และแรงกระแทก
   - Continuous trajectory ดีกว่า Discrete waypoints
3. **Motor Parameter Tuning:**
   - Position P-gain ต้องไม่สูงเกินไป (เกิด Oscillation)

- Velocity Feedforward ช่วยลด Tracking error
- Current limit ป้องกัน Overshoot

4. **Communication Reliability:**
    - CRC-16 จำเป็นมาก (ตรวจจับ Error ได้)
    - Retry logic ช่วยเพิ่มความเสถียร
    - DMA และ Buffer size มีผลต่อประสิทธิภาพ

8.4 ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาต่อไป

8.4.1 Phase 5.1: Quadruped Scaling

- พัฒนา Motor indexing system (8 motors)
- ออกแบบ Mirror kinematics สำหรับขาซ้าย-ขวา
- ทดสอบ Multi-motor synchronization
- พัฒนา Gait pattern coordination

8.4.2 Phase 5.2: Gait Tuning & Optimization

- ทดสอบ Gait modes ต่างๆ (Trot, Walk, Crawl)
- พัฒนา Asymmetric trajectory generation
- ปรับจูนพารามิเตอร์ (Step length, Lift height, Cycle time)
- ทดสอบการเดินบนพื้นจริง

8.4.3 Phase 6: Sensor Feedback (Future Work)

- ติดตั้ง IMU sensor (BNO086)
- พัฒนา Balance controller ด้วย PD control
- ชดเชยท่าทางการเดินด้วย Sensor feedback
- ทดสอบบนพื้นเอียงและพื้นไม่เรียบ

9 เอกสารอ้างอิง (References)

1. Phase 4.1: Controller Design - BLEGS Analysis Unit
2. Phase 3.1: Gait Control Simulation - BLEGS Analysis Unit
3. Binary Communication Protocols for Embedded Systems
4. CRC-16-CCITT Checksum Standard (ITU-T Recommendation V.41)

5. BLDC Motor Control and FOC Algorithms
6. Real-time Serial Communication Best Practices
7. Motor Control Parameter Tuning Guidelines
8. Data Logging and Analysis for Robotics Systems