

FCU



ePaper

逢甲大學學生報告 ePaper

基於嵌入式系統的六軸機械手臂
運動模式開發探討

Development and Analysis of Motion Patterns
for a Six-Axis Robotic Arm Based on an
Embedded System

作者：張智閔、陳融陞、陳泓儒、洪潛佑

系級：自控三乙

學號：D1153938、D1153896、D1153985、D1153911

開課老師：黃清輝

課程名稱：機器人學

開課系所：自動控制工程學系

開課學年： 113 學年度 第 1 學期



中文摘要

(一)摘要

本研究旨在設計並開發一款基於嵌入式系統 Nuvoton m467 的六軸機械手臂，並應用逆運動學技術以實現精確的運動控制。透過 Nuvoton m467 的高效能運算能力與靈活性，結合六軸機械手臂的多自由度特性，本研究期望提升機械手臂在工業自動化、精密操作等領域的應用效能。

依據需求，我們分析並結合本課程的相關知識，包括機器人學中的運動學與動力學理論，對機械手臂進行軌跡規劃與逆運動學解算開發。此外，透過課程中學習的硬體選型與嵌入式系統實作，完成了 I2C 通訊與 C 語言編程的實際應用。研究過程涵蓋系統設計、硬體挑選、軟體開發與實驗驗證，最終實現了一款能夠完成複雜任務的機械手臂原型。本研究的成果不僅結合課程理論與實務操作，還為未來機械手臂的開發提供有價值的參考。

關鍵字：嵌入式系統、Nuvoton m467、六軸機械手臂、逆運動學、I2C(通訊、C 語言、機械控制、工業自動化

Abstract

This study aims to design and develop a six-axis robotic arm based on the Nuvoton M467 embedded system, applying inverse kinematics technology to achieve precise motion control. By leveraging the high computational performance and flexibility of the Nuvoton M467, combined with the multi-degree-of-freedom characteristics of the six-axis robotic arm, this research seeks to enhance the application efficiency of robotic arms in industrial automation and precision operations.

According to project requirements, we analyzed and integrated relevant knowledge from this course, including kinematics and dynamics theories in robotics, to develop trajectory planning and inverse kinematics solutions for the robotic arm. Additionally, through hardware selection and embedded system implementation learned in the course, we successfully applied I2C communication and C language programming. The research process encompasses system design, hardware selection, software development, and experimental validation, ultimately realizing a robotic arm prototype capable of performing complex tasks. This study not only integrates theoretical knowledge with practical applications but also provides valuable references for the future development of robotic arms.

Keyword : Embedded system, Nuvoton M467, six-axis robotic arm, inverse kinematics, I2C (communication), C language, mechanical control, industrial automation.

目錄

(一) 摘要	1
(二) 研究動機與研究目的	5
(三) 文獻探討與回顧	6
(四) 研究方法與步驟	7
4.1 硬體部分	7
4.2 軟體部分	9
4.3 逆運動學計算	10
(五) 成果展示	20
5.1 控制介紹	20
5.2 軟體畫面	20
5.3 手臂運動展示	21
(六) 結論與未來展望	23
6.1 結論	23
6.2 未來展望	23
(七) 參考文獻	錯誤! 尚未定義書籤。

圖目錄

圖1、系統架構圖.....	7
圖2、手臂尺寸設計圖	8
圖3、坐標系統定義圖	8
圖4、控制流程圖.....	9
圖5、旋轉角度 B 示意圖	11
圖6、旋轉角度 C 示意圖.....	11
圖7、馬達一角度示意圖	12
圖8、馬達二、三角度關係示意圖	13
圖9、馬達二、三旋轉角度輔助圖	13
圖10、求第四軸三軸向量輔助圖	14
圖11、求第四軸三軸向量俯視輔助圖.....	15
圖12、求馬達四旋轉角度輔助圖	17
圖13、第四軸座標三軸向量輔助圖	18
圖14、求第五馬達旋轉角度輔助圖	19
圖15、控面板功能介紹圖	20
圖16、運動學計算過程軟體畫面圖	21
圖17、手臂運行軟體畫面圖	21
圖18、(a) 手臂初始位置圖、(b)~(f) 手臂連續動作圖.....	22

(二) 研究動機與研究目的

隨著工業自動化的迅速發展，機械手臂在製造業、醫療救援、農業等多個領域的應用日益廣泛。六軸機械手臂因其高精度和耐久度，能夠完成複雜且精細的操作，突破了人類在生物體上的限制，成為各行業提升生產效率和產品質量的重要工具。

龐大的市場需求推動了機械手臂在軟體創新和機電整合方面的不斷進步。例如，在工業領域，機械手臂可以替代人類完成危險且繁重的工作；在醫療救援中，機械手臂能夠進行精密的手術操作；在農業事業中，機械手臂則能夠提高作業效率並降低人力成本。然而，實現高精度和高效能的機械手臂控制系統仍面臨諸多挑戰。逆運動學 (Inverse Kinematics, IK) 作為機械手臂運動控制的核心技術，能夠根據末端執行器的目標位置和姿態，計算出各關節的運動參數，實現精確定位和靈活運動。但逆運動學的計算通常涉及複雜的數學運算，對控制器的運算能力提出了較高的要求。

傳統的控制系統依賴於專用控制器和複雜的硬體配置，不僅增加了系統成本，還限制了其靈活性和擴充性。嵌入式系統因其高效能、低功耗和即時控制能力，成為提升機械手臂控制精度和靈活性的理想選擇。基於這些背景，本研究選擇基於 Nuvoton m467 嵌入式系統開發六軸機械手臂，並應用逆運動學技術，以提升其運動控制精度與操作靈活性，滿足多變的工業應用需求。

(三) 文獻探討與回顧

六軸機械手臂廣泛應用於工業自動化、醫療救援與精密加工等領域，其運動精度與操作靈活性至關重要。逆運動學 (Inverse Kinematics, IK) 作為手臂控制的核心技術，可根據目標位置與姿態計算關節運動參數，然而其高度非線性與多解性使計算複雜度增加。

Zakharov 與 Seliverstova (2023) 提出基於 Denavit-Hartenberg (DH) 參數的建模方法，透過數值迭代與優化技術，提高運算效率並解決多解問題。研究亦引入位置誤差校正，提升手臂在高負載與動態操作場景下的穩定性。

根據《六軸機械臂之控制理論分析與應用》一文[2]，D-H 法則可簡化運動學分析，透過四個參數進行幾何建模。此外，該文探討奇異點 (Singularity) 問題，特別是在第四軸與第六軸共線時，可能導致運動自由度喪失，提出降低速度或規劃回避軌跡的解決方案。

此外，透過網路學習資源，詳細解釋了六軸機械手臂的逆運動學計算過程。影片中介紹了如何透過數學模型，例如三角函數 (正弦、餘弦運算)、矩陣變換與向量運算，來求解各關節的角度，以確保手臂的精確運動控制。影片中亦探討了手臂運動中的奇異點問題，並提供了應對這些問題的解決方案，如調整工作空間與避障策略。這些內容對於理解逆運動學在實務應用中的挑戰，並建立更穩健的控制系統具有極大的幫助。

本研究整合上述文獻成果，選用 Nuvoton M467 作為控制核心，結合數值方法與誤差校正技術，開發適用於嵌入式平台的高效逆運動學求解模組，以提升機械手臂的運算效率與應用價值。

(四) 研究方法與步驟

本研究的實施過程分為硬體部分、軟體部分以及逆運動學計算三大部分，各部分緊密結合，共同構建了一個高效的六軸機械手臂控制系統。硬體部分主要負責組件的挑選、整體機械結構的設計以及坐標系的定義。軟體部分則專注於控制程式的設計與實現，通過流程圖清晰呈現運作邏輯，並介紹關鍵程式模組。逆運動學作為核心，將末端目標位置轉換為關節角度，利用數學模型與計算過程輔以圖示詳細說明，系統架構圖為圖 1 所示。



圖 1、系統架構圖

4.1 硬體部分

硬體部分主要負責六軸機械手臂的實體搭建與組件選型，確保整體系統具有穩定的硬體基礎。本研究基於機械手臂的運動需求，設計了一套精確、可靠的硬體系統，內容包括以下幾方面：

A. 組件選型

- **控制核心**：選用 **Nuvoton m467** 作為主控單元，具備高效運算能力及多協議支持（I2C、SPI、UART），適合複雜的運動控制應用。
- **輔助控制**：選用 **TMC2209** 及 **Raspberry Pi Pico mini** 作為輔助控制單元，**TMC2209** 為高度集成模組且靜音效果佳，而 **Raspberry Pi Pico mini** 因為體積小、速度快且支援 I2C。

B. 機械結構設計

根據手臂的工作空間需求，設計了六個軸的關節配置，每個關節可實現獨立旋轉或移動，根據應用需求確定連桿長度，定義各軸座標為後續逆運動學訂定基礎，手臂尺寸設計圖如圖 2 所示、座標系統定義圖如圖 3 所示。

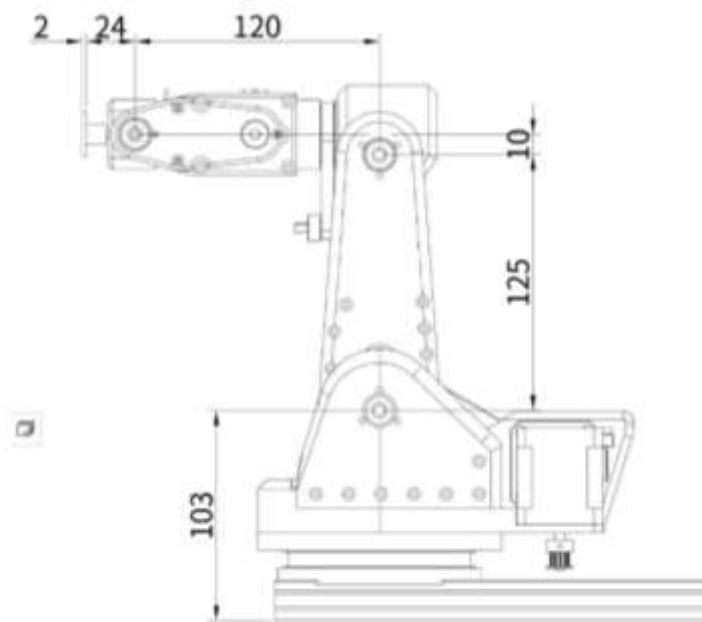


圖2、手臂尺寸設計圖

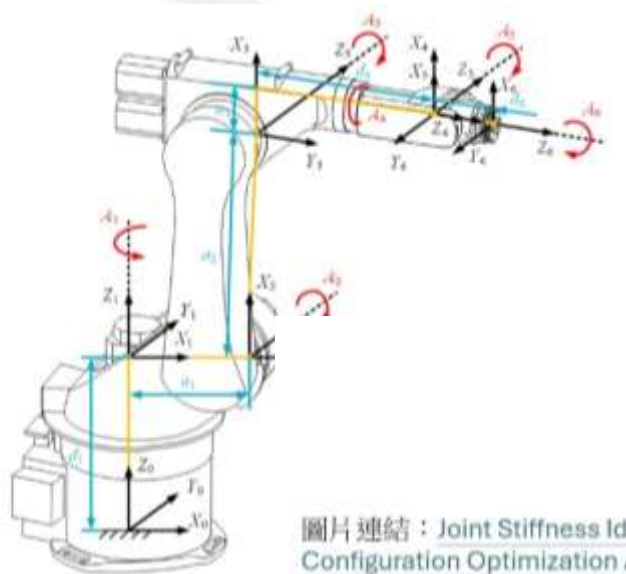


圖3、坐標系統定義圖

4.2 軟體部分

軟體部分負責控制邏輯的實現與程式開發，確保手臂運動的精確性與穩定性。

本研究的軟體設計結構化且高效，主要包括以下幾方面：

A. 控制流程設計

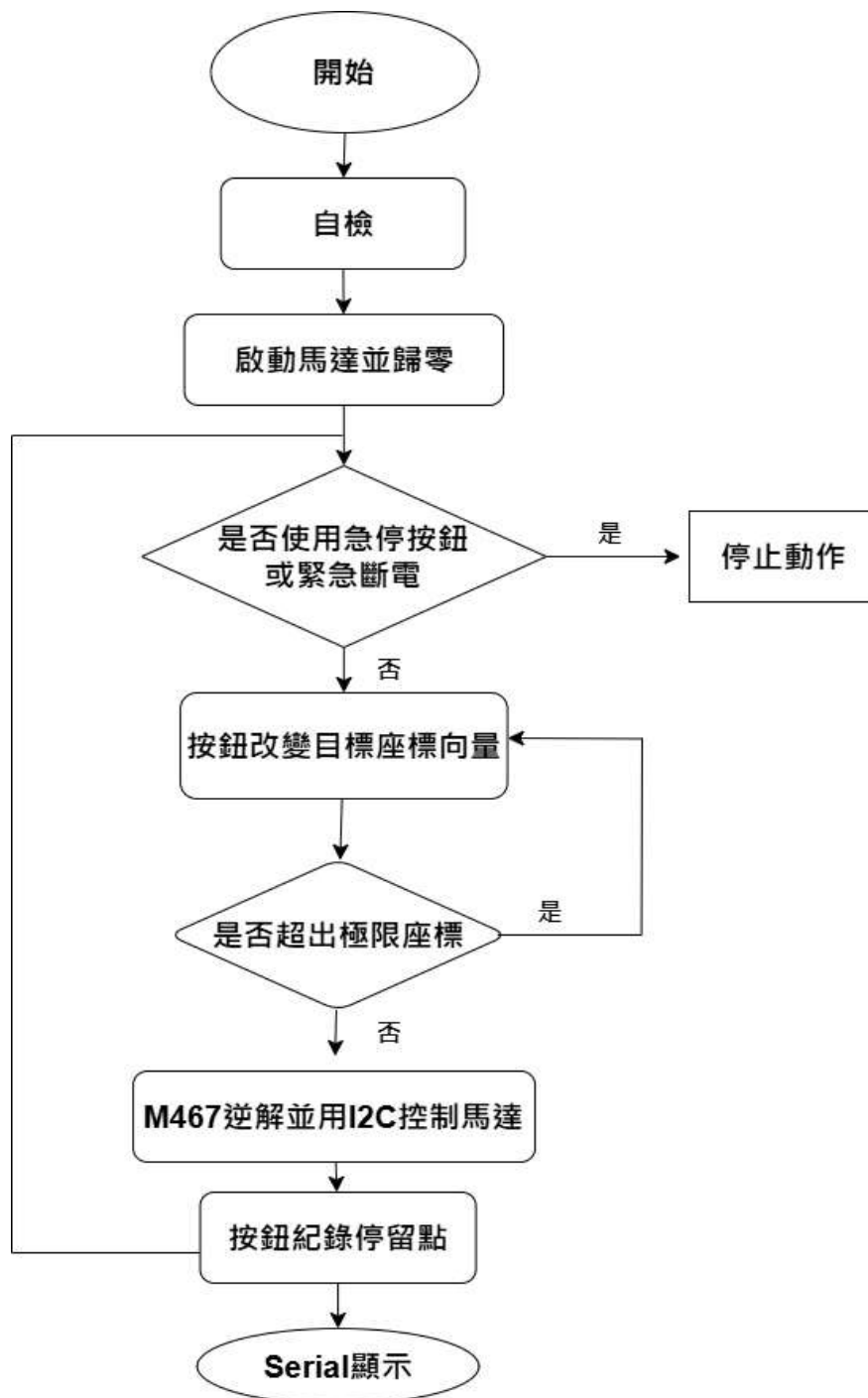


圖4、控制流程圖

B. 程式開發與實現

- I2C 通訊模組開發：撰寫基於 C 語言的 I2C 通訊程式，負責感測數據的即時傳輸及控制指令的精確發送。
- 運動控制邏輯：實現基於逆運動學運算的控制邏輯，將末端目標位置轉換為實際運動指令。
- 系統測試：多次進行程式測試與優化，確保各模組協同工作穩定可靠。

C. 使用軟體

- Keil uVision5：是由 Arm Keil 提供的一款功能強大的集成開發環境 (Integrated Development Environment, IDE)，專為基於 ARM Cortex-M 系列處理器的嵌入式系統開發而設計。它提供了從程式編寫、編譯、測試到燒錄等功能，廣泛應用於嵌入式開發領域。
- Tera Term：功能強大且免費的開源終端模擬器，被廣泛應用於嵌入式開發、串口通訊測試等領域，支援多種通訊協議，適合開發者和工程師使用。
- Arduino IDE：是一個專為 Arduino 平台設計的開發環境，提供簡單易用的介面來編寫、編譯和上傳程式到 Arduino 板上。它採用 C/C++ 語言，內建豐富的函式庫，讓使用者能快速實現各種功能。

4.3 逆運動學計算

1. 將輸入值紀錄為式(1)，角度順序為 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 。

$$\text{target} = (X, Y, Z, A, B, C) \quad (1)$$

2. 第六軸 Z 軸向量 $vZ6$ = 目標角度，可使用反三角函數計算，設定零點位置 $vZ6 = (1, 0, 0)$ 且 $|vZ6| = 1$ ，先以 X 軸作為旋轉軸，將其旋轉角度 A，可得式(2)，再以 Y 軸作為旋轉軸，將其旋轉角度 B，如圖 5 所示，可

得式(3)，最後以 Z 軸作為旋轉軸，將其旋轉角度 C，如圖 6 所示，可得到式(4)即為 vZ6 的三軸向量。

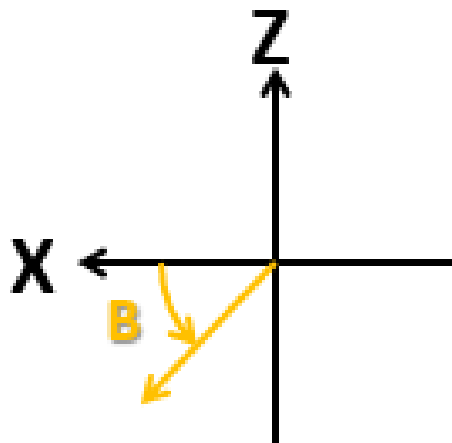


圖5、旋轉角度 B 示意圖

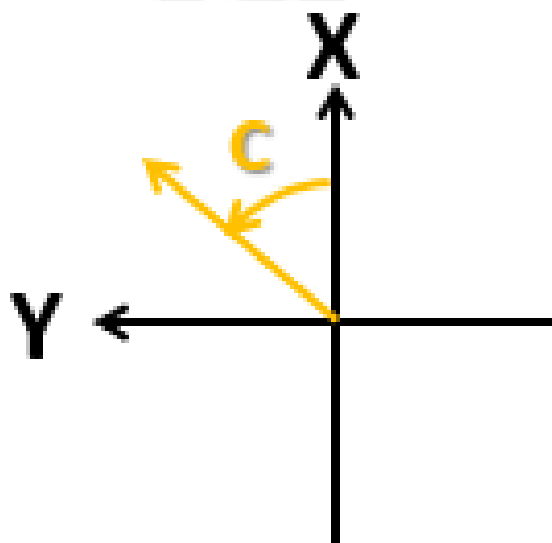


圖6、旋轉角度 C 示意圖

$$vZ6 = (1,0,0) \quad (2)$$

$$vZ6 = (\cos B, 0, -\sin B) \quad (3)$$

$$(vZ6x, vZ6y, vZ6z) = (\cos B \cos C, \cos B \sin C, -\sin B) \quad (4)$$

3. 計算第五軸座標，第五軸座標與第六軸座標之間 z 軸相差 24mm，以座標向量的形式呈現，如式(5)。

$$P5 = P6 - 24 * Z6 \quad (5)$$

4. 計算馬達一角度，馬達一角度可利用反三角函數計算出式(6)，將其範圍介於-180 度至+180 度之間，如圖 7 所示。

$$E1 = \tan^{-1} \left(\frac{y^5}{x^5} \right) \quad (6)$$

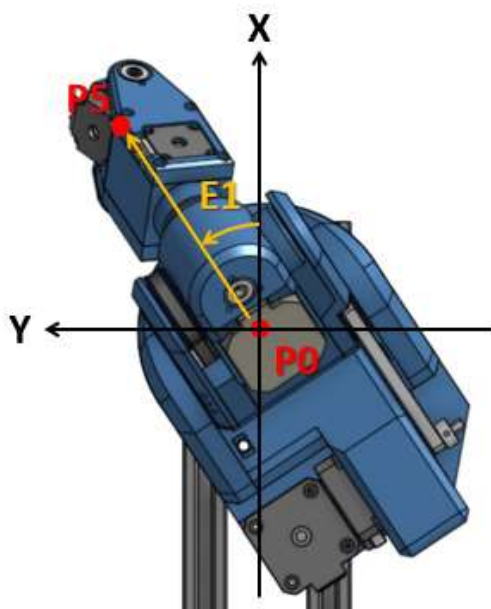


圖7、馬達一角度示意圖

5. 計算馬達二、三旋轉角度，以世界座標 Z 軸為虛軸，XY 軸為實軸，

E2 為馬達二旋轉角度，E3 為馬達三旋轉角度，如圖 8 所示。

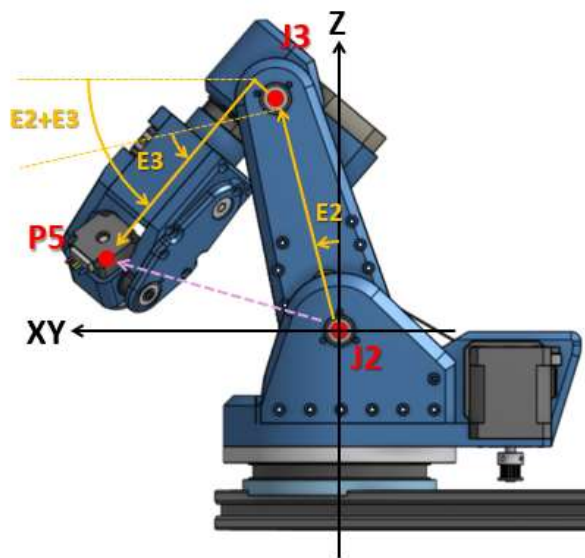


圖8、馬達二、三角度關係示意圖

圖 9 為計算馬達角度輔助圖，將已知的 tA 、 tB 和 tC 表示為式(7)，利用反三角函數與餘弦定理計算出每個角度得到式(8)，最後計算出馬達二與馬達三旋轉的角度，如式(9)所示。

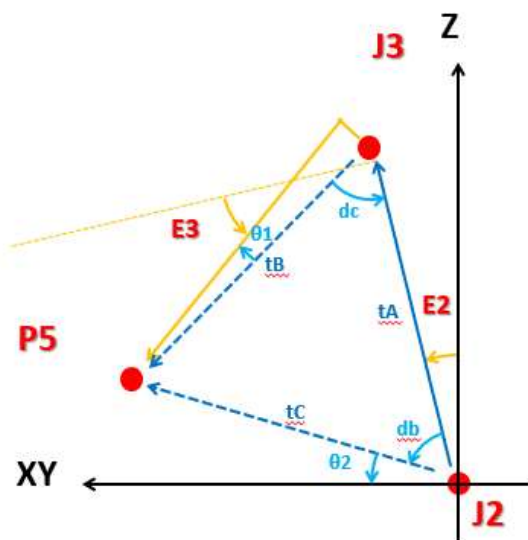


圖9、馬達二、三旋轉角度輔助圖

$$\begin{cases} tA = 125 \\ tB = \sqrt{120^2 + 10^2} \\ tC = \sqrt{x5^2 + y5^2 + (z5 - 103)^2} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} db = \cos^{-1}\left(-\frac{tB^2 - tA^2 - tC^2}{2*tA*tC}\right) \\ dc = \cos^{-1}\left(-\frac{tC^2 - tA^2 - tB^2}{2*tA*tB}\right) \\ \theta1 = \tan^{-1}\left(\frac{10}{120}\right) \\ \theta2 = \tan^{-1}\left(\frac{z5-103}{\sqrt{x5^2+y5^2}}\right) \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} E2 = 90 - db - \theta2 \\ E3 = 90 - dc + \theta1 \end{cases} \quad (9)$$

6. 計算第四軸物體座標系三軸向量($vX4, vY4, vZ4$)，首先尋找向量 $vZ4$ ，以 z 作為虛軸、以 xy 作為實軸，如圖 10 所示，進行反三角函數得到式(10)，將視角轉為俯視狀態，以 X 作為虛軸、 Y 作為實軸，如圖 11 所示，進行反三角函數得到式(11)。

$$(vZ4_{xy}, vZ4z) = (\cos(E2 + E3), -\sin(E2 + E3)) \quad (10)$$

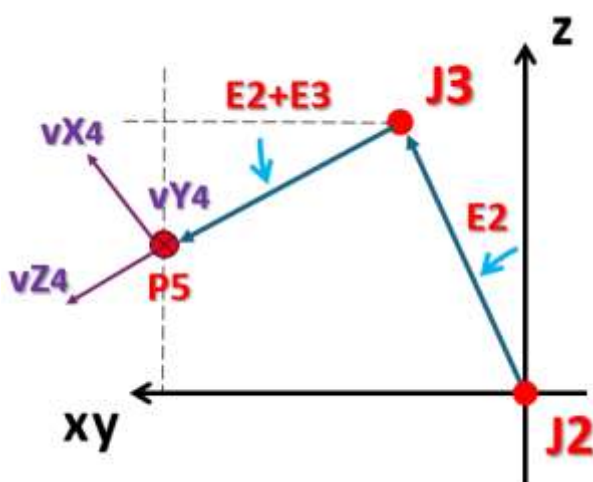


圖10、求第四軸三軸向量輔助圖

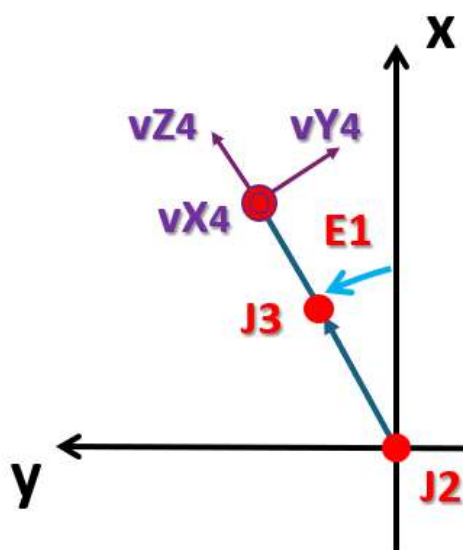


圖11、求第四軸三軸向量俯視輔助圖

$$vZ4 = (\cos(E2 + E3) \cos(E1), \cos(E2 + E3) \sin(E1), -\sin(E2 + E3)) \quad (11)$$

接著尋找向量 $vX4$ ，如圖 10 所示，利用反三角函數得到式(12)，將視角轉為俯視狀態，如圖 11 所示，進行反三角函數得到式(13)。

$$(vX4_{xy}, vX4_z) = (\sin(E2 + E3), \cos(E2 + E3)) \quad (12)$$

$$vX4 = (\sin(E2 + E3) \cos(E1), \sin(E2 + E3) \sin(E1), \cos(E2 + E3)) \quad (13)$$

接著尋找向量 $vY4$ ，如圖 10 所示， $vY4z$ 並未進行改變，可得到式(14)，將視角轉為俯視狀態，如圖 11 所示，進行反三角函數得到式(15)。

$$(vY4_{xy}, vY4_z) = (1, 0) \quad (14)$$

$$vY4 = (\sin(E1), -\cos(E1), 0) \quad (15)$$

7. 求 $P6 = (x6, y6, z6)$ 投影在第四軸座標系的座標 $P64 = (x64, y64, z64)$ ，

在這裡會使用到世界座標系轉物體座標系公式，如式(16)所示，其中 R 由式(17)所示，將式(17)進行轉置後可得到式(18)，t 由式(19)所示，將式(18)與式(19)代入式(16)可得出 $P_{64} = (x_{64}, y_{64}, z_{64})$ ，如式(20)所示。

$$P_{物體} = \begin{bmatrix} R^T & -R^T t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot P_{世界} \quad (16)$$

$$R = \begin{bmatrix} v_{X4} & v_{Y4} & v_{Z4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{X4x} & v_{Y4x} & v_{Z4x} \\ v_{X4y} & v_{Y4y} & v_{Z4y} \\ v_{X4z} & v_{Y4z} & v_{Z4z} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$R^T = \begin{bmatrix} v_{X4} \\ v_{Y4} \\ v_{Z4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{X4x} & v_{X4y} & v_{X4z} \\ v_{Y4x} & v_{Y4y} & v_{Y4z} \\ v_{Z4x} & v_{Z4y} & v_{Z4z} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$t = \begin{bmatrix} P_o x \\ P_o y \\ P_o z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} x_{64} \\ y_{64} \\ z_{64} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R^T & -R^T t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_6 \\ y_6 \\ z_6 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

8. 計算 P4 到 P64 與 X4 的夾角 θ_4 ，如圖 12 所示，需要依據 x_{64} 的值將角度 θ_4 進行調整， x_{64} 數值為正，如式(21)所示， x_{64} 數值為負，如式(22)所示，其中 θ_4 應屆於 180 度至 -180 度之間，如圖 8 所示，馬達四實際轉動角度 E4 為 θ_4 的反向，得式(23)。

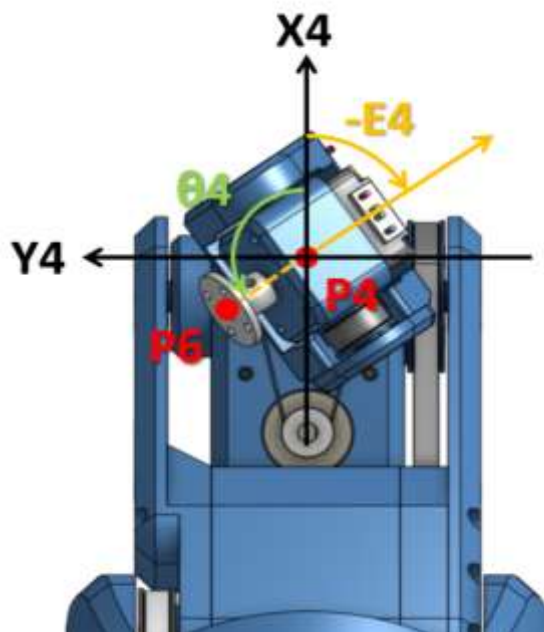


圖12、求馬達四旋轉角度輔助圖

$$\theta_4 = \tan^{-1}\left(\frac{y_{64}}{x_{64}}\right) \quad (21)$$

$$\theta_4 = 180 + \tan^{-1}\left(\frac{y_{64}}{x_{64}}\right) \quad (22)$$

$$E_4 = \theta_4 - 180 \quad (23)$$

9. 求旋轉後第四軸座標姿態，將旋轉前的三軸向量令為 vX_4 與 vY_4 ，其中 vZ_4 不變，如式(24)所示，如圖 13 所示旋轉 E_4 角度後，可得旋轉後 vX_4' 以及 vY_4' ，如式(23)所示，接著求原點 $P_4(0,0,0)$ 加上 vX_4' 以及 vY_4' 後的向量 PvX_{44} 以及 PvY_{44} ，接著將 PvX_{44} 以及 PvY_{44} 轉換世界座標公式，如式(26)所示，最後將 PvX_{44} 世界座標與 PvY_{44} 世界座標減去 P_4 後即可得到旋轉後第四軸物體座標系三軸向量，如式(27)所示。

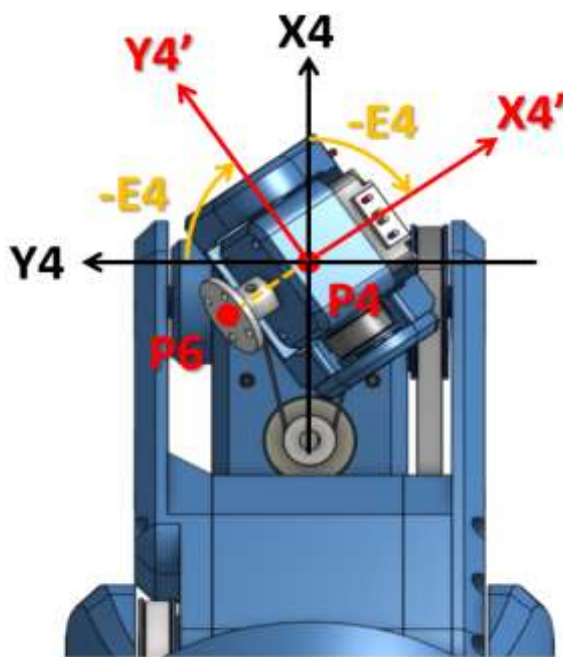


圖13、第四軸座標三軸向量輔助圖

$$\begin{cases} v_{X44} = (1, 0, 0) \\ v_{Y44} = (0, 1, 0) \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} v_{X4'} = (\cos(E4), \sin(E4), 0) \\ v_{Y4'} = (-\sin(E4), \cos(E4), 0) \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} P_{vX44_{\text{世界座標}}} = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot P_{vX44_{\text{第4軸座標}}} \\ P_{vY44_{\text{世界座標}}} = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot P_{vY44_{\text{第4軸座標}}} \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} v_{X4} = P_{vX44_{\text{世界座標}}} - P4 \\ v_{Y4} = P_{vY44_{\text{世界座標}}} - P4 \\ v_{Z4} = v_{Z4} \end{cases} \quad (27)$$

10. 尋找第五軸物體座標系三軸向量，根據圖 3 得知第四軸與第五軸關係後進行轉換得到第五軸物體座標系三軸向量，如式(28)所示。

$$\begin{cases} vZ5 = -vY4 \\ vX5 = vX4 \\ vY5 = vZ4 \end{cases} \quad (28)$$

11. 求 P6 在第五軸座標系的座標 $P65 = (x65, y65, z65)$ ，使用式(16)將 P6 從世界座標系轉物體座標系，其中 R^T 與 t 值，如式(29)所示，可得求 P6 在第五軸座標系的座標 $P65 = (x65, y65, z65)$ ，如式(30)所示。

$$\begin{cases} R^T = \begin{bmatrix} vX5 \\ vY5 \\ vZ5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} vX5x & vX5y & vX5z \\ vY5x & vY5y & vY5z \\ vZ5x & vZ5y & vZ5z \end{bmatrix} \\ t = \begin{bmatrix} P_0x \\ P_0y \\ P_0z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x5 \\ y5 \\ z5 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (29)$$

$$\begin{bmatrix} x65 \\ y65 \\ z65 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R^T & -R^T t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x6 \\ y6 \\ z6 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (30)$$

12. 計算 P6 在第五軸座標系 $XY5$ 平面中 P5 到 P65 與 $zY5$ 的夾角，其關係如圖 14 所示，透過反三角函數計算後，E5 的旋轉角度如式(31)所示。

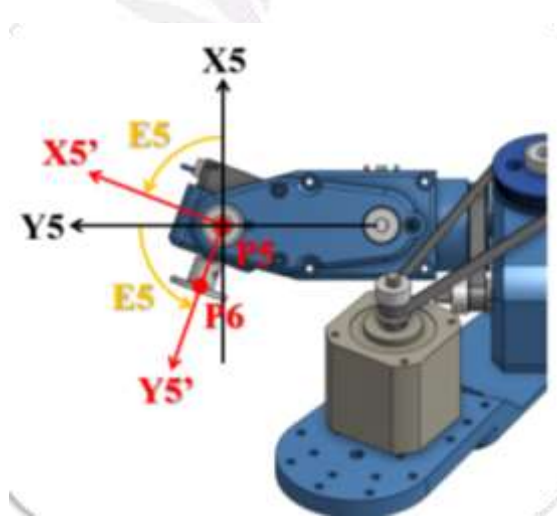


圖14、求第五馬達旋轉角度輔助圖

$$E5 = 180 - \tan^{-1}\left(\frac{x65}{y65}\right) \quad (31)$$

(五) 成果展示

本研究成功開發了一款基於嵌入式系統的六軸機械手臂，整合硬體與軟體技術，實現了高效且穩定的運動控制。經過多次測試與驗證，系統展現出卓越的穩定性與精確度。以下將從功能介紹、手臂運動展示以及軟體運行畫面三個方面，逐一介紹系統的核心成果與特色。

5.1 控制介紹

本系統控制面板由按鈕所控制，圖 15 為 Nuvoton m467 上控制面板示意圖，座標控制與末端角度控制區負責操作手臂進行位置移動、角度變化，在控制面板上有三個 LED 燈，其中紅燈代表傳輸失敗、黃燈代表超出運作極限範圍、綠燈代表正常運行，另外本系統也提供紀錄點功能，讓手臂可以記錄各個目標位置，利於自動化相關應用。

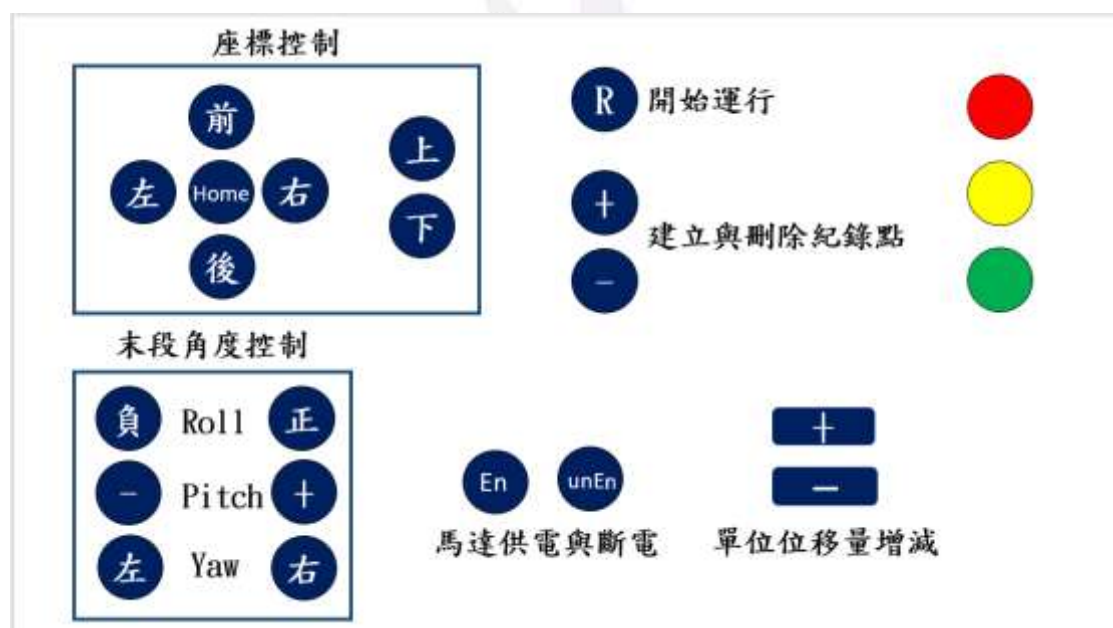


圖 15、控面板功能介紹圖

5.2 軟體畫面

本系統軟體畫面由 Tera term 展示，如圖 16 所示，在操作時會即時顯示出逆運動學計算，如圖 17 所示，在手臂運行軟體畫面裡，會顯示出目標位置與各個馬達所需旋轉角度。

```

----- Point Pv044 Object to World -----
89.32    0.62    0.60    0.50    89.61    0.42
68.92    0.47   -0.80   0.38    68.00   -0.91
132.26   0.63    0.00   -0.78   132.00   0.00
1.00     0.00    0.00    0.00    1.00     1.00

----- Point Pv144 Object to World -----
90.43    0.62    0.60    0.50    89.61    0.91
68.09    0.47   -0.80   0.38    68.00   0.42
132.57   0.63    0.00   -0.78   132.00   0.00
1.00     0.00    0.00    0.00    1.00     1.00

----- Point 5 World to Object -----
-22.72   -0.29    0.92    0.26   -71.55   100.00
7.73     0.50    0.38   -0.78    32.49    50.00
0.00     -0.82   -0.09   -0.57   154.61   120.00
1.00     0.00    0.00    0.00    1.00     1.00
    
```

圖16、運動學計算過程軟體畫面圖

```

-----data-----
target:
  X      Y      Z      A      B      C
  100.00 50.00 120.00 15.00 30.00 -60.00

6 axis data:
axis  X      Y      Z      vXx    vXy    vXz    vYx    vYy    vYz    vZx    vZy    vZz
1     0.00   0.00   0.00   0.00   0.00   0.00   0.00   0.00   0.00   0.00   0.00
2     0.00   0.00   0.00   0.00   0.00   0.00   0.00   0.00   0.00   0.00   0.00
3     0.00   0.00   0.00   0.00   0.00   0.00   0.00   0.00   0.00   0.00   0.00
4     89.61  68.00  132.00 -0.29  0.92   0.26   0.82   0.09   0.57   0.50   0.38   -0.78
5     89.61  68.00  132.00 -0.29  0.92   0.26   0.50   0.38  -0.78  -0.82  -0.09  -0.57
6    100.00  50.00  120.00  0.00   0.00   0.00   0.00   0.00   0.00   0.43  -0.75  -0.50

motor degree:
E1     E2     E3     E4     E5     E6
37.19  14.26  36.98 -65.17  71.22  15.00
    
```

圖17、手臂運行軟體畫面圖

5.3 手臂運動展示

本研究成功開發了一款基於嵌入式系統的六軸機械手臂，當按下供電按鈕後，手臂會自動移動到初始位置，如圖 18(a)所示，確認歸位後即可進行操作，(b)~(f)為手臂移動連續動作，可以看到本研究製作的手臂運行在合理範圍內的角度都是可以順利進行的，顯示出反向運動學的計算與程式的運作是可以順利進行，為後續的研究開發建立穩固的基礎。

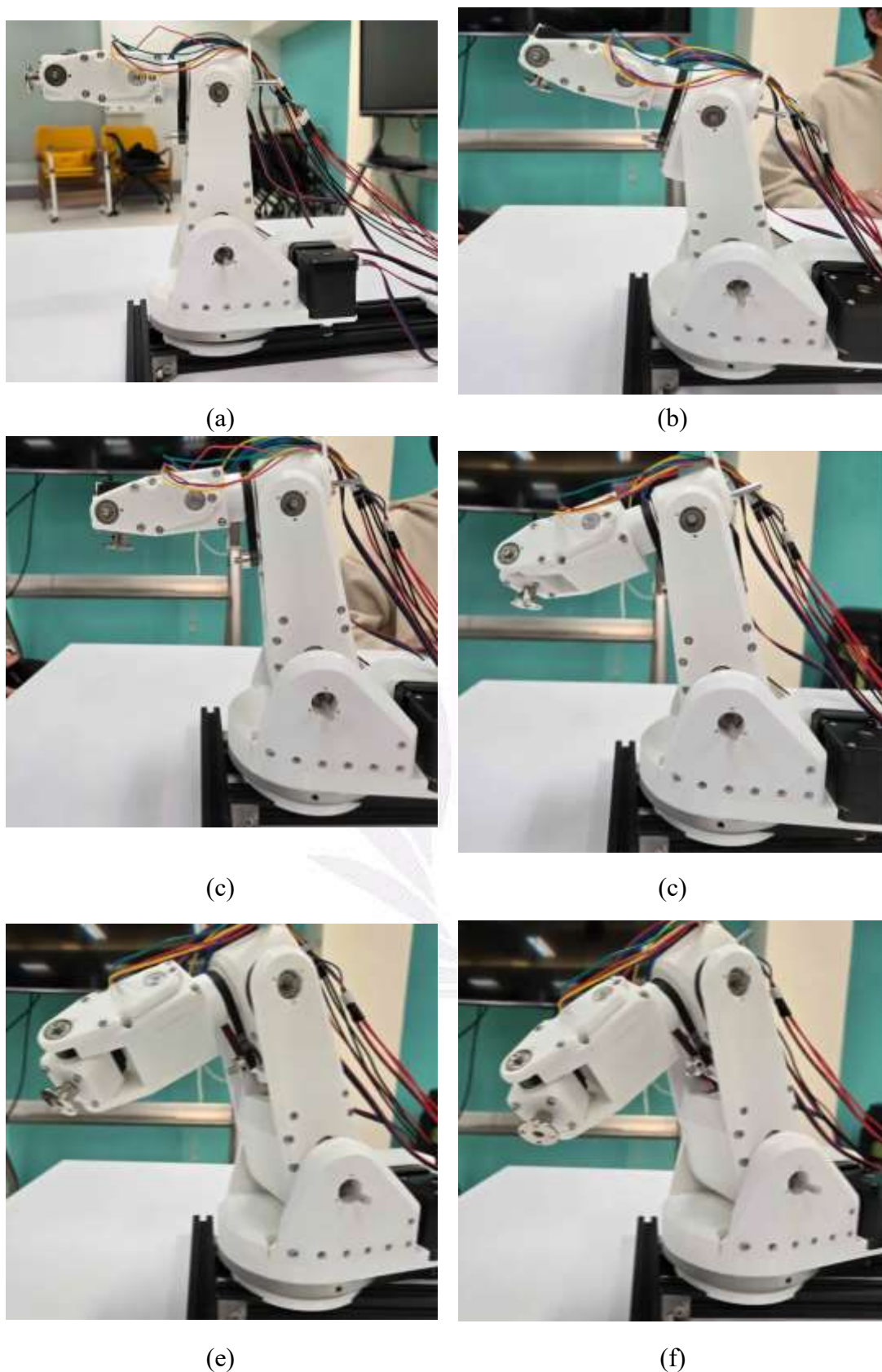


圖18、(a) 手臂初始位置圖、(b)~(f) 手臂連續動作圖

(六) 結論與未來展望

6.1 結論

本團隊成功開發了一套基於 Nuvoton m467 的六軸機械手臂控制系統，結合了硬體和軟體技術，實現了穩定且高效的運動控制。整個過程中，本團隊採用了三角函數法來計算逆運動學，這種方法簡單易懂，同時又能快速準確地計算各關節的運動角度，確保手臂的運動精度和穩定性。為了進一步提升系統性能，本團隊利用 I2C 通訊解決了多模組協作時的資料延遲問題，大幅提高了控制效率。此外，本團隊還設計了即時位置更新功能，能隨時校準手臂的位置，確保操作的精確度；紀錄點腳本模式則讓手臂可以自動執行預設的任務，減少人工操作的負擔。經過多次測試，手臂在各種情境下都展現了穩定性與高精度，整體成果為未來在嵌入式控制與機械手臂應用上的發展提供了堅實的技術基礎與參考價值。

6.2 未來展望

未來，我們將透過強化加速度與加加速度演算法，以確保機械手臂在高負載或高速運動時依然保持平穩並減少損耗；同時，直線插值法提供的精準軌跡生成能確保路徑直線性與高精度，讓生產流程更可靠。最後，操作優化則使使用者以更直覺的方式控制機械手臂，大幅提升工作效率與安全性，進一步拓展其在各領域的應用潛能。

參考文獻

- [1] O. V. Zakharov and L. V. Seliverstova, "Positional Control of 6-DoF Robot Based on an Optimal Inverse Kinematics," 2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon), Sochi, Russian Federation, 2024, pp. 866-871, doi: 10.1109/SmartIndustryCon61328.2024.10516076.
- [2] 江修，黃偉峰（2006），六軸機械臂之控制理論分析與應用。未出版之碩士論文，智慧機械技術組，台灣。

