



# 符號列表

## 座標系

$P$  座標點

$x, y, z$  座標點  $P$  的  $x, y, z$  分量

$V$  單位向量

$u, v, w$  單位向量  $V$  的  $x, y, z$  分量

$d, \alpha, \beta$  球座標系中的天頂角 (Zenith Angle)、方位角 (Azimuth Angle)、距離分量

## 座標系轉換

$H = \begin{bmatrix} Ro & T \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}$  齊次轉換矩陣 Homogeneous Transformation Matrix

$T = \begin{bmatrix} t_x & t_y & t_z \end{bmatrix}^T$  平移向量 Transfer Vector

$Ro = \{\gamma_{ij}\}$  旋轉矩陣 Rotation Matrix

## 硬體參數

符號 LED 硬體參數

$Ml$  LED 的朗伯次方 (Lambertian Order)

$Pt$  總輻射通量 (Total Radiation Flux)

符號 PD 硬體參數

$Mp$  PD 的朗伯次方 (Lambertian Order)

$A$  有效面積

$Re$  響應率 (Responsivity)

$s$  飽和電流

# LED 與 PD 的交互關係

$\phi$  PD 入射角

$\theta$  LED 出射角

$D$  距離



## 光學領域單位

符號	中文	英文	單位符號	國際單位制
$\Omega$	立體角	Solid Angle	$sr$	球面度 ( Steradian )
$\omega$	角度	Angle	$rad$	弧度 ( radian )
$r$	半徑	Radius	$m$	公尺
$\Phi$	輻射通量	Radiation Flux	$W$	瓦特 ( Watt )
$I$	輻射強度	Radiation Intensity	$W \cdot sr^{-1}$	瓦特每球面度
$E$	輻照度	Irradiance	$W \cdot m^{-2}$	瓦特每平方公尺

## 小標解釋

論文中由於座標系、硬體數量、樣本數量眾多，為了區分不同上下小標的意義，以圖1呈現各小標意思，左上標表示座標系，左下標顯示是哪個樣本，而右下標則依照物理量代表著 LED 或 PD 的編號，在 LED 與 PD 交互關係的物理量中右下標同時包含兩者的編號。

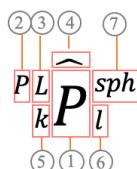


圖 1: 符號小標解釋

### (1) 符號

(2) 投影至的座標系： (  $P$ : PD 座標系 ;  $L$ : LED 座標系 )

(3) 定義於哪個座標系： (  $P$ : PD 座標系 ;  $L$ : LED 座標系 )

(4) 量測訊號： (  $\hat{\cdot}$  ) 代表該物理量為量測所得或處理量測所得訊號而得

(5) 樣本點： 第  $k$  個樣本點 (  $k = 1, 2, \dots, K$  )

(6) 硬體編號： 第  $p$  個 PD (  $p = 1, 2, \dots, P$  ) 或第  $l$  個 LED (  $l = 1, 2, \dots, L$  ) ; LED 與 PD 交互關係物理量的 (6) 小標為  $lp$  兩者的交互關係

(7) 使用的座標系統：以何種座標系呈現（無：卡氏座標系； $sph$ ：球座標系）

以下舉例解釋：

- ${}^P_k{}^{PL}\hat{T}$ ：第 k 個樣本點中，模擬量測方式所得到的 PD 座標系指向 LED 座標系的平移向量。
- ${}^L P_l, {}^{PL} P_l$ ： ${}^L P_l$  為第 l 個 LED 於 LED 座標系上的位置座標， ${}^{PL} P_l$  則是將其投影到 PD 座標系上
- ${}_k D_{lp}$ ：第 k 個樣本點鐘，第 l 個 LED 與第 p 個 PD 的距離  $Ml_i$ ：第 l 個 LED 的朗博次方





## 緒論

### 1.1 前言

隨著工業 4.0 的發展，著重於自動化、互連性，機器、人與環境之間的交互互動愈發頻繁，藉著物聯網（IoT）的能力，各領域對於量測資訊的需求大量增加，其中物聯網所包含的應用領域包含智慧工廠、智慧病房、智慧城市等參考圖 1.1 [1]。



圖 1.1: 物聯網應用的領域 [1]

在萬物互連的背景之下，感測器就像是人類的感官，透過不同種類的探測器量測各式各樣所需的資訊，例如位置、溫度、濕度、電壓、電流、轉速、流速、振動、影像等，各物體之間交換資訊，再透過電腦或是人為操作，下達任務與決策。各項量測資訊之中，相對位置為一重要量測資訊，缺乏位置資訊時，則像是失去地圖的駕駛，或是蒙住眼睛的人們，對於無論是移動、導航、一指令的下達與否，各項決策行為都會難以判斷。除此之外，定位在實務上也充滿挑戰，由於沒有任何一種感測器可以直接量測到相對位置，定位僅能透過多個感測器量測到



的距離、角度、影像等資訊，透過校正、運算以獲得定位資訊，並不像量測距離、溫度等感測器得以直接獲得的物理量一樣簡單。

室外場域中，相對位置需求最常見於載具，例如無人機之間的相互定位，以及自駕車之間的跟隨與溝通；除了載具以外，相對定位的量測在搜救、目標跟隨監視等情況下都有需求 [2]。現今室外定位主要仰賴全球衛星定位系統（Global Positioning System，以下簡稱 GPS）[3]，其原理是利用接收來自三個以上的衛星訊號，透過訊號傳輸時間判斷與各衛星的距離，進而獲得接收者的位置。即使現今的 GPS 既容易取得又有相較高精度 [4]，然而礙於衛星訊號受建築物體遮蔽的特性，GPS 仍然無法在市區、室內等障礙物較多的場域取得較高精度的定位 [5]，

隨著工業 4.0 的發展，室內應用物聯網技術的場域愈發多樣，例如圖 1.1 內提到的智慧工廠、智慧病房、智慧建築等場域，也因此帶動了室內定位的需求。然而，由於室內定位無法使用 GPS 技術，且室內定位的精度要求大多較室外定位高，因此發展一有效的室內定位方法獲得許多討論與研究關注 [6]。室內定位主要面對的困難與室外不同，室內定位需面對較多的障礙物、牆壁、人員物體的密集度使多重路徑傳輸（Multipath propagation）影響大，也使訊號衰減與散射較為嚴重，以上議題都會增加誤差與難度。眾多文獻中，[5] [6] [7] [4] [8] 皆提到相較可利用 GPS 系統的室外定位，室內定位的難度更高，且使用的硬體、演算法百百種，各自有優缺點，至今仍沒有一個領先群雄的解法。因此，我們於於 1.2 章釐清本研究的研究目標情境，再於 1.2.1 章了解室內定位需考量的面向，並以便挑選出最合適的系統。

## 1.2 目標情境

我們的主要目標為研究一移動物對另一特定物的相對定位方法，希望能將感測器與訊號發射器包裝成安裝方便的單位，成為可攜式的裝備。使用時，提供一量測單位與一被量測單位，兩者兼具易安裝、易移動的特性，得以靈活的將兩單位各自安裝在量測物與目標物上，在不同場域下進行三維的相對定位量測。

此目標是為了提供一彈性、能夠廣泛應用的設計，以彌補現今定位系統缺少的靈活度。現今大多系統皆是針對特定場域與地點、需大量事先校正與設置，但凡更換環境該系統則失效，難以廣泛應用。

因此，本研究最著重的面向為靈活度以及低演算法複雜度以達到即時應用的可能性；為了使硬體包裝成方便移動安裝的單位，則需選擇硬體體積較小的技術；再來為了能夠廣泛應用，則希望以較低成本的方法施做。

為更具體呈現目標的使用情境，以下舉實例描述：

### - 智慧工廠

隨著工業 4.0 與 5.0 的發展，人機互動以其機器間的互動越加頻繁，且工廠內也會從同品項大量製造，變成變化度高的製程，因此擁有靈活的量測



單位實為重要，可以隨時安裝在需定位的人、機械手臂、載具等上面，根據工作不同改變。

#### - 智慧病房

隨著輔具、病床智慧化，擁有靈活安裝的定位系統，能夠幫助機器與患者之間的定位，也能夠不受患者移動或是更動醫療器具影響。

#### - 其他

智能載具與服務目標的定位、輔助視障者理解目標方向、機場內針對各種載具與行李運送的量測、展場內的偵測引導等。

### 1.2.1 室內定位考量的面向

室內定位的方法非常多樣化，本論文參考 [7]，將室內定位依照技術（Technology）與方法（Technique）分類：技術所針對的是目標與量測者傳送訊號所使用的硬體種類，常見的技術包含相機、紅外線、可見光定位、無線網路（以下簡稱 WiFi）、藍芽、無線射頻辨識（Radio Frequency Identification，以下簡稱 RFID）等不同技術，於2.3中會更詳盡的介紹。

而方法則是探討不同訊號皆收與處理的方式，從接收訊號資訊的種類可分為訊號強度、時間、與角度；如何利用所接收到的資訊，進一步解出相對位置則於定位演算法分類，常見的包含多點定位（Multilateration）、三角測量（Triangulation）、指紋法（Fingerprinting）、以及利用幾何關係求解的演算法，於2.2中會進一步介紹。

在選擇合適的技術與方法以設計室內定位系統時，需考量許多面向，以下介紹室內定位需考量的因素，以及各面向與不同技術（詳述於2.3）、方法（詳述於2.2）的關聯：

#### - 精度

量測精度為量測所得的位置與目標物真實位置之間的歐幾里德距離（Euclidean Distance，以下簡稱歐式距離），多以公尺表示 [8]，普遍精度最高的技術為相機、紅外光 [6]，精度大多會在公分量級上下；相較精度較低的則為 WiFi 與藍芽，精度常會在公尺量級上下 [6]。然而為了達到高精度，需要與大多面向做取捨 [8]，例如欲達到較高的量測範圍、低成本、高靈活度等，都需要捨棄部分精度，難以同時兼顧。

#### - 量測範圍

相機、紅外光、可見光量測範圍大多會限制在五米內，超出此範圍後定位精度會快速下降；而 WiFi、藍芽、RFID 等覆蓋範圍則較廣，能夠達到十米以上的定位 [6]。



## - 成本

系統成本包含硬體設備成本與系統能耗等，成本與使用的技術種類關係較大，硬體成本屬於中高價位的有相機、紅外線、RFID，而 WiFi、藍芽、可見光定位則屬於建設成本較低的選項；能耗的部分則每篇論文皆有不同的看法，如 [9] 中認為 WiFi 為低能耗相較 [8] 認為其為高能耗，各篇論文中並沒有共識。

## - 靈活度

靈活度意指：是否能夠靈活的安裝以及使用，而所需的校正時間與系統設置難度都與方法較為相關。如指紋法需先蒐集大量數據，再與數據庫中的資料做交叉比對，此方法便需要花大量時間事先校正，並不能適應環境的改變，但凡環境與系統異動則原數據庫失效，大大限制了靈活度。且若需建立多個錨點 (Anchor)，也就是在環境中的多個位置放置接收器或是發射器，利用多個錨點的訊號來進行定位分析，此種類型的系統一樣需事先對環境設置與定位，呈現「環境對單點」的定位，系統架設複雜度高。此種類型能夠透過提高錨點的數量來提升精度與量測範圍，眾多技術中，訊號精度較低的技術如 WiFi、藍芽、RFID 較侷限在這種大規模的系統，靈活度低。

## - 是否定位可視範圍外

非可視範圍 (Non-Line-of-Sight, 以下簡稱 NLoS) 的定位，會擴大量測範圍，即可不受到環境障礙物的影響，即便是格著牆壁也可以進行定位。然而此舉也同時會造成訊號來源混亂，無法分辨此訊號強度為 LoS 傳遞而來的，還是穿透何種障礙物之後造成衰減的訊號，進而犧牲精度。而能夠穿透障礙物的多屬於使用低頻率電磁波的硬體技術，如 WiFi、藍芽、RFID，此特性也反應較低的精度上。

## - 即時應用

需進行即時應用的情境下，量測數據處理速度需夠快，以避免訊號延遲，因此經常犧牲訊號處理的複雜度及其附加的精度，或是提高成本增加硬體運算能力。訊號處理複雜度高最容易聯想到的便是相機，為了進行視覺辨識的高運算，該類型的系統多配備較好的演算單位 [4]；除此之外，主要影響因素則是該系統的演算法速度，各項技術與方法皆有演算法快與慢的方法，如何設計便是精度、功能與運算速度之間的取捨。

## - 目標物是否為特定物

定位技術大多指目標物為特定某物體的情況，因此系統需有分辨訊號發送者的能力，例如 WiFi、藍芽、RFID 都具有傳送訊息的能力且發展成熟 [8]，可見光與紅外線則是利用近年來發展的光通訊方法進行訊號傳輸，而相機則是利用視覺辨識判斷目標物；反之，超聲波與光達僅有分辨訊號的

有無，難以進行目標物辨識，因此大多應用在判斷障礙物存在與否的情境，較少在定位系統上出現。

### - 場域限制

特別需要注意的是機場與醫院，這兩種場域有可能會限制無線電波的使用 [10]，因此使用無線電波段的技術如 WiFi、藍芽、RFID 則需特別注意。

礙於如此多的特性與面向，一個面面俱到的方案是不存在的。因此在設計系統時，了解不同做法的優缺點，並了解系統目標情境與需求，進而對不同面向做出取捨，是完成有效室內定位系統的關鍵之一 [7]。

## 1.3 研究目的

雖然室內定位這個領域已經有許多文獻探討，然而針對此靈活度高、成本低、應用度廣泛的方法，仍沒有一個合適的方案。因此以這幾個面向為重點，於2.2與2.3中逐漸聚焦於發光二極體（Light Emitting Diode，以下簡稱 LED）與光電二極體（Photodiode，以下簡稱 PD）的近紅外光定位。針對此種技術與方法，設計一不限制應用場域，且目標物能夠自由移動的定位演算法，主要改善現今定位系統的侷限度，並將 LED 與 PD 定位系統中經常被忽略的硬體參數以及組態完整加入考慮。除了提出演算法外，針對不同使用情境進行最佳化，藉由挑選合適的硬體參數與組態，以提升系統定位精度與量測範圍。

- 聚焦於光波段定位：為了發展一靈活度高，能夠套用在不同場域與情境的室內定位方法，由不同方法與技術所著重的面向切入，將研究聚焦在光波段定位上。
- 完整模擬：光波段定位的領域中，朗博次方常被忽略，並不符合實際硬體挑選的狀況，因此本研究將其納入考量。
- 提出靈活的演算法：光波段定位的領域中，為了降低系統的複雜度，經常限制使用情境，例如限制目標物與觀察者需為平行，因此本論文提出一不限制情境的三維定位演算法，並以模擬分析誤差。
- 針對情境最佳化：將提出的演算法套用在不同的使用情境上，發展一套完整流程，針對其進行組態與硬體參數的最佳化。

## 1.4 論文架構

本研究分為六個章節，論文架構如下：

### 第一章 緒論

介紹研究主題，並描述本研究欲解決的問題與研究目的。



## 第二章 文獻回顧

介紹室內定位的不同技術與方法，並聚焦在利用 LED 與 PD 的光定位方法，提出此技術現今研究所不足面向。

## 第三章 LED 與 PD 定位演算法

詳細說明本研究利用 LED 與 PD 的相對定位演算法。

## 第四章 誤差分析

將第三章所提出的演算法進行誤差分析。

## 第五章 最佳化

建立針對組態與硬體參數的最機化問題，並提出一流程以針對不同量測情境與工況進行最佳化。

## 第六章 案例

針對不同情境進行最佳化，提出最佳解並探討成效。

## 第七章 結論

整理本研究之結果討論，並敘述後續研究之方向。

了解位置資訊，為機器與人類進行判斷與決策的基礎。反之，若能掌握空間中某特定物與自己的相對位置資訊，則可幫助新型載具、機械手臂與人類進行決策與執行任務，例如載具了解其他載具的位置、飛行器與遙控計之間的定位、智能載具與照護目標物的互動、機械手臂與夾取目標物的定位等。

綜上所述，獲取兩物之間的相對位置資訊，有其必要性。



## 第二章

# 室內定位相關文獻探討

統整本研究探討的情境（參考1.2）有以下需求：有易於拆裝的量測單位與被量測單位，能夠靈活應用於不同場域的三維相對定位。為滿足以上需求，需要有所需校正步驟少、體積小、能耗低、演算法簡單等特色。

在介紹本論文提出的定位方法之前，於2.1先定義相對定位開始，依照2.2中的分類，依序介紹定位方法2.2與定位技術2.3，比較各自的優缺點，根據需求聚焦在「LED 與 PD 定位技術」。2.4便針對「LED 與 PD 定位技術」進行深入探討，敘述此領域研究現況與困難。

## 2.1 相對定位定義

在開始進入文獻探討之前，需先以數學定義何謂本論文所欲量測之「相對定位」。我們將取得相對位置的一方稱為量測者，如案例中的機械手臂；而量測者所欲取得相對位置的特定物體稱為目標物，如案例中的移動載具；兩者皆為剛體。

因此，可以將量測者與目標物各自視為兩移動座標系如圖2.1，兩者在空間中各自有位置、旋轉的六個自由度，可以利用齊次座標轉換（Homogeneous Transformation）表示座標系之間的平移與旋轉（式2.1）， ${}^{PL}\mathbf{H}$  表示將 LED 座標系上的點轉換至 PD 座標系上的齊次轉換矩陣，而  ${}^{PL}\mathbf{T}$  與  ${}^{PL}\mathbf{Ro}$  各自代表平移與旋轉的轉換矩陣，符號可參考符號列表（第i頁）。

$$\begin{bmatrix} {}^{PL}\mathbf{P} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^{PL}\mathbf{H} \begin{bmatrix} {}^L\mathbf{P} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{PL}\mathbf{Ro} & {}^{PL}\mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^L\mathbf{P} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{PL}\gamma_{11} & {}^{PL}\gamma_{12} & {}^{PL}\gamma_{13} & {}^{PL}t_x \\ {}^{PL}\gamma_{21} & {}^{PL}\gamma_{22} & {}^{PL}\gamma_{23} & {}^{PL}t_y \\ {}^{PL}\gamma_{31} & {}^{PL}\gamma_{32} & {}^{PL}\gamma_{33} & {}^{PL}t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^Lx \\ {}^Ly \\ {}^Lz \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

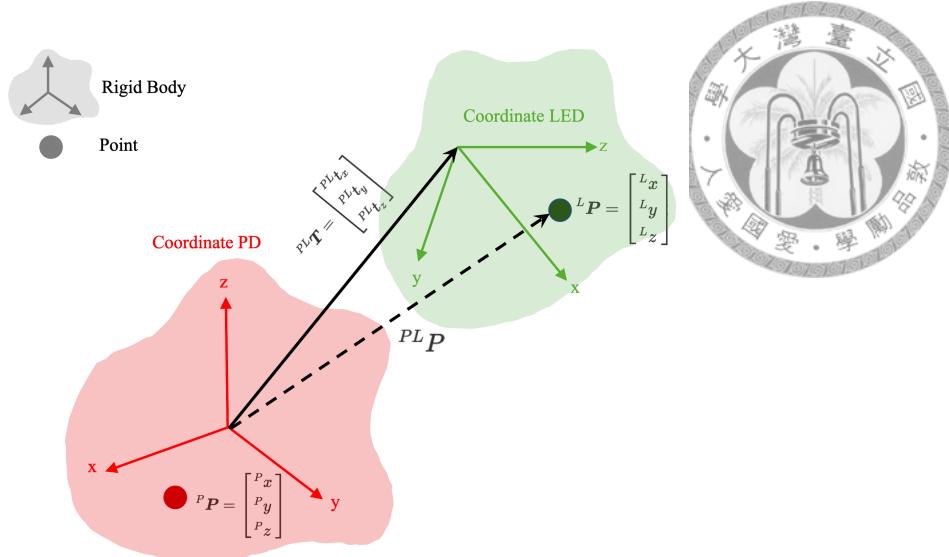


圖 2.1: LED 座標系與 PD 座標系及相對關係

其中，兩座標系之間的平移關係  $PLT$  即為欲得到的相對位置資訊，共有三個自由度。以上皆以卡氏座標系（Cartesian Coordinate）表示，然而在定位中也常使用球座標系表示，讓定位呈現「距離  $d$ 」與「方位  $(\alpha, \beta)$ 」，較為直觀，可將方位想像成「看哪裡」，而距離則為「看多遠」。兩座標系之間的換算如式2.2：

$$\begin{aligned} \mathbf{P}^{sph} &= \begin{bmatrix} d \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \\ \mathbf{P} &= \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d \sin \alpha \cos \beta \\ d \sin \alpha \sin \beta \\ d \cos \alpha \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.2)$$

在此需特別注意的是，LED 座標系與 PD 座標系指的是「兩空間中移動的座標系」，而卡氏座標系與球座標系則是座標系的呈現方式，LED 座標系可以用卡式座標系的  $x, y, z$  表達，也可以用球座標系的  $d, \alpha, \beta$  表示，PD 座標系亦然。

## 2.2 後處理方法分類

從定位流程2.2來看，目標物會主動或是被動的將訊號傳送至量測者硬體，量測者接收到訊號之後再以不同的方法進行後處理，計算出目標物與觀察者之間的相對關係。

後處理方法可以分成兩部分：室內定位所使用的硬體在接收訊號時，首先會根據量測者所接收的資訊種類有所不同；接收資訊後，如何利用資訊計算出相對位置，則是屬於定位演算法的部分。

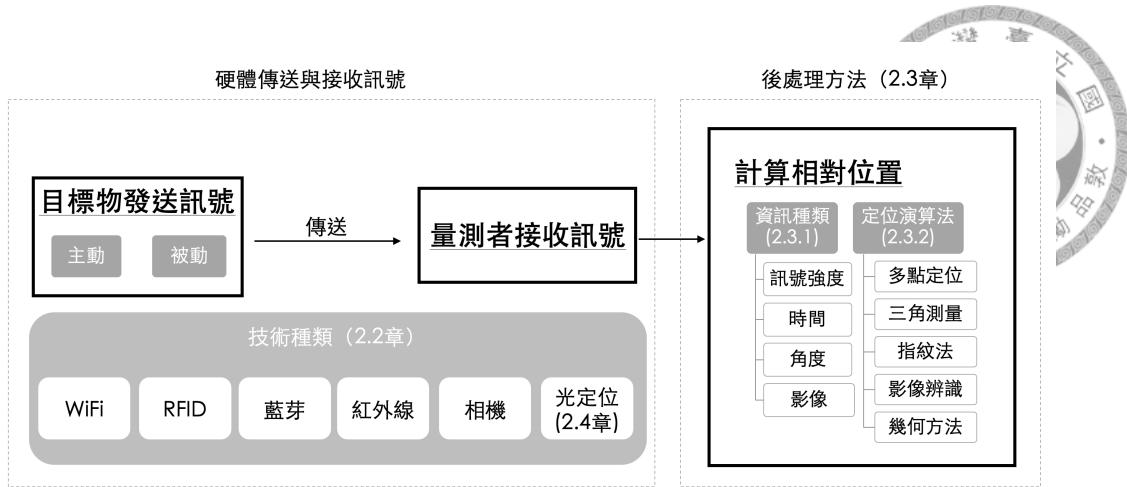


圖 2.2: 常見的室內定位流程與分類

### 2.2.1 資訊種類

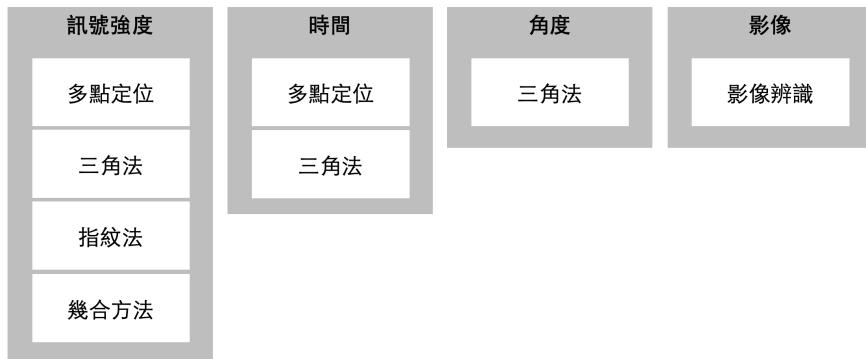


圖 2.3: 資訊種類與演算法之間的關聯 (參考 [5])

訊號強度 (Received Signal Strength, 簡寫 RSS) 為最常見的資訊種類 [7]，使用的是該硬體所接收到的訊號強度，而利用訊號強度的演算法也十分多樣，包含多點定位、三角法、指紋法等，可參考 2.2.2。

時間資訊種類則是硬體利用訊號之間的時間差，量測距離的方法，常見使用的技術為紅外線，紅外線可以利用訊號傳送到不同接收子的時間差，判斷出之間的距離。若要利用時間資訊，在各硬體之間則需要將時間同步，在實作上為一大挑戰 [6]。

若獲取的是角度資訊，基本上演算法便會搭配三角法，綜合多個接收子的角度獲得相對位置。

影像則屬於相機獨有，且定位演算法為影像辨識，目標物需有已知的特徵，透過辨識影像中的特徵點，藉由特徵點於影像中呈現的大小、變形，進行計算以回推兩者之間的距離。



## 2.2.2 定位演算法

常見的演算法種類如下：

### - 多點定位 ( Multilateration )

在環境中建立多個參考點並固定位置，利用目標物與多個參考點的距離，以各參考點為中心、距離為半徑畫圓求交點。

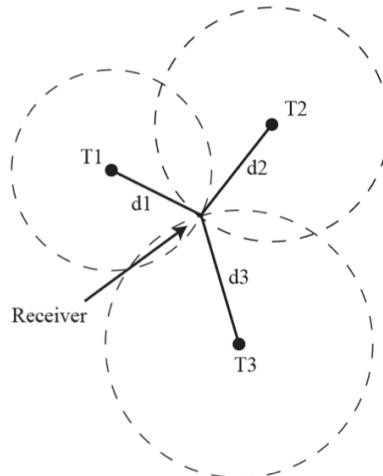


圖 2.4: 多點定位法 [4]

### - 三角測量 ( Triangulation )

在環境中建立多個參考點，藉由目標物與各參考點之間的角度關係，推算目標物位置。

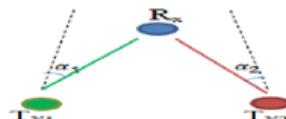


圖 2.5: 三角測量法 [11]

### - 指紋法 ( Fingerprinting )

指紋法在環境中建立多個參考點，在實際進行測量前，需進行事先測量訓練的階段。在訓練階段時需將目標物在環境中移動，蒐集大量訊號數據庫，量測階段則藉由接收訊號與訓練階段所建立的數據庫參照，尋找最有可能存在的位置 [4]，近年則是有許多以機器學習方法增加此演算法的精確度。

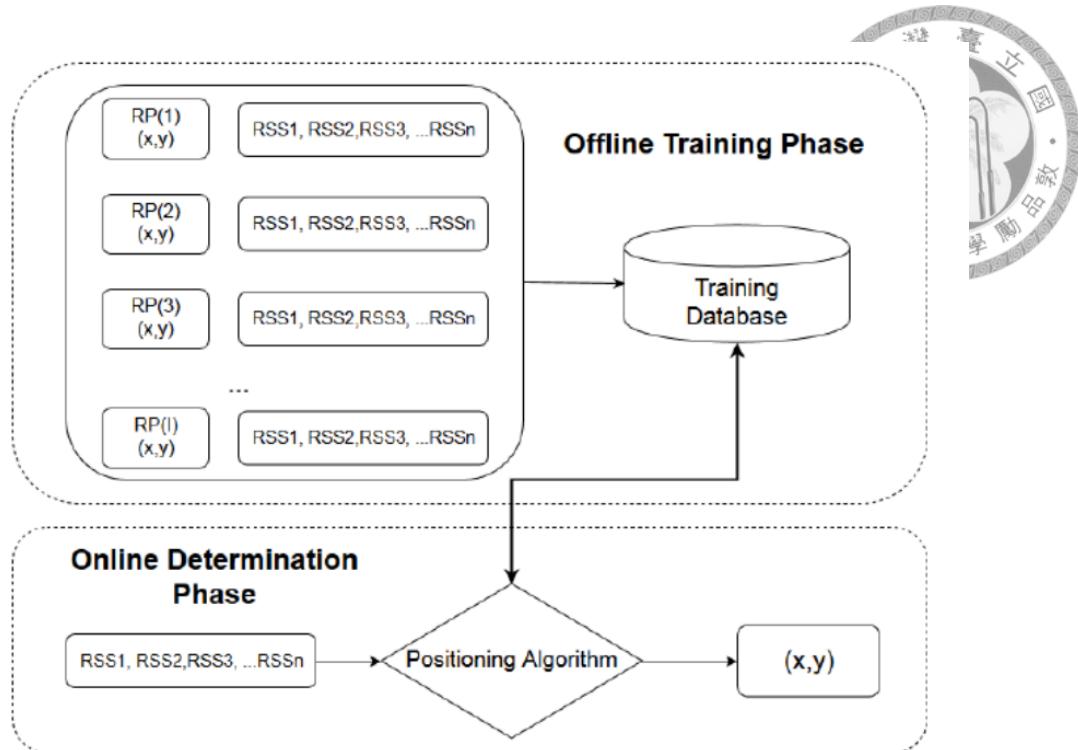


圖 2.6: 指紋法流程圖 [12]

### - 影像辨識

三維空間中的物體，透過相機拍攝成為二維的影像時，為三維空間投影至二維影像平面上的幾何轉換。利用影像辨識求解相對位置時，則是試圖將二維影像中的特徵點比對、轉換回三維空間中，利用 PnP 演算法 (Perspective-n-Point) 解出目標物相對相機座標系的位置與方位 [13]。

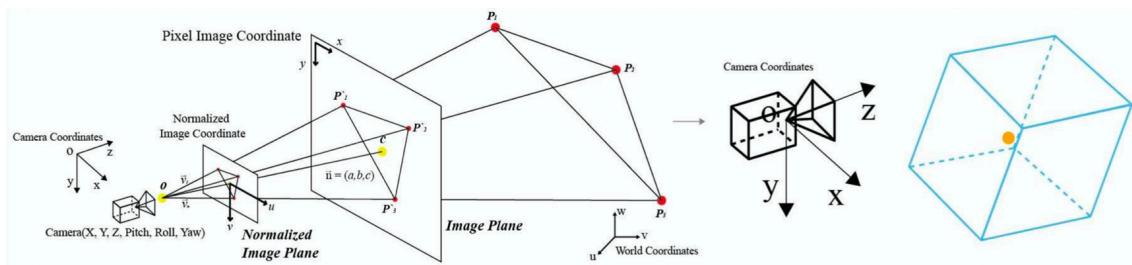


圖 2.7: 影像辨識示意圖 [13]

為了使辨識過程中，辨識特徵點的難度降低，通常會設計特徵明顯的標記，例如常見 OpenCV 中的 ArUco 標記，利用其快速的辨識 ID 以及距離、方位等資訊。

### - 幾何方法

此類方法常見於 LED 與 PD 的定位方法，並沒有一通用的分類名稱，其接收的訊號強度與距離與角度皆有關，因此需綜合多點定位與三角定位，

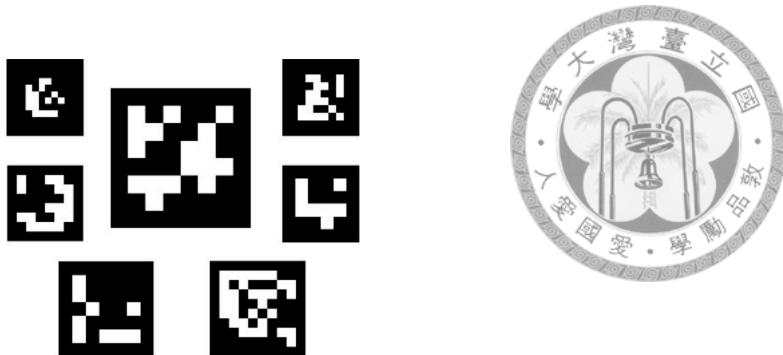


圖 2.8: ArUco 標記例子 [14]

透過訊號強度與相對位置之間的幾何關係推算相對位置 [4]。

#### - 其他

常見的其他種類演算法多會使用混合系統 ( Hybrid System ) [7]，除了使用量測距離、角度等位置資訊的感測器，多與其他量測姿態、速度的感測器結合使用，如動作捕捉 ( Motion Capture ) 領域中使用慣性量測單元 ( Inertial Measurement Unit，簡稱 IMU ) 量測點的移動軌跡。

### 2.2.3 小結

根據1.2所總結對靈活度等的需求，演算法的影響較為顯著，而其中幾何方法是最合適的，因為此方法主要利用的為「兩者之間的幾何關係」，較能夠適應不同環境、不同擺放位置的改變，做到「一對一的定位」。相較起來，多點定位、三角法、指紋法都需要多個固定點的參考點的量測環境，無法符合易於安裝單元的需求，可以想像成「環境對一點的定位」。

## 2.3 定位技術分類

室內定位所使用的技術 ( Technique ) 一樣十分多樣，非電磁波段的定位主要為超聲波，應用訊號發射與接收之間的時間差，推算與目標物之間的距離。然而該技術受溫度影響，且對目標物的辨識能力不佳，因此目前著重在自駕車與載具中障礙物的有無偵測上 [15]，並不符合研究目標，所以以下章節聚焦在電磁波段內的定位進行分析。

電磁波段內有許多不同現今受到關注的量測技術，電磁波段內常見的技術於1.2.1內有簡單介紹，而電磁波以光速傳播，擁有高傳播速度與不受介質溫度與濕度影響的特性，減少可能對量測訊號造成影響的因素。

我們由電磁波的頻率切入進行分類，頻譜圖如圖2.9，能夠用於定位的波段為頻率低於約 790THz 的波段，因為高於此波段的電磁波具有過高能量，電磁波頻率越高所含能量越高使高頻波段對人體有害，因此此波段中的 X 光、紫外線、伽瑪射線無法使用於日常應用，不予考慮。

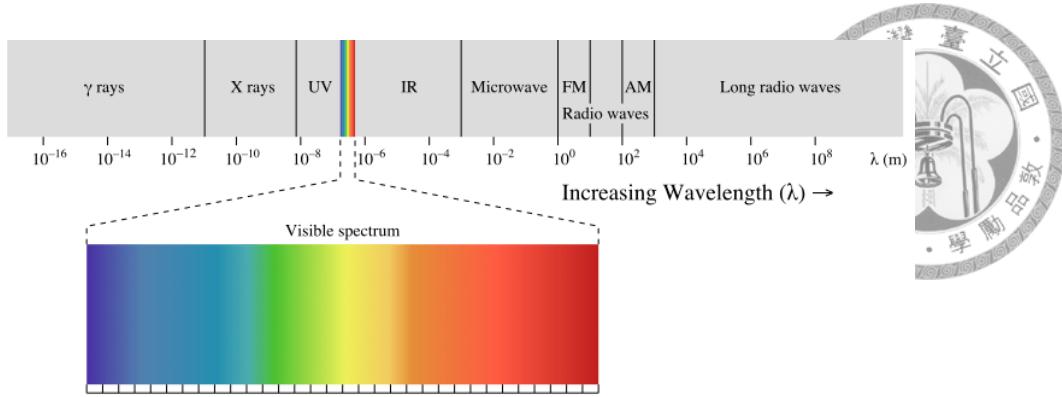


圖 2.9: 電磁波頻譜度 [16]

對人體無害的波段則分為兩部分探討：2.3.1探討頻率低於 300GHz 的低頻波段 [17]，使用此波段的技術包含 WiFi、藍芽、RFID；而在2.3.2介紹頻率介於 790THz 與 300GHz 之間的光波段，此波段的技術包含紅外線、可見光定位以及相機定位。以下章節便以圖2.10為架構依序介紹。

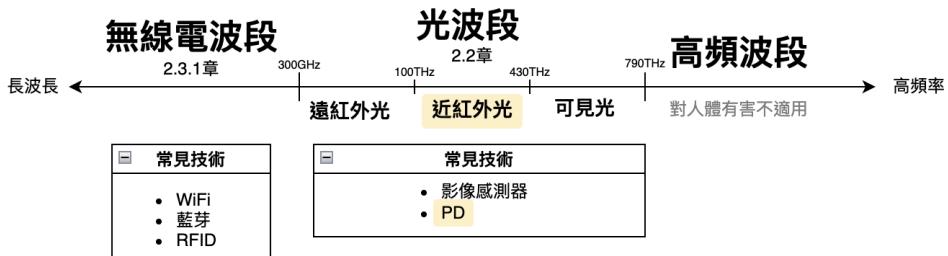


圖 2.10: 以電磁波頻率分類定位技術

### 2.3.1 無線電波段定位

低頻波段也就是俗稱的無線電波（Radio Waves），應用發展歷史長，對於可使用的頻率有嚴格規範，台灣由國家通訊委員會訂定嚴格的可使用頻率波段 [18]，保證軍警、醫療、廣播等的傳播需求。常見的定位技術包含室內與多數裝置既有的 WiFi 與藍芽裝置，或是較新的 RFID 定位技術。

無線電波的主要特色包含可穿透大多障礙物，因此可用於跨房間非可視範圍（NLoS）的定位 [7]，增加了應用場域，然而也大大提升了訊號處理的難度，感測器難以辨別訊號衰減原因為距離、角度、亦或是障礙物，因此選擇非可視範圍內定位即捨棄精度。除此之外，無線電波的傳遞距離很長，定位範圍較廣，WiFi 甚至可達距離 50 公尺的定位 [6]。所需面對的誤差處理包含電磁干擾、同頻道干擾（Co-channel Interference）、受障礙物與金屬影響的穿透效果等。

至於無線電波段所使用的定位演算法，大多系統皆是利用指紋法、多點定位、三角法的方式，共通點是都需要多個參考點，事先的安裝複雜，應用場域著重在固定場域，而精度多為公尺量級。



舉例來說，此波段大多應用在固定的場域中，方法包含指紋法的建立數據庫，或是利用大量的感測器與訊號發射器來判斷定位 [19]，系統設置皆與圖2.11相似，差異於感測器擺放的方法以及演算法。其中，最經典的 LANDMARC 例子 [20] 的環境如圖2.12所示，也是將感測器散布於環境中。

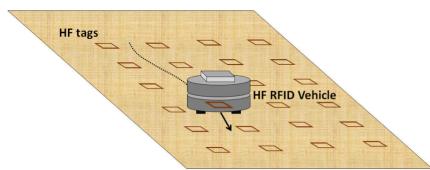


圖 2.11: RFID 定位系統示意 [19]

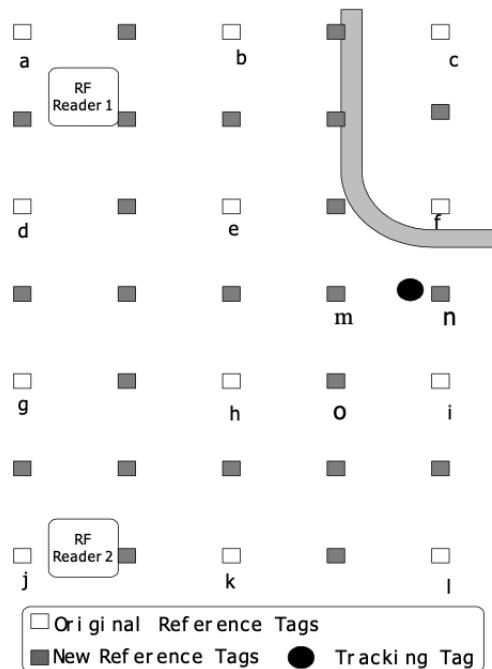


圖 2.12: LANDMARC 系統 [20]

無線電波段也有少數例用2.2.2中所提到的三角法，如 [21] 研究（圖2.13），例用 RFID 天線所接收到的訊號強度與入射角度的關係，在載具上放置兩天線，而擺放角度有 90 度的差異，藉由 RFID 發射器傳送訊號至天線的入射角度不同，計算出目標物的方位。此文獻提出了一種一對一定位的方法，然而其只能解出目標物的方位，也就是二維定位中的角度，並不包含距離。除此之外，由於可穿透障礙物的特色，隨著測試環境中添加障礙物、人、移動物品，皆會影響到訊號，造成誤差。

最後總結無線電波段的特色：此波段常使用於傳輸訊號的功能上，因此有成熟的編碼與解碼技術，能夠輕易達到辨識目標物的功能；而能夠穿透障礙物的特性，以及傳輸距離廣，使得應用範圍大又不受視線範圍拘束；然而精度相較低，

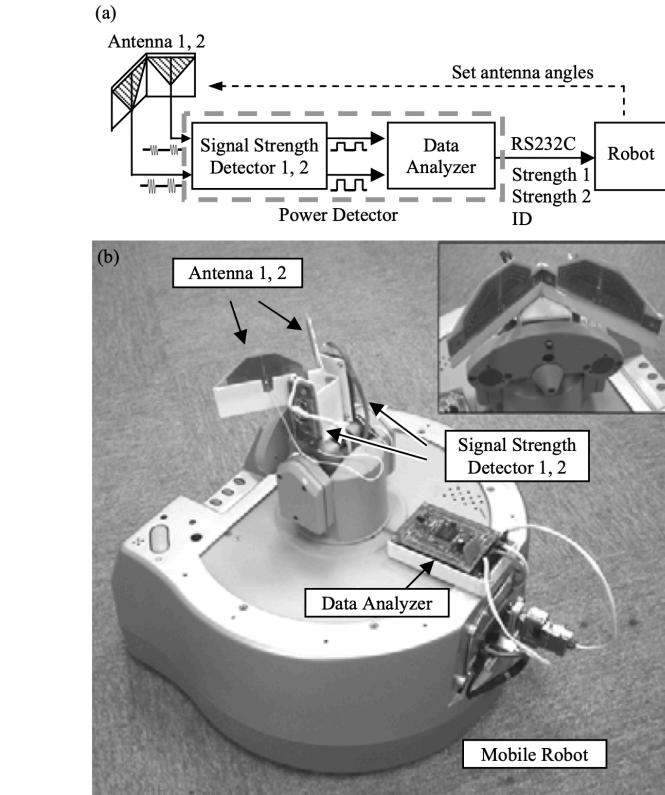


圖 2.13: 例用三角法定位的 RFID 系統 [21](a) 系統架構 (b) 載具實驗

因此大多仰賴多個參考點或是事前建立數據庫的指紋法，應用的靈活度降低，較不符合本研究目標，因此著重在2.3.2章中的光波段定位。

### 2.3.2 光波段定位

光波段的定位發展近幾年來十分顯著，主要因為光學硬體上的進步，促使光通訊（Light Communication）的發展，使發光與感光元件具有傳播 ID、訊息等資訊的能力，因此光通訊與光定位便於近年得到研究關注 [5]。光通訊流程如圖2.14所示，利用驅動器調控光源的閃爍頻率、發光強度，來達到編碼的效果，最常見的編碼方式即為關閉調控（On-Off Keying，以下簡稱 OOK），藉由開關光源傳送一段二進制訊號；感測器多以 PD 接收，接收後透過解碼取得資訊 [22]。

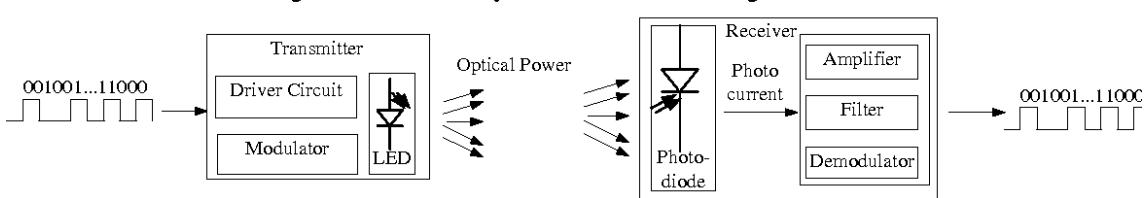


圖 2.14: 光通訊流程圖 [22]

光波段在應用場域有一優勢，其可應用於無線電波限制的場域，如機場與

醫院等特殊醫療場域 [10]，且在如今無線電波訊號充斥環境的狀況下，即使無線電波擁有很廣頻率選擇，然而隨著現進通訊需求的提升，無線電波段已被證實有塞車的狀況出現，而光波段即提供一替代方案，應對此困境。

再來，光波段無法穿透障礙物，僅能進行可視範圍內（Line-of-Sight，以下簡稱 LoS）的定位，捨棄廣域的定位，獲得較為單純的量測數據。此特性同時增加光通訊的安全性以及穩定度，著重針對可視範圍進行通訊與定位，不必考量其他訊號，也不受多餘訊號的干擾 [23]。例如載具運行時，僅需著重分析於身旁的其他物體，位於隔壁房間的物體毫不重要，因此可忽略不重要的資訊，增加處理速度與有用訊號穩定度。即便如此，僅能進行 LoS 定位也限制了能夠量測的範圍，在環境阻擋物較為複雜的環境會擋住光訊號的傳輸，使其無法進行定位。

除此之外，電磁波有一特性為：波長愈短可達到的量測精度愈高，且感測器與訊號發射器的硬體大小也愈小，例如市售便宜常見的光波段感測器如 PD 感光二極體尺寸量級為 mm 或以下 [24] 且能耗低，而使用低頻波段的 RFID 感測器常見量級為 cm [25]。因此，選擇波長較短的光波段相較無線電波段具有硬體上的優勢。

	無線電波段	光波段
通訊能力	較強	較弱
視線範圍外的定位	可以	無法
精度	較低	較高
量測範圍	較大	較小
安全性	較低	較高
醫院與機場的使用	無法	可以
硬體大小	較大	較小
常用演算法	多點定位 指紋法	多點定位 指紋法 幾何方法

圖 2.15: 無線電波段與光波段的比較

光波段定位也分為許多種類（參考圖2.10），以下分別於2.3.2.1探討使用波段的差異，以及於2.3.2.2介紹感測器硬體技術的選擇。

### 2.3.2.1 波段分類

參考圖2.10，光波段依照人眼可視與否分成可見光與紅外光兩類，而其中紅外光內由於硬體特性不同，又分為近紅外光與遠紅外光。以下依照不同面向條列



討論：

### - 人眼可視與否

依照人眼可視區分為可見光與紅外光波段，而紅外光頻率低、能量較小，且於視網膜成像的難度也大，因此較為安全。而可見光的優勢於其可以照明，因此大多可見光定位會應用於需照明的場域，配合照明用的光線進行定位。但凡使用情境不想影響人們的感知，亦或是光源需移動，有直射眼境造成人眼不適的可能時，便會選擇使用紅外光波段。

本研究目標需應用於移動物體上，因此紅外光呈現優勢，紅外光無法在視網膜成像的特性讓使用者並不會感受到不適

### - 成本

光波段的光感測器常見的材料有矽 ( Si )、鍺 ( Ge ) 與 III 或 V 族元素，價格最便宜的是矽材料，而矽感測器的感光波段約在 400-1000nm，也就是可見光與近紅外光 ( NIR ) 波段。但凡波長較長的紅外光在硬體材料便需要使用到昂貴的鍺或其他三五族元素 [26]，這也是為什麼普遍紅外光波段的硬體的印象都較為昂貴，然而近紅外光波段的感測器與可見光價格接近。

除了硬體本身的成本以外，系統架設難易度也需納入考量。常見可見光定位的文獻會強調系統架設難易度低，因為可以利用室內常見的照明光源，不需額外添置訊號發射器 [23]。然而需注意的是，可見光定位需利用光通訊分辨 ID 時，進行編碼需要在光源硬體加裝驅動器，即代表需要將原有燈具改成能夠進行編碼的硬體、加裝驅動器等，所需付出的成本不得被忽視。因此，在架設成本上，我認為波段的無論影響不大。

因此，僅考量成本時，無論是 PD 還是影像感測器，挑選可見光與近紅外光波段較為合適。

### - 環境光源的影響

光波段的誤差來源主要包含多重路徑傳輸 ( Multipath effect ) 與環境光源 ( Ambious Light Source ) [4]，其中多路徑傳輸無關波段，影響程度皆相同。而環境光源的部分，強度過高可造成訊號偏移，甚至硬體飽和導致訊號失真，因此需有效的降低環境光源的強度以保持定位的準確度。

環境光源包含了室內的光源以及太陽光源，室內的光源使用交流電的頻率約在 120hz，可以針對頻率進行濾波。而太陽光源的強度與電磁波頻率有關，可以由太陽輻射波譜 ( Solar Irradiance Spectrum ) 觀察強度與波長的關係。太陽光照射至地球時，傳送至地表的能量與大氣層的吸收度有關，高峰即為可見光波段，低谷則出現在 760nm 左右的氧氣吸收帶 ( Oxygen A-band )、與 940nm 和 1550nm 附近被水蒸氣吸收之波段 [27]。

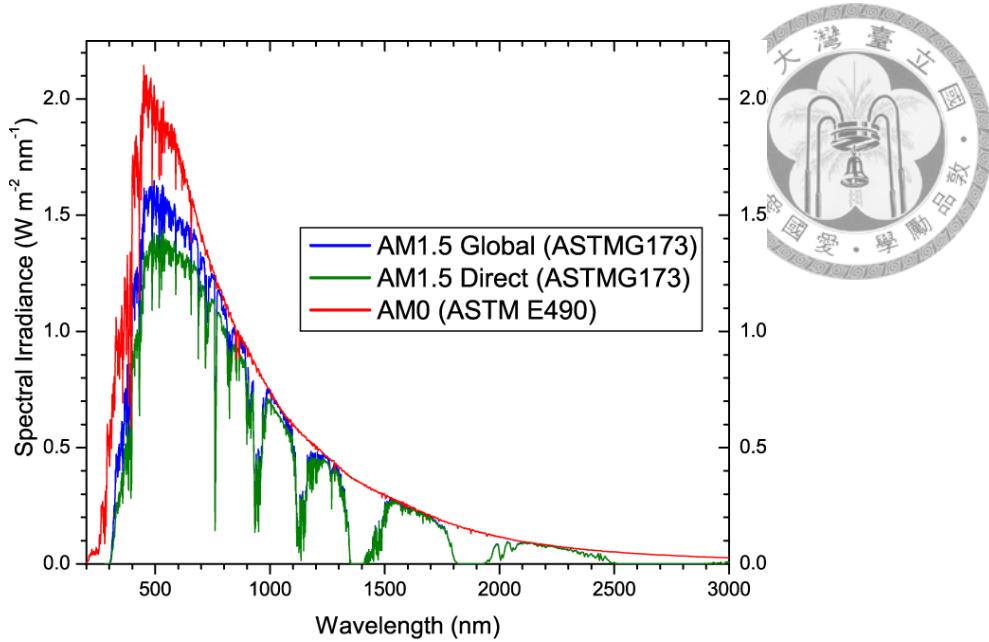


圖 2.16: 太陽輻射波譜 [28]

由於利用光波段定位最大誤差來源之一就是要克服其他光所造成的雜訊，因此在選擇工作波長時，需挑選太陽光能量較低的波段，也就是於近紅外光波段中的 760nm 與 940nm，以及遠紅外光波段內的 1550nm。

綜上所述，根據本研究的需求，最適合選擇使用近紅外光波段中的太陽能量低谷波段，簡單整理於圖2.17，可以同時節省硬體成本、降低環境光源的影響，也能夠不造成使用者的眼經不適。

	可見光波段	近紅外光波段	遠紅外光波段
硬體成本		較低	較高
人眼可視與否	同時提供照明需求		人眼不可視
太陽光能量	較高	較低 (低谷於760nm、940nm附近)	較低 (低谷於1550nm附近)

圖 2.17: 光波段中的波段特性比較

### 2.3.2.2 接收子類型：PD 與影像感測器

2.3.2.1章中討論了光波段中不同波段的優缺點，而本小節中將討論光波段中常使用的兩種硬體差別，其分別為 PD 與影像感測器。

#### - 影像感測器

影像感測器包含常見的相機，運作原理為每次取樣時，獲得多個像素的強度資訊，資訊量極多，是眾多定位技術中最消耗運算資源的。其定位方式是利用辨識已知的特徵圖案，進而將圖片中圖案的大小與變形與特徵進行比對，利用 PnP 眼算法推算目標物的距離以及姿態（參考2.2.2章）。其中，若量測範圍要廣，由於隨距離增加，投射於影像平面上的圖案大小衰減快速，因此特徵圖案則需要越大越好。然而其取樣頻率大多在百赫茲內，且視覺辨識所需要的運算資源多，因此成本高，且運算速度也較慢。

影像感測器所辨識的特徵點又可分為主動與被動傳送訊號的，被動傳送訊號的包含 ArUco 標誌（參考圖2.8），其需透過環境光源照設可見光波，讓影像感測器得以看到標誌，若室內光源未開，則無法定位。反之，主動傳送訊號的標誌便是光源，大多室內定位會使用半徑 15 公分以上的崁燈，利用相機的滾動式快門效應（Rolling Shutter Effect），將條紋圖案視為特徵辨識。其中，滾動式快門效應會造成條紋圖樣的原因可參考圖2.18，因為 CMOS 感測器並非同時進行所有像素的成像，而是輪流一列一列的成像，搭配光源的閃爍，各列成像時便會各自呈現亮暗，因此產生條紋樣式。除此之外，透過調整光源的閃爍頻率，可以調整條紋的粗細，進而達到編碼與解碼的效果，如圖2.19。

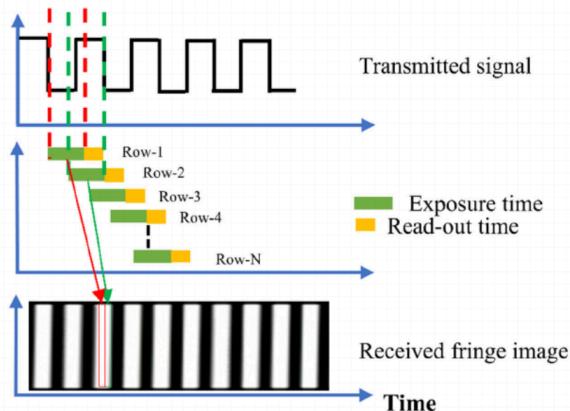


圖 2.18: 滾動式快門效應的成因 [29]

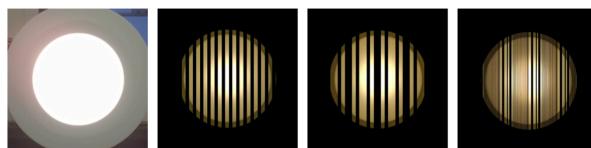


圖 2.19: 滾動式快門效應產生的條紋樣式 [30]

光波段中除了環境光源會造成誤差以外，誤差主要來源於多重路徑傳輸，如圖2.20所示，訊號在傳送至感測器之前，由於障礙物造成訊號反射，使得感測器接收的訊號除了 LoS 路徑以外，還包含了透過反射傳送而來的



訊號。除了 LoS 訊號以外，感測器量測到的 NLoS 訊號，便會造成誤差。而相機使用的為影像中的特徵點，因此較不受多重路徑傳輸的影響，在此相誤差上具有優勢。

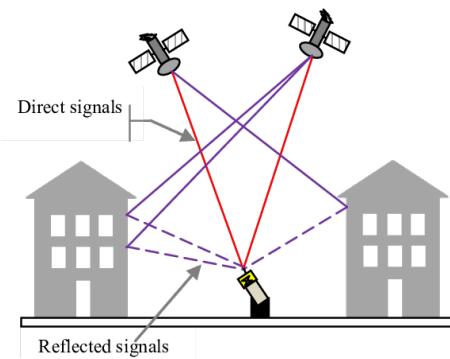


圖 2.20: 多重路徑傳輸 [31]

### - PD

PD 能感測到資訊僅有強度資訊，而強度資訊受 LED 出射角度、PD 入射角度、距離影響（詳細參考2.4.2章），相較大多無線電波技術主要僅受距離影響，PD 的變數較多，使得獲得相對定位的演算法較複雜，也需要多個 PD 或多個 LED 以進行定位。然而 PD 優勢為具有極高的取樣頻率，可高達千赫茲甚至萬赫茲，高取樣頻率即可使用光通訊進行編碼與解碼，且硬體成本相較影像感測器來說非常低。

PD 定位系統的架構如圖2.14所示，訊號發送是利用驅動器與 LED 進行光通訊，PD 接收訊號後進行解碼、取得 LED 的 ID 與光強度，再利用光強度以不同演算法解出相對位置。而 LED 與 PD 的定位系統中，包含單 LED 對多 PD、多 LED 對多 PD、或是多 LED 對多 PD，其中，當系統內包含多個 LED 對多 PD 時，PD 會同時接收到來自多個 LED 的編碼訊號，參考圖2.21，PD 會將訊號轉換至頻域，以獲得各頻率下的強度，也就是各 LED 傳送至各 PD 的強度。

利用光通訊獲得各 LED 傳送至各 PD 的強度後，解出定位的演算法分成兩類，一類型為使用指紋法或多點定位，這種類型的系統需在環境中放置多個參考點（如圖2.22），為「環境對一點的定位」。除此之外，大多使用2.2.2章中提到的幾何方法，如 [33]（參考圖2.23），透過多 PD 量測強度後，利用多個 PD 強度與幾何之間的關係取得定位，此類型方法詳述於2.4.6章。

影像感測器與 PD 進行定位的方法差異非常大，前者演算法為影像辨識，利用特殊圖案分辨光源，以影像中的變形計算位置；PD 常見的定位演算法則包含多點定位、指紋法、幾何方法，利用光通訊分辨光源。在兩者之間權衡時，本研究主

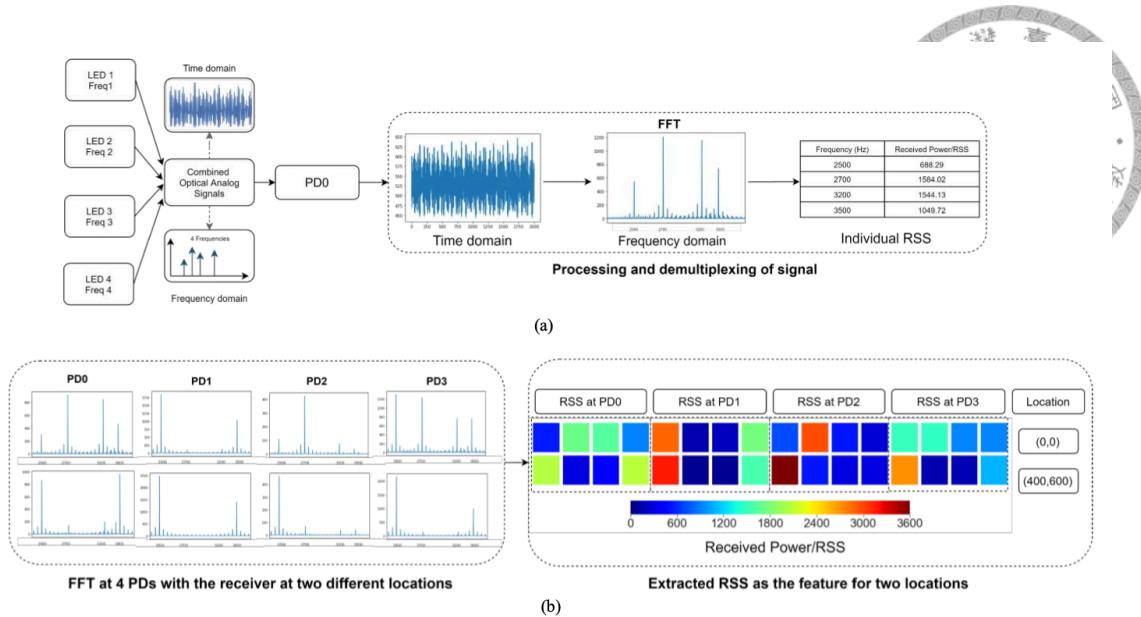


圖 2.21: 多 PD 進行光通訊解碼 [32]

要考量到成本以及硬體大小，為了能夠達到靈活、廣泛運用，取捨掉影像感測器具有高精度可能性的優勢。

### 2.3.3 小結：本研究使用技術的選擇

在2.3章中，由電磁波頻率分類為無線電波段與光波段，分別於2.3.1章與2.3.2章中介紹無線電波與光波段的定位，並於2.15中比較兩者，其中光波段較高的精度、較小的硬體、以及能夠零或應用的幾何方法演算法，使光波段定位為更適合的選擇。

光波段中，又依照使用波段與使用的硬體分類。使用波段於2.3.2.1章中討論，分為可見光、近紅外光與遠紅外光，參考圖2.17，近紅外光兼具低成本低干擾的特色，因此選用近紅外光波段中，位於輻射光譜低谷的 760nm 與 940nm 波段最為合適。硬體選擇則於2.3.2.2章中討論，參考圖2.24，權衡之下選擇 PD，雖然捨棄精度，但得以換取較低的成本與較小的體積；另外，PD 所使用的定位演算法需為具有靈活度的幾何方法。

綜上所述，本論文將使用 LED 與 PD 的定位方法，於後續的2.4章中更深入的討論，分別介紹 LED 與 PD 的特性、光傳遞模型，以及現今文獻所遇困難與限制。

## 2.4 LED 與 PD 的定位方法

於2.3章中，我們將定位方法聚焦在 LED 與 PD 的定位方法上，而此種系統是將單個或多個 LED 安裝在目標物上，各 LED 藉由編碼來區別各自的訊號，而 PD 安裝於觀察物上，將每個 PD 所接收的訊號分別解碼，得到各 LED 的訊號強度。

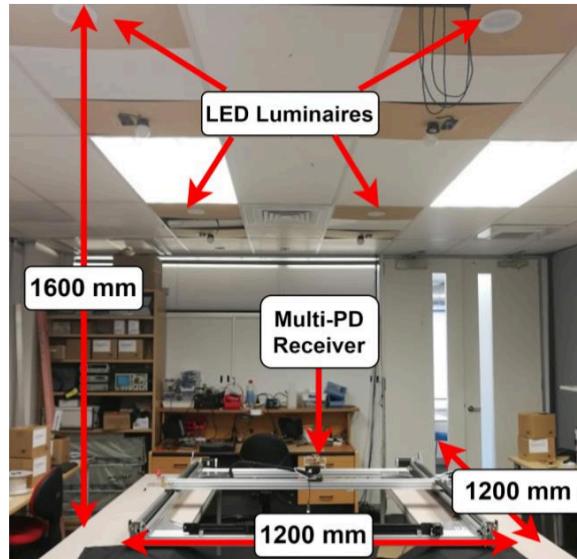


圖 2.22: 使用指紋法的系統環境 [32]

為深入了解系統運作方式，從2.4.1章開始介紹常用的光學單位；有基本了解後，於2.4.2介紹LED與PD的輻射特性。了解輻射特性後，於2.4.4中介紹完整的光傳遞模型，最後再進入2.4.6介紹現今文獻的作法，並整理所遇困難與限制。

#### 2.4.1 光學常用單位介紹

由於光領域所使用的單位與機械領域差距較大，且單位與術語經常有口語或混用的情況，令人感到困惑，因此在進入PD與LED定位的探討之前，先對光領域的一些術語與單位進行介紹。

首先，描述光照的單位分為兩種系統，輻射測量學 (Radiometry) 與光度測量學 (Photometry)，兩領域以不同單位描述光源，其中輻射測量學著重在電磁波輻射的量測，描述通量單位為瓦特 (Watt)；而光度測量學著重在人眼可見之可見光波段的研究，通量單位為流明 (Lumen)，同樣物理量下單位定義不同 [34]。

本研究聚焦在近紅外光波段，因此本論文會使用輻射測量學的系統，然而文獻上可見光定位數量較多，因此在單位的換算上需特別注意，以下針對光領域常用物理量分項簡單介紹。

##### - 立體角 Solid Angle $\Omega$

描述二維空間中的角度單位為弧度，代表夾角內的弧長與半徑比例，而單位弧度的定義是半徑與圓弧長度相等時的圓心角。

然而光源存在於立體空間中，而空間中描述角度的物理量即為立體角  $\Omega$  (Solid Angle)，該物理量代表一光束投影於單位球面上時，表面積與半徑平方的比例，如圖2.26所示。立體角的單位為球面度 (steradians, 簡寫 sr) 代表在半徑為  $r$  的球體中，立體角投射出的表面積為  $r^2$ 。

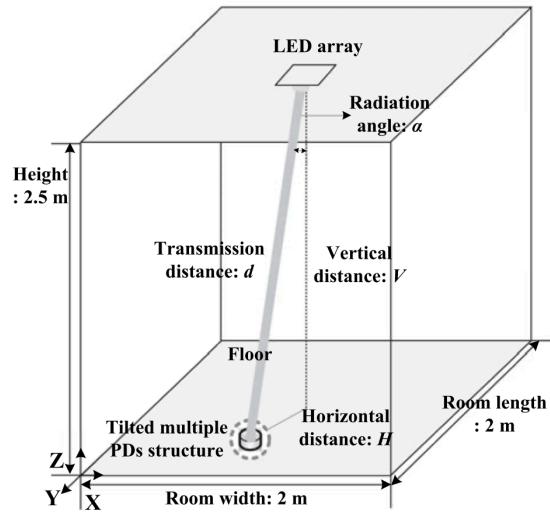


圖 2.23: 使用幾何方法的系統環境 [33]

	影像感測器	PD
成本	較高	較低
精度	較高	較低
演算法複雜度	較高	較低
辨識ID方法	視覺辨識	光通訊
多重路徑傳輸	影響小	影響大
硬體大小	辨識標誌需足夠大	PD本身體積小

圖 2.24: 影像感測器與 PD 的特性比較

#### - 輻射通量 Radiant Flux $\Phi$

描述光照功率的物理量為通量 ( Flux ) 或稱輻射功率 ( Power ), 用符號  $\Phi$  表示，代表每單位時間的輻射能量，單位為瓦特，而大多 LED 規格表上以此物理量來描述 LED 在指定電流下可產生的最大光功率。

#### - 輻射強度 Radiation Intensity $I$

每單位立體角所含的通量稱為輻射強度  $I$ ，此物理量常用於描述光與立體角之關係，在同一光束內，輻射強度僅與立體角有關，與距離無關。

#### - 輻照度 Irradiance $E$

每單位面積所含的通量稱為輻照度 ( 參考圖2.27 )，其中照射面積隨著距離  $D$  增加而平方遞增。



符號	定義	輻射測量學	單位	光度測量學	單位
$Q$		Radiant Energy 輻射能量	Joule( $J$ )	Luminous Energy 光能	Talbot
$\Phi$	$\Phi = \frac{dQ}{dt}$	Radiant Flux 輻射通量(功率)	Watt( $W$ )	Luminous Flux 光通量	Lumen ( $lm$ )
$I$	$I = \frac{d\Phi}{d\omega}$	Radiant Intensity 輻射強度	$W/sr$	Luminous Intensity 光度	Candela ( $cd$ )
$E$	$E = \frac{d\Phi}{dm^2}$	Irradiance 輻照度	$W/m^2$	Luminance 輝度	$cd/m^2$

圖 2.25: 輻射測量學與光度測量學的物理量比較

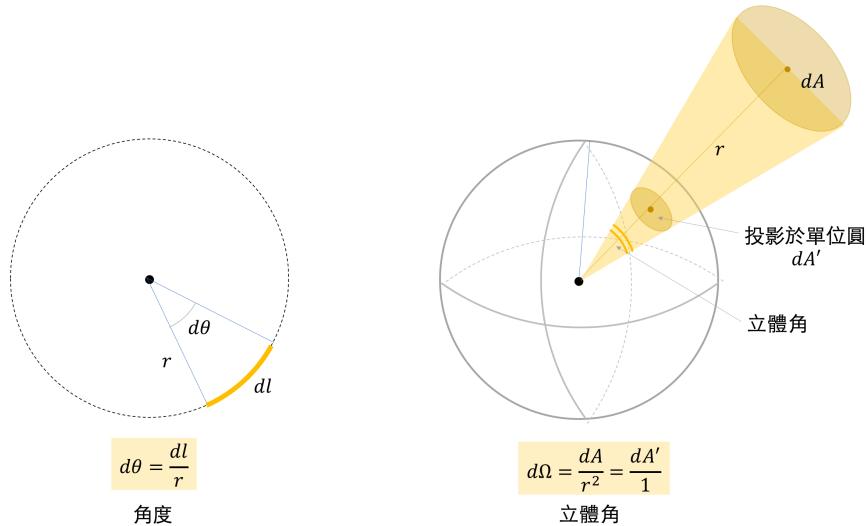
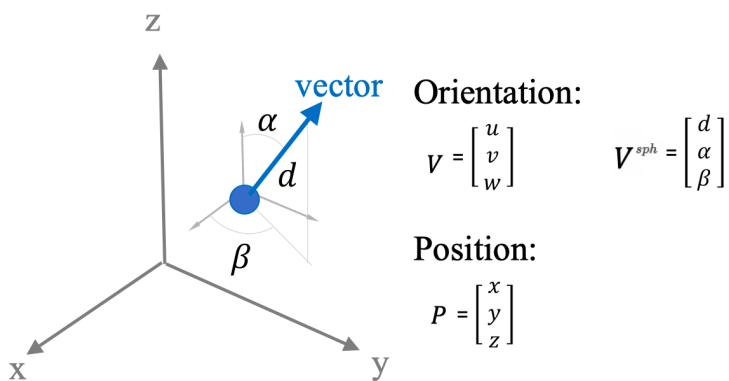
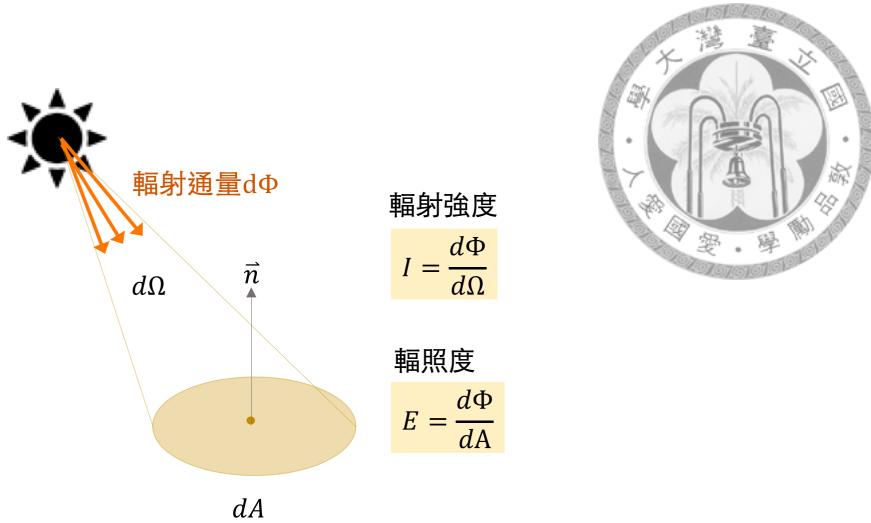


圖 2.26: 角度與立體角

## 2.4.2 LED 與 PD 的輻射特性

LED 與 PD 硬體有許多種類，最常見的市面上 LED 與 PD 為軸對稱並滿足朗博輻射模式 ( Lambertian Radiation Pattern )，本論文僅考慮此類硬體，其中軸對稱代表輻射強度並不隨方位角改變。

以下章節依序從 2.4.3 章中，定義軸對稱的 LED 與 PD 組態，介紹硬體組態的自由度，於 2.4.3.1 章介紹 LED 與 PD 皆遵守的朗博輻射模型 ( Lambertian Radiation Pattern )，再於 2.4.3.2 與 2.4.3.3 分別介紹 LED 與 PD 兩者各自的硬體特性。



### 2.4.3 LED 與 PD 的組態

在描述三維空間中的 LED 與 PD 時，因為 LED 與 PD 皆有中心軸，需要表示指向，因此可以用「空間中的向量」表示。如圖2.28，空間中的向量有六個自由度，包含定義向量起點  $P$  的三個自由度  $x, y, z$ ，以及定義向量指向  $V$  的三個自由度  $u, v, w$ ，其中指向常以球座標系表示，之間的換算可參考是2.2。然而，由於 LED 與 PD 指向只在乎方位不在乎距離，因此可將指向向量定義為單位向量，也就是球座標系中的  $d$  分量為一。

以 LED 為例，參考圖2.29，定義於 LED 座標系中的 LED 組態，需加上左上標  $L$  以代表定義於 LED 座標系，組態一共有五個自由度，包含擺放位置  ${}^L P$  的三個自由度  $x, y, z$ ，以及定義指向的單位向量  ${}^L V$ ，包含兩個自由度：天頂角  $\alpha$  與方位角  $\beta$ ，換算至卡氏座標系則為  $u, v, w$ 。

圖2.29以 LED 為例，呈現在空間中擺放的共五個自由度，而 PD 的擺放

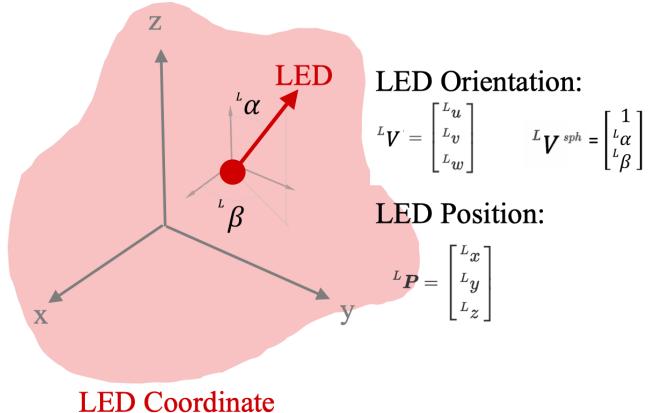


圖 2.29: LED 在座標系中的擺放自由度

自由度相同。

#### 2.4.3.1 朗博輻射模型

LED 與 PD 的照射與接收模式 (Pattern) 皆可以用朗博輻射模式描述 ( 圖2.30 )，其代表感 (發) 光強度隨著 LED 出射角 (PD 入射角) 的增加而衰減，如式2.3其衰減模式可用餘弦函數 (cosine) 的  $M$  次方 (power) 表示， $M$  代表的是朗博次方 (Lambertian Order)。

$$I(\omega) = I(\omega = 0) \times \cos(\omega)^M \quad (2.3)$$

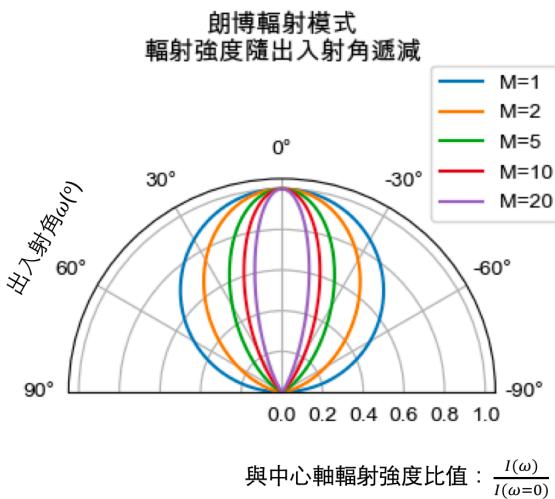


圖 2.30: 輻射強度與出入射角的關係

朗博次方與出入射角的關係如圖2.30，輻射強度隨出射角度增加而減少，在硬體中心軸的方向有最高的輻射強度，需注意的是輻射強度與距離無關 (參



考2.4.1章 )。

如先前所述，LED 與 PD 皆為為軸對稱，而且最大的可視範圍不會超過出射角  $90^\circ$ ，因此可以於球座標系中以單位半球體與一中心軸呈現於圖2.31，而出入射角則僅與球座標系中的天頂角  $\alpha$  相關。空間中的 LED 與 PD，照射模式則如圖2.32，在同樣出射角下，光輻射強度相同，呈現軸對稱，愈接近中心軸的輻射強度愈大。

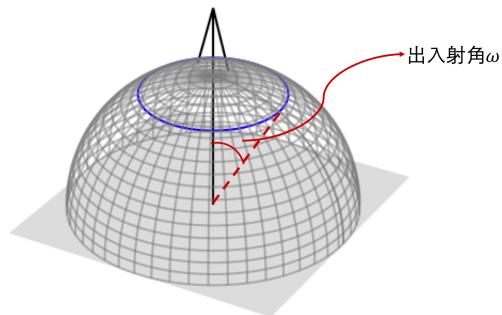


圖 2.31: LED 與 PD 於三維空間中的入射角

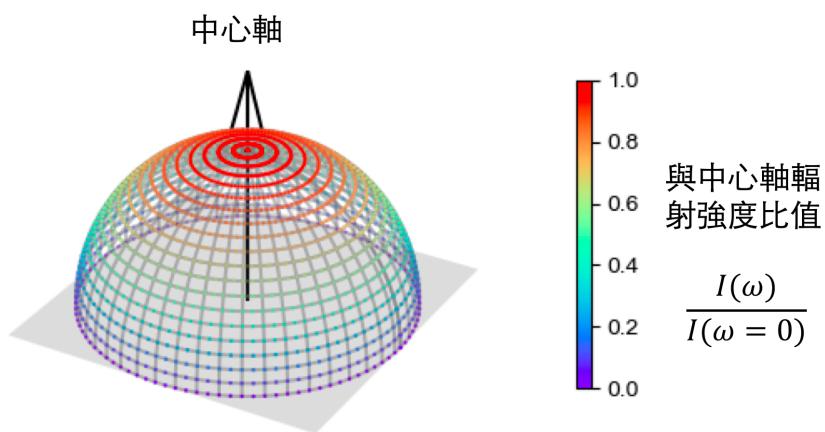


圖 2.32: 空間中輻射強度與出入射角方位的關係

朗博次方所代表的意義，可視為在敏感度與照射範圍中的取捨：朗博次方較小時，其照射範圍較大，最大可以覆蓋接近半個球面，光強度隨出射角度衰減的速度不大，也就是對不同入射角度的敏感度則不高。反之，朗博次方較大的硬體雖然覆蓋範圍較小，但對覆蓋範圍內的角度變化敏感度高（如圖2.30）。

#### 2.4.3.2 LED 特性

LED 與 PD 在選購時，除了挑選朗博次方以外，也需注意其他特性以及影響發收光能力的硬體參數，在此將硬體參數整理於圖2.33，這些硬體參數會陸續

於2.4.3.2與2.4.3.3中介紹。



	LED參數	PD參數
影響發/收光模式 (Pattern)	LED朗博次方 $Ml$	PD朗博次方 $Mp$
影響發/收光強度	總輻射通量 $Pt$	有效面積 $A$ 響應率 $Re$ 飽和電流 $s$

圖 2.33: LED 與 PD 的硬體參數

LED 發出的輻射，會遵守式2.3描述的朗博輻射模式，其提供了光輻射強度  $I$  與不同出入射角  $\omega$  的關係，在此部分僅討論 LED，因此變數為出射角  $\theta$ ，而 LED 的輻射強度以  $Il$  表示。由於光輻射為軸對稱照射於空間中，因此需將整個半球中的輻射強度積分，得到  $Pt = Il(0)(Ml + 1)/2\pi$ ，移項即可完成式2.4，此式描述 LED 輻射強度  $Il$  與入射角度、LED 總輻射功率以及朗博次方的關係。而圖2.34則呈現了輻射強度  $I$  與總輻射通量  $Pt$  在不同出射角  $\theta$  的比值，在朗博次方為 1 時，輻射強度隨出射角的衰減速度較慢，參考圖2.30即使出射角於 45 度仍有中心軸 0.7071 倍的強度，而參考圖2.31，球座標系中出入射角愈大，在空間中所含的範圍愈大，整體積分起來所含的輻射通量則大。反之，朗博次方較大時，即使出入射角大，輻射強度仍然不高，因此於中心軸的輻射強度與總輻射通量的比值，相較低朗博次方的 LED 高。

$$Il(\phi) = Pt \frac{(Ml + 1)}{2\pi} \cos \theta^{Ml} \quad (2.4)$$

### 2.4.3.3 PD 特性

首先，PD 得到的輻射強度  $Ip$  也遵守朗博輻射模式，2.5描述輻射強度與入射角度  $\phi$  以及 PD 朗博次方  $Mp$  的關係。

$$Ip(\phi) = Il \cos \phi^{Mp} \quad (2.5)$$

而 PD 所量測到的為輻射通量  $\Phi$ ，再將輻射通量轉換為電流輸出（式2.7）。而輻射通量可藉由圖2.27中輻射通量與輻射強度的關係，以及立體角  $\Omega$  的定義換算，於式2.6將式2.5的光強度轉換為 PD 接收的輻射通量。其中， $A$  為 PD 的硬體參有有效面積， $D$  為 LED 與 PD 之間的距離。

$$\Phi p = \frac{Ip}{\Omega} = \frac{IpA}{D^2} \quad (2.6)$$

而 PD 最終輸出電流  $Ie$  與輻射通量  $\Phi p$  的關係由式2.7描述， $s$  為 PD 的飽和電流，也就是該 PD 能夠輸出的最大電流。

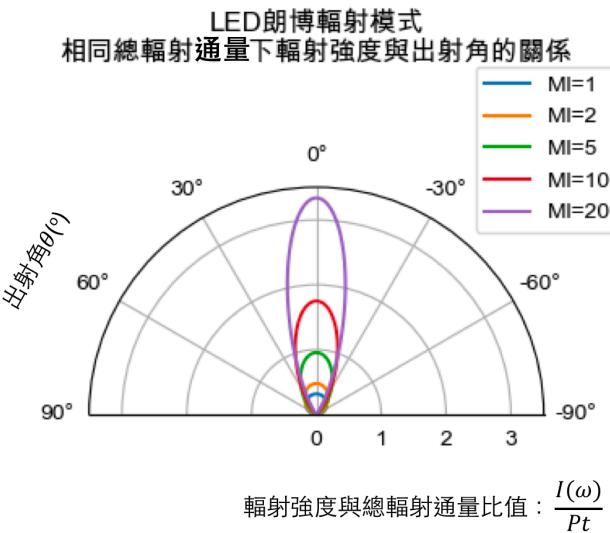


圖 2.34: 輻射強度與總輻射通量比值

$$I_e = \begin{cases} \Phi \times Re, & \text{if } I_e < s \\ s, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.7)$$

綜合式2.5、式2.6、式2.7，PD 輸出的電流  $I_e$  與 LED 的輻射強度  $I_l$  統整於式2.8，式中的硬體參數可參考圖2.33：

$$I_e = \begin{cases} Re \frac{A}{D^2} I_l(\theta) \cos \phi^{Mp}, & \text{if } I_e < s \\ s, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.8)$$

#### 2.4.4 光傳遞模型

本章節將綜合2.4.3.2章與2.4.3.3章中呈現的LED與PD模型，於2.4.4.1章中，呈現由LED光源將光波傳送至PD並轉換成電流的模型；皆著於2.4.4.2章中，將LED與PD的數量提升為多個；最後於2.4.4.3中將距離、出入射角變數轉換為用相對位置表示，呈現出LED與PD在不限制條件的情況下，模型的複雜度。

##### 2.4.4.1 單 LED 對單 PD 光傳遞模型

光傳遞模型需建立由LED至PD的過程，LED與PD各自的輻射與接收特性分別於2.4.3.2章與2.4.3.3章中介紹，綜合描述LED發光強度  $I_l$  的式2.4，以及描述PD輸出電流  $I_e$  的式2.8，即可獲得一LED對一PD的光傳遞模型（式2.9）。



$$Ie = \begin{cases} Re \cdot A \cdot Pt \frac{Ml+1}{2\pi} \frac{\cos \phi^{Mp} \cos \theta^{Ml}}{D^2}, & \text{if } Ie < s \\ s, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.9)$$

在光傳遞模型中，與定位相關的變數包含三個：距離  $D$ 、PD 入射角  $\phi$ 、LED 出射角  $\theta$ ，他們便是幾何方法演算法要使用的變數。其中出入射角如圖2.35，分別為硬體中心軸與距離向量之間的夾角。

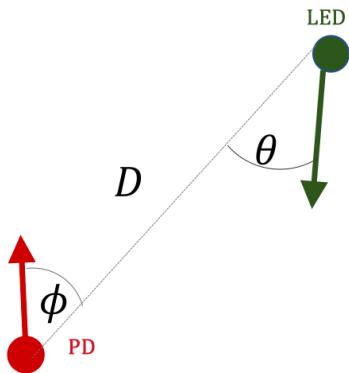


圖 2.35: 單 LED 與單 PD 的交互關係

#### 2.4.4.2 多 LED 對多 PD 光傳遞模型

由於 LED 與 PD 定位時數量通常不只一個，因此描述多 LED 對多 PD 的光傳遞模型時，需註明清楚（可參考第*i*頁）。在此設定 LED 總數為  $L$ 、PD 總數為  $P$ ，描述第  $l$  個 LED 與第  $p$  個 PD 的硬體參數時，於硬體參數的右下標加註，如  $A_2$  為第二個 PD 的有效面積；再來，描述第  $l$  個 LED 與第  $p$  個 PD 之間的關係時，則將  $lp$  同樣加註於右下標，例如  $D_{34}$  為第三個 LED 與第四個 PD 之間的距離，參考圖2.36。

而完整的多 LED 對多 PD 的的模型如式2.10， $Ie_{lp}$  代表著第  $p$  個 PD 收到來自第  $l$  個 LED 所產生的電流大小。

$$Ie_{lp} = \begin{cases} Re_p \frac{A_p \cos \phi_{lp}^{Mp}}{D_{lp}^2} \times Pt_l \frac{(Ml+1)}{2\pi} \cos \theta_{lp}^{Ml}, & \text{if } Ie_{lp} < s_p \\ s_p, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.10)$$

#### 2.4.4.3 以 LED 與 PD 座標系之間的座標轉換呈現光傳遞模型

雖然式2.10已呈現了多 LED 對多 PD 的光傳遞模型，然而式子中的變數為距離  $D$  與出入射角  $\theta\phi$ ，而這些變數為各 LED 與各 PD 之間的幾何交互關係，並沒有將 LED 與 PD 定義於各自的座標系中，呈現2.1章中描述的兩座標系各自移動的情境。我們需要能夠得到「相對關係與 PD 輸出電流大小」的關係，才能夠利用

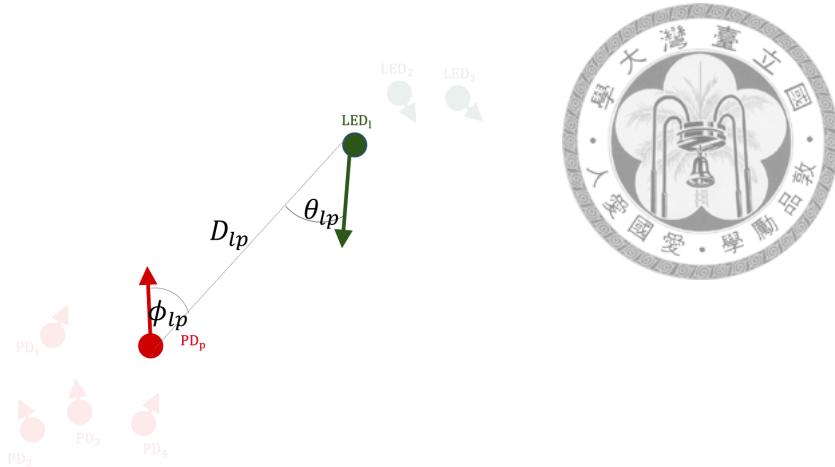


圖 2.36: 多 LED 與多 PD 的交互關係

電流關係得到相對位置關係，因此需要將式2.10中的幾何交互關係，以兩座標系之間的關係表示。

首先，如同2.4.3章中所描述，LED 的組態是定義於 LED 座標系中，而 PD 的組態則是定義於 PD 座標系之中，以兩個座標系表示 LED 與 PD 各自為剛體，也定義了兩座標系之間的齊次座標轉換矩陣為  ${}^{PL}H$ ，左上標的  $PL$  代表將 LED 座標系投影至 PD 座標系上，而要得到的位置資訊即為平移矩陣  ${}^{PL}T$ 。

接著，為了要計算出定義於 LED 座標系中的 LED，與 PD 座標系中的 PD 之間的交互關係（距離與出入射角），我們需將 LED 座標系上的所有 LED 向量，透過齊次座標轉換投影到 PD 座標系，在於 PD 座標系中計算交互關係，流程圖如圖2.37。

#### - 將 LED 投影到 PD 座標系上

LED 於空間中由  ${}^L\mathbf{P}$  代表 LED 位置、 ${}^L\mathbf{V}$  代表朝向，於式2.11呈現出  ${}^L\mathbf{P}$  經過齊次座標轉換至 PD 座標系上  ${}^{PL}\mathbf{P}$ 。而  ${}^L\mathbf{V}$  為單位項量，由於朝向不需經過平移，可以僅用旋轉矩陣  $Ro$  換算，由式2.12轉換至 PD 座標系上為  ${}^{PL}\mathbf{V}$ 。

$$\begin{bmatrix} {}^{PL}\mathbf{P} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^{PL}H \begin{bmatrix} {}^L\mathbf{P} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{PL}Ro & {}^{PL}T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^L\mathbf{P} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$${}^{PL}\mathbf{V} = {}^{PL}Ro {}^L\mathbf{V} \quad (2.12)$$

#### - 於 PD 座標系中計算距離、出入射角

首先，我們在 PD 座標系中計算距離：第  $l$  個 LED 與第  $p$  個 PD 之間的距離以  $D_{lp}$  表示，在此定義 PD 指向 LED 位置的距離向量以粗體表示： $\mathbf{D}_{lp}$ ，於式2.13轉換成 PD 座標系的形式。

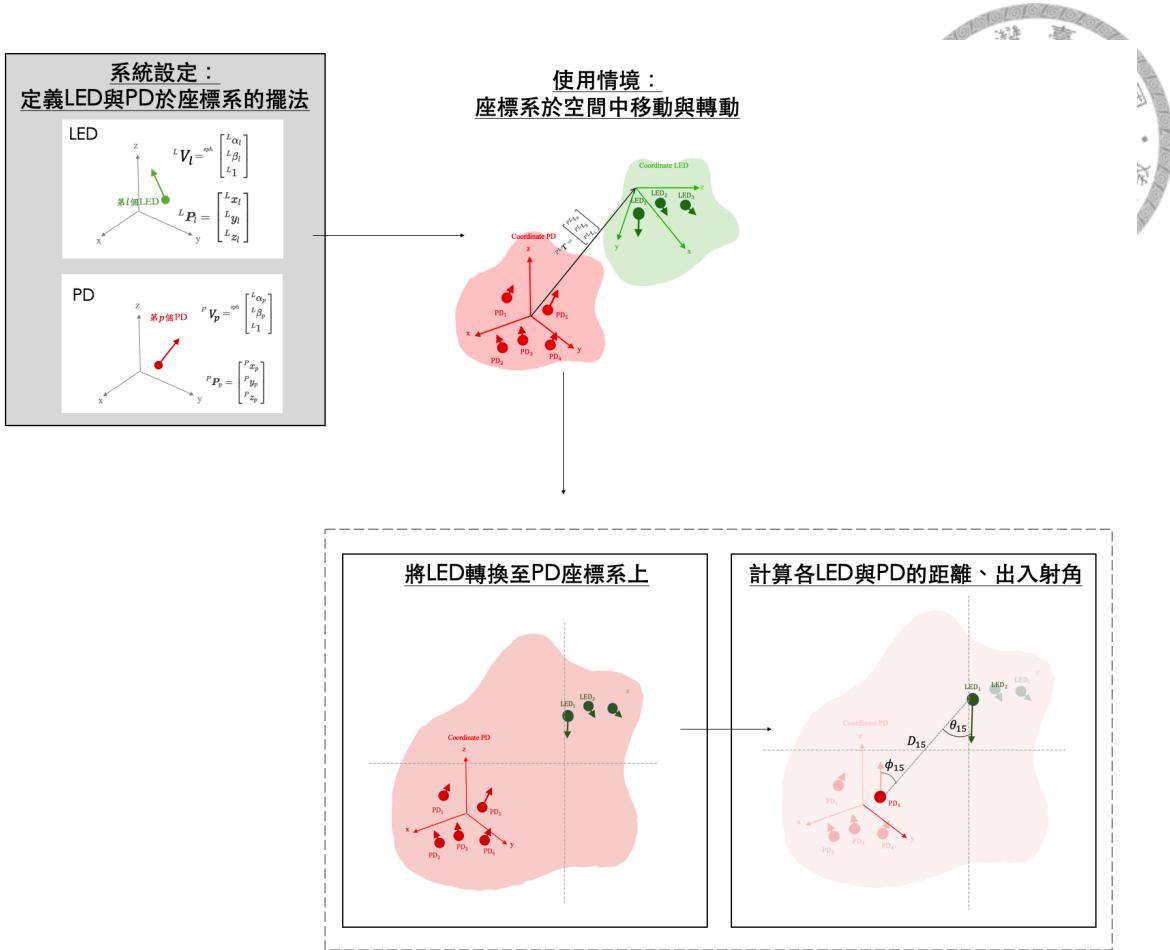


圖 2.37: 光傳遞模型與相對定位統整的流程

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_{lp} &= {}^{PL} \mathbf{P}_l - {}^P \mathbf{P}_p \\ D_{lp} &= \|\mathbf{D}_{lp}\| \end{aligned} \quad (2.13)$$

再來，出射角  $\theta_{lp}$  與入射角  $\phi_{lp}$  可透過餘弦與內積的關係求得，於式2.14表示。

$$\begin{aligned} \theta_{lp} &= \arccos\left(-\frac{{}^{PL} \mathbf{V}_l \cdot \mathbf{D}_{lp}}{D_{lp}}\right) \\ \phi_{lp} &= \arccos\left(\frac{{}^P \mathbf{V}_p \cdot \mathbf{D}_{lp}}{D_{lp}}\right) \end{aligned} \quad (2.14)$$

將距離、出入射角都以 PD 座標系表示後，於式2.15將整個光傳播模型（式2.10）以 PD 座標系表示：



if  $I_{elp} < s_p$

$$\begin{aligned} I_{elp} &= \frac{Re_p A_p Pt_l (Ml_l + 1)}{2\pi} \frac{\cos \phi_{lp}^{M p_p} \times \cos \theta_{lp}^{M l_l}}{D_{lp}^2} \\ &= \frac{Re_p A_p Pt_l (Ml_l + 1)}{2\pi} \frac{(^P \mathbf{V}_p \cdot \mathbf{D}_{lp})^{M p_p} (-^{PL} \mathbf{V}_l \cdot \mathbf{D}_{lp})^{M l_l}}{\|\mathbf{D}_{lp}\|^{2+Ml_l+Mp_p}} \end{aligned} \quad (2.15)$$

我們將式2.15中， $\mathbf{D}_{lp}$ 、 $\|\mathbf{D}_{lp}\|$ 、 $^{PL} \mathbf{V}_l$ 等盡可能的展開，呈現於式2.16，進而得出結論：無論是硬體擺設方式  $\mathbf{P}$  或  $\mathbf{V}$  更換，或是兩座標系相對關係  $^{PL} \mathbf{H}$  改變，皆會影響到輸出電流，是一個牽一髮動全身的模型，我們難以輕易透過輸出電流，獲得相對位置  $^{PL} \mathbf{T}$ 。因此，所有的研究皆需利用不同的限制方式，使式2.15簡化，以取得相對位置資訊。

if  $I_{elp} < s_p$

$$\begin{aligned} I_{elp} &= \frac{Re_p A_p Pt_l (Ml_l + 1)}{2\pi} \\ &\times \frac{(^P \mathbf{V}_p \cdot (^{PL} \mathbf{P}_l - ^P \mathbf{P}_p))^{M p_p} \times (-^{PL} \mathbf{R} \mathbf{o}^L \mathbf{V}_l \cdot (^{PL} \mathbf{P}_l - ^P \mathbf{P}_p))^{M l_l}}{\|^{PL} \mathbf{P}_l - ^P \mathbf{P}_p\|^{2+Ml_l+Mp_p}} \\ &= \frac{Re_p A_p Pt_l (Ml_l + 1)}{2\pi} \\ &\times (^P \mathbf{V}_p \cdot ((^{PL} \mathbf{R} \mathbf{o}^P \mathbf{P}_l + ^{PL} \mathbf{T}) - ^P \mathbf{P}_p))^{M p_p} \\ &\times (-^{PL} \mathbf{R} \mathbf{o}^L \mathbf{V}_l \cdot ((^{PL} \mathbf{R} \mathbf{o}^P \mathbf{P}_l + ^{PL} \mathbf{T}) - ^P \mathbf{P}_p))^{M l_l} \\ &\times \frac{1}{\|(^{PL} \mathbf{R} \mathbf{o}^P \mathbf{P}_l + ^{PL} \mathbf{T}) - ^P \mathbf{P}_p\|^{2+Ml_l+Mp_p}} \end{aligned} \quad (2.16)$$

#### 2.4.5 LED 與 PD 定位系統現況

簡單統整一下前面敘述的 LED 與 PD 定位系統資訊：首先，LED 與 PD 皆為軸對稱，定義一空間中的 LED 或 PD 共有五個自由度（參考2.4.3章），且 LED 與 PD 皆遵守朗博輻射模式，藉由挑選朗博次方，可於對出入射角敏感度與輻射範圍之間取捨（參考2.4.3.1章）。接著，2.4.3.2章中介紹了 LED 的特性，主要影響的式總輻射通量  $Pt$  定義了該 LED 能夠發出的通量；而2.4.3.3章中介紹了 PD 接收光輻射的特性。綜合 LED 與 PD 的特性以及朗模輻射模式，2.4.4章中將完整的光傳遞模型整理呈現，並於2.4.4.3章，將 LED 與 PD 之間的交互關係，以2.1章中描述兩座標系的座標轉換呈現。



#### 2.4.5.1 LED 與 PD 定位流程

有了這些資訊，接下來介紹現今 LED 與 PD 定位系統的系統流程：參考圖??，可以將流程分為兩部分，光通訊與定位計算。

##### - 光通訊

光通訊可參考圖2.14，各 LED 通過編碼，傳輸特定模式的訊號，在定位上最常使用的編碼系統為 OOK，僅利用開關頻率將 LED 的 ID 傳輸。LED 發出的光訊號透過光傳遞至 PD，每個 PD 將所收到的訊號進行光通訊解碼，將訊號拆成訊號來自哪個 LED 以及該 LED 所造成的電流大小，綜合  $P$  個 PD 解碼後的資訊，即可獲得一  $L \times P$  的表格，顯示各 PD 對應各 LED 的電流。

##### - 定位計算

定位計算著重在如何透過  $L \times P$  各 PD 對應各 LED 的電流，回推出兩座標系的相對位置，如同2.2.2章敘述，PD 能使用的定位演算法種類包含多點定位、三角法、指紋法與幾何類型，前三種都為多點對一目標物的定位，系統環境與架構可參考圖2.22，並不符合本研究目標欲達到的兩單位之間的互相定位，參考圖2.23；因此，以下針對幾何類型介紹。

使用幾何方法的演算法，主要是仰賴光傳播模型中 ( 2.10 )，PD 的電流與距離、出入射角相關，利用多個 LED 與 PD 之間的交互關係，得到相對位置。光傳遞模型中，變數除了距離以外，還包含出入射角，使得 PD 比起僅能得到距離資訊的感測器，靈活度更高，例如 PD 得以透過特殊的限制與組態，得到目標物的姿態 [35]，是除了相機以外能得到姿態資訊的方法。然而也因為變數較多，使得模型較為複雜，如同式2.16呈現，因此需透過適當的限制簡化模型複雜度，常見的限制於2.4.5.2章中介紹。

#### 2.4.5.2 常見的 LED 與 PD 定位系統限制

常見限制以下條列呈現：

##### · 忽略朗博次方

朗博次方是一個影響輻射模式的重要參數（參考2.4.3.1章），LED 與 PD 兩者皆有各自的朗博次方，代表著訊號對角度敏感度與覆蓋範位的取捨。大多文獻將 LED 與 PD 的朗博次方皆假設為一，降低系統複雜度，將式2.16與硬體選擇的限制一起簡化於式2.17。

然而，假設朗博次方為一在實際上是不符合現實的，因為實際上在挑選硬體時朗博次方時有許多選擇，為了降低複雜度而省略朗博次方，會侷限了能夠使用的硬體，也限制了系統的自由度 [5]。即便如此，大多研究仍將其省略，其中將 PD 的朗博次方納入考量的文獻極少 [5]，相較起來，LED 朗博次方有部分研究有將其納入計算，如 [36] [37]。



### · 硬體種類限制

文獻上，挑選 LED 時僅會選擇一種，同一系統下，並不會同時出現多種 LED，PD 亦然。因此，LED 與 PD 的硬體參數（參考圖2.33）並不會隨 LED 與 PD 的編號改變，綜合此限制與朗博次方為一的限制，將式2.16簡化為式2.17。

$$\text{Let } \begin{cases} M_{p_p} = M_p \\ M_{l_l} = M_l \\ R_{e_p} = R_e \\ A_p = A \\ P_{t_l} = P_t \\ s_p = s \end{cases} \quad \text{for } \begin{cases} p = 1, 2, \dots, P \\ l = 1, 2, \dots, L \end{cases} \quad (2.17)$$

When  $I_{e_{lp}} < s$ ,

$$\begin{aligned} I_{e_{lp}} &= \frac{ReAPt}{\pi} ({}^P\mathbf{V}_p \cdot (({}^{PL}\mathbf{R}\mathbf{o}^P\mathbf{P}_l + {}^{PL}\mathbf{T}) - {}^P\mathbf{P}_p)) \\ &\times \frac{(-{}^{PL}\mathbf{R}\mathbf{o}^L\mathbf{V}_l \cdot (({}^{PL}\mathbf{R}\mathbf{o}^P\mathbf{P}_l + {}^{PL}\mathbf{T}) - {}^P\mathbf{P}_p))}{||({}^{PL}\mathbf{R}\mathbf{o}^P\mathbf{P}_l + {}^{PL}\mathbf{T}) - {}^P\mathbf{P}_p||^4} \end{aligned}$$

### · 限制 PD 組態

最常見的硬體組態限制，為限制所有 PD 的擺放位置於同一點： ${}^P\mathbf{P}_p = [0 \ 0 \ 0]^T$ ，僅剩下朝向  ${}^P\mathbf{V}_p^{sph} = [1 \ \alpha \ \beta]^T$  的兩個自由度，擺法可參考圖2.38，現今幾乎所有幾何方法的 PD 組態都是此種類型 [5]。通過此限制，式2.17可進一步簡化為式2.18。

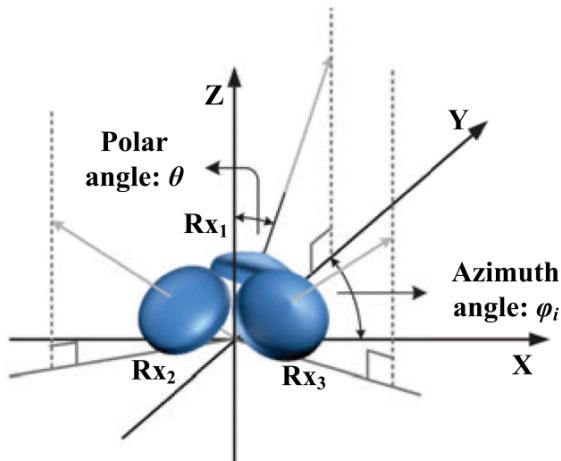


圖 2.38: 常見限制擺放於同點位置 PD 組態示意圖 [33]



Let  ${}^P\mathbf{P}_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$  for  $p = 1, 2, \dots, P$

If  $I_{elp} < s$ , then  $I_{elp}$

$$= \frac{ReAPt}{\pi} \frac{({}^P\mathbf{V}_p \cdot ({}^{PL}\mathbf{R}\mathbf{o}^P\mathbf{P}_l + {}^{PL}\mathbf{T}))(-{}^{PL}\mathbf{R}\mathbf{o}^L\mathbf{V}_l \cdot ({}^{PL}\mathbf{R}\mathbf{o}^P\mathbf{P}_l + {}^{PL}\mathbf{T}))}{||{}^{PL}\mathbf{R}\mathbf{o}^P\mathbf{P}_l + {}^{PL}\mathbf{T}||^4} \quad (2.18)$$

除了位置的限制，PD 指向在文獻中也常將兩自由度降至一個自由度，也就是將  ${}^P\mathbf{V}_p^{sph}$  的方位角平均分配： $\beta_p = 1\pi/P$ ，且各 PD 的天頂角相同： $\alpha_p = \alpha$ ，PD 唯一的組態變數為  $\alpha$  天頂角，如 [36] [37] [33]。另外一種限制，則是利用多面體，將 PD 朝向限制於多面體的頂點，如 [32]。

#### · 限制定位維度

現今使用幾何方法的 LED 與 PD 系統，大多定位維度僅到二維 [5]，將欲解的相對位置  ${}^{PL}\mathbf{T} = \begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}^T$  中的  $z$  限制為已知，也就是將目標物與觀察者的垂直距離固定，參考圖 2.39。由於大多 LED 與 PD 的定位系統應用於室內原有的光源，因此此限制代表的意義，便是目標物僅能於室內地面的水平高度移動，無法定位不在地面上的目標物。透過此限制，在方程式上的意義，則是將變數由三個減少為兩個。

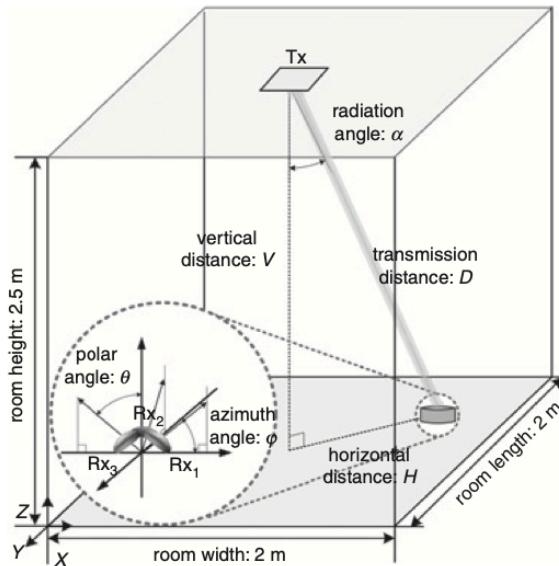


圖 2.39: 常見的 LED 與 PD 定位系統架設 [38]

達到三維定位的 LED 與 PD 定位系統，大多是利用指紋法 [32]，然而指紋法為環境對單點的定位，不符合本研究需求。而利用幾何方法達到三維定位的研究較少，[37] 透過一已知  $x, y$  位置的參考點，來進行垂直距離的計算；[33] 則是使用複雜的演算法，獲得目標物方位後，利用迭代計算垂直



距離；[39] 則需使用兩平行且之間有距離的 LED，利用 PD 兩兩比較電流大小，計算出三維相對位置；以上三篇研究皆有限制使用情境，而這些研究於2.4.5.3章詳述。

#### · 限制使用情境

在使用幾何類型演算法的研究中，最常見的使用情境限制為：目標物與量測者需平行，如圖2.39。舉例來說，展場內的光源中心軸朝地面，此時利用手機前鏡頭進行定位的使用者，便需將手機平放，以使其中心軸垂直地面朝上達到平行。

透過此限制，光傳遞模型中的出射角  $\theta$  必與入射角  $\phi$  相等，即可將光傳播模型的變數降低至兩個，利用  $\cos \theta = \cos \phi$  可將式2.18簡化至式2.19，其中的  ${}^{PL}Ro$  也僅剩一個自由度，大大的簡化了模型複雜度。

$$\begin{aligned} & \text{If } Ie_{lp} < s, \text{ then } Ie_{lp} \\ &= \frac{ReAPt}{\pi} \frac{({}^P\mathbf{V}_p \cdot ({}^{PL}\mathbf{Ro}^P \mathbf{P}_l + {}^{PL}\mathbf{T}))^2}{||{}^{PL}\mathbf{Ro}^P \mathbf{P}_l + {}^{PL}\mathbf{T}||^4} \end{aligned} \quad (2.19)$$

雖然此限制常見，但是他造成很大的使用不便，除了室內光源搭配於地面上移動的載具以外，基本上沒有其他應用場域，大幅度限制了使用的情境，難以達到具有靈活度的應用，因此本研究的主要目標之一便是去除此相限制。

#### 2.4.5.3 LED 與 PD 定位系統實例

##### [39]：使用紅外光且易於攜帶但量測範圍小的案例

[39] 研究利用 2 個 LED 與 3 個 PD 進行光通訊，光通訊流程如圖2.14，其將朗博次方假設為一，使用與圖2.38最常見的 PD 組態，實體圖為圖2.40，為達到三維定位而限制目標物與量測者需為平行。

簡單介紹此研究使用的演算法：只看一顆 LED 時，式2.19中的  ${}^P\mathbf{P}_l$  可視為零，將兩 PD 獲得的電流相除如式2.20，即可得到兩入射角比值。透過已知的 PD 組態，獲得 PD 座標系中 LED 的方位  $\alpha\beta$ ，綜合兩 LED 的結果以及兩 PD 之間的距離，如圖2.42，即可得到三維定位。

$$\frac{Ie_{11}}{Ie_{12}} = \frac{({}^P\mathbf{V}_1 \cdot {}^{PL}\mathbf{T})}{({}^P\mathbf{V}_2 \cdot {}^{PL}\mathbf{T})} = \frac{\cos \phi_{11}}{\cos \phi_{12}} \quad (2.20)$$

此研究針對僅有  $50 \times 50mm$  的範圍，垂直距離也僅有  $300mm$  的範圍，非常小；而實驗中二維定位可達到平均誤差為  $1.6mm$  的精度，垂直距離的誤差最大來到  $50mm$ 。該研究值得注意的是，他將 PD 封裝成一非常小的單位，完全符合易攜帶又成本低的特色，且其利用的波段並非紅外光，為少數不利

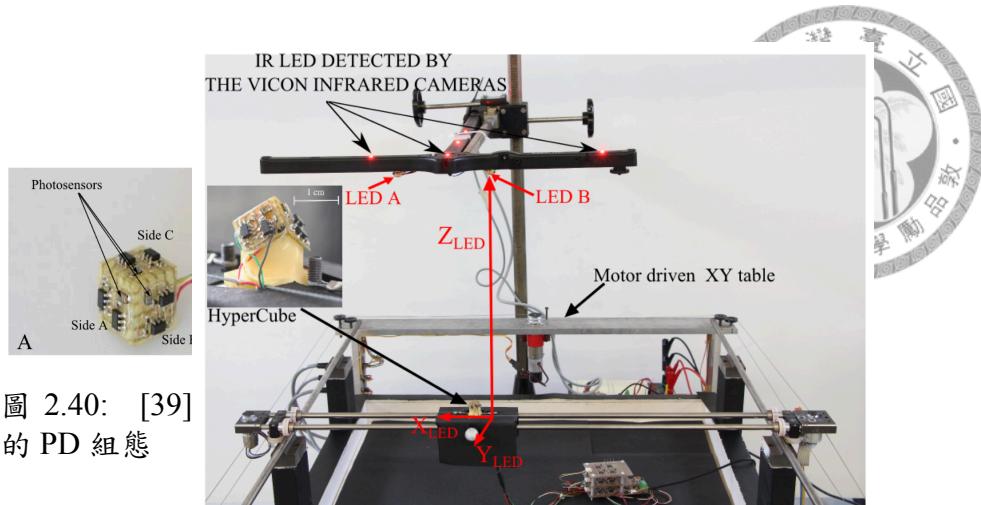


圖 2.40: [39]  
的 PD 組態

圖 2.41: [39] 的系統架構

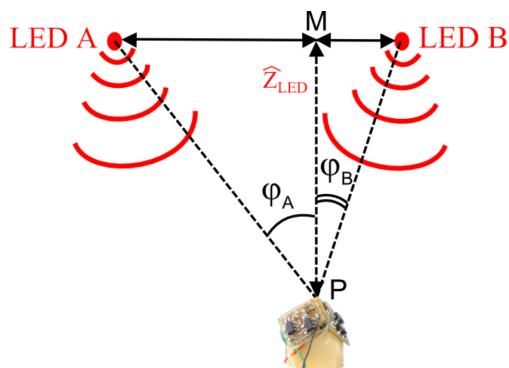


圖 2.42: [39] 利用兩個 LED 達到三維定位

用室內現成光源的 LED 與 PD 系統，使 LED 與 PD 定位不侷限於室內照明光源的應用上。

### [33]：迭代獲得三維相對定位的案例

本研究的系統架構如圖2.23，測試範圍為  $2 \times 2 \times 2.5m$ ，利用單個 LED 與三個 PD 遾到三維定位，其中 PD 組態如圖2.38，與 [39] 的限制類似，一樣假設朗博次方為一、目標物與量測者需平行，而將 PD 電流兩兩相除為入射角的餘弦比值，如式2.20，於特定垂直距離的水平面上，餘弦比值呈現於圖2.43。因此，透過比值可取得三條線，交點即為二維定位的解，實驗中平均誤差小於 3cm。三維定位，則是將垂直距離每十公分切為一層如圖2.44，每層皆利用二維定位的方法計算一次位置，再將該位置以光傳遞模型計算出各 PD 理論上該得到的電流值，將其與實際 PD 電流比對，差異最小的該層則為三維定位的垂直距離。

此方法特殊在其利用與絕大多數研究相同的系統架構，卻透過特殊的演算法，利用迭代各層計算與實際量測的電流大小差異，進行三維定位，且有進行實驗驗證。然而，該方法在垂直距離的定位，解析度為 10cm，若要達

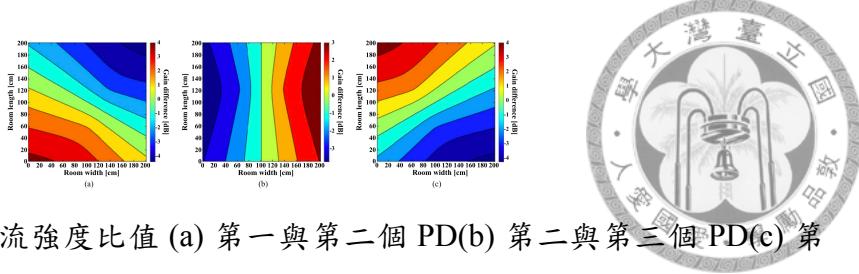


圖 2.43: 地面上 PD 電流強度比值 (a) 第一與第二個 PD(b) 第二與第三個 PD(c) 第一與第三個 PD [33]

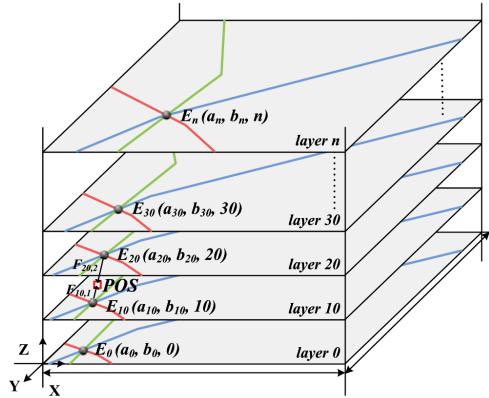


圖 2.44: [33] 將量測空間切為多層

到更高的解析度則需要切更多層，而迭代且取最小值的演算法已經十分耗時，切更多層更會加大運算負擔。

### [37]：事先校正參考點以獲得三維定位的案例

本研究架構與 PD 組態於圖 2.45，其利用單 LED 與五個 PD，量測範圍為  $1 \times 1 \times 1.5m$ ，限制則一樣是目標物與觀察者需平行，雖然 PD 朗博次方仍假設為一，但 LED 的朗博次方則有被考慮。二維定位的方法也是利用兩兩 PD 的電流比值，透過已知的 PD 組態回推目標物的方位，實驗達到平均  $2.32cm$  的經度。垂直距離則需要透過一參考點，該參考點需與目標物的垂直距離相同且已知方位，實驗達到平均  $5.08cm$  的精度。

該研究特色之一為其考慮了 LED 的朗博次方，而演算法則相較簡單，透過幾何關係計算且具有實驗驗證。然而雖然該研究成功獲得三維定位，然而其需要有一同樣垂直距離的參考點，使得應用情境仍受限制，若移動改變垂直距離參考點則作廢，需重新量測參考點。

以上介紹了 LED 與 PD 系統中，三篇利用單點對單點，達到三維定位的方法。各自使用的限制與演算法不同，共同的限制為 PD 朗博次方皆簡化為一，且目標物與量測者需平行。

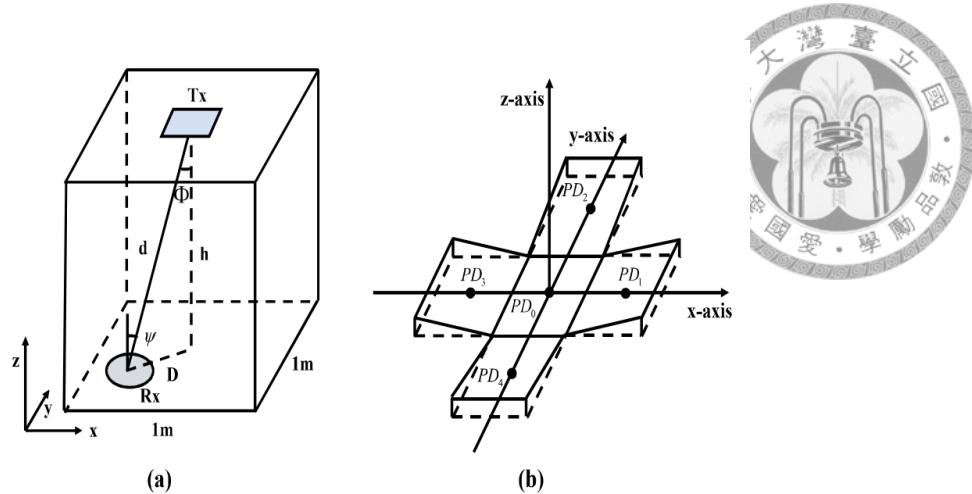


圖 2.45: [37] 研究的 (a) 系統架構 (b)PD 組態

## 2.4.6 LED 與 PD 定位系統所遇困難

綜合2.4.5.2章中敘述的限制與案例，以下統整，分項探討此領域所欠缺的面向。

### - 系統限制多

參考2.4.5.2章，常見的限制包含忽略朗博次方的影響、限制硬體選擇、限制 PD 組態、限制定位維度、限制使用情境等。當一次使用所有限制，即可得到式2.19中簡單的模型，能夠輕易的取得相對定位。然而如2.4.5.2所述，忽略朗博次方不符合實際情況，而其他的限制都會限制系統靈活度，也就是本論文最主要的目標，因此提出一限制較少的定位演算法有其必要性。

### - 較少硬體實驗驗證

在 LED 與 PD 系統中的研究，大多僅使用模型模擬，實際架設硬體進行實驗的案例較少，於[5]中整理的 35 個研究中，僅有不到一半的研究有進行實驗，其中[39][33]為有進行硬體實驗的少數研究。大多研究不進行實驗驗證的原因，其中之一為光通訊相較無線電波為較新的技術，LED 光通訊在 2000 年被提出[40]，因此光通訊的硬體搭建並不像發展超過百年的無線電波技術完全，光通訊使用的驅動器與 LED 尚未被組合並商品化[23]，相較無線電播技術中觸手可及的硬體，系統架設難度較高。因此大多研究先透過模擬，探索演算法與不同系統組態的可能性，具有架設完整光通訊系統能力的實驗室才會進一步進行實驗。

### - 忽略誤差

首先，最常被忽略的是多重路徑傳輸（圖2.20）所產生的誤差，因為多重路徑傳輸與環境、障礙物的位置與材質皆相關，十分複雜，而該誤差於障礙物附近最為嚴重，如室內的角落。實驗上，經常將測試範圍選擇於一空曠



廣大的室內中心，將測試範圍與牆壁的距離拉開，減少多重路徑傳輸效應。而僅進行模擬的研究中，模擬多重路徑誤差的難度很高 [41]，三維空間中要判斷透過多次反彈能夠到達 PD 的光束，計算非常複雜，且針對具有障礙物等較為複雜的環境，多重誤差的模擬則更為複雜，

再來，光定位中另一個造成誤差主要原因為環境光源，實際上在光通訊系統中，由於環境光源並不會閃爍，因此可透過將偏差 ( Bias ) 去除，以此處理環境光源。然而環境光源仍有可能使 PD 電流超過飽和，因此常見處理方式為將系統架設於無窗戶之室內，模擬上則常常直接將其忽略。

## 2.5 結論

利用 LED 與 PD 的技術且使用幾何方法類型演算法的文獻，由於光傳遞模型變數除了距離還有出入射角，具有靈活應用的潛力，近年來開始被討論。然而，此領域有以下不足：常見的系統限制多、較少硬體實驗驗證、以及忽略誤差。本研究目標為靈活應用，因此主要著重於減少系統限制，2.4.5.2章中敘述的限制中，本論文目標將朗博次方完整考慮，並解決使用情境與定位維度的限制。

因此，本研究主要針對部分缺點進行改進：首先，本研究將考量 LED 與 PD 的朗博次方，完整將硬體不同的輻射模式納入模型；另外，本研究於3章中提出一能夠達到三維定位，且不需限制目標物與量測者平行的演算法，以提升使用上的靈活度，達到兩單位自由移動且能定位的目標情境。



---

# LED 與 PD 三維相對位置演算法

---

本章節將提出一定位演算法，利用  $L \times P$  個 LED 對 PD 的電流大小資訊，計算出三維相對定位，且不需限制目標物與使用者平行，並在模型中將 LED 與 PD 的朗博次方考慮進去。

## 3.1 拘束條件

### 3.1.1 硬體選用限制

### 3.1.2 PD 組態限制

### 3.1.3 LED 組態限制

## 3.2 訊號過濾

## 3.3 演算法

### 3.3.1 解入射方位

### 3.3.2 解出距離



# 模擬與誤差分析

## 4.1 模擬方法

## 4.2 誤差分析

如第二章所述，LED 與 PD 量測系統以多個 LED 與 PD 所組成，透過  $P$  個 PD 分別量測到  $L$  個 LED 的  $L \times P$  個量測訊號，由傳遞強度模型回推位置資訊。

本論文目標是提供一方法進行由 LED 與 PD 量測的三維定位方法，並分析調整 LED 與 PD 的擺設方法以及朗博次方對誤差的影響，進而針對不同使用情境提供最佳的系統組態。首先，會介紹 LED 與 PD 的定位系統如何運作，介紹本論文所提出的三維定位方法，在第四章介紹最佳化問題，並於第五章舉例並給出最佳系統組態。

## 4.3 系統概述

系統組成是由多個 LED 與多個 PD 組成，PD 唯一可獲得的資訊是電流大小，而 PD 電流大小為光強度的函數，在飽和強度以下光強度與電流成正比。多 LED 與多 PD 的互動下，每個 PD 都有可能收到多個 LED 的訊號，透過光通訊，由 LED 利用驅動器編碼，傳遞到 PD 後再進行解碼，將不同 LED 來源分離，得到各 LED 對各 PD 的訊號強度。

如第二章所述，PD 所接收的光電流強度除了硬體參數以外，變數有三個：光於 PD 的入射角、光從 LED 的出射角、LED 與 PD 的距離。考慮 LED 與 PD 在空間中的擺放方式，固定其中一者而另一者進行旋轉時，僅會改變出射角或是入射角，但凡兩者之間的相對位置有所改變，則同時會改變出入射角以及距離。

$$\Phi_{lp} = \frac{A_p \cos \phi_{lp}^{m_p}}{D_{lp}^2} \times Pt_l \frac{(M_l + 1)}{2\pi} \cos \theta_{lp}^{M_l} = k_{lp} \frac{\cos \theta_{lp}^{M_l} \cos \phi_{pl}^{m_p}}{D_{lp}^2} \quad (4.1)$$



因此，當有  $L \times P$  訊號強度時，每個訊號強度都是三個變數函數，為了降低方程式複雜度，最常見的方法是如上述，就是限制同一組的 PD 的擺設方法為僅能擺放於同個位置，這樣光強度的唯一變數僅剩下入射角度。常見的系統設置大多是利用可見光，將定位用的 LED 同時當作室內光源照射，而且常見的系統是將 LED 與 PD 的中心軸限制為必須平行，例如在室內時將手機平放，內鏡頭便會垂直朝上與垂直地面朝下的 LED 平行。此種限制是為了更進一步的降低方程式的複雜度，使得入射角與出射角的角度相等，則可較為簡單的藉由不同的算法將定位計算出來。

然而限制兩中心軸平行的方式會極大的限制使用情境，基本上僅有在室內光源固定的狀況下較好判斷 LED 中心軸的方向，才能進而將接收子 PD 摆放至合適的接收姿態，如手機室內定位的例子，使用者移動時需全程手持手機並將其保持水平向上，大大限制了使用者的自由性。然而我們的目標情境是並沒有限制目標物的環境與相對姿態的，過去文獻的這類型演算法顯然不適用，我們需要有更加靈活不受限的演算法來解出兩者的相對定位，而本章節將提出一種符合此需求的方法。

## 4.4 定位演算法

本論文提出個演算法藉由多 PD 的訊號獲得入射角方位，再藉由多 LED 的訊號獲得出射角方位，綜合前兩著資訊來取得距離。

### 4.4.1 取得入射角方位

首先，三維定位在解析時大致分成兩種方式，一種是以卡式座標系的方式求  $xyz$  三者的分量，另一種常見的則是以方位（二維）與距離（一維）來解析，也可以看成是球座標系的表示方法，而接下來都會以方位與距離來解相對位置，其較直觀的將相對位置以載具的出發點分析，且一個單位的接收子或發射子剛好可以視為球座標系的中心點。

以球座標系來看，為了簡化方程式複雜度，我們同樣將所有 PD 摆設於同個位置，僅通過調整擺放的朝向來改變入射角度， $P$  個 PD 的強度公式如下，在各 PD 硬體相同時，唯一的變數就是入射角度，而透過將兩兩強度相除並將已知的朗博次方的影響去除，即可獲得各 PD 之間的強度比值，也就是入射角的 cosine 比值，而在座標系中滿足入射角 cosine 比值的所有點皆位於同個平面上，為了方便用內積計算 cosine，此段以卡式座標系表示。而各個 PD 的指向可以用球座標系的天頂角與方位角  $\alpha\beta$  表示。

當兩 PD 位於原點，指向分別以  $V$  表示，目標物所在方位則以小標  $T$  表示，因此可將入射角度的 cosine 比值寫為以下形式：

$$ratio_{12} = R_{12} = \left( \frac{\Phi_{l1}}{\Phi_{l2}} \right)^{1/m_p} \quad (4.2)$$

式子整理過後可以看出：滿足此入射角 cosine 比值的目標物所在方位，為一通過原點的平面，可以透過式子描述。

$$R_{12} = \frac{\cos(\text{angle difference between } {}^P V_1, {}^P V_L)}{\cos(\text{angle difference between } {}^P V_2, {}^P V_L)} = \frac{{}^P V_1 \cdot {}^P V_L}{{}^P V_2 \cdot {}^P V_L} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} {}^P x_p({}^P x_1 - R_{12}^P x_2) + {}^P y_p({}^P y_1 - R_{12}^P y_2) + {}^P z_p({}^P z_1 - R_{12}^P z_2) &= 0 \quad (4.4) \\ ({}^P x_1 - R_{12}^P x_2, {}^P y_1 - R_{12}^P y_2, {}^P z_1 - R_{12}^P z_2) \end{aligned}$$

#### 4.4.1.1 多個平面求交軸即為解

在上一小節中，先求三維的相對位置中的方位，透過同位置不同指向的兩 PD，計算光強度的比值得到入射角的 cosine 比值，而滿足該比值的入射方位在座標系中唯一通過原點的平面。

透過同樣方式，利用 P 個 PD 各自兩兩比較，即可得到  $P - 1$  組通過原點的平面，求平面最簡單的方式便是利用平面法向量內積，即可獲得目標物方位。

#### 4.4.1.2 多解平均

在一個 LED 對  $P$  個 PD 的系統中，將 PD 擺放於座標系原點而指向皆不同，去除掉可視範圍外的 PD，共有  $P_u$  (代表 usable) 個強度訊號，取一強度訊號作為參考強度，將其他  $P_u - 1$  個強度訊號與參考強度相除並去除朗博次方的影響，即可獲得  $P_u - 1$  個目標方位可能存在的平面。將  $P_u - 1$  個平面中的其中一個平面同樣當作參照，即可將另外的  $P_u - 2$  與其進行外積得到  $P_u - 2$  個解，則最少需要有三個有訊號的 PD 才能得到解。

$${}^{PL} \hat{\mathbf{T}} = \sum_{i=1}^{P_u-2} (\vec{n}_r \times \vec{n}_i) \quad (4.5)$$

#### 4.4.2 取得距離

藉由單個 LED 與三個以上接收到訊號的 PD，即可獲得入射角方位（二維）的資訊，欲獲得距離之前，則需將 LED 出射角資訊獲得。而 LED 出射角資訊可以利用與 PD 入射角資訊相同的方式取得，只是改多個 LED 對單個 PD 的訊號量測，藉由比較同個 PD 所收到不同 LED 的訊號比值獲得。

求出入射角與出射角方位之後即可從光傳遞模型推算出距離。

### 4.5 誤差分析

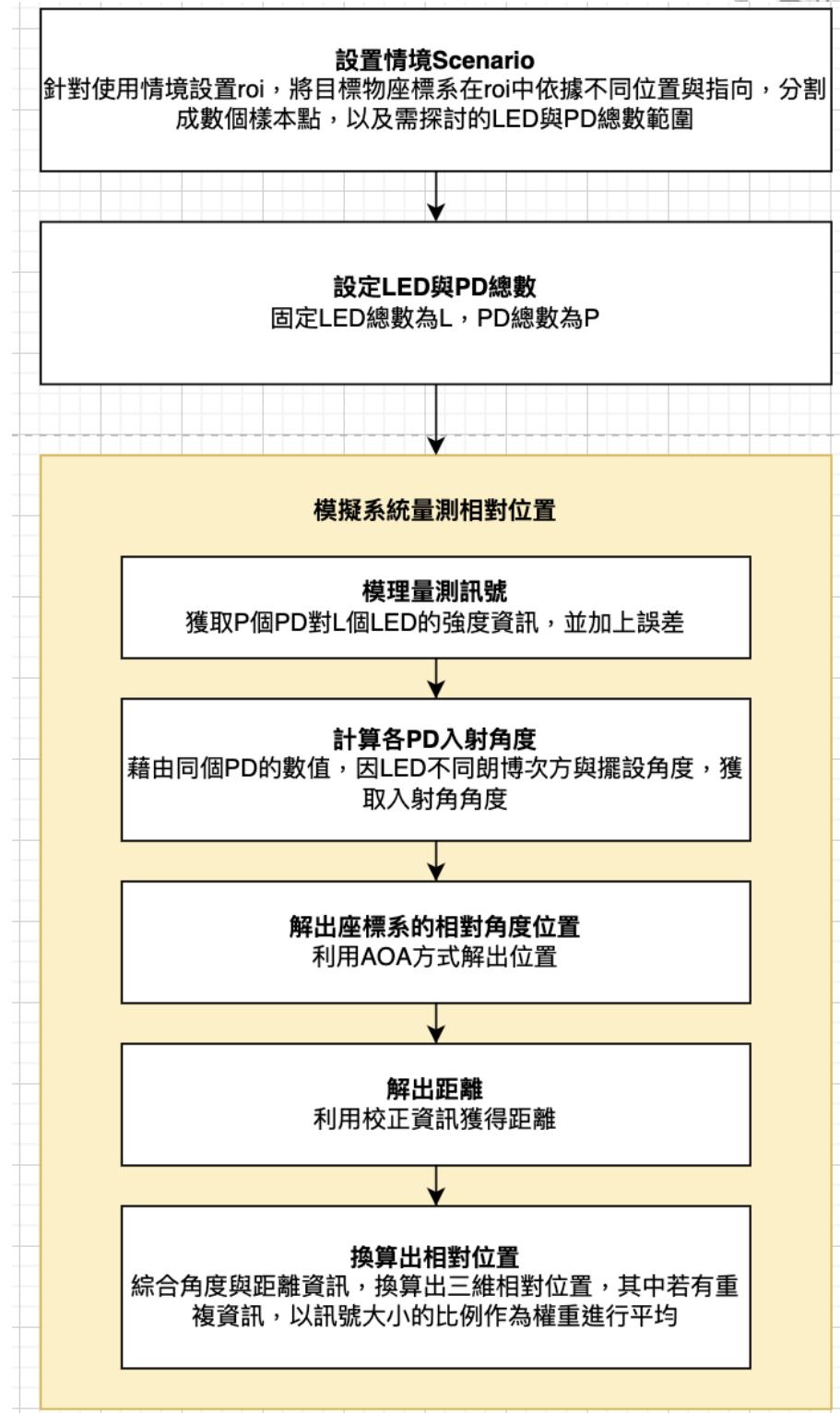


圖 4.1: 量測三維相對位置流程圖

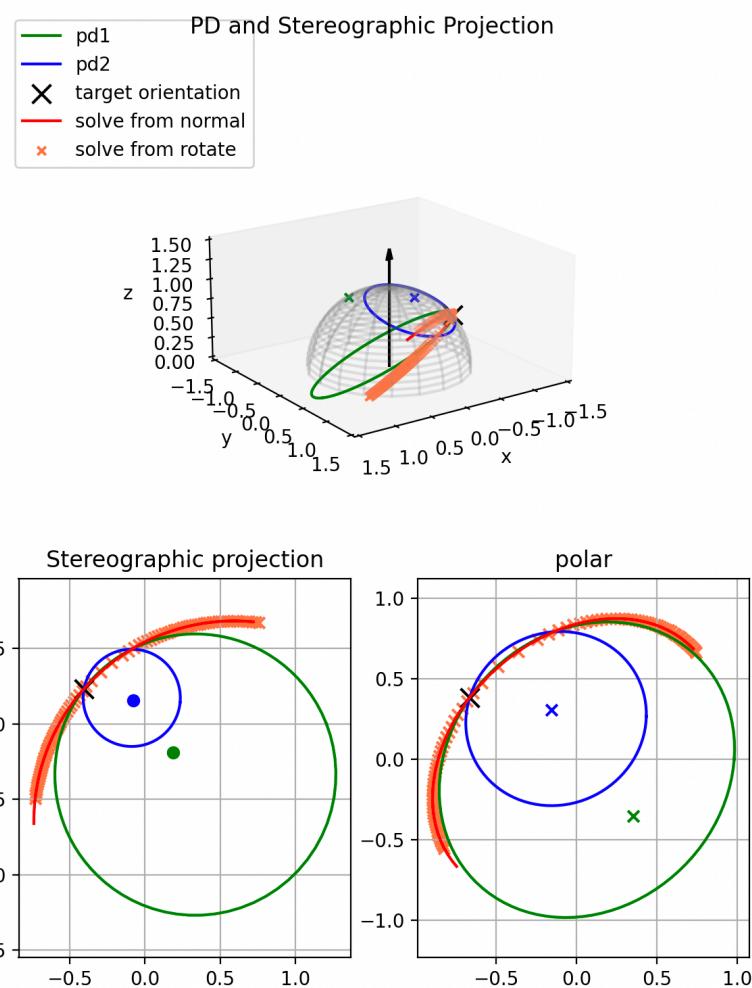


圖 4.2: 演算法結果



---

# 最佳化

---

## 5.1 簡介

此章節要針對特定情境進行最佳化，希望針對該情境，藉由調整 LED 與 PD 的硬體參數以及擺放位置，改善系統的量測表現，流程圖如5.1。

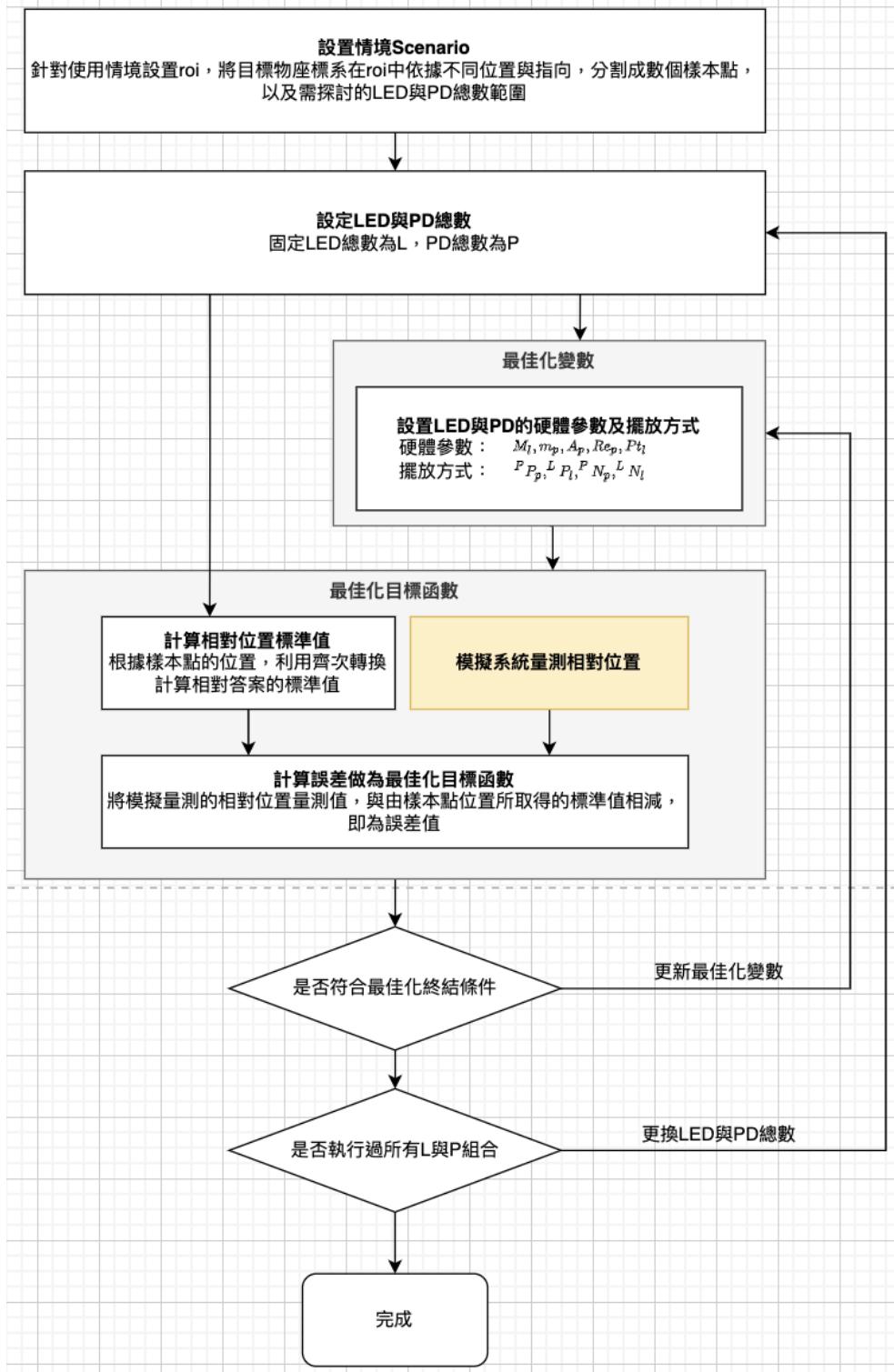
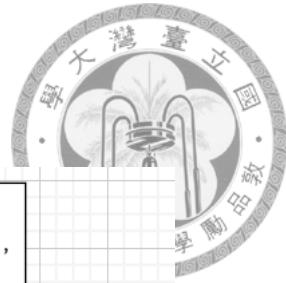


圖 5.1: 最佳化流程圖



### 5.1.1 情境設定

需先定義此量測工況中觀察者座標系的 ROI(Region of Interest)，擁有此資訊後，將此範圍切割成數個樣本點位置（圖5.2）。我們將觀察者的 PD 座標系固定，將目標物的 LED 座標系放置於各樣本點，所有樣本點的平均誤差即為量測表現，誤差愈小代表量測表現愈好。

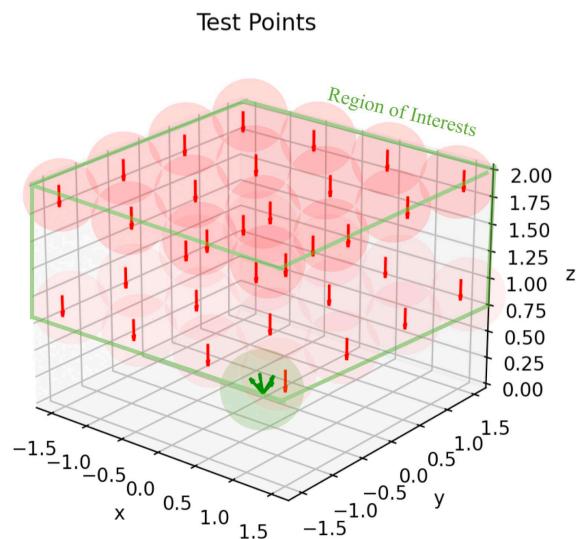


圖 5.2: ROI 與樣本點示意圖



### 5.1.2 目標函數

愈改善之目標為系統表現，期望能降低系統在 ROI 中的平均量測誤差，因此由5.1表示，將  $K$  個樣本點中的模擬量測相對位置與標準相對位置相減後，總和除  $K$  則得平均誤差；其中標準相對位置，為各樣本點相對 PD 座標系的位置；而模擬量測位置則利用第三章的方式進行數據處理所得。

( 參考5.1 )

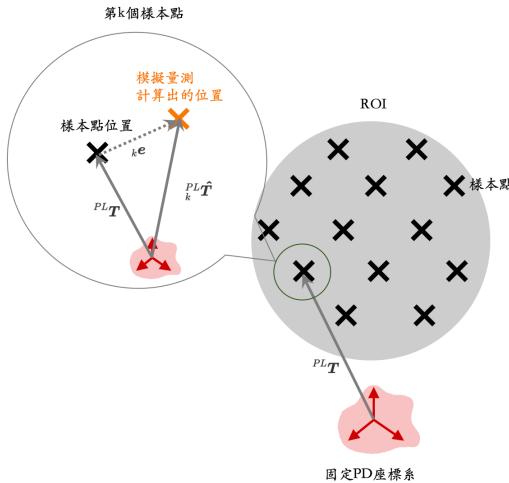


圖 5.3: 誤差示意圖

$$\underset{{}^P P_p, {}^L P_l, {}^P N_p, {}^L N_l, M_l, M_{pp}, A_p, R_{ep}, P_{tl}}{\text{minimize}} \quad f = \frac{\sum_{i=1}^K (||{}^P L \mathbf{T}_k - {}^P \hat{L} \mathbf{T}_k||)}{K} \quad (5.1)$$

where  $p = 1, 2, \dots, P$

$l = 1, 2, \dots, L$

### 5.1.3 最佳化變數

硬體參數： $M_l, m_p, A_p, R_{ep}, P_{tl}$

擺設方式： ${}^P P_p, {}^L P_l, {}^P N_p, {}^L N_l$

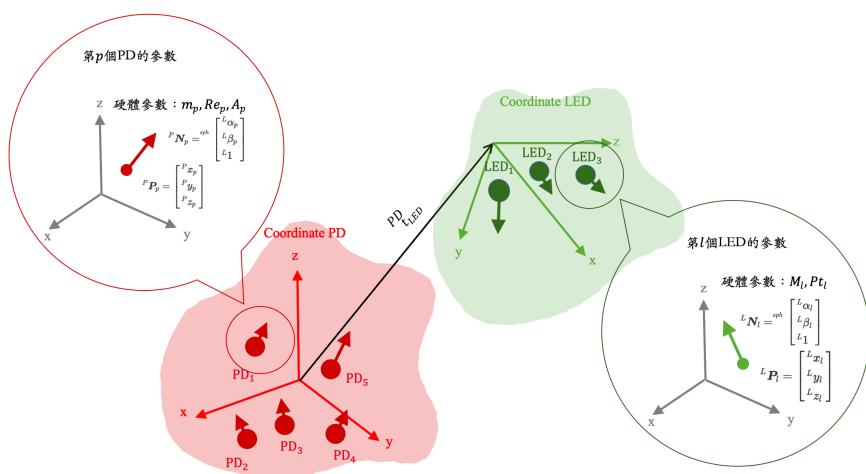


圖 5.4: 最佳化變數

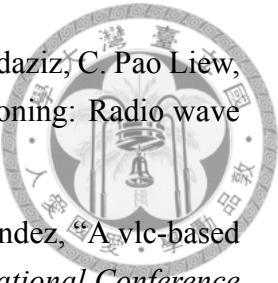


---

## 參考文獻

---

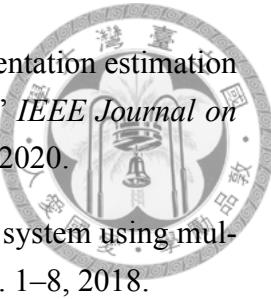
- [1] K. Shafique, B. A. Khawaja, F. Sabir, S. Qazi, and M. Mustaqim, “Internet of things (iot) for next-generation smart systems: A review of current challenges, future trends and prospects for emerging 5g-iot scenarios,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 23022–23040, 2020.
- [2] G. De Angelis, A. De Angelis, V. Pasku, A. Moschitta, and P. Carbone, “A hybrid outdoor/indoor positioning system for iot applications,” in *2015 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, pp. 1–6, 2015.
- [3] S.-C. Yeh, W.-H. Hsu, M.-Y. Su, C.-H. Chen, and K.-H. Liu, “A study on outdoor positioning technology using gps and wifi networks,” in *2009 International Conference on Networking, Sensing and Control*, pp. 597–601, 2009.
- [4] M. Maheepala, A. Z. Kouzani, and M. A. Joordens, “Light-based indoor positioning systems: A review,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 8, pp. 3971–3995, 2020.
- [5] Y. Zhuang, L. Hua, L. Qi, J. Yang, P. Cao, Y. Cao, Y. Wu, J. Thompson, and H. Haas, “A survey of positioning systems using visible led lights,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 1963–1988, 2018.
- [6] L. Mainetti, L. Patrono, and I. Sergi, “A survey on indoor positioning systems,” in *2014 22nd International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, pp. 111–120, 2014.
- [7] F. Zafari, A. Gkelias, and K. K. Leung, “A survey of indoor localization systems and technologies,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, pp. 2568–2599, 2019.
- [8] J. Kunhoth, A. Karkar, S. Al-ma’adeed, and A. Al-Ali, “Indoor positioning and wayfinding systems: a survey,” *Human-centric Computing and Information Sciences*, vol. 10, 12 2020.



- [9] T. Kim Geok, K. Zar Aung, M. Sandar Aung, M. Thu Soe, A. Abdaziz, C. Pao Liew, F. Hossain, C. P. Tso, and W. H. Yong, “Review of indoor positioning: Radio wave technology,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 1, 2021.
- [10] G. del Campo-Jimenez, J. M. Perandones, and F. J. Lopez-Hernandez, “A vlc-based beacon location system for mobile applications,” in *2013 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS)*, pp. 1–4, 2013.
- [11] H. Hasan, M. Hussein, S. mad saad, and M. A. Mat Dzahir, “An overview of local positioning system: Technologies, techniques and applications,” *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, vol. 7, pp. 1–5, 08 2018.
- [12] T. Tegou, I. Kalamaras, M. Tsipouras, N. Giannakeas, K. Votis, and D. Tzovaras, “A low-cost indoor activity monitoring system for detecting frailty in older adults,” *Sensors*, vol. 19, p. 452, 01 2019.
- [13] J.-Y. Kim, I.-S. Kim, D.-Y. Yun, T.-W. Jung, S.-C. Kwon, and K.-D. Jung, “Visual positioning system based on 6d object pose estimation using mobile web,” *Electronics*, vol. 11, no. 6, 2022.
- [14] OpenCV, “Detection of aruco markers.” Retrieved Jul 2022 from: <http://web.archive.org/web/20080207010024/http://www.808multimedia.com/winnt/kernel.htm>.
- [15] Z. Qiu, Y. Lu, and Z. Qiu, “Review of ultrasonic ranging methods and their current challenges,” *Micromachines*, vol. 13, no. 4, p. 520, 2022.
- [16] Y. Abdelrahman, A. Schmidt, and P. Knierim, “Snake view: exploring thermal imaging as a vision extender in mountains,” pp. 1067–1071, 09 2017.
- [17] D. J. Griffiths, “Introduction to electrodynamics,” 2005.
- [18] 國家通訊傳播委員會, 業餘無線電技術規範, 10 2015.
- [19] A. Motroni, A. Buffi, and P. Nepa, “A survey on indoor vehicle localization through RFID technology,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 17921–17942, 2021.
- [20] L. Ni, Y. Liu, Y. C. Lau, and A. Patil, “Landmarc: indoor location sensing using active rfid,” in *Proceedings of the First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, 2003. (PerCom 2003).*, pp. 407–415, 2003.
- [21] M. Kim and N. Y. Chong, “Enhancing rfid location sensing using a dual directional antenna,” 2005.



- [22] T. Çevik and S. Yilmaz, “An overview of visible light communication systems,” *ArXiv*, vol. abs/1512.03568, 2015.
- [23] P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu, and P. Mohapatra, “Visible light communication, networking, and sensing: A survey, potential and challenges,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2047–2077, 2015.
- [24] OSRAM Opto Semiconductors Inc., *High Power Infrared Emitter (940 nm)*, 11 2021. Ver 1.8.
- [25] Avery Dennison Corp., *UHF RFID Inlays*, 2015.
- [26] A. K. Sood, J. W. Zeller, R. A. Richwine, Y. R. Puri, H. Efstathiadis, P. Haldar, N. K. Dhar, and D. L. Polla, “Sige based visible-nir photodetector technology for optoelectronic applications,” in *Advances in Optical Fiber Technology* (M. Yasin, H. Arof, and S. W. Harun, eds.), ch. 10, Rijeka: IntechOpen, 2015.
- [27] C. A. Gueymard, “The sun’s total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models,” *Solar Energy*, vol. 76, no. 4, pp. 423–453, 2004.
- [28] *Standard Solar Spectra*. No. ASTM G-173-03 (International standard ISO 9845-1), 1992.
- [29] M. Rahman, M. A. Sejan, J.-J. Kim, and W.-Y. Chung, “Reduced tilting effect of smartphone cmos image sensor in visible light indoor positioning,” *Electronics*, vol. 9, pp. 1–19, 10 2020.
- [30] Y.-S. Kuo, P. Pannuto, K.-J. Hsiao, and P. Dutta, “Luxapose: indoor positioning with mobile phones and visible light,” *Proceedings of the 20th annual international conference on Mobile computing and networking*, 2014.
- [31] G. Kumar, G. Rao, and M. Kumar, “Gps signal short-term propagation characteristics modeling in urban areas for precise navigation applications,” *Positioning*, vol. 04, pp. 192–199, 01 2013.
- [32] A. H. A. Bakar, T. Glass, H. Y. Tee, F. Alam, and M. Legg, “Accurate visible light positioning using multiple-photodiode receiver and machine learning,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1–12, 2021.
- [33] S.-H. Yang, H.-S. Kim, Y.-H. Son, and S.-K. Han, “Three-dimensional visible light indoor localization using aoa and rss with multiple optical receivers,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 14, pp. 2480–2485, 2014.
- [34] W. Mccluney, *Introduction to Radiometry and Photometry 2nd ed: Title Page & Table of Contents*. 11 2015.



- [35] S. Shen, S. Li, and H. Steendam, “Simultaneous position and orientation estimation for visible light systems with multiple LEDs and multiple PDs,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 38, pp. 1866–1879, aug 2020.
- [36] X. Yu, J. Wang, and H. Lu, “Single led-based indoor positioning system using multiple photodetectors,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 10, no. 6, pp. 1–8, 2018.
- [37] X. Yu, J. Wang, and H. Lu, “Indoor positioning system based on single led using symmetrical optical receiver,” in *Asia Communications and Photonics Conference (ACP) 2018*, p. Su2A.50, Optica Publishing Group, 2018.
- [38] S.-H. Yang, E.-M. Jeong, and S. Han, “Indoor positioning based on received optical power difference by angle of arrival,” *Electronics Letters*, vol. 50, pp. 49–51, 2014.
- [39] T. Raharijaona, P. Mignon, R. Juston, L. Kerhuel, and S. Viollet, “Hypercube: A small lensless position sensing device for the tracking of flickering infrared leds,” *Sensors*, vol. 15, no. 7, pp. 16484–16502, 2015.
- [40] S. U. Rehman, S. Ullah, P. H. J. Chong, S. Yongchareon, and D. Komosny, “Visible light communication: A system perspective—overview and challenges,” *Sensors*, vol. 19, no. 5, 2019.
- [41] J. Barry, J. Kahn, W. Krause, E. Lee, and D. Messerschmitt, “Simulation of multipath impulse response for indoor wireless optical channels,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 11, no. 3, pp. 367–379, 1993.