

逢甲大學學生報告 ePaper

報告題名：

用於無人機載具之光通訊地面系統設計與整合測試

**Design and Integration Testing of a Ground System  
for UAV Optical Communication**

作者：王譽閔、許祐瑜、蔡禮安

系級：機電三甲

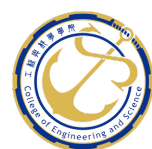
學號：D1247502、D1247414、D1247754

開課老師：林玉堃

課程名稱：專題實作(二)

開課系所：機械與電腦輔助工程學系

開課學年：114 學年度 第二學期



## 中文摘要

本研究針對無人機光通訊地面站之追蹤需求，設計一套結合超寬頻定位、資料運算、可程式邏輯控制器及雙軸伺服雲台之自動追蹤系統。系統透過五個 UWB 固定站量測移動站與各固定站之距離資訊，以最小平方法解算目標三維座標，再轉換為方位角、仰角與伺服控制脈衝，由 PLC 驅動雙軸雲台完成目標指向。

為驗證系統可行性，本研究進行 UWB 定位精度、角度計算、追蹤更新率及雲台指向誤差實驗。UWB 靜態定位測試之平均三維定位誤差為 16.19 cm，RMSE 為 19.10 cm，具備約 20 cm 等級之粗定位能力。目標方向計算之方位角平均絕對誤差為  $1.217^\circ$ ，仰角平均絕對誤差為  $5.332^\circ$ 。平均追蹤更新頻率為 0.637 Hz，約每 1.5 秒完成一次位置更新與控制命令輸出。雲台指向實驗取得 84 筆雷射光點量測資料，平均徑向指向誤差為 5.124 cm，RMSE 為 7.164 cm，約 79.8% 的量測資料維持於 3 cm 以內。

實驗結果顯示，本系統已完成 UWB 測距、三維座標解算、角度換算、PLC 通訊及雙軸雲台控制之完整流程整合，具備無人機自由空間光通訊之粗追蹤能力。

**關鍵字：** 可程式邏輯控制器、自由空間光通訊、粗追蹤系統、超寬頻定位、雙軸雲台

## Abstract

This study develops an automatic tracking system for ground stations used in unmanned aerial vehicle (UAV) free-space optical communication applications. The proposed system integrates Ultra-Wideband (UWB) positioning, data processing, a Programmable Logic Controller (PLC), and a dual-axis servo gimbal. Distance information between a target and five UWB anchor nodes is obtained and processed using the least-squares method to estimate the three-dimensional coordinates of the target. The calculated coordinates are then converted into azimuth angles, elevation angles, and servo control pulses. Finally, the PLC drives the dual-axis gimbal to achieve automatic target pointing.

To evaluate the feasibility of the proposed system, positioning accuracy, angle calculation accuracy, tracking update rate, and gimbal pointing performance are investigated. The results show that the system provides coarse positioning capability at approximately the 20 cm level and successfully performs target direction calculation and automatic tracking control. The gimbal pointing tests indicate that most measurement data remain within a small error range, demonstrating good tracking stability and repeatability. Overall, the developed system successfully integrates UWB ranging, three-dimensional coordinate estimation, angle conversion, control signal transmission, and dual-axis gimbal control, providing coarse tracking capability for UAV free-space optical communication ground stations.

**Keywords: Coarse Tracking System, Dual-Axis Gimbal, Free-Space Optical Communication (FSO), Programmable Logic Controller (PLC), Ultra-Wideband Positioning (UWB)**

# 目 次

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 中文摘要 .....                | 1  |
| Abstract .....            | 2  |
| 第一章 引言 .....              | 6  |
| 1.1 背景概述 .....            | 6  |
| 1.2 技術挑戰 .....            | 7  |
| 1.3 研究動機與目標 .....         | 8  |
| 1.4 報告架構 .....            | 9  |
| 第二章 文獻探討與理論基礎 .....       | 10 |
| 2.1 光通訊地面站與 PAT 系統 .....  | 10 |
| 2.2 UWB 定位技術 .....        | 11 |
| 2.3 PLC 控制原理 .....        | 11 |
| 2.4 雙軸雲台與逆運動學 .....       | 12 |
| 第三章 系統設計方法 .....          | 14 |
| 3.1 系統整體架構設計 .....        | 14 |
| 3.2 定位感測端 .....           | 15 |
| 3.2.1 UWB 固定站配置 .....     | 16 |
| 3.2.2 UWB 移動站設定 .....     | 20 |
| 3.3 資料運算端 .....           | 21 |
| 3.3.1 座標系定義 .....         | 21 |
| 3.3.2 三維定位演算法 .....       | 22 |
| 3.3.3 旋轉角計算 .....         | 25 |
| 3.3.3 角度脈衝換算 .....        | 27 |
| 3.4 命令控制端 .....           | 29 |
| 3.4.1 伺服馬達控制策略 .....      | 29 |
| 3.4.2 Modbus 資料交換機制 ..... | 30 |
| 3.4.3 PLC 控制流程 .....      | 31 |
| 3.4.4 Home 點設計 .....      | 31 |
| 3.4.5 自動回歸起始點功能 .....     | 32 |
| 3.5 運動執行端 .....           | 33 |
| 3.5.1 雲台機構設計 .....        | 33 |
| 3.5.2 系統硬體組成 .....        | 34 |
| 3.5.3 雲台指向範圍與機構限制 .....   | 40 |
| 3.6 系統整體運作流程 .....        | 41 |
| 第四章 實驗與結果分析 .....         | 44 |
| 4.1 測試目的與評估項目 .....       | 44 |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 4.2 UWB 定位精度測試.....     | 44  |
| 4.2.1 測試環境與位置部署 .....   | 45  |
| 4.2.2 三維座標誤差分析 .....    | 46  |
| 4.2.3 定位誤差分布 .....      | 48  |
| 4.2.4 定位精度分析 .....      | 52  |
| 4.2.5 UWB 定位精度測試結果..... | 53  |
| 4.3 目標方向計算驗證 .....      | 54  |
| 4.3.1 測試條件與參考值建立 .....  | 54  |
| 4.3.2 座標轉角度換算 .....     | 55  |
| 4.3.3 角度誤差分析 .....      | 57  |
| 4.3.4 角度轉脈衝驗證 .....     | 60  |
| 4.3.5 脈衝誤差分析 .....      | 62  |
| 4.3.6 目標方向計算驗證結果 .....  | 64  |
| 4.4 系統追蹤更新率測試 .....     | 65  |
| 4.4.1 更新週期量測方法 .....    | 65  |
| 4.4.3 系統延遲來源分析 .....    | 68  |
| 4.5 雲台指向誤差分析 .....      | 70  |
| 4.5.1 雷射光點定位方法 .....    | 70  |
| 4.5.2 水平與垂直偏移分析 .....   | 71  |
| 4.5.3 指向誤差分布分析 .....    | 73  |
| 4.5.4 雲台指向誤差分析結果 .....  | 76  |
| 4.6 實驗結果總結 .....        | 77  |
| 第五章 技術比較與應用價值分析 .....   | 78  |
| 5.1 無人機追蹤技術與比較框架 .....  | 78  |
| 5.1.1 常見追蹤技術 .....      | 78  |
| 5.2 本研究系與相關系統比較 .....   | 79  |
| 5.2.1 定位性能比較 .....      | 79  |
| 5.2.2 方向資訊與控制能力 .....   | 80  |
| 5.3 系統整合與成本分析 .....     | 80  |
| 5.4 應用價值 .....          | 81  |
| 5.5 綜合討論 .....          | 81  |
| 第六章 結論與未來工作 .....       | 83  |
| 6.1 研究結論 .....          | 83  |
| 6.2 研究貢獻 .....          | 83  |
| 6.3 未來工作 .....          | 84  |
| 參考文獻 .....              | 86  |
| 附錄 原始報告補充資料 .....       | 89  |
| 指導教授諮詢紀錄表 .....         | 89  |
| Gantt chart .....       | 114 |
| 群組反思與個人心得 .....         | 115 |

用於無人機載具之光通訊地面系統設計與整合測試

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 1. 反思：專題是否都有符合六項「嘗試解決的問題必須具備的性質」。  | 116 |
| 2. 反思：專題符合六項「嘗試解決的問題必須具備的性質」之簡要例證。 | 116 |
| 經費與資源明細                            | 123 |



# 第一章 引言

## 1.1 背景概述

近年來，無人機（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）技術快速發展，應用範圍已由早期的航拍與娛樂用途，逐漸擴展至智慧農業、災害監測、工業巡檢、物流運輸、環境監控以及國防安全等領域。由於無人機具有機動性高、部署快速及成本相對較低等優勢，使其成為近年來備受重視的載具之一。

隨著無人機應用需求日益增加，所需傳輸的資料量亦持續提升。例如高解析度影像、即時傳感器資料以及遠端控制訊號等，都需要穩定且高速的通訊系統作為支撐。然而，目前廣泛使用的射頻（Radio Frequency, RF）通訊技術受到電磁干擾以及資訊安全等因素影響，在高資料傳輸需求的應用情境下逐漸面臨挑戰。

自由空間光通訊（Free Space Optical Communication, FSO）是一種利用光束於空氣中進行資料傳輸的技術。相較於傳統射頻通訊，光通訊具有高頻寬、高資料傳輸速率、抗電磁干擾能力佳以及保密性高等優點，因此被視為未來高速無線通訊的重要技術之一。若能該技術應用於無人機通訊系統中，將有機會突破傳統射頻通訊的限制，提供更高速且更安全的資料傳輸能力。

然而，光通訊系統具有高度方向性，其光束發散角通常遠小於射頻天線的涵蓋範圍，因此發射端與接收端之間必須保持精確對準，才能維持穩定的通訊

用於無人機載具之光通訊地面系統設計與整合測試

品質。當無人機於空間中移動時，地面端必須持續追蹤其位置並即時修正光束方向，否則容易造成通訊中斷。因此，如何建立一套能夠即時獲取無人機位置資訊，並自動調整光學地面站指向方向的追蹤系統，成為光通訊技術應用於無人機載具的重要研究方向。

基於上述背景，本研究以無人機光通訊地面系統為研究對象，建構一套結合超寬頻定位系統、雙軸雲台控制與目標方位計算之自動追蹤雲台，並完成系統整合與功能測試，作為未來無人機光通訊應用發展之基礎。

## 1.2 技術挑戰

由於自由空間光通訊具有高度方向性，其光束發散角遠小於一般射頻天線，因此系統對於發射端與接收端之間的對準精度要求相當嚴格[1]。

在無人機光通訊系統中，地面站必須持續追蹤空間中移動的無人機位置，並即時修正光束指向方向，以維持穩定的通訊。Kaushal 等人指出，光通訊系統最大的挑戰之一為 PAT (Pointing, Acquisition and Tracking) 問題，其包含目標指向 (Pointing)、目標擷取 (Acquisition) 以及目標追蹤 (Tracking) 三個部分[2]。當目標高速移動或環境受到外界干擾時，皆可能造成光束偏離接收端位置，進而降低通訊品質甚至導致通訊中斷。

除了光束對準問題之外，實際系統亦會受到定位誤差、控制延遲以及機械誤差等因素影響。定位系統所提供的位置資訊可能因量測環境而產生偏差，而控制系統在資料傳輸與運算過程中亦會產生時間延遲。此外，雲台機構於方向

切換時容易受到齒輪間隙、聯軸器誤差以及機構組裝公差等因素影響，使實際指向位置與理論位置產生偏差。因此，如何提升定位精度、降低控制延遲以及補償機械誤差，成為光通訊地面站追蹤系統設計的重要問題。

基於上述技術挑戰，本研究將建立一套結合定位系統與雙軸雲台控制之地面追蹤平台，以提升無人機光通訊系統之追蹤能力與指向精度。

### 1.3 研究動機與目標

本實驗室長期投入自由空間光通訊技術之研究，並已建立光通訊地面站之基本硬體架構。然而，現有系統仍以人工操作控制雲台指向，僅能進行靜態目標之對準與測試，當目標於空間中移動時，無法持續維持穩定的指向。因此，本階段的研究致力於實現光通訊地面系統之自動追蹤功能。

由於光通訊系統對於指向精度具有高度要求，若能即時獲得無人機位置資訊並自動調整雲台方向，將有助於提升光通訊系統於動態環境中的應用。因此，本研究規劃利用定位系統取得移動目標之空間座標，並結合雙軸雲台控制技術，建立一套可自動追蹤目標之光通訊地面系統。

本研究之主要目標如下：

- (1) 建立 UWB 定位系統，取得移動目標之三維空間座標。
- (2) 建立空間座標轉換模型，將目標位置轉換為雲台所需之方位角與仰角。

(3) 建立 PLC 與伺服馬達控制系統，使雲台能依據目標位置自動調整指向方向。

(4) 整合 UWB 定位系統、Python 控制程式、PLC 控制器以及雙軸雲台，完成自動追蹤系統建置。

(5) 進行定位精度、雲台指向精度以及整體追蹤能力測試，驗證系統之可行性。

希望透過本研究所建立之追蹤平台，作為未來無人機光通訊粗追蹤系統之基礎。

## 1.4 報告架構

本報告共分為以下六章：第一章說明研究背景、技術挑戰與研究目標；第二章探討相關文獻與理論基礎；第三章介紹系統設計方法；第四章進行系統測試與結果分析；第五章探討相關技術比較與系統應用價值；第六章提出研究結論、研究貢獻及未來工作。

## 第二章 文獻探討與理論基礎

### 2.1 光通訊地面站與 PAT 系統

自由空間光通訊以光束在大氣或真空中傳輸資料，具有高頻寬、低電磁干擾與高方向性等特點。然而，FSO 的高方向性也使通訊品質高度依賴指向、擷取與追蹤（PAT）能力；若光束未能穩定落入接收端孔徑範圍，即使通訊模組本身具備高速傳輸功能，整體通訊仍可能中斷[3][4]。

UAV 空地光通訊系統通常採用粗追蹤（Coarse Tracking）與細追蹤（Fine Tracking）兩階段架構。粗追蹤主要利用定位系統或目標位置資訊，控制雲台將光通訊設備指向目標所在方向；當目標進入視場範圍後，再透過影像感測器或光電感測器進行細追蹤，以進一步修正指向誤差並維持穩定通訊。此分層式追蹤架構可有效提升光通訊系統之追蹤能力與連線穩定性。Carrasco-Casado 等人所提出之無人機光通訊地面站系統，以及後續空地光通訊實驗，皆採用先由粗追蹤完成目標搜尋與指向，再利用細追蹤提高指向精度之設計概念[4][5]。

近年針對光通訊擷取與指向性能的研究亦指出，擷取時間、開迴路指向誤差與光束追蹤精度會直接影響系統可用性[6]。因此，本研究可借用文獻中的分層 PAT 概念：定位與雲台控制主要對應粗追蹤階段，其任務是縮小搜尋範圍、提供初始指向，並為後續光學細追蹤建立基礎。

## 2.2 UWB 定位技術

超寬頻 (UWB) 定位常被用於機器人與移動目標追蹤。其原理為利用無線訊號在裝置間的傳播時間推算距離，並進一步計算目標位置[7]。

UWB 定位常見模型包含到達時間 (Time of Arrival, TOA)、雙向測距 (Two-Way Ranging, TWR) 與到達時間差 (Time Difference of Arrival, TDOA)。文獻指出，TDOA 適合較大規模定位系統，但需要基地台同步且容易受到錨點幾何、非視距 (Non-Line-of-Sight, NLOS) 與多路徑影響[8][9]；相較之下，TWR 或雙向測距不需全域同步，對少量移動目標較容易實作。由於本研究著重於單一無人機之粗追蹤，因此文獻上可支持以 UWB 測距作為資訊來源。

UWB 相關文獻也提醒，定位結果並非只由測距精度決定，還會受到錨點配置、偏差校正影響。相關研究顯示，合理的錨點部署可降低定位誤差放大，而相對定位方法也能改善複雜場域中的 UWB 表現[9][10][11]。因此，後續系統設計應將 UWB 視為粗追蹤定位資料來源，並搭配數據品質檢查、濾波或誤差門檻，而非直接假設其能滿足最終光學對準精度。

## 2.3 PLC 控制原理

可程式邏輯控制器是一種廣泛應用於工業自動化領域之控制設備，具有穩定性高、抗干擾能力佳、程式修改容易等特性，因此常被應用於生產設備控制、自動化產線及機電整合系統。相較於一般個人電腦控制方式，PLC 更適合長時間連續運作，並能與各式感測器、驅動器及人機介面進行整合。

本研究採用 PLC 作為雲台控制單元，負責接收資料運算模組所傳送之控制命令，並控制伺服馬達驅動雙軸雲台完成目標指向。此外，系統透過 Modbus 通訊協定進行資料交換，利用暫存器讀寫方式將運算結果傳送至 PLC，作為雲台控制依據[12]。Modbus 為工業自動化領域常用之通訊協定，可實現不同設備間之資料傳輸與控制整合，具有架構簡單且相容性高之優點。

## 2.4 雙軸雲台與逆運動學

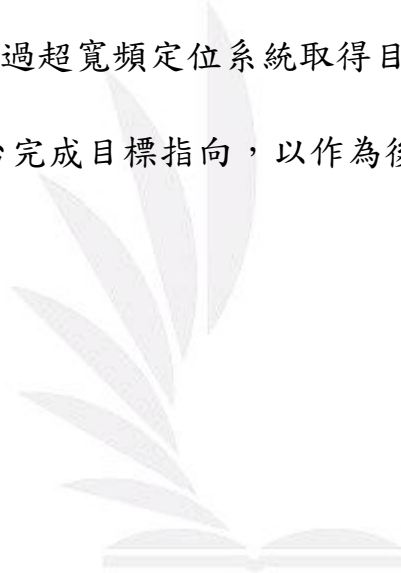
雙軸雲台（Pan-Tilt Gimbal）廣泛應用於攝影機、光學感測器、雷射系統及無人機酬載之指向控制，其主要功能為透過方位角（Pan）與仰角（Tilt）兩個旋轉自由度，使設備能夠朝向指定目標方向。由於雙軸雲台具有結構簡單、控制容易及指向範圍廣等特性，因此常被應用於目標追蹤、監控系統及光通訊系統之中。

Byun 等人針對 pan-tilt camera system 之研究指出，許多既有方法假設雲台已完成校正，且旋轉軸與相機光軸之間具有理想對齊關係。然而，在自行組裝或非標準化之 pan-tilt 系統中，旋轉軸位置與方向可能存在偏差，進而造成理論模型與實際機構行為不一致。為改善此問題，研究中利用旋轉軸位置與方向等參數建立運動模型，並透過校正程序補償非理想組裝所造成之控制誤差[13]。

Choi 等人則探討動態多相機系統中之雲台校正問題。研究指出，當相機安裝於雲台等可動機構時，相機間之座標轉換關係會隨關節角變化而改變。傳

統方法多仰賴編碼器提供關節角資訊，但實際系統中並不一定能取得完整且準確之量測資料。因此，該研究提出 Encoderless Gimbal Calibration 方法，在缺少完整關節角資訊的情況下，同時估測雲台運動參數與未知關節角，驗證校正方法對提升系統模型準確度之可行性[14]。

綜合上述文獻可知，雙軸雲台於光學指向系統中不僅提供旋轉自由度，更是影響目標追蹤精度的重要機構。雲台實際性能除受控制演算法影響外，亦與機構組裝誤差、軸向幾何關係及校正品質有關。因此，本研究於建立光通訊地面站粗追蹤系統時，透過超寬頻定位系統取得目標位置資訊，並利用方位角與仰角計算控制雙軸雲台完成目標指向，以作為後續光通訊系統整合之基礎。



## 第三章 系統設計方法

### 3.1 系統整體架構設計

本研究整體系統架構以光通訊地面站追蹤需求為核心，目標在於利用 UWB 定位系統取得移動目標之空間位置，並將其轉換為雙軸雲台所需之指向資訊，使地面站能初步指向目標區域。

整體系統可分為定位感測端、資料運算端、命令控制端與運動執行端。圖 3.1 為本研究之整體系統架構圖，呈現各功能模組之相互關係。定位感測端由 UWB 固定站與移動站組成，負責取得目標位置相關量測資料；資料運算端由電腦中的 Python 程式進行資料接收、座標解算、目標方向計算與控制參數產生；命令控制端以 PLC 為核心，負責接收資料運算端所產生之控制命令，並執行相關控制邏輯；運動執行端則由伺服驅動器與伺服馬達組成雙軸雲台，負責完成實際之指向動作。透過上述四個模組之分工，可建立一套的完整追蹤架構。

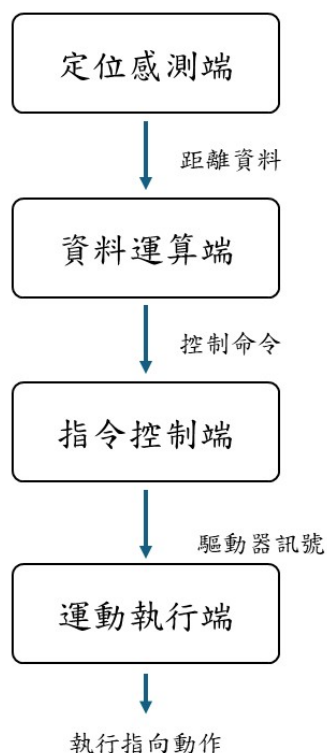


圖 3.1 整體系統架構圖

### 3.2 定位感測端

本研究採用超寬頻（UWB）定位系統作為光通訊地面站粗追蹤之位置資訊來源。所使用之 UWB 定位板如圖 3.2 所示，UWB 系統負責量測移動目標與多個固定站之間的距離，並將資料提供給數值運算程式進行座標解算與目標方向計算，該定位板可依系統設定作為固定站或移動站使用。由於本研究並非以 UWB 直接完成光通訊所需之精密對準，而是利用其定位結果提供雲台初始指向，因此 UWB 在整體系統中被定位為粗追蹤感測模組。

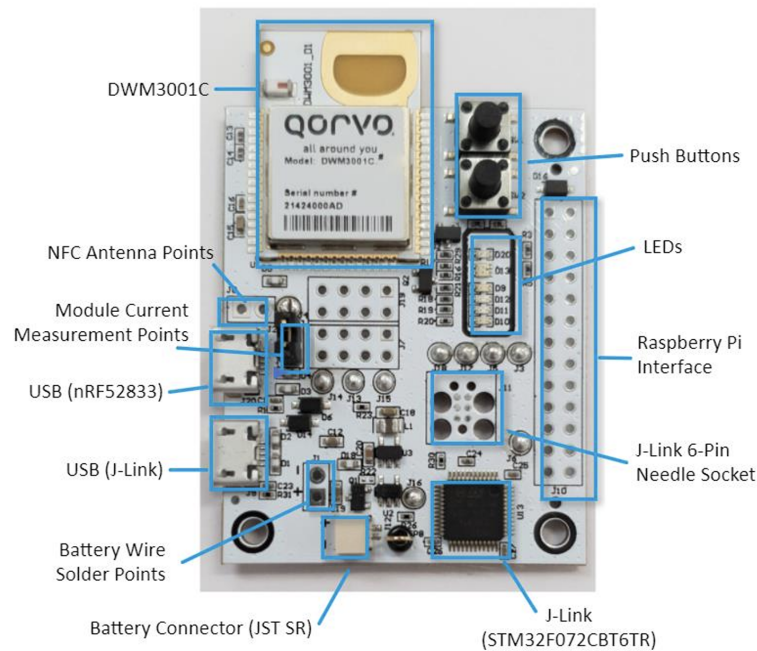


圖 3.2 DWM3001C 開發板硬體配置圖[15]

本研究之 UWB 定位系統由固定站與移動站組成。固定站部署於已知座標位置，作為定位參考點；移動站則安裝於待追蹤目標端，依序與各固定站進行測距。資料運算端接收距離資料後，會根據固定站座標與量測距離解算移動站之三維位置，並進一步轉換為雲台控制所需之目標方向資訊。此設計可避免將 UWB 原始量測值直接作為控制命令使用，並保留後續加入濾波、誤差門檻與異常資料排除機制的空間。

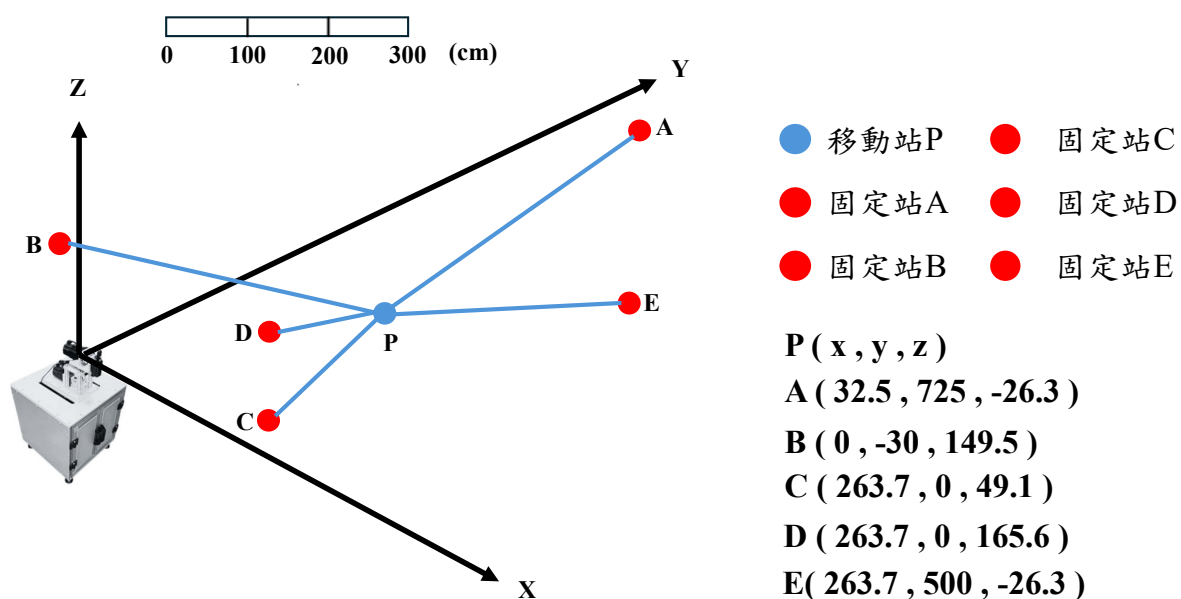
### 3.2.1 UWB 固定站配置

固定站配置是 UWB 三維定位系統的重要基礎。由於移動站位置需由多個距離約束共同求得，因此固定站必須放置於已知且穩定的位置，並形成足夠的空間幾何分布。若固定站過於集中，或多數固定站位於同一直線或同一平面

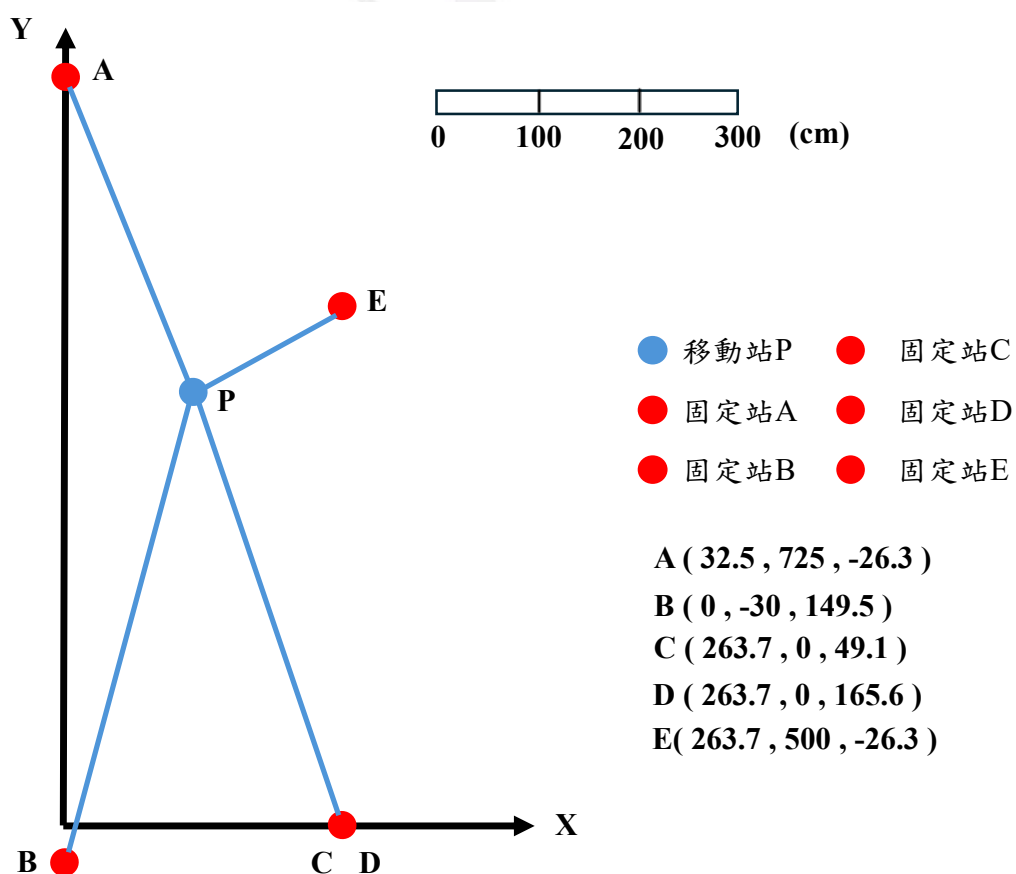
上，將解算程式碼對部分方向的變化不敏感，進而放大量測誤差。因此，本研究採用多點分散配置，使固定站能在水平與垂直方向上提供定位約束。

本研究測試階段使用五個 UWB 固定站作為定位參考點，如圖 3.3(a)所示固定站在空間中的分佈，分別標記為 A、B、C、D、E，並設定為回應端 (Responder)，負責回應移動站發出的測距請求，圖 3.3(b)則可呈現各固定站在水平平面上的分佈情形。各固定站配置如表 3.1 所示。移動站 P 則作為發起端 (Initiator)，依序向各固定站發出測距命令，取得與不同固定站之間的距離資料。相較於僅使用四個固定站，五個固定站可提供額外距離約束，有助於降低單一量測誤差或異常值對定位結果的影響。

固定站座標以公分為單位建立，並以雲台兩旋轉軸之交點作為座標原點。由於實際實驗場域受到實驗室空間、設備擺放位置、固定站安裝高度、雲台本體高度與支撐結構限制等因素影響，各固定站無法完全配置於理想整數座標位置。因此，本研究之固定站座標並非皆為整數，而是依據現場實際量測結果建立，以使定位演算法使用之座標能更接近實際硬體配置。



(a)固定站分佈空間示意圖



(b)固定站分佈 x-y 平面俯視圖

圖 3.3 UWB 固定站平面與空間配置示意圖

表 3.1 各固定站坐標配置表

| 固定站 | 座標位置 (cm)           | 功能            |
|-----|---------------------|---------------|
| A   | (32.5, 725, -26.3)  | 提供 Y 軸方向幾何約束  |
| B   | (0, -30, 149.5)     | 提供 Z 軸方向幾何約束  |
| C   | (263.7, 0, 49.1)    | 提供 X 軸方向幾何約束  |
| D   | (263.7, 0, 165.6)   | 提供 X-Z 平面複合約束 |
| E   | (263.7, 500, -26.3) | 提供 Y 軸方向幾何約束  |

由圖 3.3 可知，五個固定站在水平位置與高度方向上皆具有不同分布，可提供三維定位所需之幾何約束。其中，A、C、E 等固定站主要提供水平位置分佈，使系統能辨識移動站在 x-y 平面中的位置變化；B 與 D 則配置於不同高度，用以提供垂直方向約束，使系統能進一步估算移動站高度。此配置可避免固定站完全共平面，並使三維定位演算法能同時利用水平與垂直方向的幾何資訊。

在實際量測流程中，移動站 P 會依序對各固定站進行測距。Python 程式接收距離量測值後，將固定站座標與對應距離整理並輸入定位演算法，再進行三維座標解算。

### 3.2.2 UWB 移動站設定

移動站是 UWB 定位系統中安裝於待追蹤目標（即無人機）的量測點，主要功能是與各固定站進行距離量測，並作為三維定位演算法中的未知點。本研究將移動站標記為  $P$ ，其空間座標可表示為： $M(x, y, z)$ 。由於移動站位置會隨目標移動而改變，因此系統需持續取得其與各固定站之間的距離資料，以更新目標位置並提供後續雲台指向計算使用。

在 UWB 角色設定上，本研究將移動站設定為發起端 (Initiator)。移動站會依序向五個固定站  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  發出測距請求，取得對應距離  $r_A, r_B, r_C, r_D, r_E$ 。當目標位置改變時，資料運算端即可根據最新距離資料重新解算移動站座標，並進一步轉換為雲台所需之目標方向角。

在實際應用上，移動站應盡量安裝於能代表待追蹤目標位置處。若移動站與光學目標中心存在明顯偏移，則定位結果會反映移動站本身位置，而非實際需對準的位置。因此，後續若移動站安裝點與目標中心不重合，應考慮加入符合安裝偏移量之補償值，以提高雲台指向的準確性。

完成測距後，移動站所取得之距離資料將透過序列通訊傳送至資料運算端。資料運算端接收各固定站之距離量測結果後，進一步進行三維座標解算、目標方向計算及控制命令產生，作為後續雲台追蹤控制之依據。

### 3.3 資料運算端

資料運算端主要負責接收定位感測端所回傳之距離量測資料，並將其逐步轉換為雲台控制所需之控制命令。首先，本研究以雲台上下兩馬達旋轉軸之交點作為座標原點，建立系統三維座標系，作為後續定位與方向計算之共同參考基準。接著，利用固定站座標與移動站至各固定站之距離量測結果，透過三維定位演算法解算目標之空間座標位置。完成座標解算後，再根據目標相對於雲台的位置關係計算方位角與仰角，最後依據雲台控制需求將角度資訊轉換為對應之脈衝命令，提供後續 PLC 控制與雲台運動執行使用。

資料運算端之主要流程包含座標系定義、三維定位演算法、旋轉角計算及角度脈衝換算四個步驟，其內容將於後續各小節分別說明。

#### 3.3.1 座標系定義

座標系是目標方向計算的基礎，本研究以雙軸雲台兩個旋轉軸之交點作為座標原點，建立整體系統之三維座標系。此原點可視為雲台進行方位軸與俯仰軸旋轉時的共同參考點，也是後續計算目標方向角的基準位置。相較於以任一 UWB 固定站作為原點，以雲台旋轉中心作為原點可使方位角與仰角計算更加直接。

在此座標系中，各 UWB 固定站座標皆以其相對於雲台原點的空間位置差表示。若雲台旋轉軸交點定義為原點  $O(0,0,0)$ ，則固定站的座標可表示為  $(x_i, y_i, z_i)$ ，分別表示該固定站相對於雲台原點在 X、Y、Z 方向上的距離。

### 3.3.2 三維定位演算法

本研究之 UWB 定位系統利用移動站與多個固定站之間的距離量測資料，解算移動站於三維空間中的座標位置。由於固定站座標為已知，且移動站至各固定站之距離可由 UWB 測距取得，因此可將三維定位問題表示為多個球面交會問題。理想情況下，移動站位於各固定站所形成球面之共同交點；然而實際量測會受到雜訊、多路徑與非視距環境影響，因此本研究採用五個固定站建立多餘距離約束，並以最小平方法求得移動站位置估計值。

假設五個固定站分別為 A、B、C、D、E，其座標皆已知分別為  $A(x_A, y_A, z_A), B(x_B, y_B, z_B), C(x_C, y_C, z_C), D(x_D, y_D, z_D), E(x_E, y_E, z_E)$ ，而移動站 M 的未知座標為  $M(x, y, z)$ 。

UWB 量測可得到移動站到五個固定基站之距離，分別記為  $r_A, r_B, r_C, r_D, r_E$ 。

我們的目標是根據這五組已知距離，以及五個固定基站的已知座標，求出移動站的位置。

因此，可根據距離關係建立五個球面方程式：

$$(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2 + (z - z_A)^2 = r_A^2 \quad (3-1)$$

$$(x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 + (z - z_B)^2 = r_B^2 \quad (3-2)$$

$$(x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 + (z - z_C)^2 = r_C^2 \quad (3-3)$$

$$(x - x_D)^2 + (y - y_D)^2 + (z - z_D)^2 = r_D^2 \quad (3-4)$$

$$(x - x_E)^2 + (y - y_E)^2 + (z - z_E)^2 = r_E^2 \quad (3-5)$$

為了將上述非線性方程式轉換為線性形式，本研究選擇固定站 A 作為基準，將其他固定站之方程式分別減去固定站 A 的方程式。如此可消去共同的二次項  $x^2$ ,  $y^2$ ,  $z^2$ ，得到關於未知座標  $(x, y, z)$  的線性方程式。

以固定站 B 與固定站 A 為例，相減後可得：

$$(x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 + (z - z_B)^2 - (x - x_A)^2 - (y - y_A)^2 - (z - z_A)^2 = r_B^2 - r_A^2 \quad (3-6)$$

展開整理：

$$2(x_A - x_B)x + 2(y_A - y_B)y + 2(z_A - z_B)z = b_{BA} \quad (3-7)$$

其中：

$$b_{BA} = r_B^2 - r_A^2 - x_B^2 + x_A^2 - y_B^2 + y_A^2 - z_B^2 + z_A^2 \quad (3-8)$$

同理，可得到其餘三組線性方程式：

$$2(x_A - x_C)x + 2(y_A - y_C)y + 2(z_A - z_C)z = b_{CA} \quad (3-9)$$

$$2(x_A - x_D)x + 2(y_A - y_D)y + 2(z_A - z_D)z = b_{DA} \quad (3-10)$$

$$2(x_A - x_E)x + 2(y_A - y_E)y + 2(z_A - z_E)z = b_{EA} \quad (3-11)$$

其中：

$$b_{CA} = r_C^2 - r_A^2 - x_C^2 + x_A^2 - y_C^2 + y_A^2 - z_C^2 + z_A^2 \quad (3-12)$$

$$b_{DA} = r_D^2 - r_A^2 - x_D^2 + x_A^2 - y_D^2 + y_A^2 - z_D^2 + z_A^2 \quad (3-13)$$

$$b_{EA} = r_E^2 - r_A^2 - x_E^2 + x_A^2 - y_E^2 + y_A^2 - z_E^2 + z_A^2 \quad (3-14)$$

將式 (6) 至式 (9) 合併，可寫成矩陣形式：

$$\begin{bmatrix} 2(x_A - x_B) & 2(y_A - y_B) & 2(z_A - z_B) \\ 2(x_A - x_C) & 2(y_A - y_C) & 2(z_A - z_C) \\ 2(x_A - x_D) & 2(y_A - y_D) & 2(z_A - z_D) \\ 2(x_A - x_E) & 2(y_A - y_E) & 2(z_A - z_E) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{BA} \\ b_{CA} \\ b_{DA} \\ b_{EA} \end{bmatrix} \quad (3-15)$$

令為：

$$MP = b \quad (3-16)$$

其中：

$$M = \begin{bmatrix} 2(x_A - x_B) & 2(y_A - y_B) & 2(z_A - z_B) \\ 2(x_A - x_C) & 2(y_A - y_C) & 2(z_A - z_C) \\ 2(x_A - x_D) & 2(y_A - y_D) & 2(z_A - z_D) \\ 2(x_A - x_E) & 2(y_A - y_E) & 2(z_A - z_E) \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

$$P = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} b_{BA} \\ b_{CA} \\ b_{DA} \\ b_{EA} \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

由於本研究使用五個固定站，因此可得到四條線性方程式，而未知數為  $x, y, z$  三個。此時系統具有額外距離約束，並非單純使用三條方程式直接求解。因此，本研究採用最小平方法求得移動站座標，使矩陣方程式  $MP = b$  的殘差最小為  $\min ||MP - b||^2$ 。

其解可表示為：

$$P = (M^T M)^{-1} M^T b \quad (3-19)$$

因此，移動站三維座標可由下式求得：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = (M^T M)^{-1} M^T b \quad (3-20)$$

其中， $P$  由五個固定基站之已知座標建立， $b$  由五組 UWB 距離量測值與固定站座標計算而得。當固定站幾何配置良好，且量測距離誤差不過大時，最小平方解可作為移動站位置的估計值。

綜合而言，五固定基站演算法與四固定基站演算法的主要差異在於：四固定基站在理想情況下可形成三條線性方程式並直接求解三維座標；五固定基站則形成四條線性方程式，提供額外距離約束，因此更適合以最小平方法求得

用於無人機載具之光通訊地面系統設計與整合測試

位置估計。此方式可提升定位解算對量測雜訊的容忍度，並作為後續雲台目標方向計算的座標輸入。

### 3.3.3 旋轉角計算

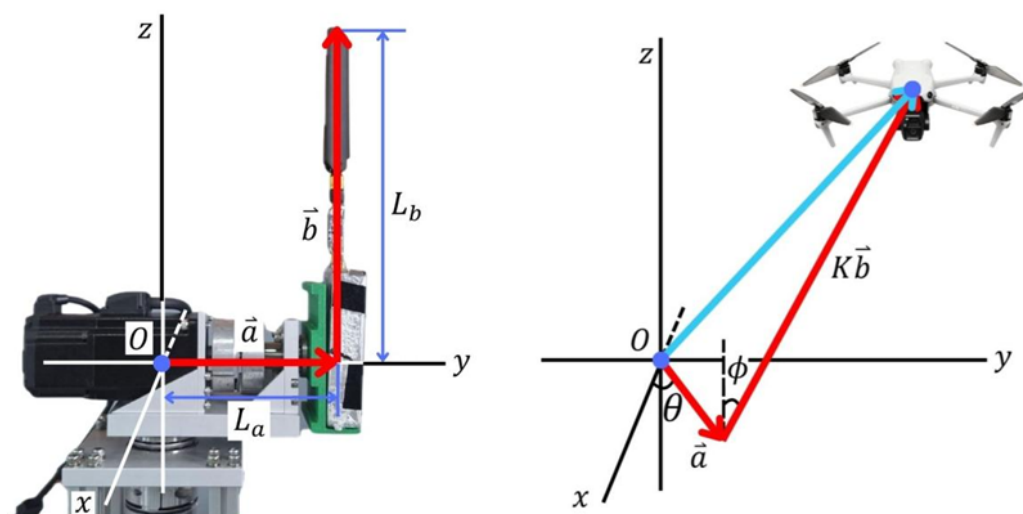


圖 3.4 角度計算參數示意圖

如圖 3.4 所示，其中：

- (1)  $O$  點為原點（即上下馬達旋轉軸之交點）
- (2)  $M$  點為雲台指向的目標點（即無人機所在位置）
- (3) 令  $\overrightarrow{OM} = \vec{m}$
- (4)  $\vec{a}$  由大主軸頂點到小主軸頂點（長度  $L_a$ ）
- (5)  $\vec{b}$  由小主軸頂點到天線頂點（長度  $L_b$ ）
- (6)  $K$  為第二段伸長比例
- (7)  $\theta$  為  $\vec{a}$  的水平旋轉角
- (8)  $\phi$  為  $\vec{b}$  的旋轉角（仰角）

由圖 3.4 可知

$$\vec{a} + K\vec{b} = \vec{m} \quad (3-21)$$

$$(x_a, y_a, z_a) + (Kx_b, Ky_b, Kz_b) = (x_m, y_m, z_m) \quad (3-22)$$

其中：

$$\vec{a} = \begin{bmatrix} L_a \cos\theta \\ L_a \sin\theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-23)$$

以  $\vec{a}$  為  $\hat{e}_i$ ，定義 pitch 的局部基底： $\hat{e}_i$ 、 $\hat{e}_j$ 、 $\hat{e}_k$  ( $\hat{e}_i \times \hat{e}_j = \hat{e}_k$ )

$$\hat{e}_i = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \\ 0 \end{bmatrix}, \hat{e}_j = \begin{bmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta \\ 0 \end{bmatrix}, \hat{e}_k = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-24)$$

\*  $\hat{e}_j$  為 pitch 的旋轉軸

$$\vec{u}_b = \cos\phi \hat{e}_i + \sin\phi \hat{e}_k \quad (3-25)$$

$$\vec{u}_b = \cos\phi \begin{bmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta \\ 0 \end{bmatrix} + \sin\phi \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta \cos\phi \\ \cos\theta \cos\phi \\ \sin\phi \end{bmatrix} \quad (3-26)$$

$$\vec{b} = L_b \vec{u}_b = \begin{bmatrix} -L_b \sin\theta \cos\phi \\ L_b \cos\theta \cos\phi \\ L_b \sin\phi \end{bmatrix} \quad (3-27)$$

令  $\vec{OM} = \vec{m} = \vec{a} + L_b \vec{u}_b$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} L_a \cos\theta \\ L_a \sin\theta \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_b \sin\theta \cos\phi \\ L_b \cos\theta \cos\phi \\ L_b \sin\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a \cos\theta - L_b \sin\theta \cos\phi \\ L_a \sin\theta + L_b \cos\theta \cos\phi \\ L_b \sin\phi \end{bmatrix} \quad (3-28)$$

$$= \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} L_a \cos\theta - L_b \sin\theta \cos\phi = x_m \\ L_a \sin\theta + L_b \cos\theta \cos\phi = y_m \\ L_b \sin\phi = z_m \end{cases} \quad (3-29)$$

分別計算  $\theta$ 、 $\phi$ 、 $K$ ：

新增變數：

$$H = \sqrt{x_m^2 + y_m^2 - L_a^2} \quad (3-30)$$

$$\begin{cases} \theta = \tan^{-1}\left(\frac{y_m}{x_m}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{H}{L_a}\right) \\ K = \frac{\sqrt{H^2 + z_m^2}}{L_b} \\ \phi = \tan^{-1}\left(\frac{z_m}{H}\right) \end{cases} \quad (3-31)$$

然而，實際控制程式中為配合雲台安裝方向、座標系定義以及 Home 點校正，本研究最終採用 atan2 函數進行角度計算，並透過座標轉換與角度補償修正實際機構方向。其實作形式如下：

$$\theta = -\text{atan2}(y_m, x_m) - \text{atan2}(H, L_a) \quad (3-32)$$

$$\phi = \text{atan2}(z_m, H) \quad (3-33)$$

### 3.3.3 角度脈衝換算

在完成目標方向角計算後，系統需將方位角與仰角轉換為伺服馬達可執行之脈衝命令。由於本研究之雙軸雲台由伺服馬達驅動，而 PLC 主要以脈衝數控制馬達旋轉位置，因此資料運算端計算所得之角度值不能直接作為控制命令，必須依據馬達、驅動器與機構傳動比例轉換為對應脈衝數。

若雲台某一軸的目標旋轉角度為  $\alpha$ ，其對應脈衝數可表示為：

$$P_\alpha = \alpha \times R_p \quad (3-34)$$

其中， $P_\alpha$  為該軸所需輸出的脈衝數， $\alpha$  為目標旋轉角度， $R_p$  為角度與脈衝之間的轉換比例。此比例可由馬達每轉脈衝數、減速比與機構旋轉角度關係共同決定。若以每轉脈衝數  $P_r$  與減速比  $G_r$  表示，則每一度所需脈衝數可寫為：

$$R_p = \frac{P_r \times G_r}{360} \quad (3-35)$$

因此，方位軸與仰角軸之脈衝命令可分別表示為：

$$P_\theta = \theta \times R_{p\theta} \quad (3-36)$$

$$P_\varphi = \varphi \times R_{p\varphi} \quad (3-37)$$

其中， $P_\theta$  為方位軸脈衝數， $P_\varphi$  為仰角軸脈衝數， $\theta$  為方位角， $\varphi$  為仰角， $R_{p\theta}$  與  $R_{p\varphi}$  則分別為方位軸與仰角軸之角度脈衝轉換比例。由於兩軸可能具有不同的機構配置、馬達方向或減速比例，因此兩者需分別設定。

此外，實際控制時仍需考慮馬達旋轉方向與雲台座標方向是否一致。若計算所得角度方向與馬達實際正方向相反，則需在脈衝命令前加入方向修正係數。其通式可表示為：

$$P = s \times \alpha \times R_p \quad (3-38)$$

其中， $s$  為方向修正係數。當馬達正轉方向與座標系定義方向一致時， $s=1$ ；若方向相反，則  $s=-1$ 。透過此方式，可將數學座標系中的角度結果轉換為符合實際雲台運動方向的控制命令。

本研究中，資料運算端程式會先根據 UWB 定位結果計算目標方位角與仰角，再依據各軸設定之脈衝比例與方向係數，將角度轉換為 PLC 可接收之脈衝命令。PLC 接收脈衝數後，再控制伺服驅動器帶動雙軸雲台旋轉至指定方向。此轉換流程使前段定位與角度計算結果能銜接至後段實際運動控制，完成

用於無人機載具之光通訊地面系統設計與整合測試

由目標座標至雲台指向命令之轉換。

## 3.4 命令控制端

### 3.4.1 伺服馬達控制策略

本研究之雙軸雲台以伺服馬達作為主要驅動元件，分別控制方位軸與仰角軸之旋轉。Python 程式負責根據 UWB 定位結果計算目標角度與對應脈衝數，PLC 則負責將控制命令輸出至伺服驅動器，使馬達帶動雲台旋轉至指定方向。

本研究採用位置控制模式作為伺服馬達之主要控制方式。伺服驅動器接收 PLC 輸出的脈衝訊號後，依據脈衝數控制馬達轉動對應角度；方向訊號則用於決定馬達正轉或反轉。因此，前述角度轉脈衝結果可作為 PLC 輸出控制命令之依據。

在雙軸控制上，方位軸與仰角軸分別由不同伺服馬達驅動。方位軸控制水平旋轉，對應目標方位角；仰角軸控制垂直旋轉，對應目標仰角。系統控制頻率由初期測試之 1 Hz 調整為 10 Hz，使雲台能以較高更新率接收定位結果與角度命令，提升粗追蹤過程中的連續性。

為使雲台動作更平順，本研究針對伺服驅動器參數進行調整。方位軸電子齒輪比由 10000 調整為 5000，仰角軸電子齒輪比由 2000 調整為 1000，以修正角度與脈衝之間的對應比例。另一方面，S 形平滑曲線之加速與減速常數亦由原先較高設定降低，使馬達啟動與停止過程較不易產生突兀變化；其中方

用於無人機載具之光通訊地面系統設計與整合測試

位軸另加入位置命令平滑常數，以降低旋轉動作時的震動與過衝。

整體而言，本研究之伺服馬達控制策略以穩定的位置控制為主，透過控制頻率、電子齒輪比與平滑曲線參數調整，使 UWB 粗定位結果能轉換為較平順的雲台旋轉動作。

### 3.4.2 Modbus 資料交換機制

在本系統中，雲台 (Gimbal) 控制架構採用工業標準 Modbus ASCII 協定作為核心通訊機制。透過運算主機與 PLC 之間的串列傳輸介面，建立起穩定且符合工業規範的資料通訊通道，確保運算層之命令能準確傳遞至驅動執行層。

在通訊協定實作上，本系統運用 pymodbus 函式庫建構通訊環境，並由 ModbusAsciiFramer 處理底層的資料封包處理，以維持傳輸過程中訊框結構的正確性與資料流的完整性。

對於保持暫存器的存取，系統針對 32-bit 之運動增量參數，採用資料拆解傳輸，將單一 32-bit 數據拆解為兩個 16-bit 暫存器單元進行傳輸。此方式符合 Modbus 標準暫存器之長度限制，並確保參數在讀寫操作時能與 PLC 之記憶體位址精準對應。

此外，系統利用 Modbus 協議中的線圈功能，作為系統邏輯狀態的切換媒介。透過對指定線圈位址進行寫入，系統能即時更新 PLC 內部之控制邏輯

用於無人機載具之光通訊地面系統設計與整合測試

狀態，從而實現對雲台驅動單元的遠端邏輯控制與資料同步更新。

透過上述 Modbus 通訊架構與標準化的暫存器與線圈映射，本系統成功建立了一套具備高相容性與穩定性的數據傳輸體系，確保雲台控制參數在運算主機與 PLC 間達成一致的傳輸品質。

### 3.4.3 PLC 控制流程

在本系統中，PLC 端的執行邏輯建立了一套連續的閉迴路控制流程。系統啟動後，PLC 會即時解析 D200 至 D203 的運動數據，並透過判斷 D10 與 D20 的數值，輸出對應旗標以驅動馬達轉向，實現精確的物理運動控制。

為確保控制命令的時效性，系統引入 T200 計時器進行 1 秒的週期管理，作為馬達執行運動的有效寬限時間，確保機械運作與邏輯控制同步。

最後，系統導入了狀態復歸機制。在計時結束後，PLC 會強制歸零控制線圈並清除數據暫存器，確保單次運動循環結束後系統自動重置，有效避免舊數據殘留導致的錯誤，確保了雲台控制邏輯的封閉性與可靠度。

### 3.4.4 Home 點設計

Home 點是雙軸雲台控制系統中的初始基準位置，用於建立方位軸與仰角軸的零位參考。由於伺服馬達在位置控制模式下主要依據脈衝數進行相對位置控制，若系統啟動時未先建立一致的初始位置，後續角度與脈衝命令將缺乏共同基準，可能造成雲台實際指向與理論計算角度不一致。因此，本研究在

雲台控制流程中加入 Home 點設計，使系統每次啟動或重新校正時皆能回到固定初始姿態。

本研究以雲台兩軸回到預設機械位置作為 Home 狀態。方位軸 Home 點用於定義水平旋轉的初始方向，仰角軸 Home 點則用於定義垂直方向的初始角度。當雲台完成 Home 程序後，系統即以此位置作為角度計算與脈衝輸出的零點基準；後續由 Python 程式計算出的方位角與仰角，便可轉換為相對於 Home 點的旋轉命令。

### 3.4.5 自動回歸起始點功能

為提高系統操作便利性，本研究設計回歸起始點功能。系統於開始追蹤時將當前雲台位置視為起始位置，並於追蹤過程中記錄水平軸與垂直軸的累積移動量。

當使用者按下停止追蹤按鈕後，系統會先停止 UWB 定位與追蹤程序，接著根據追蹤期間所累積的馬達脈衝數計算回程所需位移量，並透過 PLC 控制伺服馬達以相反方向運轉，使雲台返回追蹤開始前的位置。

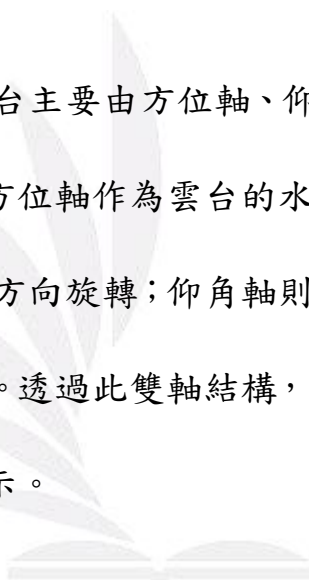
此方法無需額外配置原點感測器即可完成復位功能，可降低硬體成本並簡化系統架構。此外，由於回程命令直接由累積脈衝量計算而得，因此能快速完成復位動作，提升系統操作效率。

### 3.5 運動執行端

雙軸雲台是本研究中負責實際執行目標指向的機械與控制模組。前述 UWB 定位系統可取得移動站之三維座標，資料運算端則可根據目標位置計算方位角、仰角與對應脈衝命令；然而，這些運算結果仍需透過雲台機構與伺服控制系統轉換為實際旋轉動作。因此，運動執行端主要負責接收 PLC 輸出的控制命令，並驅動伺服馬達使雲台旋轉至指定方向。

#### 3.5.1 雲台機構設計

本研究所設計之雙軸雲台主要由方位軸、仰角軸、伺服馬達、支撐結構與光學模組安裝平台所組成。方位軸作為雲台的水平旋轉軸，位於整體機構下方，負責帶動上方結構進行左右方向旋轉；仰角軸則安裝於方位軸上方，負責帶動光學模組進行上下方向旋轉。透過此雙軸結構，系統可分別控制水平與垂直方向之指向角度。如圖 3.5 所示。



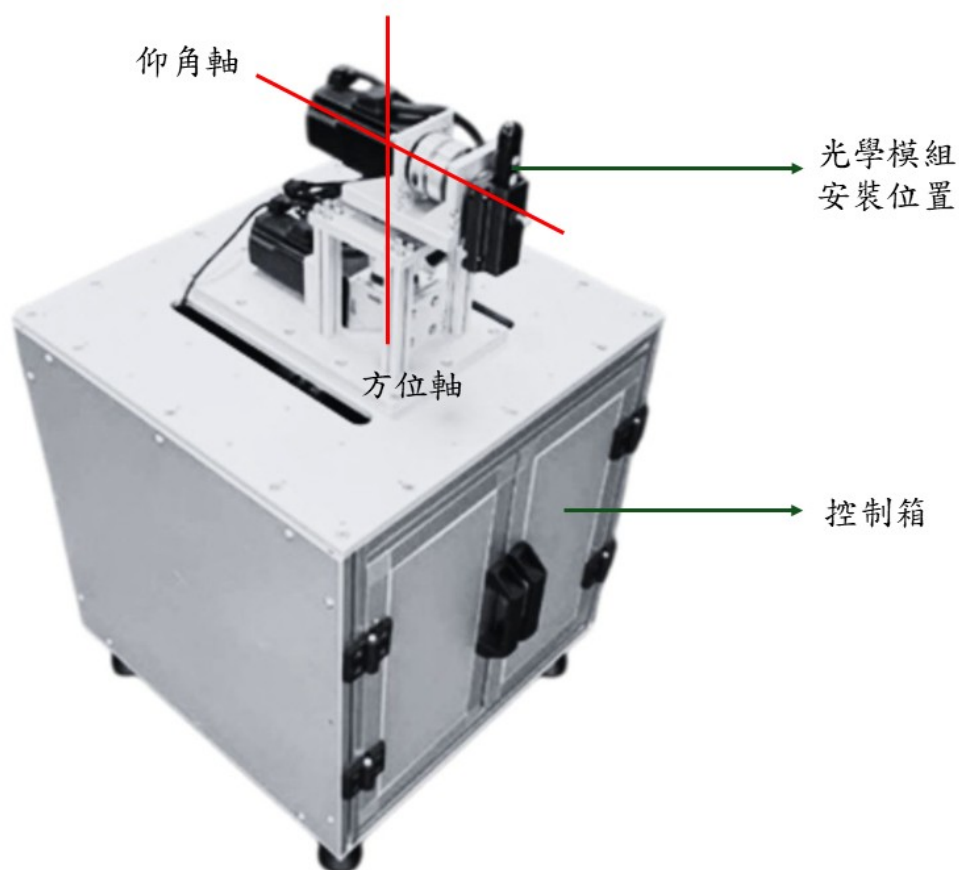


圖 3.5 雙軸雲台實體圖

由於實際機構可能存在安裝誤差、旋轉軸不完全正交、馬達方向與座標系定義不一致等問題，因此雲台機構設計除了需要完成基本的雙軸旋轉功能外，也需保留校正與補償的彈性。

### 3.5.2 系統硬體組成

為完成雙軸雲台之目標追蹤功能，本研究建置包含控制、驅動、供電及機構傳動等硬體元件。整體系統主要由伺服馬達、伺服驅動器、PLC、電源供應器、減速機、聯軸器及雲台平台等設備所組成，其功能說明如下。

### （一）伺服馬達

本研究採用兩組台達 400 W 交流伺服馬達作為方位軸與仰角軸之驅動來源，負責提供雲台旋轉所需之扭矩與定位能力。伺服馬達具備閉迴路控制特性，可提升角度控制精度與定位穩定性，其規格如圖 3.6 、表 3.2 所示。



表 3.2 馬達規格

|                            |                               |
|----------------------------|-------------------------------|
| Model Name                 | ECM-B3M-C20604SS1             |
| Motor Series               | ECM-B3M Medium Inertia Series |
| Output Power               | 0.4kW                         |
| Torque                     | 1.27(N·m)                     |
| Voltage                    | 220VAC                        |
| Phase                      | 1/3(PH)                       |
| Rated Current              | 2.4 Arms                      |
| Instant Max Output Current | 9.47 Arms                     |

### （二）伺服驅動器

用於無人機載具之光通訊地面系統設計與整合測試

伺服驅動器負責接收 PLC 所輸出之控制命令，並將交流電源轉換為適合伺服馬達運轉之驅動訊號，以控制馬達之轉速、位置及轉矩。實體如圖 3.7。



圖 3.7 馬達驅動器

### （三）可程式控制器（PLC）

本研究採用台達 PLC 作為系統控制核心，負責接收資料運算端所傳送之控制命令，並透過脈波輸出控制伺服驅動器完成雲台定位。實體如圖 3.8。



圖 3.8 PLC 實體圖

#### (四) 電源供應系統

系統供電部分包含 24 V 直流電源供應器及 110 V 轉 220 V 變壓器。直流電源供應器主要提供 PLC 與控制元件穩定電源，而變壓器則負責供應伺服驅動器所需之交流電源。實體如圖 3.9、圖 3.10。



圖 3.9 電源供應器



圖 3.10 變壓器

### （五）傳動機構

傳動機構包含聯軸器與減速機。如圖 3.11 與圖 3.12 所示。聯軸器用於連接馬達與傳動軸，減速機則採用 1:5 確認參數直角減速機，以降低輸出轉速並提升輸出扭矩，增加雲台運轉穩定性並改變扭矩傳動方向。



圖 3.11 聯軸器



圖 3.12 減速機

### （六）操作部分

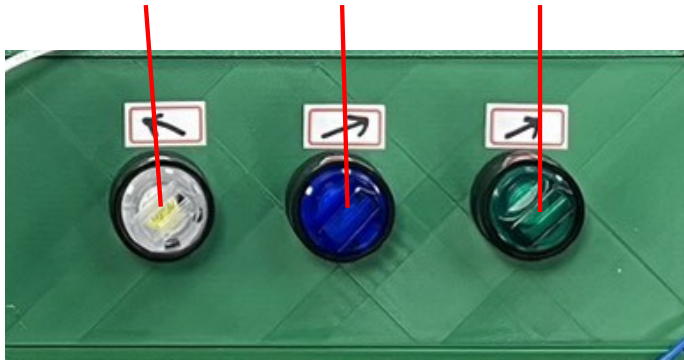
系統設置啟動旋鈕、極限開關及緊急停止按鈕，供操作人員進行系統控制

用於無人機載具之光通訊地面系統設計與整合測試

與安全保護。如圖 3.13。此外，所有電子元件與控制設備均安裝於平台框架上，以利設備固定、配線整理及後續維護。



系統啟動 正轉極限 反轉極限



(a) 旋鈕



(b) 緊急停止按鈕

圖 3.13 操作部分實體圖

### 3.5.3 雲台指向範圍與機構限制

為評估雙軸雲台在現有旋轉軸配置與可動角度限制下的空間覆蓋範圍，本研究依據雲台機構尺寸及旋轉方向建立幾何模型，並利用 Matlab 模擬其三維指向範圍。如圖 3.14 所示，模擬時將目標位置設定於距離雲台中心點 500 mm 以外，以觀察光學模組在方位軸與仰角軸共同作用下可到達的空間區域。

模擬結果顯示，雲台整體可指向範圍近似半球形，但受到仰角軸旋轉方向、兩軸相對位置及機構干涉限制，雲台正上方存在半徑約 130 mm 的圓柱形指向死角，當目標位於此區域時，即使 UWB 定位系統能取得正確座標，現有機構仍無法使光軸直接指向目標。因此，系統實際工作空間除受到定位精度與控制誤差影響外，也受到雲台機構可達範圍限制。

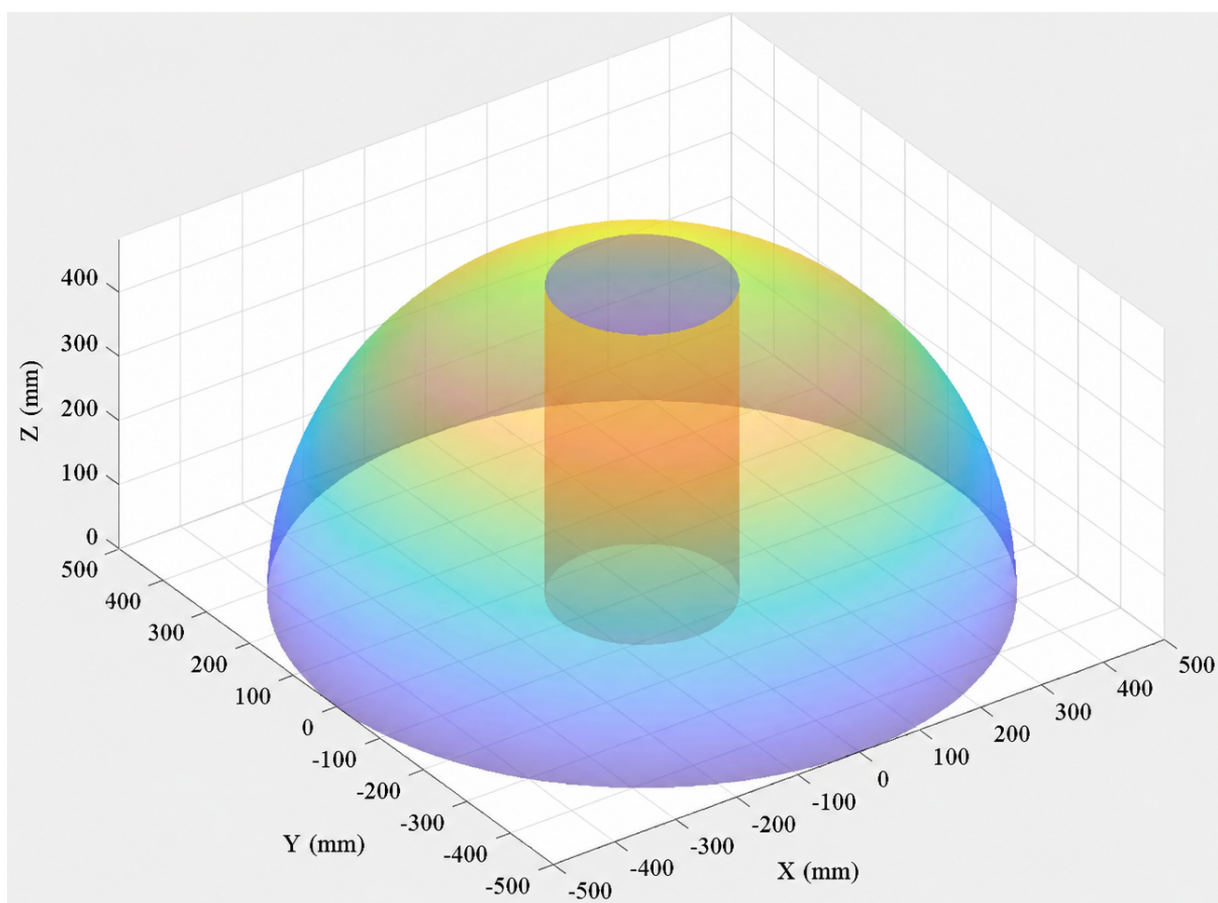


圖 3.14 雲台模擬指向範圍圖

### 3.6 系統整體運作流程

完成定位感測端、資料運算端、命令控制端及運動執行端之設計後，本研究進一步將各模組進行整合，建立完整之光通訊地面系統。圖 3.15 為本研究之系統整體運作流程圖。系統運作流程涵蓋目標位置量測、資料運算、控制命令產生及雲台指向執行等階段，各模組透過資料交換與控制訊號傳遞共同完成目標追蹤功能。

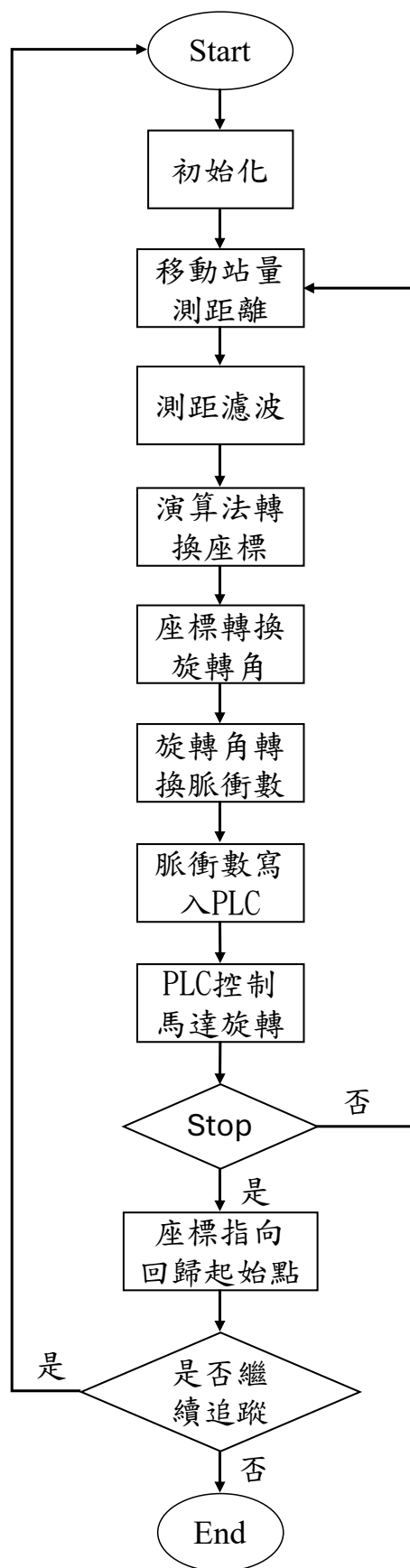


圖 3.15 系統整體運作流程圖

如圖所示，系統啟動後，定位感測端首先利用 UWB 固定站與移動站進行距離量測，取得目標與各固定站之間的距離資訊。量測資料經由通訊介面傳送至資料運算端，作為後續定位計算之輸入資料。

資料運算端接收距離量測結果後，依據固定站已知座標進行三維定位解算，求得移動站相對於雲台原點之空間位置座標。接著，根據目標座標計算所需之方位角與仰角，並依據各軸之角度脈衝轉換比例產生對應控制命令，完成由目標位置資訊至控制參數之轉換。

控制命令產生後，資料運算端透過 Modbus 通訊將脈衝數及控制旗標寫入 PLC 暫存器。命令控制端接收資料後，依據 PLC 控制邏輯執行脈衝輸出、方向判斷及狀態管理等功能，並將控制訊號傳送至伺服驅動器。

運動執行端接收 PLC 所輸出之控制訊號後，由伺服驅動器驅動方位軸與仰角軸伺服馬達旋轉，進而帶動雙軸雲台調整指向方向，使光學模組朝向目標所在位置。

當雲台完成本次指向動作後，系統會依據追蹤狀態判斷是否持續執行追蹤流程。若追蹤功能仍為啟用狀態，系統將重新進行 UWB 距離量測，更新目標位置並修正雲台指向；若追蹤功能停止，則系統可回歸原點並結束追蹤程序。

整體而言，本研究透過定位感測端、資料運算端、命令控制端及運動執行端之整合，建立一套可持續循環運作之追蹤架構。系統能將目標位置資訊即時轉換為雲台指向動作，形成感測、運算、控制與執行之流程。

## 第四章 實驗與結果分析

### 4.1 測試目的與評估項目

為驗證本研究所建置之無人機光通訊地面站粗追蹤系統之可行性，本章針對系統定位、角度計算、追蹤更新能力及實際指向結果進行測試與分析。由於系統由 UWB 定位、座標解算、角度計算、PLC 控制及雙軸雲台等模組整合而成，因此需透過實驗確認各功能模組是否能達成預期目標，並評估整體系統之追蹤性能。

本研究首先利用已知座標點驗證 UWB 定位結果之準確性，評估定位系統提供目標位置資訊之能力；接著分析目標座標轉換為方位角與仰角之計算結果，確認角度計算流程之正確性。此外，透過量測追蹤循環執行時間，分析系統更新率與延遲來源，以評估系統即時追蹤能力。最後，利用雷射光點實際落點位置分析雲台指向誤差，驗證系統完成定位、計算與控制後之最終指向效果。

藉由上述測試結果，可全面評估本研究所建置之光通訊地面站粗追蹤系統性能，並作為後續系統改善與應用發展之參考依據。

### 4.2 UWB 定位精度測試

本節針對所建置之 UWB 定位系統進行靜態定位精度測試，以評估系統於固定目標條件下之定位準確性與穩定性。實驗時將 UWB 移動站依序放置於五個已知座標位置，並保持靜止狀態進行量測。系統透過量測移動站與各固

用於無人機載具之光通訊地面系統設計與整合測試

定基站之間的距離資訊，結合定位演算法解算移動站之三維座標，再將解算結果與實際座標進行比較，以分析定位誤差特性。

由於雲台控制需根據定位結果計算方位角與仰角，若定位資料存在較大誤差或波動，將可能導致雲台產生指向偏差或追蹤不穩定之情形。因此，本節首先透過靜態定位測試評估系統之定位精度與穩定性，作為後續追蹤系統驗證之依據。

#### **4.2.1 測試環境與位置部署**

本實驗於室內環境中進行，共配置五個固定基站 A、B、C、D 及 E，並選取五個固定測試點  $P_1 \sim P_5$  作為移動站之測試位置。各固定站與移動站測試點之配置位置如表 4.1 所示。各測試點皆為已知座標位置，量測期間移動站保持靜止不動，以排除移動因素對定位結果之影響。

測試時，移動站於每一測試點連續擷取 100 筆定位資料，共取得 500 筆定位結果。系統首先量測移動站與各固定基站之間的距離資訊，再利用定位演算法進行三維座標解算，以獲得移動站之定位座標。後續將以實際座標作為基準，分析各測試點之定位誤差、誤差分布及定位精度。

表 4.1 靜態測試各點部署表

(a) 固定站測試部署位置表

| 固定站 | 座標位置 (cm)           |
|-----|---------------------|
| A   | (32.5, 725, -26.3)  |
| B   | (0, -30, 149.5)     |
| C   | (263.7, 0, 49.1)    |
| D   | (263.7, 0, 165.6)   |
| E   | (263.7, 500, -26.3) |

(b) 移動站測試點位置表

| 移動站   | 座標位置 (cm)        |
|-------|------------------|
| $P_1$ | (100, 100, 0)    |
| $P_2$ | (100, 100, 45.5) |
| $P_3$ | (200, 200, 0)    |
| $P_4$ | (200, 200, 45.5) |
| $P_5$ | (250, 250, 45.5) |

#### 4.2.2 三維座標誤差分析

為分析 UWB 定位系統於各測試點之座標偏移情形，本研究將解算所得之平均座標與實際座標進行比較，並計算 X、Y 及 Z 三軸方向之平均誤差，如圖 4.1 所示。

平均誤差 (cm)

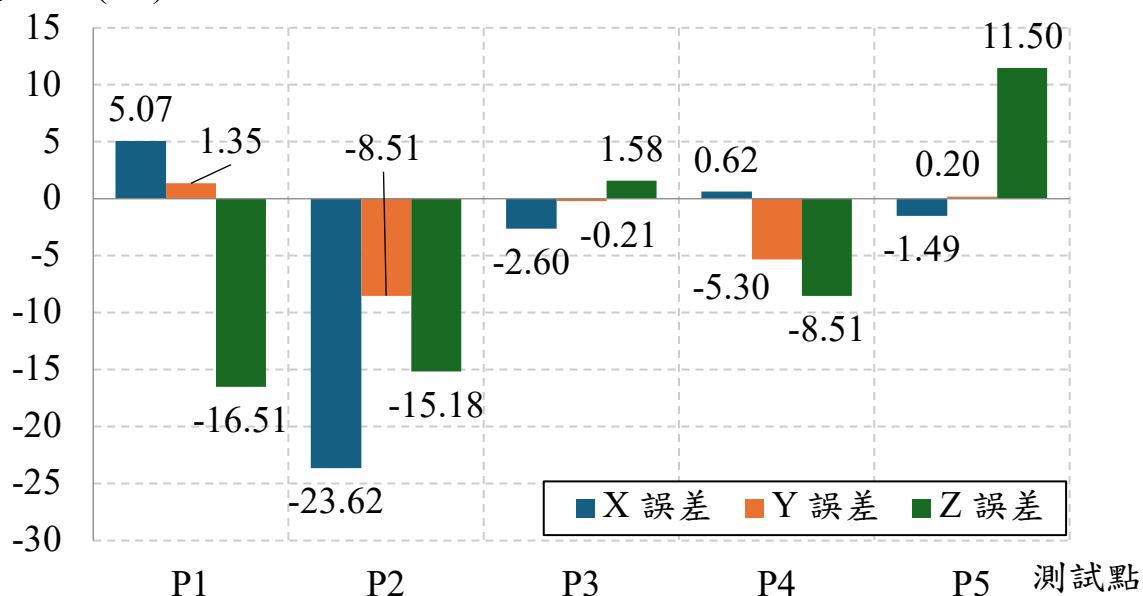


圖 4.1 各測試點 XYZ 軸向平均誤差長條圖

由圖 4.1 可知，P3、P4 與 P5 於三軸方向之平均誤差皆相對較小，表示系統於上述測試位置下具有較佳之定位準確性。其中 P3 之 X、Y 方向平均誤差分別為 -2.60 cm 及 -0.21 cm，Z 方向平均誤差為 1.58 cm，三軸偏差均較小，顯示其平均解算座標最接近實際位置。P4 與 P5 雖然在 X、Y 方向之偏差皆控制於 6 cm 以內，但於 Z 方向仍分別存在 -8.51 cm 及 11.50 cm 之平均誤差，顯示高度方向之定位精度仍受到一定程度影響。然而整體而言，其三維座標仍與實際位置相近。相較之下，P2 之座標偏移最為明顯，其中 X 方向平均誤差達 -23.62 cm，為所有測試點中最大偏差值；Z 方向平均誤差亦達 -15.18 cm，顯示該位置之定位結果存在較明顯之系統性偏移現象。P1 則主要表現在 Z 軸方向之負偏差，其平均誤差為 -16.51 cm，而 X 與 Y 方向偏差相對較小，表示該測試點之誤差主要來自高度方向。

綜合各測試點之分析結果可知，本研究之 UWB 定位系統於不同空間位置存在不同程度之系統性偏移，其中 P2 偏移最為顯著，而 P3 之平均解算結果最接近實際位置。

### 4.2.3 定位誤差分布

為進一步評估各測試點之定位穩定性，本研究將每筆解算座標與實際座標之間的三維空間距離定義為定位誤差，其計算方式如式（4-1）所示。

$$e_i = \sqrt{(x_i - x_t)^2 + (y_i - y_t)^2 + (z_i - z_t)^2} \quad (4-1)$$

其中， $x_i$ 、 $y_i$ 、 $z_i$  為第  $i$  筆資料之解算座標， $x_t$ 、 $y_t$  及  $z_t$  為測試點之實際座標。各測試點皆量測 100 筆資料，並計算其平均誤差、標準差、最小誤差、最大誤差，各測試點之定位誤差統計結果如表 4.2 所示。其中平均誤差用以表示定位結果與實際位置之平均距離；標準差反映定位結果之離散程度；最小誤差與最大誤差分別代表最佳與最差定位情況。

表 4.2 各測試點定位誤差統計

| 測試點 | 平均誤差<br>(cm) | 標準差<br>(cm) | 最小誤差<br>(cm) | 最大誤差<br>(cm) |
|-----|--------------|-------------|--------------|--------------|
| P1  | 19.42        | 8.50        | 8.09         | 44.65        |
| P2  | 29.73        | 4.61        | 20.73        | 41.37        |
| P3  | 8.10         | 7.88        | 1.12         | 56.94        |
| P4  | 11.10        | 5.51        | 1.77         | 30.87        |
| P5  | 12.58        | 5.73        | 3.50         | 29.32        |

|    |       |       |      |       |
|----|-------|-------|------|-------|
| 整體 | 16.19 | 10.16 | 1.12 | 56.94 |
|----|-------|-------|------|-------|

由表中可知，各測試點之定位誤差存在明顯差異。其中，P3 之平均誤差最低，顯示其定位結果最接近實際位置；P2 之平均誤差最高，且結合前節分析可知其存在較明顯之系統性偏移。其餘測試點之平均誤差皆維持於 13 cm 左右，顯示具有良好之定位表現。整體而言，本研究所建置之 UWB 定位系統平均三維定位誤差為 16.19 cm，顯示系統於靜態環境下具有良好之定位能力。

為進一步觀察各測試點定位誤差之分布情形，將各測試點之定位誤差繪製為盒狀圖，如圖 4.2 所示，其對應之統計值整理如表 4.3 所示。盒狀圖以第一四分位數 (Q1)、中位數及第三四分位數 (Q3) 描述定位誤差之分布情形。

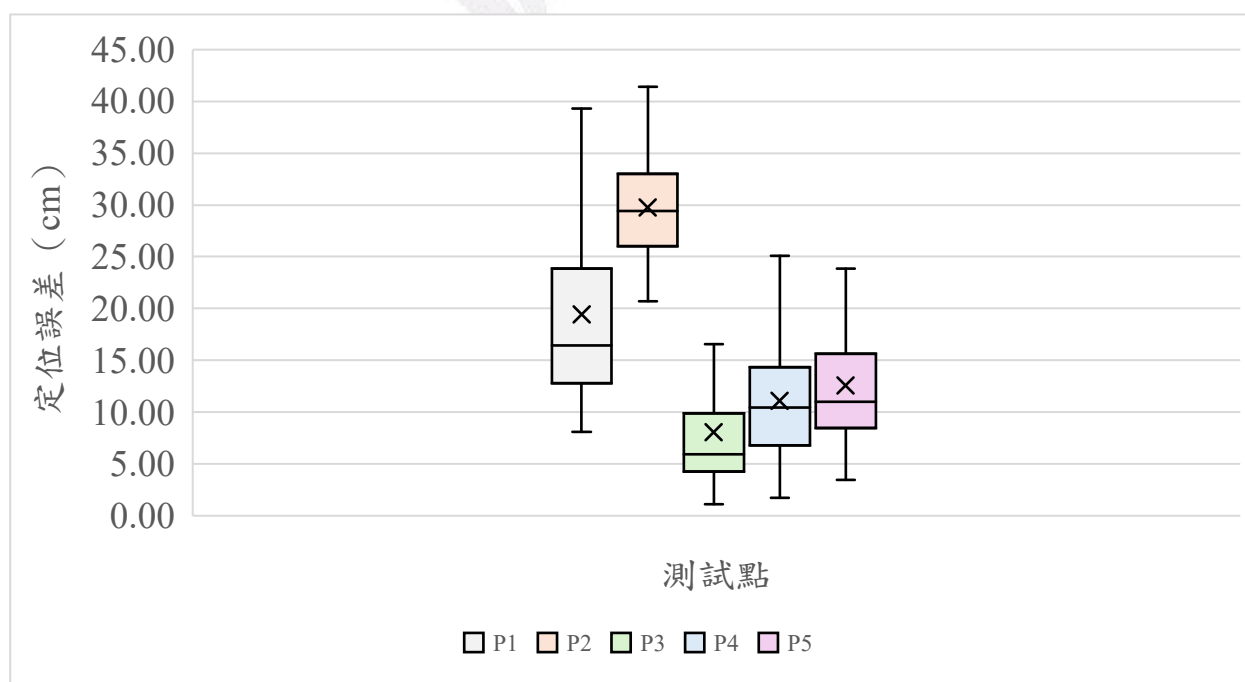


圖 4.2 各測試點定位誤差盒狀圖



表 4.3 各測試點定位誤差統計值

| 統計值       | P1    | P2    | P3    | P4    | P5    |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 最大值       | 44.65 | 41.37 | 56.94 | 30.87 | 29.32 |
| 第三四分位數 Q3 | 23.49 | 32.95 | 9.66  | 14.30 | 15.42 |
| 第一四分位數 Q1 | 12.82 | 26.02 | 4.37  | 6.88  | 8.69  |
| 最小值       | 8.09  | 20.73 | 1.12  | 1.77  | 3.50  |
| 平均值       | 19.42 | 29.73 | 8.10  | 11.10 | 12.58 |
| 中位數       | 16.42 | 29.41 | 5.92  | 10.58 | 11.04 |

單位：公分（cm）

由圖 4.2 及表 4.3 可知，P2 之誤差分布範圍較為集中，其中位數為 29.41 cm，且四分位距較小，顯示其定位結果具有良好之一致性，但整體誤差明顯偏高，與前節所觀察到之系統性偏移現象相符。P3 之中位數僅 5.92 cm，為所有測試點中最低，顯示大部分定位結果均接近實際位置；然而其最大誤差達 56.94 cm，顯示量測過程中仍存在少數較大之離群值。P4 與 P5 之誤差分布較為集中，且平均值與中位數相近，顯示定位結果具有良好之穩定性。相較之下，P1 之盒體範圍較大，顯示其定位結果波動較為明顯。

綜合圖 4.2 及表 4.3 之分析結果可知，P2 主要受到系統性偏移影響，而 P3 雖具有最佳定位精度，但仍存在少數離群值；P4 與 P5 則兼具良好之定位精度與穩定性。

#### 4.2.4 定位精度分析

為進一步評估各測試點之整體定位精度，本研究採用均方根誤差（Root Mean Square Error, RMSE）作為評估指標，其計算方式如式（4-2）所示。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2} \quad (4-2)$$

其中， $e_i$ 為第 $i$ 筆資料之定位誤差， $n$ 為該測試點之資料筆數。由於 RMSE 對較大誤差具有較高權重，因此能有效反映定位系統之整體精度表現。本研究各測試點之 RMSE 值如圖 4.3 所示。

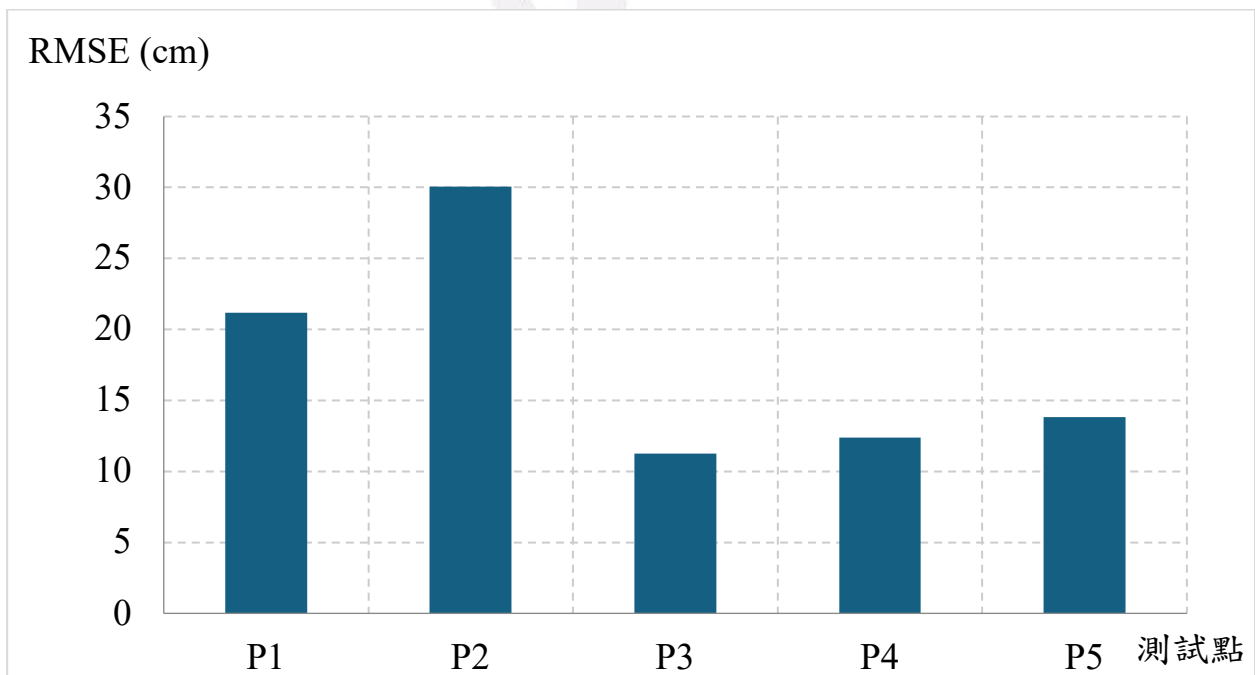


圖 4.3 各測試點 RMSE 長條圖

由圖中可知，各測試點之 RMSE 介於 11.27 cm 至 30.08 cm 之間。其中，P3 之 RMSE 最低，為 11.27 cm，顯示其定位精度最佳；P2 之 RMSE 最高，達 30.08 cm，表示其定位結果與實際位置之差異最為明顯，此結果亦與前述三維

用於無人機載具之光通訊地面系統設計與整合測試  
座標誤差分析及定位誤差分布分析結果相符。

此外，P4 與 P5 之 RMSE 分別為 12.38 cm 及 13.81 cm，均維持於 15 cm 以內，顯示其具有良好之定位精度；P1 之 RMSE 為 21.18 cm，雖高於 P3、P4 及 P5，但仍維持於可接受範圍內。

綜合各測試點之分析結果可知，本研究所建置之 UWB 定位系統整體 RMSE 為 19.10 cm，顯示系統於靜態環境下可提供約 20 cm 等級之定位精度，足以作為後續雙軸雲台粗追蹤控制之位置資訊來源。

#### **4.2.5 UWB 定位精度測試結果**

本節針對所建置之 UWB 定位系統進行靜態定位精度測試，共於五個固定測試點取得 500 筆定位資料，並分別從三維座標偏移、定位誤差分布及 RMSE 等面向進行分析。

實驗結果顯示，系統於不同測試位置之定位表現存在差異，其中 P3 具有最佳定位精度，P2 則因存在較明顯之系統性偏移而產生較大定位誤差。由誤差分布分析結果可知，多數測試點皆具有良好之穩定性，僅部分資料存在較大離群值現象。

綜合各項統計結果，本研究所建置之 UWB 定位系統平均三維定位誤差為 16.19 cm，整體 RMSE 為 19.10 cm，顯示系統於靜態環境下可提供約 20 cm 等級之定位精度。整體而言，系統已具備穩定之目標定位能力，可作為後續方位

用於無人機載具之光通訊地面系統設計與整合測試

角與仰角計算之基礎，並滿足雙軸雲台粗追蹤控制之應用需求。

## 4.3 目標方向計算驗證

### 4.3.1 測試條件與參考值建立

本實驗延續前節 UWB 定位精度測試之五個固定測試點 P1~P5，並利用各測試點之已知座標作為參考位置。每一測試點量測 100 筆資料，共取得 500 筆實驗資料，以驗證座標轉換、角度計算及脈衝換算之正確性。

首先根據各測試點之實際座標，利用系統所建立之座標轉換關係計算其理論方位角與仰角，作為後續誤差分析之參考值。接著再依照雲台馬達每圈所需脈衝數，將理論角度換算為水平軸與垂直軸控制脈衝，以建立各測試點之參考脈衝值。

表 4.4 列出各測試點之參考座標、理論方位角、仰角及對應控制脈衝。後續將以系統實際計算所得之角度與脈衝結果與表中參考值進行比較，以評估目標方向計算之正確性與控制命令輸出之誤差表現。

表 4.4 測試點參考座標、角度與脈衝

| 測試點 | 參考座標<br>(cm)     | 方位角 $\theta$<br>( $^{\circ}$ ) | 仰角 $\phi$<br>( $^{\circ}$ ) | 水平軸脈衝<br>$\alpha$ | 垂直軸脈衝<br>$\beta$ |
|-----|------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------|------------------|
| P1  | (100, 100, 0)    | 51.900                         | 90.000                      | -721              | 1250             |
| P2  | (100, 100, 45.5) | 51.900                         | 72.165                      | -721              | 1002             |
| P3  | (200, 200, 0)    | 51.900                         | 90.000                      | -721              | 1250             |
| P4  | (200, 200, 45.5) | 51.900                         | 80.861                      | -721              | 1123             |
| P5  | (250, 250, 45.5) | 51.900                         | 82.667                      | -721              | 1148             |

#### 4.3.2 座標轉角度換算

系統取得 UWB 定位座標後，先將世界座標轉換至雲台座標系。由於雲台相對 UWB 世界座標系統 Z 軸旋轉  $180^{\circ}$ ，因此座標轉換如下：

$$x_g = -x, \quad y_g = -y, \quad z_g = z$$

接著依雲台安裝方向計算水平旋轉角  $\theta$ ：

$$\theta = -\text{atan2}(x_g, -y_g) + 6.9^{\circ} \quad (4-3)$$

其中  $6.9^{\circ}$  為水平軸原點補償角，用以修正馬達實際歸零方向與座標系理論方向之間的偏差。

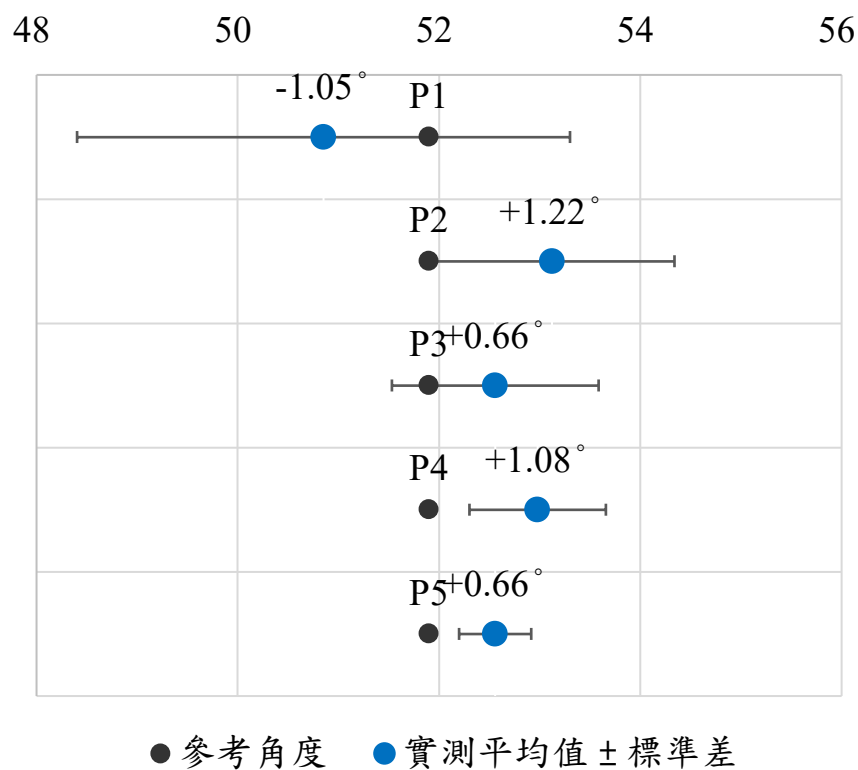
垂直方向角  $\phi$  的計算方式為：

$$\phi = \text{atan2}\left(\sqrt{x_g^2 + y_g^2}, z_g\right) \quad (4-4)$$

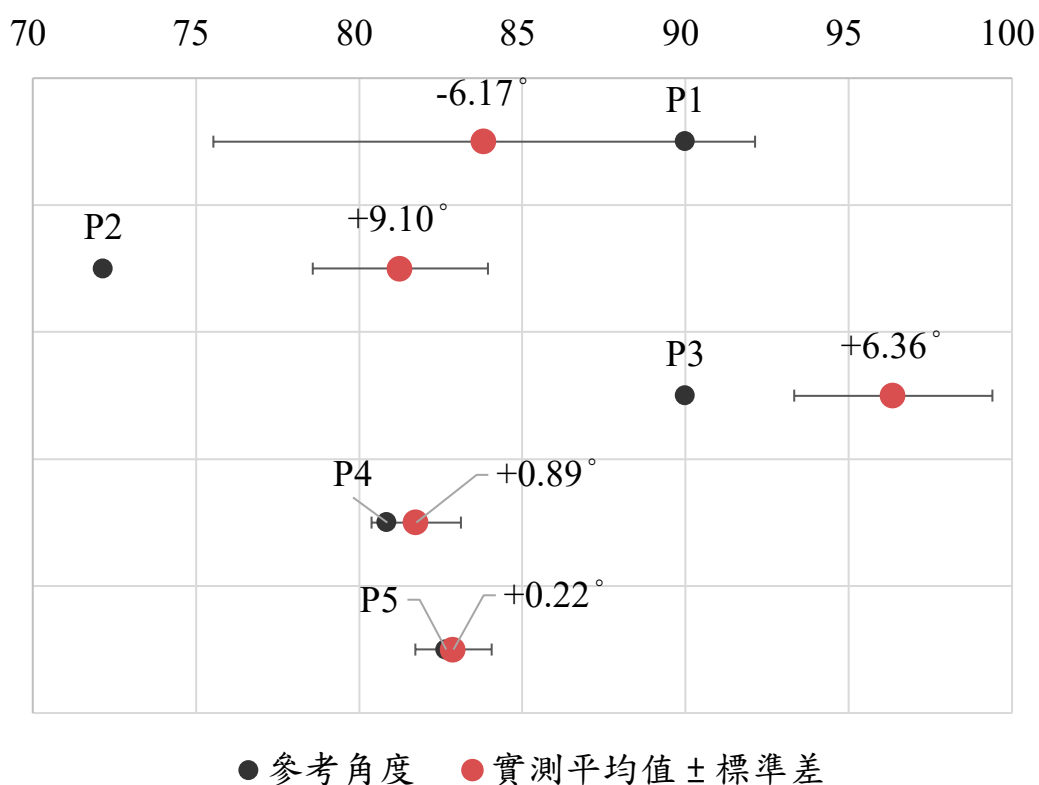
本系統的  $\phi$  是由垂直軸方向量測至目標方向的夾角，因此  $\phi=0^{\circ}$  表示目

標位於正上方， $\phi=90^\circ$ 表示目標與雲台位於相同高度。此定義與一般由水平面向上量測的仰角不同；若換算為一般仰角，則可表示為 $90^\circ - \phi$ 。

依據上述座標轉換與角度計算方式，可求得各測試點之參考方位角與仰角，其結果如圖 4.4 所示。由圖中可知，各測試點之實測平均角度均接近理論參考角度，顯示系統所建立之座標轉換與角度計算流程能正常完成方向換算。



(a) 旋轉角



(b)仰角

圖 4.4 各測試點參考角度與實測角度比較圖

### 4.3.3 角度誤差分析

為評估座標轉換後之方向計算準確性，本研究比較各測試點之參考角度與系統計算角度，並統計方位角及仰角之平均誤差與平均絕對誤差（Mean Absolute Error, MAE），結果如表 4.5 所示。

表 4.5 各測試點方位角與仰角誤差統計

| 測試點 | 方位角<br>平均誤差 (°) | 方位角 MAE<br>(°) | 仰角<br>平均誤差 (°) | 仰角 MAE<br>(°) |
|-----|-----------------|----------------|----------------|---------------|
| P1  | -1.048          | 1.838          | -6.170         | 8.957         |
| P2  | 1.222           | 1.491          | 9.096          | 9.096         |
| P3  | 0.658           | 0.965          | 6.363          | 6.363         |
| P4  | 1.080           | 1.115          | 0.886          | 1.303         |
| P5  | 0.657           | 0.678          | 0.223          | 0.944         |
| 整體  | 0.514           | 1.217          | 2.080          | 5.332         |

由表 4.5 可知，500 筆資料之方位角平均絕對誤差為  $1.217^{\circ}$ ，顯示系統於水平方向具有良好之角度計算能力。其中 P5 表現最佳，其方位角 MAE 僅  $0.678^{\circ}$ ；P1 之誤差相對較大，但仍維持於  $2^{\circ}$  以內。仰角部分之整體 MAE 為  $5.332^{\circ}$ ，明顯高於方位角誤差，其中 P4 及 P5 之仰角 MAE 分別為  $1.303^{\circ}$  及  $0.944^{\circ}$ ，具有較佳之垂直方向計算精度。

為進一步觀察角度誤差之分布情形，將各測試點之方位角與仰角誤差繪製為盒狀圖，如圖 4.5 所示。

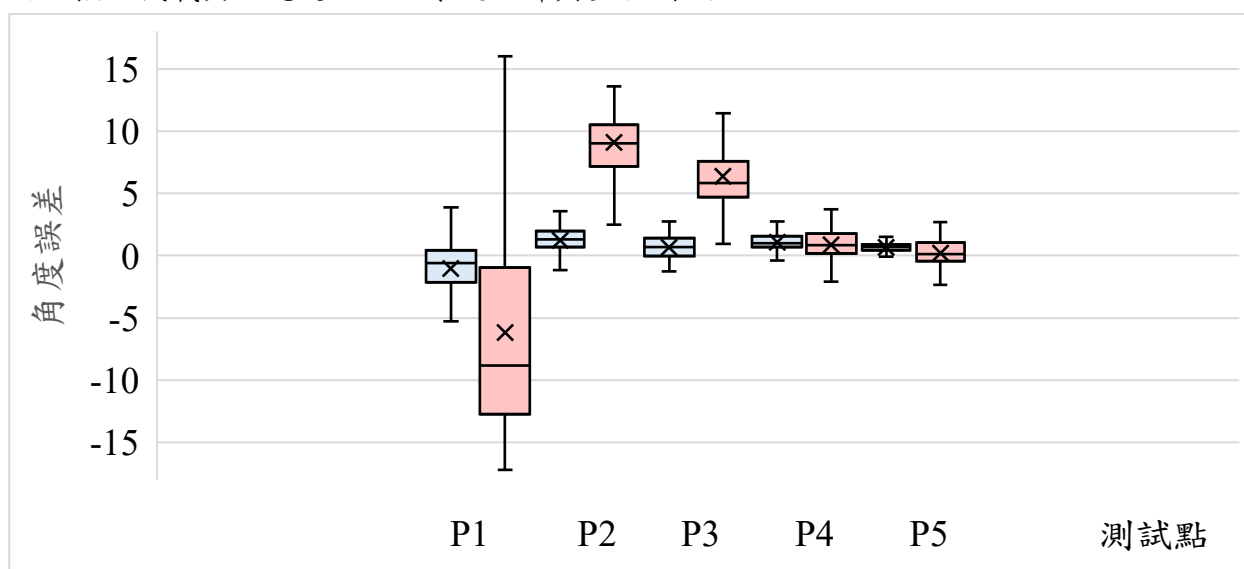


圖 4.5 各測試點方位角與仰角誤差盒狀圖

由圖 4.5 可知，各測試點之方位角誤差分布皆相對集中，大多維持於 $\pm 2^\circ$ 範圍內，顯示水平方向具有良好穩定性。相較之下，仰角誤差分布較為分散，其中 P1、P2 及 P3 之誤差範圍較大，顯示垂直方向較容易受到定位誤差影響。

各測試點之角度平均絕對誤差比較如圖 4.6 所示。

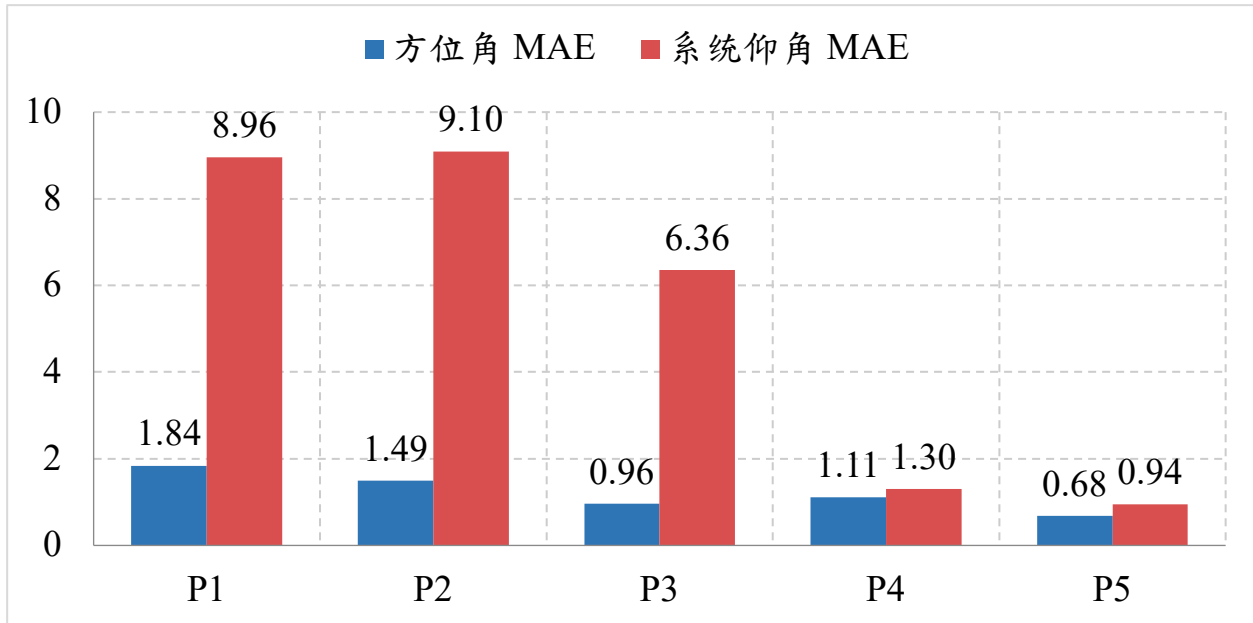


圖 4.6 各測試點角度平均絕對誤差比較圖

由圖 4.6 可知，方位角 MAE 皆低於  $2^\circ$ ，而仰角 MAE 則介於  $0.944^\circ$  至  $9.096^\circ$  之間。P1 及 P3 之參考高度為 0 cm，其系統仰角接近  $90^\circ$ ，當目標位於接近水平面位置時，Z 軸定位誤差將較直接反映於仰角計算結果，因此其仰角誤差相對較高。此外，P2 雖具有 45.5 cm 高度，但因水平距離較短，使垂直座標偏差對角度結果之影響更加明顯。

#### 4.3.4 角度轉脈衝驗證

本系統水平軸與垂直軸每旋轉一圈均需要 5000 個脈衝，因此角度與脈衝的換算關係為：

$$N_\alpha = -\frac{\theta}{360^\circ} \times 5000 \quad (4-5)$$

$$N_\beta = \frac{\phi}{360^\circ} \times 5000 \quad (4-6)$$

其中， $N\alpha$  為水平軸目標脈衝數， $N\beta$  為垂直軸目標脈衝數； $\theta$  為方位角， $\phi$  為系統定義之仰角。計算得每個脈衝所對應的理論角度為：

$$\frac{360^\circ}{5000} = 0.072^\circ/\text{pulse}$$

脈衝值經四捨五入轉換為整數，亦即每  $1^\circ$  約對應 13.889 個脈衝，依據各測試點之參考角度，可換算得到對應之水平軸與垂直軸目標脈衝值，其結果如表 4.3-1 所示。其中，各測試點之水平軸參考脈衝皆為 -721 pulse，而垂直軸則依目標高度不同介於 1002 至 1250 pulse 之間。



實際控制時，系統並非每次皆由原點移動至目標位置，而是利用目標絕對脈衝與目前累積脈衝之差值計算增量脈衝，再依 PLC 及馬達配線方向決定脈衝正負號後輸出至控制器。後續將透過脈衝誤差分析驗證角度轉脈衝之計算結果是否正確。

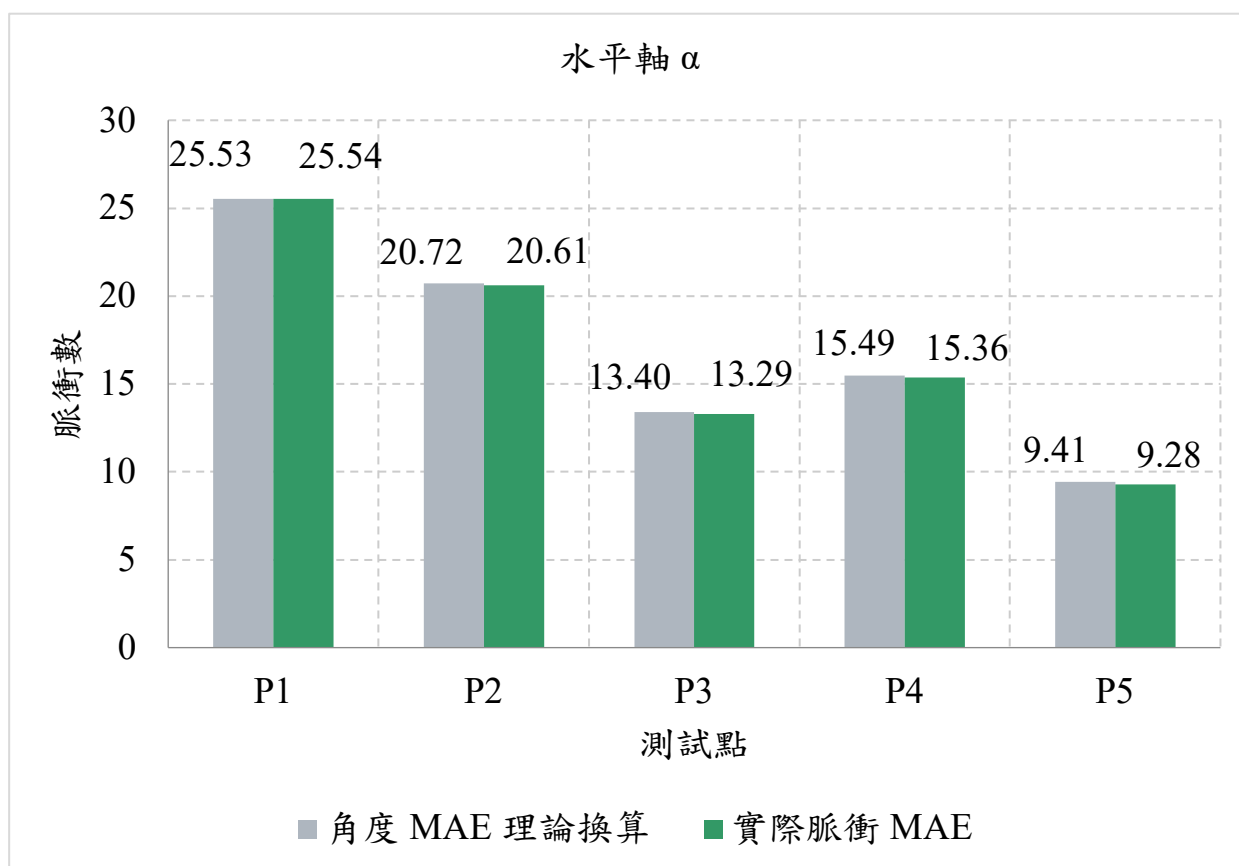
#### 4.3.5 脈衝誤差分析

為評估角度誤差經脈衝換算後對雲台控制之影響，本研究統計各測試點之水平軸與垂直軸脈衝平均絕對誤差（MAE）及均方根誤差（RMSE），結果如表 4.6 所示。

表 4.6 各測試點水平軸與垂直軸脈衝誤差統計

| 測試點 | 水平軸脈衝<br>MAE | 水平軸脈衝<br>RMSE | 垂直軸脈衝<br>MAE | 垂直軸脈衝<br>RMSE |
|-----|--------------|---------------|--------------|---------------|
| P1  | 25.54        | 36.89         | 124.42       | 143.16        |
| P2  | 20.61        | 23.83         | 126.63       | 131.95        |
| P3  | 13.29        | 16.79         | 88.40        | 97.84         |
| P4  | 15.36        | 17.58         | 18.11        | 22.60         |
| P5  | 9.28         | 10.27         | 13.10        | 16.44         |
| 整體  | 16.82        | 22.91         | 74.13        | 98.24         |

由表 4.6 可知，相較於水平軸，垂直軸之脈衝誤差較大，其中 P5 之水平軸與垂直軸誤差皆為最低，分別為 9.28 pulse 及 13.10 pulse，具有最佳控制精度；而 P1 及 P2 於垂直軸之脈衝誤差較高，與前節仰角誤差分析結果一致。此外，為驗證角度轉脈衝公式之正確性，本研究將理論角度誤差換算所得之脈衝誤差與實際脈衝誤差進行比較，其結果如圖 4.7。



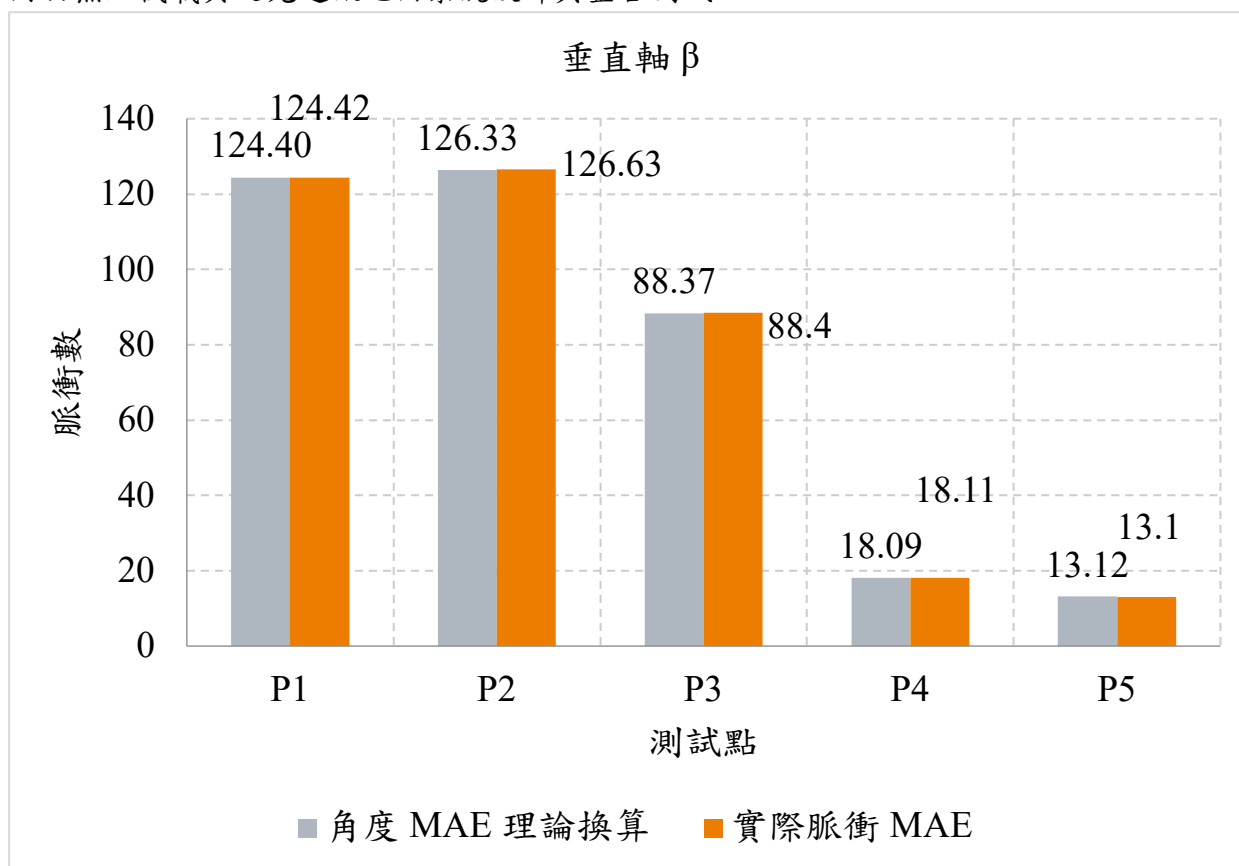


圖 4.7 理論脈衝誤差與實際脈衝誤差比較圖

圖中顯示理論換算之脈衝誤差與實際脈衝誤差幾乎重合，證明角度轉脈衝公式及程式實作結果一致。

#### 4.3.6 目標方向計算驗證結果

本節完成座標轉換、角度計算及脈衝換算之驗證。實驗結果顯示，系統可根據 UWB 定位座標正確計算方位角、仰角及控制脈衝，其中整體方位角平均絕對誤差為  $1.217^\circ$ ，仰角平均絕對誤差為  $5.332^\circ$ 。此外，理論脈衝誤差與實際脈衝誤差結果一致，證明角度轉脈衝公式與程式實作正確。綜合而言，本研究所建置之目標方向計算模組能穩定產生雙軸雲台控制所需之方向資訊，可作為後續追蹤控制之依據。

## 4.4 系統追蹤更新率測試

### 4.4.1 更新週期量測方法

本研究為評估系統於實際追蹤過程中的更新能力，於追蹤程式中加入時間戳記，並利用 Python 之高解析度計時函式 `time.perf_counter()` 記錄各追蹤循環之執行時間。量測內容包含 UWB 測距、定位解算、濾波、控制量計算及 PLC 通訊等處理階段，並記錄各階段完成之時間點。透過分析各階段之執行時間及系統整體更新週期，可進一步評估系統之即時追蹤能力與運作效能。

原始紀錄共取得 504 筆追蹤循環資料，其中循環 209、210、381 及 382 受到 UWB 固定站逾時與恢復程序影響，未能代表正常運作狀態，因此予以排除。最終保留 500 筆有效資料作為後續統計分析依據。

本研究以相鄰兩次成功完成 PLC 控制命令輸出之時間差作為系統更新週期，並以其倒數定義追蹤更新頻率。此外，亦統計 UWB 量測、定位解算、控制量計算及 PLC 通訊等處理階段之執行時間，以分析系統延遲來源及更新率限制因素。

### 4.4.2 追蹤頻率統計分析

本研究 500 筆有效資料之更新週期與追蹤頻率統計結果如表 4.7 所示。

表 4.7 系統更新週期與追蹤頻率統計

| 指標                   | 有效筆數 | 平均值          | 中位數          | 標準差     | 最小值          | 最大值          |
|----------------------|------|--------------|--------------|---------|--------------|--------------|
| 循環起始週期<br>(ms)       | 499  | 1579.33<br>3 | 1488.89<br>0 | 174.725 | 1083.72<br>2 | 2358.48<br>0 |
| 成功命令<br>更新週期<br>(ms) | 498  | 1592.58<br>7 | 1488.61<br>7 | 257.171 | 1453.44<br>0 | 4904.14<br>3 |
| 追蹤更新頻率<br>(Hz)       | 498  | 0.637        | 0.672        | 0.065   | 0.204        | 0.688        |

由表 4.7 可知，成功命令更新週期平均為 1592.587 ms，中位數為 1488.617 ms，表示系統於正常運作情況下約每 1.49 秒可完成一次位置更新與控制命令輸出。追蹤更新頻率平均為 0.637 Hz，中位數為 0.672 Hz，顯示系統大多維持每秒約 0.6 至 0.7 次之更新能力。

為觀察更新週期隨時間之變化情形，將 498 筆追蹤循環之更新週期繪製成時序圖如圖 4.8 所示。

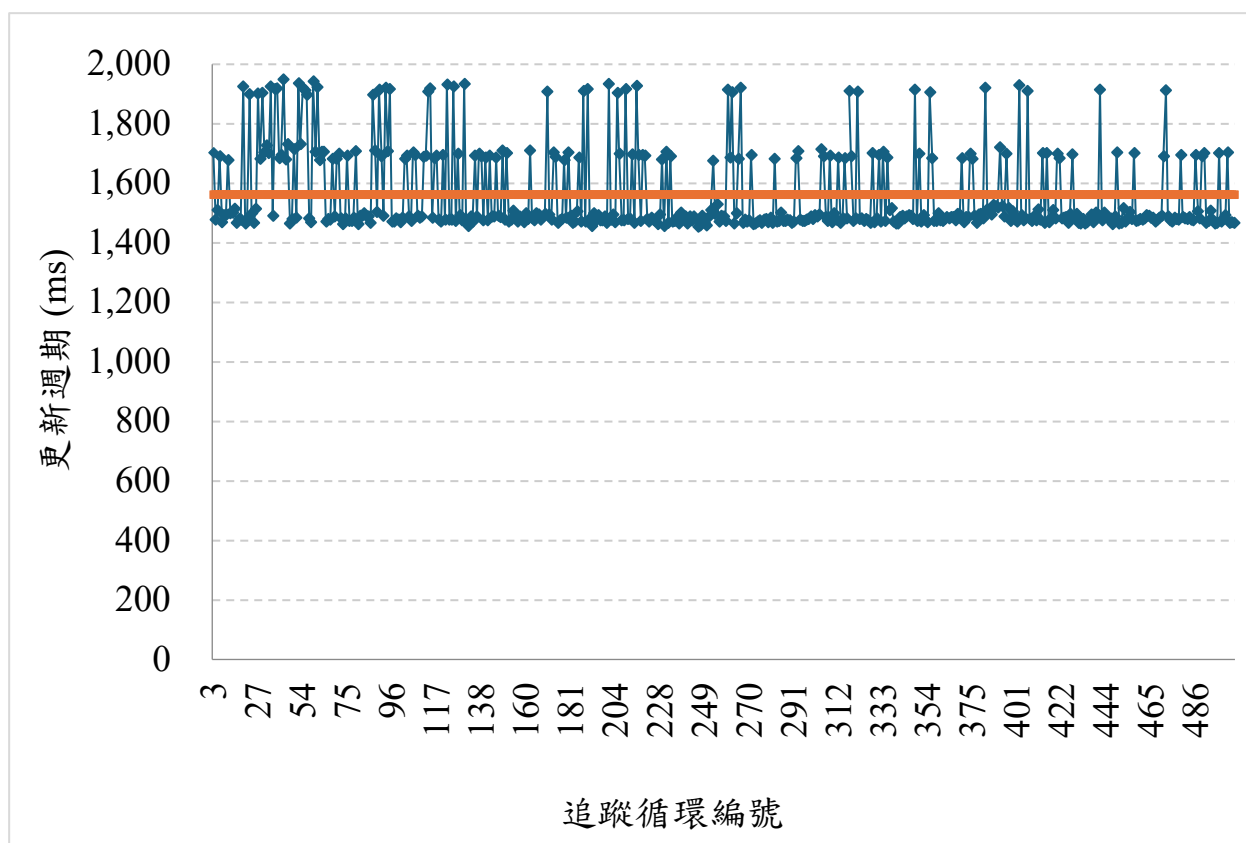


圖 4.8 系統更新週期時序圖

由圖 4.8 可知，大部分更新週期集中於 1.4 至 1.7 秒之間，僅少數循環出現較長之更新間隔，顯示系統整體更新節奏具有良好一致性。此外，追蹤更新頻率之分布情形如圖 4.9 所示。

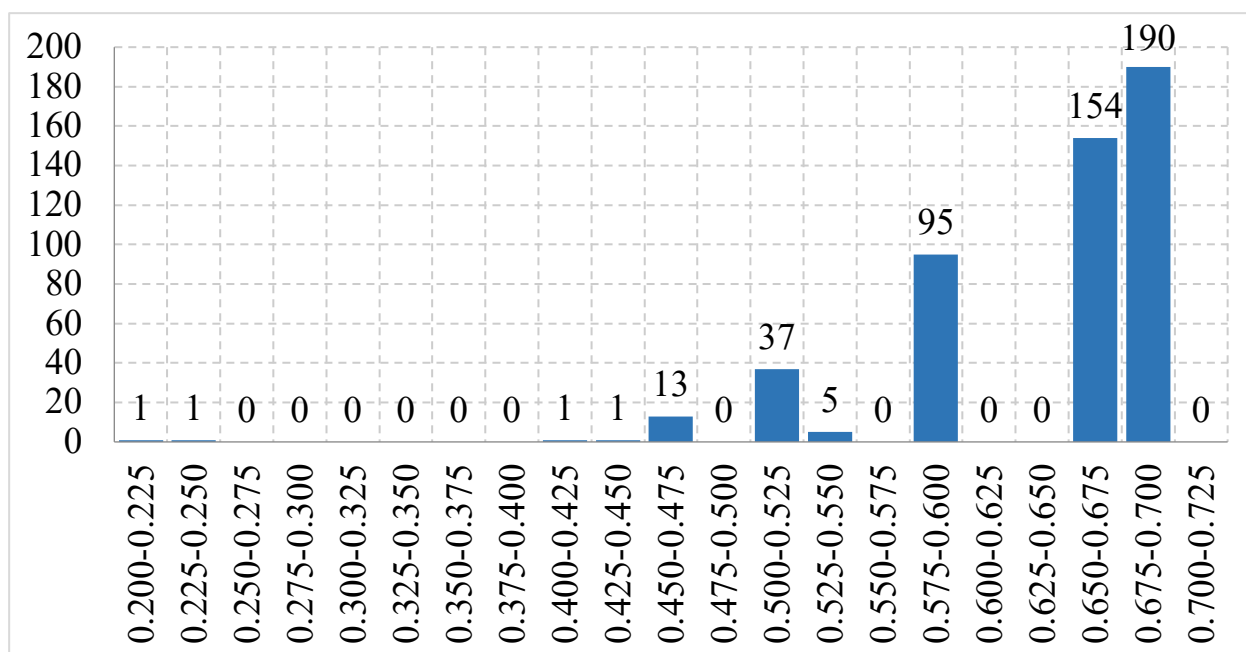


圖 4.9 追蹤更新頻率分布圖

由圖 4.9 可知，追蹤頻率主要集中於 0.6 至 0.7 Hz 區間，其中大部分資料接近 0.67 Hz。整體而言，本系統之追蹤更新頻率主要集中於 0.6 至 0.7 Hz 區間，顯示更新能力具有良好穩定性。

#### 4.4.3 系統延遲來源分析

本研究統計各處理階段於整體延遲中所占比例，其結果如圖 4.10 所示。

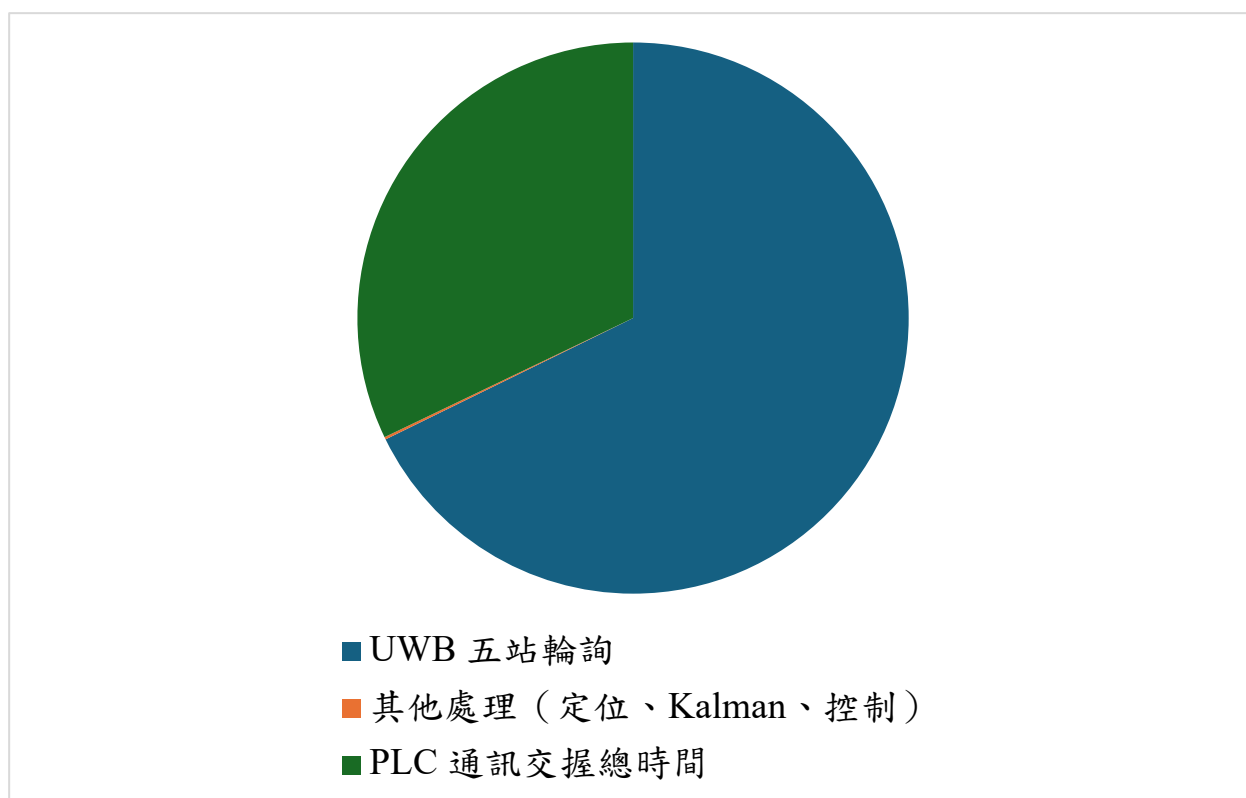


圖 4.10 各處理階段平均延遲與占比比較圖

由圖可知，系統延遲主要集中於 UWB 五站輪詢與 PLC 通訊交握兩個階段。其中，UWB 五站輪詢約占整體延遲 67.7%，為系統更新率之主要限制來源；PLC 通訊交握約占 32.1%，為第二大延遲來源。相較之下，定位解算、Kalman 濾波及控制量計算等運算程序合計僅占約 0.1%，對整體延遲影響極小。

此結果顯示，本研究所採用之定位解算、濾波及角度換算等演算法皆可於極短時間內完成，其運算能力已足以滿足即時控制需求。目前系統更新率之瓶頸主要來自 UWB 量測流程及 PLC 通訊時間，而非定位演算法本身。

綜合圖 4.10 與前節更新率分析結果可知，本系統平均追蹤更新頻率約為 0.64 Hz，正常情況下約每 1.5 秒完成一次位置更新與控制命令輸出。若未來需提升系統即時性，可優先縮短 UWB 輪詢時間或優化 PLC 通訊流程，以進一步提升整體追蹤更新能力。

## 4.5 雲台指向誤差分析

### 4.5.1 雷射光點定位方法

為評估位置與雷射光點中心之相對位置作為指向誤差。影像處理完成後，將雷射光點中心座標與目標中心座標之像素差，依量測平面之尺度校正轉換為實際距離，分別得到水平方向偏移量  $\Delta X$  與垂直方向偏移量  $\Delta Y$ ，單位皆為公分。

本次實驗共取得 84 筆量測資料，每筆資料均包含影像檔名、水平偏移量  $\Delta X$  與垂直偏移量  $\Delta Y$ 。由於資料檔已完成像素至實際距離之換算，因此本文直接以公分偏移量進行後續統計分析。偏移量之正負號沿用原始影像處理輸出結果，不另外定義其實際空間方向。

為避免僅以單一方向偏移量評估指向誤差而低估實際偏移程度，本研究進一步定義徑向指向誤差（Radial Pointing Error）作為整體指向精度之評估指標，其計算方式如式（4-7）所示。

$$e_i = \sqrt{(\Delta X_i)^2 + (\Delta Y_i)^2} \quad (4-7)$$

其中， $e_i$  為第  $i$  筆量測資料之徑向指向誤差； $\Delta X_i$  與  $\Delta Y_i$  分別為第  $i$  筆量測資料之水平偏移量與垂直偏移量。徑向誤差可同時反映兩方向之綜合偏移程度，較能代表雷射光點相對目標中心之實際指向誤差。圖 4.11 為雷射光點定位與偏移量定義示意圖。

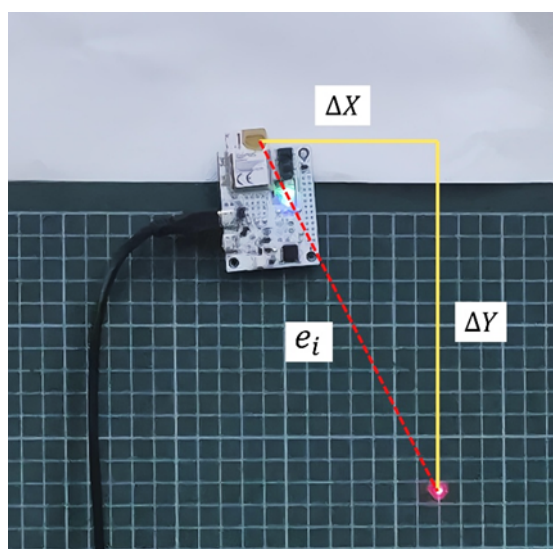


圖 4.11 雷射光點定位與水平、垂直偏移定義示意圖

#### 4.5.2 水平與垂直偏移分析

為了解雲台實際指向結果於水平與垂直方向之偏移情形，本研究針對 84 筆雷射光點量測資料進行統計分析，其結果如表 4.8 所示

表 4.8 84 筆雲台指向誤差統計

| 指標              | 平均值   | 中位數   | 標準差   | 最小值     | 最大值    | RMSE  |
|-----------------|-------|-------|-------|---------|--------|-------|
| $\Delta X$ (cm) | 3.123 | 1.540 | 4.359 | -16.160 | 14.070 | 5.341 |
| $\Delta Y$ (cm) | 1.940 | 2.370 | 4.388 | -11.100 | 22.320 | 4.774 |
| 徑向誤差 (cm)       | 5.124 | 2.832 | 5.037 | 2.665   | 25.076 | 7.164 |

由表 4.8 可知，兩方向之平均值皆未落於零點，顯示雷射光點中心相對目標基準位置存在固定方向偏差。

此外， $\Delta X$  與  $\Delta Y$  之標準差分別為 4.359 cm 及 4.388 cm，顯示水平與垂直方向之離散程度相近。然而，由最大值與最小值可發現，部分量測資料存在較大偏移情形，使平均值與 RMSE 受到一定程度影響，因此仍需搭配偏移分布進一步分析。

為觀察雷射光點之空間分布情形，將 84 筆資料之水平與垂直偏移量繪製為散布圖，如圖 4.12 所示。



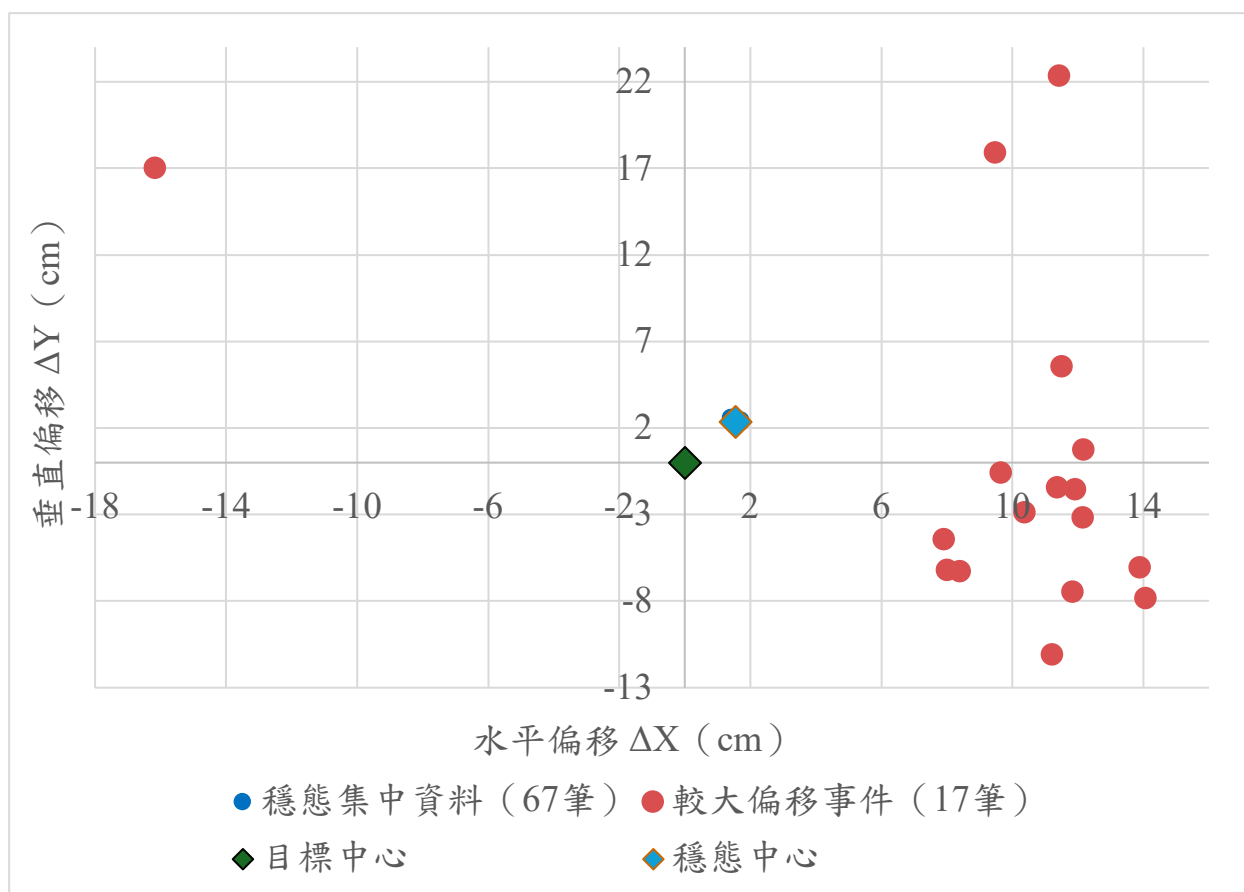


圖 4.12 84 筆雷射光點水平與垂直偏移散布圖

由圖 4.12 可知，多數量測資料集中於同一區域附近，主要落點約位於  $\Delta X = 1.54$  cm、 $\Delta Y = 2.37$  cm 附近，顯示系統在大部分量測情況下具有穩定之指向落點。然而，仍有少數資料分散於較遠位置，形成較大偏移點。整體而言，雷射光點並非以目標中心為分布中心，而是呈現固定方向偏移之特性，顯示系統存在一定程度之系統性誤差。

### 4.5.3 指向誤差分布分析

為綜合評估雷射光點相對目標中心之實際偏移情形，本研究以徑向誤差作為指向誤差評估指標，其統計結果如表 4.8 所示。

由表 4.8 可知，84 筆資料之平均徑向誤差為 5.124 cm，中位數為 2.832 cm，RMSE 為 7.164 cm，最大誤差則達 25.076 cm。平均值明顯高於中位數，顯示誤差分布受到少數較大偏移資料影響，使整體誤差增加。

為進一步觀察指向誤差隨量測次序之變化情形，將 84 筆徑向誤差繪製為時序圖，如圖 4.13 所示。

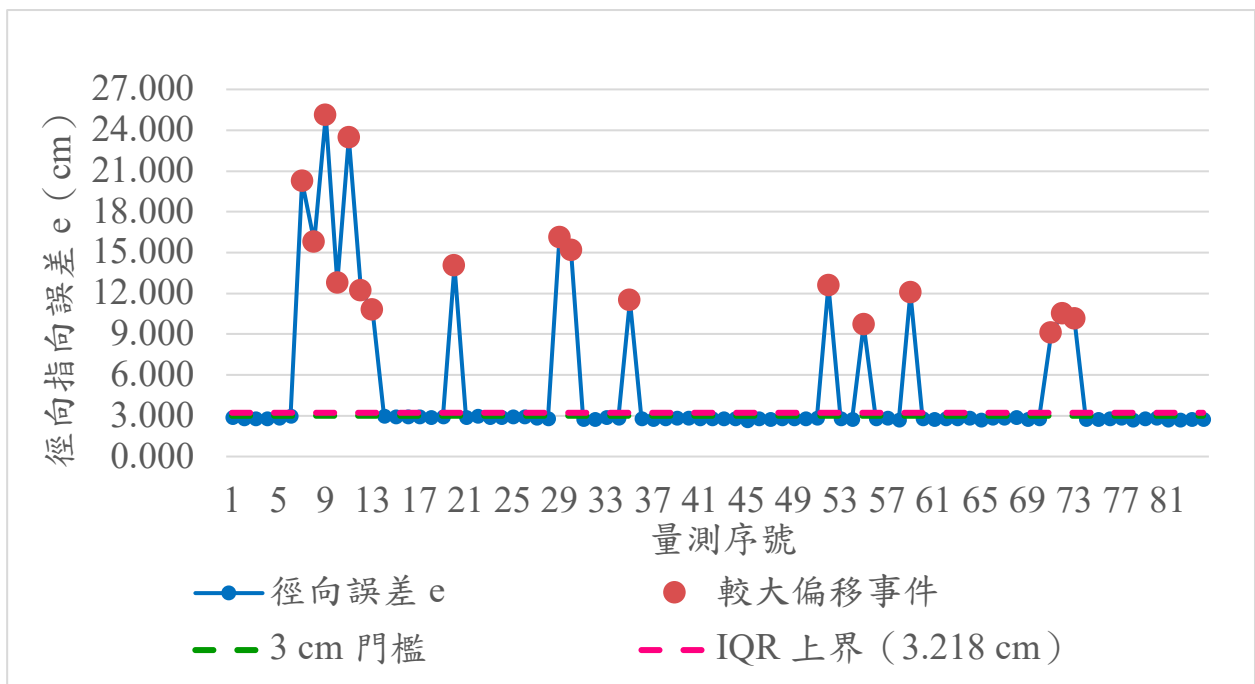


圖 4.13 84 筆雲台徑向指向誤差時序圖

由圖 4.13 可知，多數量測資料皆集中於較小誤差範圍內，但仍可觀察到數個明顯較高之誤差峰值，顯示系統在大部分時間具有穩定之指向表現，但仍偶爾出現較大偏移現象。

為進一步分析誤差分布特性，本研究依據徑向誤差分布將資料區分為穩態集中資料與較大偏移事件。其中穩態集中資料主要分布於 3 cm 以內，而超過此範圍者則歸類為較大偏移事件，其統計結果如表 4.9 所示。



表 4.9 穩態集中資料與較大偏移事件比較

| 資料分類   | 筆數 | 比例 (%)  | 平均徑向 (cm) | 標準差 (cm) | 最大值 (cm) |
|--------|----|---------|-----------|----------|----------|
| 穩態集中資料 | 67 | 79.762  | 2.825     | 0.072    | 2.985    |
| 較大偏移事件 | 17 | 20.238  | 14.181    | 4.722    | 25.076   |
| 全部資料   | 84 | 100.000 | 5.124     | 5.037    | 25.076   |

由表 4.9 可知，84 筆資料中共有 67 筆屬於穩態集中資料，占總資料量 79.762%；其平均徑向誤差為 2.825 cm，標準差僅 0.072 cm，顯示雷射光點具有良好之重複定位能力。另一方面，共有 17 筆資料屬於較大偏移事件，占 20.238%，其平均誤差達 14.181 cm，最大誤差為 25.076 cm，對整體平均誤差及 RMSE 具有顯著影響。

#### 4.5.4 雲台指向誤差分析結果

本節透過雷射光點偏移量分析雲台實際指向誤差，並由水平與垂直偏移、徑向誤差及誤差分布等面向進行評估。

實驗結果顯示，系統平均徑向誤差為 5.124 cm，RMSE 為 7.164 cm，且約 79.8%之量測資料可維持於 3 cm 以內，顯示系統具有良好之指向穩定性。雖然仍存在少數較大偏移事件，但整體而言，本研究所建置之系統已具備粗指向能力，可作為後續自由空間光通訊細追蹤系統之前級追蹤平台。

## 4.6 實驗結果總結

本章針對所建置之 UWB 定位與雙軸雲台追蹤系統進行實驗驗證，內容包含 UWB 定位精度測試、目標方向計算驗證、系統追蹤更新率測試及雲台指向誤差分析。

UWB 定位精度測試結果顯示，系統整體平均定位誤差為 16.19 cm，RMSE 為 19.10 cm，可提供約 20 cm 等級之定位精度，足以作為雙軸雲台粗追蹤控制之位置資訊來源。

目標方向計算驗證結果顯示，系統可正確完成座標轉換、角度計算及脈衝換算，其中整體方位角平均絕對誤差為  $1.217^\circ$ ，仰角平均絕對誤差為  $5.332^\circ$ ，證明方向計算模組具有良好之準確性。

系統追蹤更新率測試結果顯示，平均追蹤更新頻率為 0.637 Hz，約每 1.5 秒完成一次位置更新與控制命令輸出；其主要限制來自 UWB 量測流程與 PLC 通訊時間。

雲台指向誤差分析結果顯示，系統平均徑向指向誤差為 5.124 cm，RMSE 為 7.164 cm，且約 79.8% 之量測資料可維持於 3 cm 以內，顯示系統具有良好之指向穩定性。

綜合各項實驗結果可知，本研究所建置之系統已具備穩定之定位、方向計算及粗追蹤控制能力，可作為自由空間光通訊地面站之前級追蹤平台。

## 第五章 技術比較與應用價值分析

本章依據第四章實驗結果，將本研究與常見無人機追蹤技術及相關 UWB 定位系統進行比較，並分析系統整合能力、建置成本、應用價值與目前限制。比較重點為本研究之定位誤差是否具備工程使用價值。

### 5.1 無人機追蹤技術與比較框架

#### 5.1.1 常見追蹤技術

無人機追蹤常見技術包含視覺追蹤、雷達、光達（Light Detection and Ranging, LiDAR）與 UWB。視覺追蹤可由影像辨識目標並取得方向資訊，適合高更新率與精密追蹤，但容易受到光照、遮蔽及鏡頭視場影響。雷達與 LiDAR 具有良好的距離量測與環境感知能力，可應用於偵測及導航，但硬體與資料處理成本較高。UWB 則透過固定站與移動標籤進行測距及定位，不需先在影像中看見目標，適合提供三維位置與方向估測。比較如表 5.1。

表 5.1 無人機追蹤技術特性比較

| 技術類型     | 主要優點       | 主要限制     | 適合角色      |
|----------|------------|----------|-----------|
| 視覺追蹤     | 可辨識目標、更新率高 | 受光照與遮蔽影響 | 目標辨識與精密追蹤 |
| 雷達、LiDAR | 距離量測能力佳    | 成本較高     | 偵測與導航     |
| UWB 定位   | 不需先看到目標    | 需部署固定站   | 定位與方向估測   |

本研究採用 UWB 作為定位來源，利用多個固定站取得目標三維位置，再將座標轉換為方位角與仰角，並透過 PLC 驅動雙軸雲台完成方向指向。

## 5.2 本研究系與相關系統比較

### 5.2.1 定位性能比較

表 5.2 本研究與相關 UWB 系統比較

| 系統            | 定位誤差     | 類型                |
|---------------|----------|-------------------|
| 本研究           | 19.10 cm | UWB 定位 + 雲台整合     |
| Tiemann [16]  | 30.1 cm  | UAV 定位            |
| Bitcraze [17] | 約 10 cm  | 商用平台              |
| XRLoc [18]    | 2.4 cm   | 高性能研究系統<br>(參考上限) |

由表 5.2 可知，本研究整體 RMSE 為 19.10 cm。Tiemann 等人的多 UAV 定位系統之 3D Q95 約為 30.1 cm，可作為 decimeter-class 定位之比較依據 [16]；Bitcraze Loco 官方資料所列定位精度約為 10 cm 級，可作為商用研究平台之參考[17]；XRLoc 之動態中位誤差可達 2.4 cm，代表高性能 UWB 研究系統之公分級性能上限[18]。因此，本研究雖未達高性能系統之公分級精度，但與部分 UAV-UWB 系統仍屬相近誤差尺度，已具備提供目標位置資訊之能力。需注意各研究分別使用 RMSE、Q95 與中位誤差等不同指標，表中數值

主要用於判讀誤差量級，並非視為完全相同條件下的直接排名。

### 5.2.2 方向資訊與控制能力

如表 5.3，結果顯示方位角誤差較小，可提供較穩定的水平預指向資訊；仰角誤差則受 Z 軸定位影響較大，仍有改善空間。第四章亦確認角度至脈衝換算與 PLC 記錄一致，表示定位結果已可轉換為雲台控制命令。

表 5.3 本研究角度性能

| 項目  | MAE    | RMSE   |
|-----|--------|--------|
| 方位角 | 1.217° | 1.653° |
| 仰角  | 5.332° | 7.067° |

## 5.3 系統整合與成本分析

如表 5.4，本研究並非僅完成 UWB 定位，而是完成距離量測、定位解算、角度換算、PLC 通訊及雙軸雲台控制之完整流程。系統建置成本約為新臺幣 40,000 元，雖未進一步與其他研究系統進行成本比較，但已完成由定位資訊轉換為實際控制命令之工程整合驗證。

表 5.4 本研究系統整合能力

| 功能       | 本研究 |
|----------|-----|
| UWB 定位   | ✓   |
| 三維座標解算   | ✓   |
| 異常值處理    | ✓   |
| 方位角、仰角計算 | ✓   |
| PLC 控制   | ✓   |
| 雙軸雲台控制   | ✓   |
| 光學精密追蹤   | X   |

## 5.4 應用價值

無人機地面站定位：在固定站涵蓋範圍內提供目標三維座標與方向資訊。

光通訊目標擷取：協助雲台指向目標區域，縮小後級相機或光學感測器的搜尋範圍。

室內定位與導航：在全球導航衛星系統（Global Navigation Satellite System, GNSS）訊號受限環境中，提供合作式移動目標的位置來源。

## 5.5 綜合討論

綜合本章比較結果可知，本研究之整體定位 RMSE 為 19.10 cm，與部分 UAV-UWB 文獻同屬 decimeter-class 定位尺度，顯示系統已具備提供目標三

維位置資訊之能力。雖然定位精度尚未達到高性能 UWB 研究系統之公分級水準，但仍可作為無人機追蹤與目標定位之位置來源。

相較於僅進行定位驗證之研究，本研究完成 UWB 測距、三維座標解算、異常值處理、方位角與仰角計算、脈衝換算、PLC 通訊及雙軸雲台控制等功能，建立由定位資訊至控制輸出的完整流程。系統建置成本約為新臺幣 40,000 元，並完成實際硬體整合與功能驗證，具備作為無人機地面追蹤平台之工程實作價值。

然而，目前仍有部分功能尚待驗證，包括系統更新率與端到端延遲量測、雲台實際轉角精度驗證，以及光學回授與光通訊鏈路整合等。因此，本研究現階段較適合作為目標定位與方向指向平台，後續可透過改善固定站幾何配置、提升 Z 軸定位精度及導入光學感測器，進一步提升系統追蹤能力與實際應用範圍。

## 第六章 結論與未來工作

### 6.1 研究結論

本研究以無人機自由空間光通訊地面站之粗追蹤需求為背景，建置一套結合超寬頻定位系統、資料運算模組、PLC 控制器及雙軸雲台之自動追蹤平台。系統透過五個 UWB 固定站量測移動站與各固定站之距離資訊，利用最小平方法解算目標三維座標，再進一步轉換為方位角與仰角，並透過 PLC 輸出控制命令驅動雙軸雲台完成目標指向。

定位性能測試結果顯示，系統整體定位 RMSE 為 19.10 cm，其中部分測試點之誤差可維持於 10 cm 以內，顯示系統已具備提供目標位置資訊之能力。角度分析結果顯示，方位角平均絕對誤差為  $1.217^\circ$ ，仰角平均絕對誤差為  $5.332^\circ$ 。其中方位角具有較佳穩定性，而仰角誤差則受到固定站高度配置及 Z 軸定位誤差影響較為明顯。

此外，本研究完成定位資訊至控制命令之整合流程，包含距離量測、座標解算、角度計算、脈衝換算、PLC 通訊及雙軸雲台控制等功能驗證。實驗結果證明系統可將 UWB 定位結果轉換為實際雲台控制命令，完成追蹤平台建置。

### 6.2 研究貢獻

本研究之主要貢獻如下：

用於無人機載具之光通訊地面系統設計與整合測試

(1) 建立以 UWB 定位技術為基礎之無人機追蹤系統，並建置五固定站之三維定位系統。

(2) 建立由三維座標轉換為旋轉角之數學計算流程，使定位結果可直接應用於雲台指向控制。

(3) 完成 Python 程式、Modbus 通訊、PLC 控制器與雙軸伺服雲台之系統整合，建立由定位資訊至控制命令輸出的完整流程。

(4) 透過定位精度、角度誤差及控制命令驗證等實驗，評估系統於粗追蹤應用之可行性。

(5) 建立可供後續光學細追蹤及自由空間光通訊系統整合之實驗平台。

## 6.3 未來工作

首先，應改善 UWB 系統之 Z 軸定位精度。後續可增加固定站高度差並調整空間配置，重新校正各固定站座標與距離偏差，並導入殘差門檻、穩健加權或感測器融合方法，以降低垂直方向誤差及其對仰角計算結果之影響。

其次，完成系統更新率與延遲測試。可分別記錄 UWB 測距、座標解算、資料傳輸、PLC 交握及控制命令輸出時間，分析各階段之平均週期、變異與最大延遲，以評估系統可支援之目標移動速度與動態追蹤能力。

第三，進行雲台實際轉角驗證。未來可利用編碼器、電子傾角儀或外部光點量測設備，比較命令角度與雲台實際轉角，進一步量化零點偏差、機構間隙、

用於無人機載具之光通訊地面系統設計與整合測試

重複定位精度與遲滯現象，並建立相應之校正與補償方法。

最後，應整合相機、光電位置感測器或快速轉向鏡等光學細追蹤模組，使 UWB 定位資訊用於縮小目標搜尋範圍，再由光學回授完成較高精度之閉迴路指向控制。



## 參考文獻

- [1] Majumdar, A. K. (2015). *Advanced Free Space Optics (FSO): A Systems Approach*. Springer.
- [2] Kaushal, H., & Kaddoum, G. (2017). Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(1), 57-96.
- [3] Dabiri, M. T., Rezaee, M., Mohammadi, L., et al. (2022). *Modulating Retroreflector Based Free Space Optical Link for UAV-to-Ground Communications*. arXiv:2203.07234.
- [4] Carrasco-Casado, A., Vergaz, R., & Sanchez-Pena, J. M. (2015). *Design and early development of a UAV terminal and a ground station for laser communications*. arXiv:1506.08854.
- [5] Carrasco-Casado, A., Takenaka, H., Kolev, D., et al. (2017). *LEO-to-ground optical communications using SOTA (Small Optical Transponder): Payload verification results and experiments on space quantum communications*. arXiv:1708.01592.
- [6] Wang, J., Su, Z., Li, B., Zheng, W., & Gao, H. (2025). *Ground-Based Verification Method for Pointing and Acquisition Performance of Space Optical Communication System with Sub-Second Acquisition Time*. arXiv:2508.08950.
- [7] Gezici, S., Tian, Z., Giannakis, G. B., et al. (2005). Localization via Ultra-Wideband Radios: A Look at Positioning Aspects for Future Sensor Networks. *IEEE Signal Processing Magazine*, 22(4), 70-84.
- [8] Rathje, P., & Landsiedel, O. (2024). *Precise Ranging: Modeling Bias and Variance of Double-Sided Two-Way Ranging with TDoA Extraction under Multipath and NLOS Effects*. arXiv:2410.12826.
- [9] Zhao, W., Goudar, A., & Schoellig, A. P. (2022). *Finding the Right Place: Sensor Placement for UWB Time Difference of Arrival Localization in Cluttered Indoor Environments*. arXiv:2204.04508.
- [10] Nguyen, T.-M., Zaini, A. H., Wang, C., Guo, K., & Xie, L. (2018). *Robust Target-relative Localization with Ultra-Wideband Ranging and Communication*. arXiv:1802.08953.
- [11] Zhao, W., Panerati, J., & Schoellig, A. P. (2021). *Learning-based Bias Correction for Time Difference of Arrival Ultra-Wideband Localization of Resource-constrained Mobile Robots*. arXiv:2103.01885.
- [12] Modbus Organization. (2012). *MODBUS Application Protocol Specification V1.1b3*.
- [13] Byun, J.-H., Chae, S.-H., & Han, T.-D. (2018). *Accurate control of a pan-tilt*

- system based on parameterization of rotational motion*. arXiv:1812.00232.
- [14] Choi, C. L., Rebello, J., Koppel, L., et al. (2018). *Encoderless Gimbal Calibration of Dynamic Multi-Camera Clusters*. arXiv:1807.09304.
- [15] Qorvo. (2022). *DWM3001CDK Quick Start Guide (Rev. B)*. Qorvo, Inc.
- [16] Tiemann, J., Eckermann, F., & Wietfeld, C. (2017). Scalable and precise multi-UAV indoor navigation using TDOA-based UWB localization. *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*.
- [17] Bitcraze AB. (2026). *Loco Positioning System*.  
<https://www.bitcraze.io/documentation/system/positioning/loco-positioning-system/> (accessed 2026-06-15).
- [18] Arun, A., Saruwatari, S., Shah, S., & Bharadia, D. (2023). *XRLoc: Accurate UWB Localization to Realize XR Deployments*. arXiv:2307.12512.





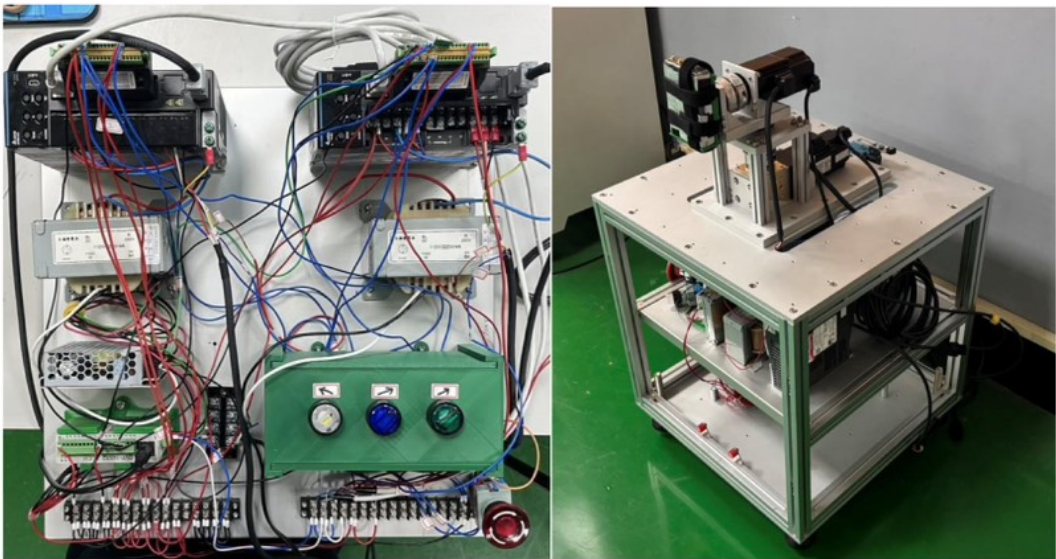
附錄 原始報告補充資料

# 指導教授諮詢紀錄表



114 學年度逢甲大學機械與電腦輔助工程學系

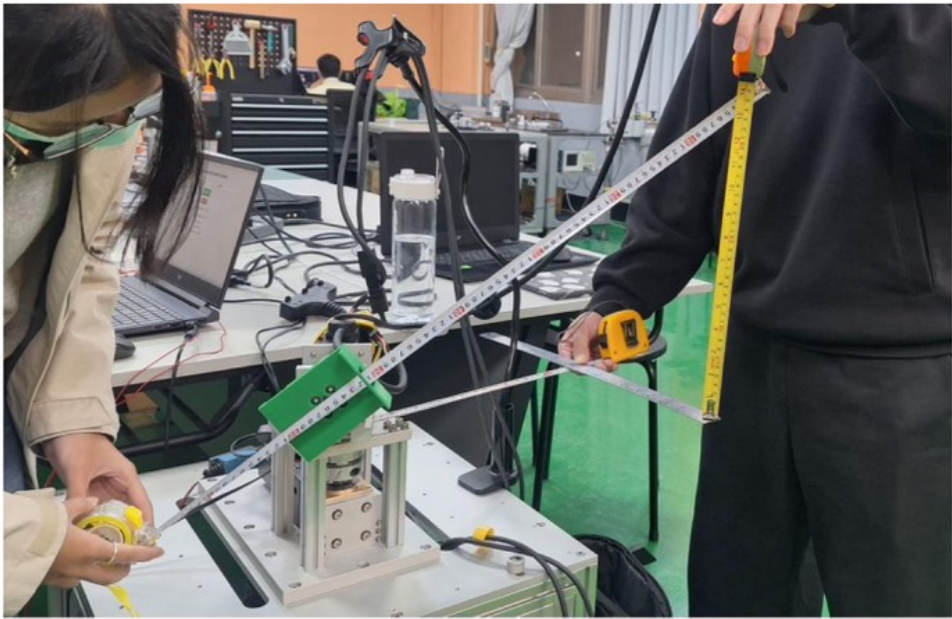
【專題實作(一)指導教授諮詢紀錄表】

|                                                                                                                                                                            |              |     |             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----|-------------|
| 日 期                                                                                                                                                                        | 10/15        | 時 間 | 17:00~17:30 |
| 組 別                                                                                                                                                                        | 第 28 組       |     |             |
| 組 員 簽 名                                                                                                                                                                    | 許祐瑜 蘇禮安 王譽閔. |     |             |
| 討論事項(學生填寫)                                                                                                                                                                 |              |     |             |
| <div></div> <p>1.更新平台:將原先的實驗平台換為較小的實驗平台，如右圖。</p> <p>2.電子元件配置:重新配置馬達與中間層電子元件的位置，如左圖。</p> |              |     |             |

指導教授簽名：黃振軒 共同指導教授簽名：\_\_\_\_\_

## 114 學年度逢甲大學機械與電腦輔助工程學系

### 【專題實作(一)指導教授諮詢紀錄表】

|                                                                                      |              |     |             |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----|-------------|
| 日 期                                                                                  | 11/7         | 時 間 | 17:00~17:30 |
| 組 別                                                                                  | 第 28 組       |     |             |
| 組 員 簽 名                                                                              | 許祐瑜 蔡禮安 王譽閔. |     |             |
| 討論事項(學生填寫)                                                                           |              |     |             |
|  |              |     |             |
| <p>運動方程式驗證：</p> <p>在電腦輸入座標命令馬達旋轉後，實際側量馬達指向的座標是否吻合。</p>                               |              |     |             |

指導教授簽名：黃振軒 共同指導教授簽名：\_\_\_\_\_

# 114 學年度逢甲大學機械與電腦輔助工程學系

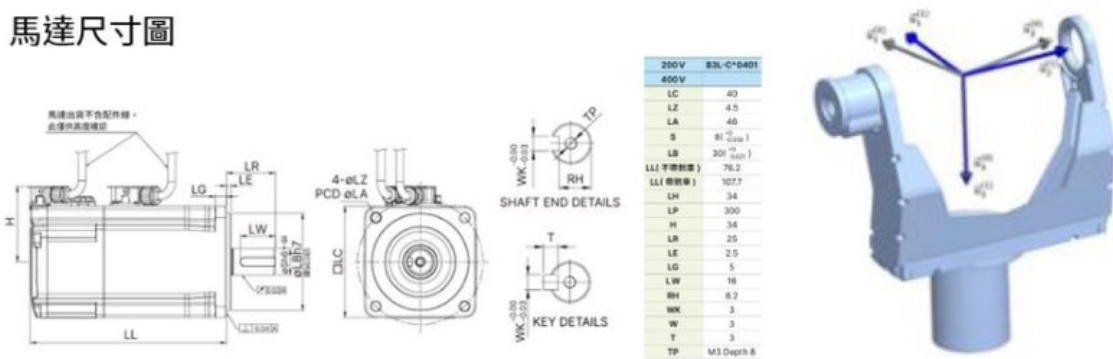
## 【專題實作(一)指導教授諮詢紀錄表】

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |              |     |             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----|-------------|
| 日 期                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 11/19        | 時 間 | 19:00~19:30 |
| 組 別                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 第 28 組       |     |             |
| 組 員 簽 名                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 許祐瑜 蔡禮安 王譽閔. |     |             |
| 討論事項(學生填寫)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |              |     |             |
| <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 20px;">             角度偵測系統<br/>流程圖           </div> <div> <pre> graph TD     Start([Start]) --&gt; Python1([Python])     Python1 --&gt; PLC[PLC 軟體]     PLC --&gt; Motor([馬達])     Motor --&gt; Encoder([編碼器])     Encoder --&gt; Python2([Python])             </pre> </div> </div> <p>1.雲台運作流程:為了確認馬達旋轉後會轉到指定位置，以建立此流程</p> <p>2.模擬無人機飛行之追蹤:預想無人機以直線飛行，建立直線方程式並將線上的點輸入電腦，讓雲台能連續指向在直線上的點。</p> |              |     |             |

指導教授簽名：黃振軒 共同指導教授簽名：\_\_\_\_\_

# 114 學年度逢甲大學機械與電腦輔助工程學系

## 【專題實作(一)指導教授諮詢紀錄表】

| 日 期                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 12/3        | 時 間 | 18:00~18:30 |      |            |    |    |    |     |    |    |   |           |    |            |            |      |          |       |    |    |    |     |   |    |    |    |    |     |    |   |    |    |    |     |    |   |   |   |   |   |    |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----|-------------|------|------------|----|----|----|-----|----|----|---|-----------|----|------------|------------|------|----------|-------|----|----|----|-----|---|----|----|----|----|-----|----|---|----|----|----|-----|----|---|---|---|---|---|----|------------|
| 組 別                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 第 28 組      |     |             |      |            |    |    |    |     |    |    |   |           |    |            |            |      |          |       |    |    |    |     |   |    |    |    |    |     |    |   |    |    |    |     |    |   |   |   |   |   |    |            |
| 組 員 簽 名                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 許祐瑜 蔡禮安 王譽閔 |     |             |      |            |    |    |    |     |    |    |   |           |    |            |            |      |          |       |    |    |    |     |   |    |    |    |    |     |    |   |    |    |    |     |    |   |   |   |   |   |    |            |
| 討論事項(學生填寫)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |             |     |             |      |            |    |    |    |     |    |    |   |           |    |            |            |      |          |       |    |    |    |     |   |    |    |    |    |     |    |   |    |    |    |     |    |   |   |   |   |   |    |            |
| <p>馬達尺寸圖</p>  <p>馬達尺寸圖包含側視圖、正面視圖、軸端細節圖和鍵細節圖。圖中標註了多個尺寸，如 LL, LR, LE, LW, LH, LP, H, LA, S, LB, LL1, LL2, WK, RH, T, WK, W, T, TP。此外還有一個 3D 模型顯示了機械結構。</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>200V</th> <th>30L-C*0401</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>LC</td><td>40</td></tr> <tr><td>LZ</td><td>4.5</td></tr> <tr><td>LA</td><td>40</td></tr> <tr><td>S</td><td>81 (2.00)</td></tr> <tr><td>LB</td><td>300 (7.62)</td></tr> <tr><td>LL1 (平槽距離)</td><td>76.2</td></tr> <tr><td>LL2 (槽距)</td><td>107.7</td></tr> <tr><td>LH</td><td>34</td></tr> <tr><td>LP</td><td>300</td></tr> <tr><td>H</td><td>34</td></tr> <tr><td>LR</td><td>25</td></tr> <tr><td>LE</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>LG</td><td>5</td></tr> <tr><td>LW</td><td>18</td></tr> <tr><td>BH</td><td>5.2</td></tr> <tr><td>WK</td><td>3</td></tr> <tr><td>W</td><td>3</td></tr> <tr><td>T</td><td>3</td></tr> <tr><td>TP</td><td>M3 Depth 8</td></tr> </tbody> </table> <ol style="list-style-type: none"> <li>雲台機構重新設計:驗證運動方程式後發現雲台有指向死角，所以需要重新設計上馬達機構改為搖籃機構。</li> <li>馬達更換:為了使搖籃機構的負擔減小，另外也不需要承受太高的負載，所以確認要更換為輸出功率更小的馬達。</li> </ol> |             |     |             | 200V | 30L-C*0401 | LC | 40 | LZ | 4.5 | LA | 40 | S | 81 (2.00) | LB | 300 (7.62) | LL1 (平槽距離) | 76.2 | LL2 (槽距) | 107.7 | LH | 34 | LP | 300 | H | 34 | LR | 25 | LE | 2.5 | LG | 5 | LW | 18 | BH | 5.2 | WK | 3 | W | 3 | T | 3 | TP | M3 Depth 8 |
| 200V                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 30L-C*0401  |     |             |      |            |    |    |    |     |    |    |   |           |    |            |            |      |          |       |    |    |    |     |   |    |    |    |    |     |    |   |    |    |    |     |    |   |   |   |   |   |    |            |
| LC                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 40          |     |             |      |            |    |    |    |     |    |    |   |           |    |            |            |      |          |       |    |    |    |     |   |    |    |    |    |     |    |   |    |    |    |     |    |   |   |   |   |   |    |            |
| LZ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 4.5         |     |             |      |            |    |    |    |     |    |    |   |           |    |            |            |      |          |       |    |    |    |     |   |    |    |    |    |     |    |   |    |    |    |     |    |   |   |   |   |   |    |            |
| LA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 40          |     |             |      |            |    |    |    |     |    |    |   |           |    |            |            |      |          |       |    |    |    |     |   |    |    |    |    |     |    |   |    |    |    |     |    |   |   |   |   |   |    |            |
| S                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 81 (2.00)   |     |             |      |            |    |    |    |     |    |    |   |           |    |            |            |      |          |       |    |    |    |     |   |    |    |    |    |     |    |   |    |    |    |     |    |   |   |   |   |   |    |            |
| LB                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 300 (7.62)  |     |             |      |            |    |    |    |     |    |    |   |           |    |            |            |      |          |       |    |    |    |     |   |    |    |    |    |     |    |   |    |    |    |     |    |   |   |   |   |   |    |            |
| LL1 (平槽距離)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 76.2        |     |             |      |            |    |    |    |     |    |    |   |           |    |            |            |      |          |       |    |    |    |     |   |    |    |    |    |     |    |   |    |    |    |     |    |   |   |   |   |   |    |            |
| LL2 (槽距)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 107.7       |     |             |      |            |    |    |    |     |    |    |   |           |    |            |            |      |          |       |    |    |    |     |   |    |    |    |    |     |    |   |    |    |    |     |    |   |   |   |   |   |    |            |
| LH                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 34          |     |             |      |            |    |    |    |     |    |    |   |           |    |            |            |      |          |       |    |    |    |     |   |    |    |    |    |     |    |   |    |    |    |     |    |   |   |   |   |   |    |            |
| LP                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 300         |     |             |      |            |    |    |    |     |    |    |   |           |    |            |            |      |          |       |    |    |    |     |   |    |    |    |    |     |    |   |    |    |    |     |    |   |   |   |   |   |    |            |
| H                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 34          |     |             |      |            |    |    |    |     |    |    |   |           |    |            |            |      |          |       |    |    |    |     |   |    |    |    |    |     |    |   |    |    |    |     |    |   |   |   |   |   |    |            |
| LR                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 25          |     |             |      |            |    |    |    |     |    |    |   |           |    |            |            |      |          |       |    |    |    |     |   |    |    |    |    |     |    |   |    |    |    |     |    |   |   |   |   |   |    |            |
| LE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 2.5         |     |             |      |            |    |    |    |     |    |    |   |           |    |            |            |      |          |       |    |    |    |     |   |    |    |    |    |     |    |   |    |    |    |     |    |   |   |   |   |   |    |            |
| LG                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 5           |     |             |      |            |    |    |    |     |    |    |   |           |    |            |            |      |          |       |    |    |    |     |   |    |    |    |    |     |    |   |    |    |    |     |    |   |   |   |   |   |    |            |
| LW                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 18          |     |             |      |            |    |    |    |     |    |    |   |           |    |            |            |      |          |       |    |    |    |     |   |    |    |    |    |     |    |   |    |    |    |     |    |   |   |   |   |   |    |            |
| BH                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 5.2         |     |             |      |            |    |    |    |     |    |    |   |           |    |            |            |      |          |       |    |    |    |     |   |    |    |    |    |     |    |   |    |    |    |     |    |   |   |   |   |   |    |            |
| WK                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 3           |     |             |      |            |    |    |    |     |    |    |   |           |    |            |            |      |          |       |    |    |    |     |   |    |    |    |    |     |    |   |    |    |    |     |    |   |   |   |   |   |    |            |
| W                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 3           |     |             |      |            |    |    |    |     |    |    |   |           |    |            |            |      |          |       |    |    |    |     |   |    |    |    |    |     |    |   |    |    |    |     |    |   |   |   |   |   |    |            |
| T                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 3           |     |             |      |            |    |    |    |     |    |    |   |           |    |            |            |      |          |       |    |    |    |     |   |    |    |    |    |     |    |   |    |    |    |     |    |   |   |   |   |   |    |            |
| TP                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | M3 Depth 8  |     |             |      |            |    |    |    |     |    |    |   |           |    |            |            |      |          |       |    |    |    |     |   |    |    |    |    |     |    |   |    |    |    |     |    |   |   |   |   |   |    |            |

指導教授簽名：黃振軒

共同指導教授簽名：\_\_\_\_\_

# 114 學年度逢甲大學機械與電腦輔助工程學系

## 【專題實作(二)指導教授諮詢紀錄表】

|                                                                                                                    |                 |     |             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----|-------------|
| 日 期                                                                                                                | 3/23            | 時 間 | 16:00~16:30 |
| 組 別                                                                                                                | 第 28 組          |     |             |
| 組 員 簽 名                                                                                                            | 王 峇 閣 . 許祐瑜 蔡禮安 |     |             |
| 討論事項(學生填寫)                                                                                                         |                 |     |             |
| <p>1. 雲台運動方程式的計算, 其座標的定義以及多軸的運動疊加, 要列出機構末端 (雷射發射點) 的運動軌跡, 以及其指向方向</p> <p>2. 機台規格制定, 其中需包含項目</p> <p>3. UWB 採購確認</p> |                 |     |             |

指導教授簽名： 林玉堂 共同指導教授簽名： \_\_\_\_\_

## 114 學年度逢甲大學機械與電腦輔助工程學系

### 【專題實作(二)指導教授諮詢紀錄表】

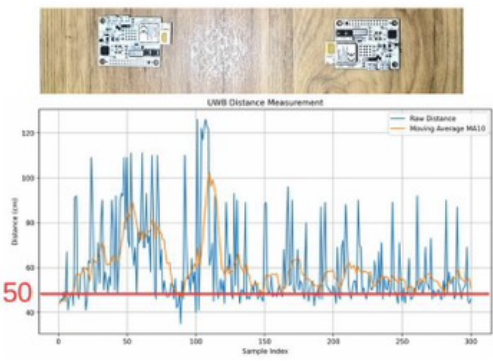
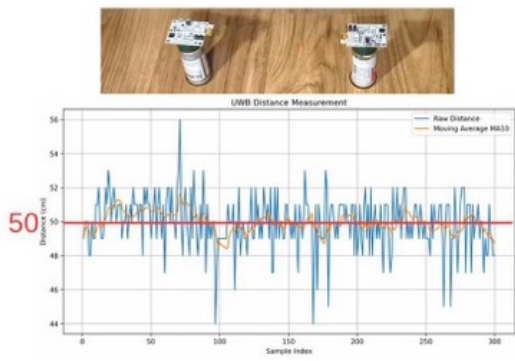
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                     |     |             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-----|-------------|
| 日 期                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 3/30                | 時 間 | 16:00~16:30 |
| 組 別                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 第 28 組              |     |             |
| 組 員 簽 名                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 王 鈺 閣 . 許 祐 瑜 蔡 禮 安 |     |             |
| 討論事項(學生填寫)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                     |     |             |
| <p>購買定位設備 RF 開發工具 DWM3001CDK</p> <p><b>DWM3001CDK</b><br/>Ultra-Wideband (UWB) Module Development Kit</p> <p><a href="#">Production &gt;</a></p> <div><p> <b>Product Brief</b><br/>Rev B – 05/2022</p></div> <p><b>Key Features</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Convenient kit for evaluation of <a href="#">DWM3001C</a> UWB module</li><li>• Interoperable with Apple U1 chip &amp; U2</li><li>• Supports UWB channels 5 (6.5 GHz) and 9 (8 GHz)</li><li>• J-Link on-board for debug and flashing via USB</li><li>• USB port for direct connection to DWM3001C USB interface</li><li>• 26 pin Raspberry Pi compatible header</li><li>• Reset and user-defined buttons and LEDs</li><li>• Access to all DWM3001C GPIOs and interfaces</li><li>• Fully aligned with FiRa™ PHY, MAC and certification development</li></ul> |                     |     |             |

指導教授簽名： 林玉盛

共同指導教授簽名： \_\_\_\_\_

# 114 學年度逢甲大學機械與電腦輔助工程學系

## 【專題實作(二)指導教授諮詢紀錄表】

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |               |     |             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----|-------------|
| 日 期                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 4/13          | 時 間 | 16:00~16:30 |
| 組 別                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 第 28 組        |     |             |
| 組 員 簽 名                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 王 峯 閣 許祐瑜 蔡禮安 |     |             |
| 討論事項(學生填寫)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |               |     |             |
| <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>測量值：35~126<br/>平均值：60.003<br/>標準差：18.759</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>測量值：44~56<br/>平均值：49.940<br/>標準差：1.572</p> </div> </div> <p>UWB 定位板之精度測試與補償、雲台減速機齒輪間隙誤差計算與補償，發現 UWB 定位板其天線周圍必須無遮擋物，以 50cm 為例有<math>\pm 4</math>cm 內誤差，雲台經過測量後發現方位角之旋轉有 <math>1^\circ</math> 左右的機械間隙，當控制方位角之馬達相較於上次旋轉為逆轉時需增加旋轉 <math>1^\circ</math> 填補機械間隙。</p> |               |     |             |

指導教授簽名： 林玉堂

共同指導教授簽名： \_\_\_\_\_

114 學年度逢甲大學機械與電腦輔助工程學系

【專題實作(二)指導教授諮詢紀錄表】

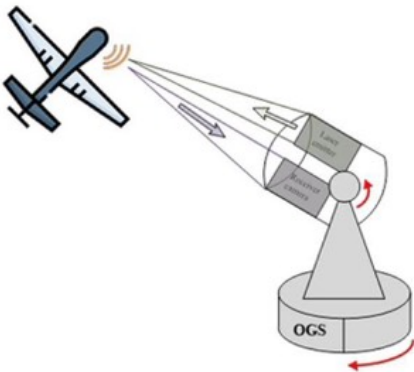
|                                                                 |                 |     |             |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------|-----|-------------|
| 日 期                                                             | 5/11            | 時 間 | 16:00~16:30 |
| 組 別                                                             | 第 28 組          |     |             |
| 組 員 簽 名                                                         | 王 鈞 閣 . 許祐瑜 蔡禮安 |     |             |
| 討論事項(學生填寫)                                                      |                 |     |             |
| <p>相較與本專題之追蹤無人機算法，尋找以發表的相關主題之論文，比較其方法或算法，我們是否有技術上的突破、創新或優勢。</p> |                 |     |             |

指導教授簽名： 林玉堂 共同指導教授簽名： \_\_\_\_\_

# 課前分組討論表

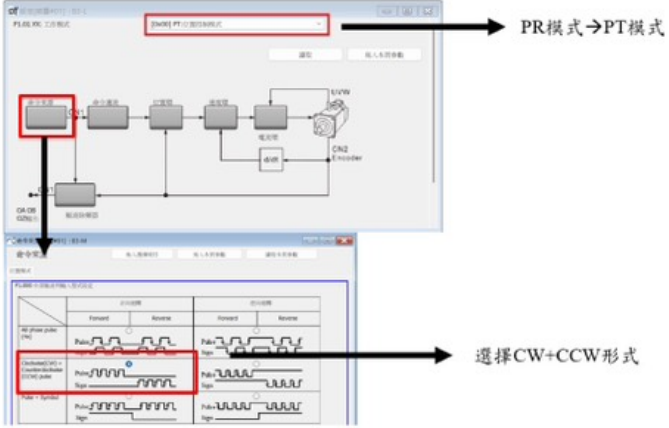
114 學年度逢甲大學機械與電腦輔助工程學系

## 【專題實作課前分組討論表】

|                     |                                                                                                      |     |             |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------------|
| 組別                  | 第 28 組                                                                                               |     |             |
| 日期                  | 114/9/17                                                                                             | 時間  | 15:00~17:00 |
| 地點                  | 工 406                                                                                                | 主持人 | 王譽閔         |
| 出席人員                | 許祐珣 許禮安 王譽閔.                                                                                         |     |             |
| 主席                  | 王譽閔.                                                                                                 |     |             |
| 討論議題                | <p>雲台需達成的目標</p>   |     |             |
| 決議內容<br>或欲提出之<br>問題 | <p>動態自動追蹤無人機</p> <p>當無人機經過，為了達成動態環境下保持穩定通訊，雲台需精準指向並追蹤無人機，預計追蹤精度可達到 0.2 度，並達到無死角追蹤，以滿足光通訊對準的嚴苛需求。</p> |     |             |

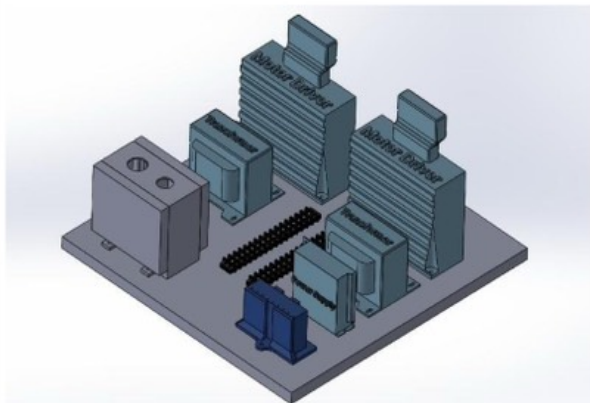
# 114 學年度逢甲大學機械與電腦輔助工程學系

## 【專題實作課前分組討論表】

|                         |                                                                                                                                       |       |             |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------|
| 組 別                     | 第 28 組                                                                                                                                |       |             |
| 日 期                     | 114/9/26                                                                                                                              | 時 間   | 15:00~17:00 |
| 地 點                     | 工 406                                                                                                                                 | 主 持 人 | 許祐瑜         |
| 出 席 人 員                 | 許祐瑜 許禮安 王譽閔                                                                                                                           |       |             |
| 主 席                     | 許祐瑜                                                                                                                                   |       |             |
| 討 論 議 題                 | <p>馬達命令模式</p>  <p>PR模式→PT模式</p> <p>選擇CW+CCW形式</p> |       |             |
| 決 議 內 容<br>或欲提出之<br>問 題 | <p>改為位置(脈衝)模式，為了更精準指向無人機，並讀取馬達內編碼器的數值以便精準控制馬達，由原先的速度模式改為位置模式，</p>                                                                     |       |             |

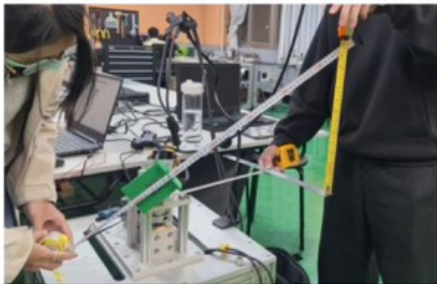
## 114 學年度逢甲大學機械與電腦輔助工程學系

### 【專題實作課前分組討論表】

|                         |                                                                                                      |       |             |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------|
| 組 別                     | 第 28 組                                                                                               |       |             |
| 日 期                     | 114/10/8                                                                                             | 時 間   | 17:00~19:00 |
| 地 點                     | 工 406                                                                                                | 主 持 人 | 蔡禮安         |
| 出 席 人 員                 | 許祐瑜 蔡禮安 王基閔.                                                                                         |       |             |
| 主 席                     | 蔡禮安                                                                                                  |       |             |
| 討 論 議 題                 | <p>雲台電子元件配置</p>  |       |             |
| 決 議 內 容<br>或欲提出之<br>問 題 | <p>規劃確定各個電子元件的位置並打孔，後續實際將各個電子元件鎖上並放置於實驗平台中間層</p>                                                     |       |             |

# 114 學年度逢甲大學機械與電腦輔助工程學系

## 【專題實作課前分組討論表】

|                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |       |             |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------|
| 組 別                         | 第 28 組                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |       |             |
| 日 期                         | 114/11/7                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 時 間   | 15:00~17:00 |
| 地 點                         | 工 406                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 主 持 人 | 許祐瑜         |
| 出 席 人 員                     | 許祐瑜 許禮安 王譽閔                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |       |             |
| 主 席                         | 許祐瑜                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |             |
| 討 論 議 題                     | <p>運動方程式驗證</p> <p>新增變數：<math>H = \sqrt{x_g^2 + y_g^2 - L_a^2}</math></p> <div style="background-color: #ffffcc; padding: 10px; display: inline-block;"> <p>最終算得<br/>運動方程式</p> <math display="block">\begin{cases} \theta = \tan^{-1}\left(\frac{y_g}{x_g}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{H}{L_a}\right) \\ L_b = \sqrt{H^2 + z_g^2} \\ \phi = \tan^{-1}\left(\frac{z_g}{H}\right) \end{cases}</math> </div>  |       |             |
| 決 議 內 容<br>或 欲 提 出 之<br>問 題 | <p>求得運動方程式後，將任意座標帶入，換算後命令雲台旋轉指向該座標，並實際測量，以驗證方程式準確無誤。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |       |             |

## 114 學年度逢甲大學機械與電腦輔助工程學系

### 【專題實作課前分組討論表】

|                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |       |             |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------|
| 組 別                         | 第 28 組                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |       |             |
| 日 期                         | 114/10/22                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 時 間   | 17:00~19:00 |
| 地 點                         | 工 406                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 主 持 人 | 王譽閔         |
| 出 席 人 員                     | 許祐瑜 蘇禮安 王譽閔.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |       |             |
| 主 席                         | 王譽閔.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |       |             |
| 討 論 議 題                     | <p>偵測無人機方式</p> <div data-bbox="475 1037 911 1193" data-label="Text"> <p>RTK 定位是一種衛星導航技術，利用一個已知位置的基準站 (Base) 和一個移動站 (Rover) 來實現高精度的即時定位。</p> </div> <div data-bbox="735 1066 1366 1464" data-label="Diagram"> <p>The diagram illustrates the RTK (Real-time Kinematic) positioning system. It shows a globe with a 3D coordinate system (x, y, z). A drone, labeled 'Rover', is shown with its own coordinate system (α, β, γ). A ground station, labeled 'Base', is also shown with its coordinate system (x, y, z). Dashed lines connect the Rover and Base to the globe, indicating the positioning process. The text explains that RTK is a satellite navigation technology that uses a known base station and a moving station to achieve high-precision real-time positioning.</p> </div> |       |             |
| 決 議 內 容<br>或 欲 提 出 之<br>問 題 | <p>決定利用衛星定位與 RTK 法</p> <p>利用衛星定位系統得到無人機與雲台的三維座標，再經由 RTK 法，交叉對比這兩個座標，得到無人機的精準座標，再換算成角度與脈衝值，並命令馬達旋轉。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |       |             |

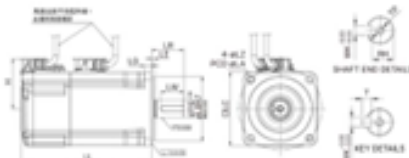
# 114 學年度逢甲大學機械與電腦輔助工程學系

## 【專題實作課前分組討論表】

|                         |                                                                                                                                                                                                                                                                      |       |             |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------|
| 組 別                     | 第 28 組                                                                                                                                                                                                                                                               |       |             |
| 日 期                     | 114/11/19                                                                                                                                                                                                                                                            | 時 間   | 17:00~19:00 |
| 地 點                     | 工 406                                                                                                                                                                                                                                                                | 主 持 人 | 許祐瑜         |
| 出 席 人 員                 | 許祐瑜 蘇禮安 王譽閔.                                                                                                                                                                                                                                                         |       |             |
| 主 席                     | 許祐瑜                                                                                                                                                                                                                                                                  |       |             |
| 討 論 議 題                 | <p>雲台運作流程</p> <pre> graph TD     Start([Start]) --&gt; Python1([Python])     Python1 --&gt; PLC([PLC 軟體])     PLC --&gt; Motor([馬達])     Motor --&gt; Encoder([編碼器])     Encoder --&gt; Python2([Python])     Python2 --&gt; End([End])     </pre> <p>角度偵測系統 流程圖</p> |       |             |
| 決 議 內 容<br>或欲提出之<br>問 題 | <p>輸入座標命令雲台旋轉後，無法非常精準的指向，有誤差存在，需要找出誤差的原因並補償，而執行的流程</p>                                                                                                                                                                                                               |       |             |

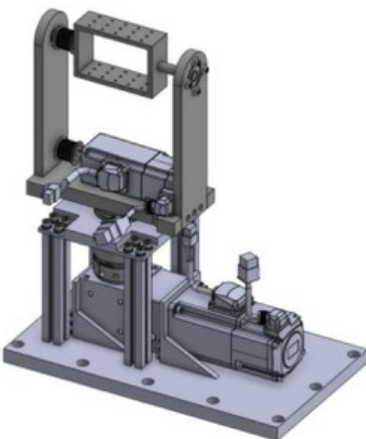
## 114 學年度逢甲大學機械與電腦輔助工程學系

### 【專題實作課前分組討論表】

| 組 別                     | 第 28 組                                                                                                                                                                                                                                                   |       |             |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------|
| 日 期                     | 114/11/26                                                                                                                                                                                                                                                | 時 間   | 17:00~18:00 |
| 地 點                     | 工 406                                                                                                                                                                                                                                                    | 主 持 人 | 蔡禮安         |
| 出席人員                    | 王 峇 閣. 許祐瑜 蔡禮安                                                                                                                                                                                                                                           |       |             |
| 主 席                     | 王 峇 閣.                                                                                                                                                                                                                                                   |       |             |
| 討 論 議 題                 | <p>馬達更換</p> <p>ECM-B3L-C20401SS1<br/>100W<br/>低慣量</p> <p>馬達尺寸圖</p>  <p>馬達規格</p>  |       |             |
| 決 議 內 容<br>或欲提出之<br>問 題 | <p>為了配合光通訊模組設備，負載變小，需更換功率更小的馬達，並重新設計上馬達機構</p>                                                                                                                                                                                                            |       |             |

# 114 學年度逢甲大學機械與電腦輔助工程學系

## 【專題實作課前分組討論表】

|                         |                                                                                                       |       |             |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------|
| 組 別                     | 第 28 組                                                                                                |       |             |
| 日 期                     | 12/5                                                                                                  | 時 間   | 15:00~17:00 |
| 地 點                     | 工 406                                                                                                 | 主 持 人 | 王譽閔         |
| 出 席 人 員                 | 許祐瑜 許禮安 王譽閔.                                                                                          |       |             |
| 主 席                     | 王譽閔.                                                                                                  |       |             |
| 討 論 議 題                 | <p>上馬達機構重新設計</p>  |       |             |
| 決 議 內 容<br>或欲提出之<br>問 題 | 將上馬達設計為搖籃式機構，讓光通訊設備無指向死角                                                                              |       |             |

# 114 學年度逢甲大學機械與電腦輔助工程學系

## 【專題實作課前分組討論表】

|                             |                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                            |                                    |                                                                                                                                                                                 |  |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| 組 別                         | 第 28 組                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                            |                                    |                                                                                                                                                                                 |  |
| 日 期                         | 3/9                                                                                                                                                          | 時 間                                                                                                                                                                                        | 15:30~16:30                        |                                                                                                                                                                                 |  |
| 地 點                         | 工 406                                                                                                                                                        | 主 持 人                                                                                                                                                                                      | 許祐瑜                                |                                                                                                                                                                                 |  |
| 出 席 人 員                     | 王 峇 閔. 許祐瑜 蔡禮安                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                            |                                    |                                                                                                                                                                                 |  |
| 主 席                         | 王 峇 閔.                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                            |                                    |                                                                                                                                                                                 |  |
| 討 論 議 題                     | 針對雙軸雷射指向系統之運動方程式進行檢討：<br><br>討論原角度計算中使用反正切函數 $\tan^{-1}$ 所可能產生之象限判斷問題，並評估改採 $\text{atan2}$ 函數之可行性與必要性，以提升目標點角度換算之正確性。                                        |                                                                                                                                                                                            |                                    |                                                                                                                                                                                 |  |
| 決 議 內 容<br>或 欲 提 出 之<br>問 題 | 經討論後，確認原方程式中以 $\tan^{-1}$ 計算角度時，可能因僅依賴比值關係而無法正確辨識目標點所在象限，造成角度方向誤判。為改善此問題，決議將水平角與俯仰角之計算改採 $\text{atan2}$ 函數，以同時考量座標正負號資訊，確保空間座標轉換之正確性，並提升後續馬達控制與雷射指向之精度。(如下圖) |                                                                                                                                                                                            |                                    |                                                                                                                                                                                 |  |
|                             | 原方程式                                                                                                                                                         | $\begin{cases} \theta = \tan^{-1}\left(\frac{y_g}{x_g}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{H}{L_a}\right) \\ L_a = \sqrt{H^2 + z_g^2} \\ \phi = \tan^{-1}\left(\frac{z_g}{H}\right) \end{cases}$ | $\tan^{-1}$<br>反正切函數               | $\tan^{-1}\left(\frac{z}{x}\right)$<br>$A \Rightarrow \tan^{-1}\left(\frac{1}{1}\right) = 45^\circ$<br>$B \Rightarrow \tan^{-1}\left(\frac{-1}{-1}\right) = 45^\circ$           |  |
|                             | 新方程式                                                                                                                                                         | $\begin{cases} \theta = \text{atan2}(y_g, x_g) - \text{atan2}(H, L_a) \\ L_a = \sqrt{H^2 + z_g^2} \\ \phi = \text{atan2}(z_g, H) \end{cases}$                                              | $\text{atan2}$<br>反正切函數<br>(帶方向判斷) | $\text{atan2}\left(\frac{z}{x}\right)$<br>$A \Rightarrow \text{atan2}\left(\frac{1}{1}\right) = 45^\circ$<br>$B \Rightarrow \text{atan2}\left(\frac{-1}{-1}\right) = 135^\circ$ |  |

## 114 學年度逢甲大學機械與電腦輔助工程學系

### 【專題實作課前分組討論表】

| 組 別                     | 第 28 組                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |       |             |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------|
| 日 期                     | 4/3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 時 間   | 15:30~16:30 |
| 地 點                     | 工 406                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 主 持 人 | 蔡禮安         |
| 出 席 人 員                 | 王 峇 閔, 許祐瑜, 蔡禮安                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |       |             |
| 主 席                     | 王 峇 閔                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |       |             |
| 討 論 議 題                 | <p>針對無人機定位技術進行選擇與評估。原先規劃採用 RTK (Real-Time Kinematic) 定位技術，以取得高精度座標，但考量其設備成本較高，且需搭配戶外環境與基站架設，不利於專題初期於室內實驗室進行測試。因此本次討論重點為：選擇一套成本較低、可於室內運作，且具備即時距離量測能力之替代定位方案。</p>                                                                                                                                                                                |       |             |
| 決 議 內 容<br>或欲提出之<br>問 題 | <p>經討論後，決議採用 Qorvo 之 DWM3001CDK UWB 開發板 (如下圖)，作為無人機定位之座標來源。具體理由如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 支援 UWB 高精度距離量測，適用於室內定位</li> <li>2. 可透過多基站架構進行座標推算 (多邊定位)</li> <li>3. 開發套件整合度高，便於快速建置實驗系統</li> <li>4. 成本相較 RTK 較低，適合專題初期開發與測試</li> </ol>  |       |             |

## 114 學年度逢甲大學機械與電腦輔助工程學系

### 【專題實作課前分組討論表】

| 組 別                     | 第 28 組                                                                                                                                                                                                                               |       |             |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------|
| 日 期                     | 4/13                                                                                                                                                                                                                                 | 時 間   | 15:30~16:30 |
| 地 點                     | 工 406                                                                                                                                                                                                                                | 主 持 人 | 許祐瑜         |
| 出 席 人 員                 | 王 峇 閣. 許祐瑜 蔡禮安                                                                                                                                                                                                                       |       |             |
| 主 席                     | 王 峇 閣.                                                                                                                                                                                                                               |       |             |
| 討 論 議 題                 | <p>針對 UWB 定位板之資料取得方式進行討論。原廠提供之軟體可直接顯示各裝置間距離，但其輸出格式可能不易匯入 Python 進行後續處理，將影響定位演算法與座標轉換（如旋轉角計算）之整合。因此本次討論重點為：是否應捨棄原廠軟體介面，改以 Python 直接控制與擷取資料，以提升系統整合性。</p>                                                                              |       |             |
| 決 議 內 容<br>或欲提出之<br>問 題 | <p>經討論後，決議採用 Python 作為主要控制與資料處理平台，直接與 UWB 定位板通訊，取代原廠軟體介面。具體方向如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 透過序列通訊擷取距離資料，便於即時處理</li> <li>2. 統一資料格式，提升後續演算法整合性</li> <li>3. 直接串接座標計算與角度轉換程式</li> <li>4. 降低系統整合複雜度，提升開發彈性</li> </ol> |       |             |

# 114 學年度逢甲大學機械與電腦輔助工程學系

## 【專題實作課前分組討論表】

|                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                          |       |             |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------|
| 組 別                     | 第 28 組                                                                                                                                                                                                                                                                                   |       |             |
| 日 期                     | 3/16                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 時 間   | 15:30~16:30 |
| 地 點                     | 工 406                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 主 持 人 | 蔡禮安         |
| 出 席 人 員                 | 王 峇 閣, 許祐瑜, 蔡禮安                                                                                                                                                                                                                                                                          |       |             |
| 主 席                     | 王 峇 閣                                                                                                                                                                                                                                                                                    |       |             |
| 討 論 議 題                 | <p>針對雙軸雷射指向系統之末端發射模組進行檢討，討論是否需重新設計雷射筆固定治具，以及治具之結構設計方向。原先雷射筆係以魔鬼氈固定於馬達末端，雖可快速安裝，但在實際旋轉與追蹤過程中，可能因固定剛性不足而產生晃動，進而影響雷射發射方向之穩定性與指向精度。因此，本次討論重點包含：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 是否有必要重新設計雷射筆固定治具。</li> <li>2. 新治具應如何提升固定穩定性與結構剛性。</li> <li>3. 如何兼顧雷射筆之常亮需求與後續充電便利性。</li> </ol> |       |             |
| 決 議 內 容<br>或欲提出之<br>問 題 | <p>經討論後，決議設計一款專用雷射筆治具，取代原先以魔鬼氈固定之方式，以提升雷射筆安裝穩定性與雷射發射精度。決議內容如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 改用機構式固定方式</li> <li>2. 提升雷射指向穩定性</li> <li>3. 設計常亮固定機構</li> <li>4. 預留充電孔位與使用空間</li> </ol>                                                                                     |       |             |

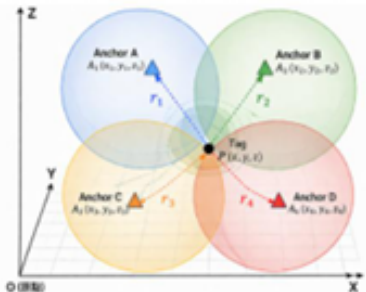
## 114 學年度逢甲大學機械與電腦輔助工程學系

### 【專題實作課前分組討論表】

| 組 別                     | 第 28 組                                                                                                                                          |       |             |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------|
| 日 期                     | 4/24                                                                                                                                            | 時 間   | 15:30~16:30 |
| 地 點                     | 工 406                                                                                                                                           | 主 持 人 | 蔡禮安         |
| 出 席 人 員                 | 王 峇 閔. 許祐瑜 蔡禮安                                                                                                                                  |       |             |
| 主 席                     | 王 峇 閔.                                                                                                                                          |       |             |
| 討 論 議 題                 | <p>討論馬達轉速及控制命令輸入源是否改變。原本使用 CW + CCW 模式控制馬達運轉，但因為輸出腳位的最高轉速設定不同，若要提升雲台響應能力必須提高轉速，因此必須轉換為 Pulse + Dir 模式。因此本次討論主題為：是否轉換控制模式以提升轉速從而縮短 PLC 掃描時間。</p> |       |             |
| 決 議 內 容<br>或欲提出之<br>問 題 | <p>經討論後，決定嘗試使用 Pulse + Dir 模式，並將轉速提升</p>                                                                                                        |       |             |

# 114 學年度逢甲大學機械與電腦輔助工程學系

## 【專題實作課前分組討論表】

| 組別          | 第 28 組                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |     |             |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------------|
| 日期          | 5/15                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 時間  | 13:00~14:00 |
| 地點          | 工 406                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 主持人 | 許祐瑜         |
| 出席人員        | 王峇閔、許祐瑜、蔡禮安                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |     |             |
| 主席          | 王峇閔                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |     |             |
| 討論議題        | <p>UWB 定位板之空間座標系，將 UWB 定位板距離資料轉換成移動站之空間中座標，以哪一點為原點設定五個固定站相對於原點的座標</p>  <div data-bbox="1077 1131 1356 1467"> <p><b>球面方程式</b><br/>           Tag 到每個 Anchor 的距離形成一個球面<br/> <math>(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = r_1^2</math><br/> <math>(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = r_2^2</math><br/> <math>(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = r_3^2</math><br/> <math>(x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2 = r_4^2</math></p> <p><b>幾何意義</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>每個 Anchor 以其量測距離為半徑形成一個球</li> <li>理想情況下，四個球面的交會點即為 Tag 位置 P</li> <li>實際量測存在誤差，四個球面通常不會完美相交</li> <li>透過最小平方估計求得最佳位置</li> </ul> </div> |     |             |
| 決議內容或欲提出之問題 | 以雲台旋轉軸心為空間中座標原點                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |             |

# 114 學年度逢甲大學機械與電腦輔助工程學系

## 【專題實作課前分組討論表】

| 組 別                     | 第 28 組                                                                                    |       |             |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------|
| 日 期                     | 5/18                                                                                      | 時 間   | 16:00~18:00 |
| 地 點                     | 工 406                                                                                     | 主 持 人 | 蔡禮安         |
| 出 席 人 員                 | 王 峇 閏. 許祐瑜 蔡禮安                                                                            |       |             |
| 主 席                     | 王 峇 閏.                                                                                    |       |             |
| 討 論 議 題                 | <p>整合 UWB 座標轉換算法與雲台指向座標點之程式碼，整合整體程式指令的流程與邏輯，以及嘗試固定站接於電腦，移動站以無線的方式，增加資料更新的頻率，使雲台追蹤移動站。</p> |       |             |
| 決 議 內 容<br>或欲提出之<br>問 題 | <p>整合為一個 Python 程式碼，礙於技術上的困難，1 個無限的移動站無法同時與 5 個移動站測量距離，最終決定移動站連接於電腦。</p>                  |       |             |

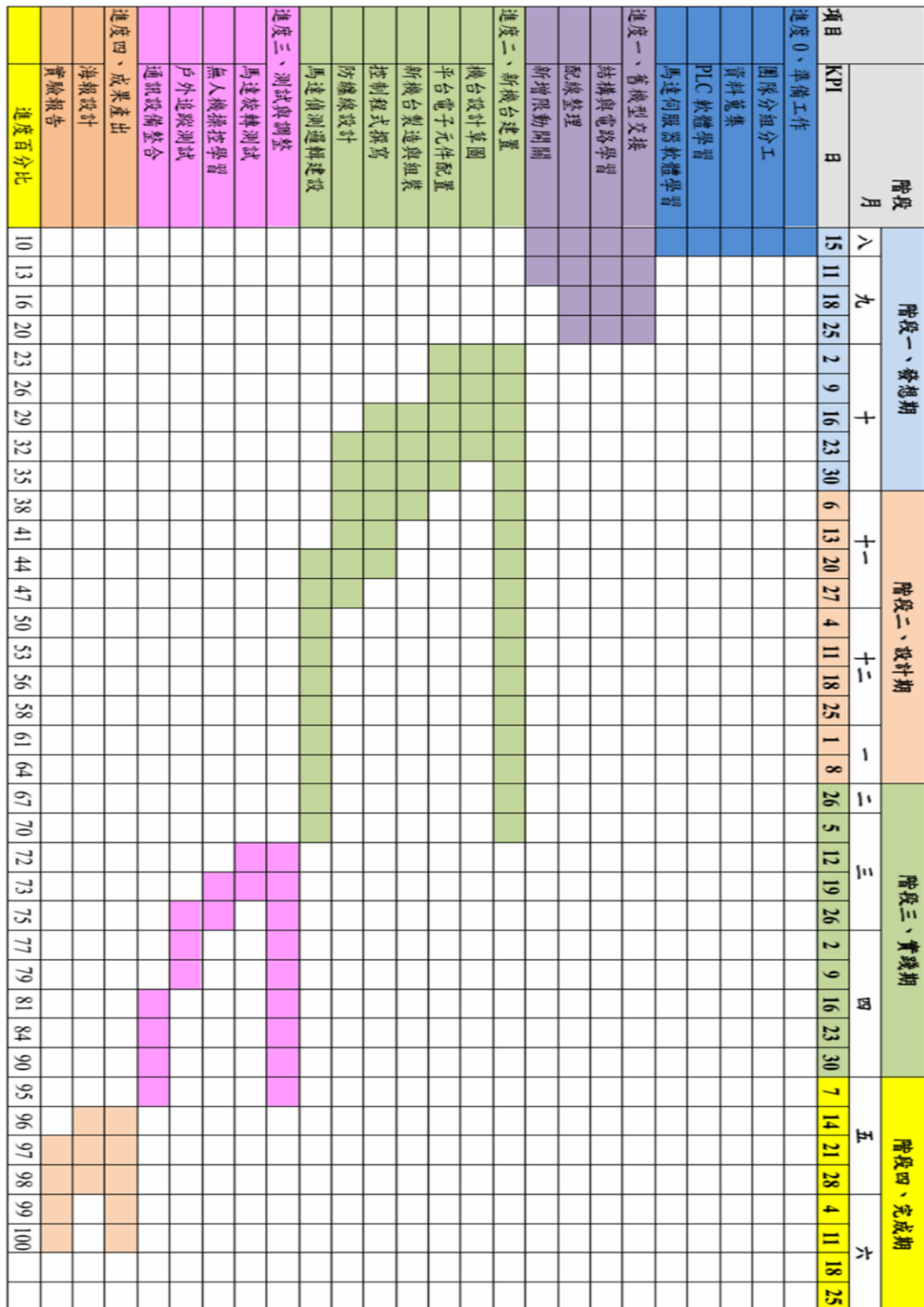
# 114 學年度逢甲大學機械與電腦輔助工程學系

## 【專題實作課前分組討論表】

|                         |                                                                            |       |             |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------|-------------|
| 組 別                     | 第 28 組                                                                     |       |             |
| 日 期                     | 6/4                                                                        | 時 間   | 16:00~18:00 |
| 地 點                     | 工 406                                                                      | 主 持 人 | 張禮安         |
| 出 席 人 員                 | 王 鈞 閣、 許祐瑜、 張禮安                                                            |       |             |
| 主 席                     | 王 鈞 閣                                                                      |       |             |
| 討 論 議 題                 | <p>UWB 定位系統也可以用 4 個定位板來求出座標，但利用 5 個定位板求出的座標更為精準，是否要為了更新資料的頻率，犧牲作標的精準度。</p> |       |             |
| 決 議 內 容<br>或欲提出之<br>問 題 | <p>維持原本的 5 個定位板求出座標，相較於資料更新率，座標精準更為重要。</p>                                 |       |             |

# 甘 梯 圖

## G a n t t c h a r t



# 群組反思與個人心得

\*\*\*\*\* 專題實作嘗試解決的問題必須具備的性質 \*\*\*\*\*

- (a) 需較深的知識才可以解決的問題。
- (b) 是一個實際的問題，沒有顯而易見的解決方法。
- (c) 問題本身可能對社會及環境有深遠的影響。
- (d) 需創新的應用專業基本原則及實務上最新的研究成果才可解決的問題。
- (e) 問題本身是多面向的或者是在技術、專業或其他層面上有可能發生相互牽制的情況。
- (f) 解決該問題時，需考量現實中多方資源的限制，例如人力、成本、設備、材料、資訊及技術等。

# 群組反思

## 1. 反思：專題是否都有符合六項「嘗試解決的問題必須具備的性質」。

本專題整體而言符合工程專題所要求的六項問題特性。研究目標並非單純完成一套雲台控制系統，而是針對光通訊地面站在追蹤移動無人機時所面臨的實際問題，嘗試提出完整的解決方案。由於自由空間光通訊具有高度方向性，若地面站無法即時追蹤目標，便可能造成通訊中斷，因此需要整合 UWB 定位、三維座標解算、逆運動學、PLC 控制以及雙軸雲台等多項技術才能完成系統建置。專題過程中除了需解決技術問題外，也必須考量硬體設備、成本、系統整合及定位精度等限制，因此符合複雜工程問題的特性。

## 2. 反思：專題符合六項「嘗試解決的問題必須具備的性質」之簡要例證。

(1) 本專題需同時運用 UWB 定位原理、最小平方法三維定位演算法、逆運動學、PLC 控制及伺服馬達控制等專業知識。例如在定位部分，需要利用五個固定站的距離資訊建立球面方程式，再透過最小平方法求得移動站座標，而非一般基礎課程即可完成的內容。

(2) 光通訊系統因光束發散角極小，必須精確指向目標才能維持通訊品質。當無人機持續移動時，地面站如何即時追蹤並修正方向是一項真實存在的工程問題，並不存在單一旦直接的解決方法，需要透過定位、控制及機構整合共同完成。

用於無人機載具之光通訊地面系統設計與整合測試

(3) 未來無人機光通訊技術可應用於智慧農業、災害監測、工業巡檢、物流運輸及國防安全等領域。若能建立可靠的追蹤系統，將有助於提升高速通訊能力與資訊安全性，因此具有實際應用價值與發展潛力。

(4) 本專題並非單純套用既有技術，而是將 UWB 定位技術、光通訊 PAT (Pointing, Acquisition and Tracking) 概念、逆運動學及工業控制系統進行整合，建立一套光通訊地面站粗追蹤平台。此系統架構參考相關研究成果，並依據實際需求進行設計與整合。

(5) 系統性能同時受到定位誤差、控制延遲、機械誤差及雲台結構限制影響。例如提高定位更新頻率可能增加系統運算負擔，而提升機構精度又會增加成本，因此各項因素之間存在相互牽制的關係，需要整體權衡。

(6) 專題製作過程必須考量實驗室現有設備、人力、經費以及開發時間限制，因此選擇以 UWB 作為粗追蹤感測器，以 PLC 作為控制核心，並利用現有雙軸雲台平台進行整合驗證，而非直接建置高成本的完整光學追蹤系統。

3. 反思：若有未能符合「嘗試解決的問題必須具備的性質」，檢討原因。

雖然本專題大致符合六項複雜工程問題的特性，但在第三項「對社會及環境具有深遠影響」方面，目前仍屬於基礎技術驗證階段，尚未直接應用於實際光通訊系統或無人機任務中。因此，目前的影響主要仍停留在研究與技術開發層面，尚未能充分展現對產業或社會的實際效益。此外，由於專題時間、人力與設備限制，本研究主要聚焦於粗追蹤功能驗證，尚未整合光學細追蹤系統及實際光通訊鏈路測試，因此在系統完整性與實際應用層面仍有進一步發展空

用於無人機載具之光通訊地面系統設計與整合測試

間。未來若能完成細追蹤模組、提升定位精度並進行實際無人機光通訊驗證，將更能展現本研究對未來高速無線通訊技術的貢獻。



# 個人心得

蔡禮安:

本次專題讓我深刻體會到完成一套完整工程系統的困難與價值。從最初的研究方向規劃、文獻閱讀，到後續硬體建置、程式撰寫與系統測試，每一個階段都需要投入大量時間與心力。尤其是在閱讀相關文獻時，我發現光通訊地面站追蹤系統並不是單純的機械控制問題，而是結合了定位技術、控制理論、運動學分析以及工業控制等多項技術。這讓我了解到現代工程技術的發展趨勢已經逐漸走向跨領域整合，單靠某一項專業知識往往難以完成完整系統。

在專題研究過程中，我認為最具挑戰性的部分是雙軸雲台逆運動學與實際控制的結合。雖然透過數學推導可以計算出理論上的方位角與仰角，但實際系統還需要考慮雲台結構尺寸、安裝位置、馬達方向以及零點校正等問題。許多原本看似簡單的角度計算，在實際應用時都需要額外的補償與修正，才能讓雲台真正指向目標位置。這讓我了解工程設計不只是套用公式，而是需要考量許多實際因素，並透過反覆測試逐步改善系統性能。

此外，在團隊合作方面也讓我獲益良多。專題研究往往無法由單一個人獨立完成，需要組員之間互相分工與合作。當遇到技術問題時，透過彼此討論常常能夠找到不同的解決思路，也能提高問題排除效率。在與組員共同努力完成專題的過程中，我學習到溝通協調的重要性，也培養了團隊合作能力。這些經驗不僅有助於專題完成，更能成為未來進入職場的重要基礎。

許祐瑜：

經過本次專題研究與實作，我最大的感受是工程技術的發展需要建立在扎實理論基礎與大量實驗驗證之上。過去在課堂中學習數學、程式設計、控制工程與機械設計時，常常會認為這些知識彼此獨立，但透過本專題才真正理解它們之間的關聯性。例如 UWB 定位系統需要利用數學方法進行三維座標解算，而雲台追蹤系統則需要透過逆運動學將空間座標轉換為旋轉角度，再結合 PLC 與伺服控制完成實際運動。這些技術環環相扣，缺少任何一部分都無法讓系統正常運作。

在研究過程中，我也深刻感受到工程問題往往沒有唯一答案。當系統出現誤差或異常時，可能是硬體設備、程式邏輯、通訊方式或機構設計等多種因素共同造成。因此我們必須透過有系統的分析方法逐步排除問題，而不是盲目修改程式或更換設備。這種解決問題的能力是在不斷嘗試與失敗中培養出來的，也是本次專題帶給我最重要的收穫之一。

另外，透過閱讀大量文獻與參考相關研究成果，我了解到學術研究的重要性。許多看似成熟的技術，其實背後都有許多學者長期投入研究與改進。透過閱讀文獻，不僅能學習他人的研究方法，也能避免重複犯下相同錯誤，進而提升研究效率。這讓我體會到學術研究與工程實務之間密不可分的關係。

整體而言，本次專題不僅讓我學習到 UWB 定位、PLC 控制、雙軸雲台以及光通訊相關知識，更培養了我獨立思考、分析問題與團隊合作的能力。雖然研究過程中遇到許多困難與挫折，但當系統逐漸完成並成功運作時，所獲得的

成就感也十分珍貴。我相信這段專題經驗將成為我大學生涯中重要的學習歷程，並對未來升學、研究與職涯發展帶來正面的幫助。

王譽閔：

透過本次專題研究，我對於 UWB 定位技術、PLC 控制系統以及雙軸雲台控制的整合應用有了更深入且完整的認識。以往在課堂中學習控制理論、機械設計與程式設計時，大多是分別接觸各項知識，很少有機會將不同領域的技術整合成一套完整系統。然而在專題實作過程中，我發現真正的工程問題往往需要跨領域知識共同配合才能解決。從文獻蒐集開始，我們需要了解光通訊系統的基本原理與追蹤需求，再進一步研究 UWB 定位技術如何取得目標位置資訊，以及如何利用逆運動學將目標座標轉換成雙軸雲台所需的旋轉角度。

在系統建置過程中，最大的收穫是學習到理論與實務之間存在相當大的差異。例如理論上的定位演算法雖然能夠順利推導，但實際量測時卻會受到環境反射、訊號遮蔽以及硬體誤差等因素影響，使得定位結果出現偏差。因此我們必須透過多次實驗驗證結果，並不斷調整參數來提升系統穩定性。此外，PLC 與 Python 之間的通訊整合也是一項挑戰，需要考慮資料傳輸格式、控制邏輯以及即時性問題。每當系統出現異常時，都必須逐步檢查軟體、通訊與硬體各個環節，才能找出真正的問題來源。

透過這次專題，我不僅提升了程式設計與控制系統整合能力，也學習到工程實務中解決問題的方法與態度。當遇到困難時，不能只依賴理論分析，而是需要透過實驗驗證與團隊討論尋找最佳解決方案。這段過程讓我更加了解工

用於無人機載具之光通訊地面系統設計與整合測試

程師在實際工作中所需具備的能力，也對未來從事智慧控制、自動化系統或機電整合相關領域產生更濃厚的興趣。



# 經費與資源明細

| 經費之品項     | 費用(元) |
|-----------|-------|
| UWB 定位板   | 6928  |
| 座標海報列印    | 120   |
| 電池盒×6     | 360   |
| 電池        | 879   |
| 雷射筆       | 579   |
| 傳輸線×4     | 236   |
| 5 公尺傳輸線×1 | 198   |

