

符號列表

符號列表

座標系

P	座標點
x, y, z	座標點 P 的 x, y, z 分量
N	單位向量
u, v, w	單位向量 N 的 x, y, z 分量
α	球座標系中的仰角分量
β	球座標系中的方位角分量

座標系轉換

H	齊次轉換矩陣 Homogeneous Transformation Matrix
T	平移向量 Transfer Vector
Ro	旋轉矩陣 Rotation Matrix

LED 與 PD 的交互關係

ϕ	PD 入射角
θ	LED 出射角
D	距離

硬體參數

符號	LED 硬體參數
M	LED 的朗伯次方 (Lambertian Order)
Pt	總輻射通量 (Total Radiation Flux)



符號	PD 硬體參數
m	PD 的朗伯次方 (Lambertian Order)
A	有效面積
Re	響應率 (Responsivity)

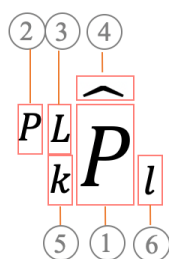
光學領域單位

符號	中文	英文	單位符號	國際單位制
Ω	立體角	Solid Angle	sr	球面度 (Steradian)
ω	角度	Angle	rad	弧度 (radian)
r	半徑	Radius	m	公尺
Φ	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) $\hat{\cdot}$ 代表該物理量為量測所得或處理量測所得訊號而得
- (5) 第 k 個樣本點 ($k = 1, 2, \dots, K$)
- (6) 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



緒論

1.1 前言

隨著工業 4.0 的發展，機器、人與環境之間的交互互動愈發頻繁，萬物互連的背景之下，各領域對於量測資訊的需求大量增加，其中了解位置資訊為機器與人類進行判斷與計算的基礎。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。

1.1.1 室內定位簡介

現今室外定位主要仰賴全球衛星定位系統 (GPS)，然而礙於衛星訊號受建築物遮蔽的特性，GPS 定位技術無法應用在室內場域，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。室內定位主要面對的困難與室外不同，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嚴重，以上議題都會增加誤差，且室內應用所需求的精度大多高於 GPS，因此如何設計合適的室內定位系統近年來受到研究矚目 [1]。

室內定位最常見的分類方式為技術 (Technology) 與方法 (Technique) [2]，技術針對所使用的訊號與硬體種類進行分類，例如相機、紅外線、WiFi、藍芽等不同技術；而方法則是探討不同訊號皆收與處理的方式，如 RSS (Received Signal Strength) 與 ToF (Time-of-Flight) 兩種訊號接收方式，以及三邊量測法 (Trilateration)、三角測量法 (Triangulation) 等取得相對位置訊號的方法。



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：

量測範圍與精度 包含精度、覆蓋範圍（Coverage）、目標偵測距離。

成本 包含硬體設備成本、系統能耗等

靈活度 硬體大小、拆裝方便性、所需校正時間

是否定位可視範圍外 若要進行非可視範圍（NLoS）內的定位，需利用可穿透障礙物的訊號，並犧牲精度。

是否進行即時應用 若要進行即時應用，量測數據處理速度需夠快以避免訊號延遲，需犧牲訊號處理的複雜度及其附加的精度提升可能性。

目標物是否為特定物 若目標物為特定某物體，則系統需有分辨訊號發送者的能力，例如無線電波的加密技術，反之光達僅有分辨訊號的有無，難以進行目標物辨識。

目標物式否有欲先安裝之特徵點 是否能對目標物預先安裝特徵點也會影響系統設計，無法預先安裝特徵點的例子為自駕車，其需在陌生環境中以相機辨識周遭物體為人車或是建築物並進行定位；反例則為安裝在欲追蹤物體上的AirTag，其發送訊號以利手機追蹤並定位。

對環境的理解程度 大多 WiFi 與藍芽技術使用指紋比對（Fingerprinting）的方法，將系統設置完成後，預先進行大量的訊號蒐集，將接收訊號與數據庫比對得出位置，然而此方法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。

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，進而對不同設計參數做出取捨，是完成有效室內定位系統的關鍵之一 [2]。

1.2 研究動機：情境描述

室內定位的方法分成許多種，根據不同的應用需求與特性適用的方式也不盡相同。本研究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，提供一量測單位與一被量測單位，能夠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。

為更具體呈現目標的使用情境，以下舉實例描述：

智慧工廠（待補）

智慧病房（待補）

其他 智能載具與服務目標的定位、輔助視障者理解移動方向、機場內針對什麼的量測



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，然而針對此情境仍沒有一個合適的方案，因此研究目的歸納如下：

- 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，其中場域需包含醫療環境，因此著重在探討光波段的定位應用。
- 針對光波段定位，將被簡化的參數納入考量，並將組態上的限制放開，且試圖將定位維度提升到三維。
- 將不同應用情境納入考量，發展一套完整流程，針對不同情境進行最佳化，以提供最佳組態。

本研究以 LED（發光二極體，Light Emitting Diode）與 PD（光電二極體，Photodiode）的近紅外光定位為主，針對不同情境對 LED 與 PD 的組態與配置最佳化，其中在模擬中更完整的考慮各種因素並減少組態上的限制，以更貼近實際應用上的狀況。

1.4 論文架構

本研究分為六個章節，論文架構如圖：

[補論文架構圖]

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

介紹室內定位的技術與方法，並針對光定位的相關方法與現今文獻進行探討。

第三章 LED 與 PD 定位方法

詳細說明本研究如何利用 LED 與 PD 進行相對定位量測，並進行誤差分析。

第四章 最佳化

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

第五章 案例

針對不同情境 (Scenario) 進行最佳化，提出最佳解並探討成效。

第六章 結論

整理本研究之結果討論，並敘述後續研究之方向。





文獻回顧

本研究所探討情境下的量測方法有以下需求：有易於拆裝的量測單位與被量測單位，能夠快速進行拆裝、靈活應用於不同場域，而安裝完成後即可進行三維相對位置量測。為滿足靈活且易於安裝且能夠應用在不同場域的特性，需要有體積小、能耗低、所需校正步驟少、能夠使用於不同場域等特色。

因此，本章節先定義所謂相對定位，再介紹現有文獻的定位技術與方法，比較優缺點並凸顯「近紅外光定位」的優勢，近而針對本論文著重的「LED 與 PD 以近紅外光波段進行定位」的文獻進行探討，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」。首先，本論文所討論的情境為一量測物針對另一特定目標物進行相對位置的量測，如智慧工廠內的機械手臂欲取得與移動載具之間的相對關係，以利夾取搬運物品至載具上進行運送。

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）。

$$\begin{bmatrix} {}^{PL}P \\ 1 \end{bmatrix} = {}^{PL}\mathbf{H} \begin{bmatrix} {}^LP \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{PL}\mathbf{Ro} & {}^{PL}\mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^LP \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$${}^{PL}\mathbf{T} = \begin{bmatrix} {}^{PL}x \\ {}^{PL}y \\ {}^{PL}z \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

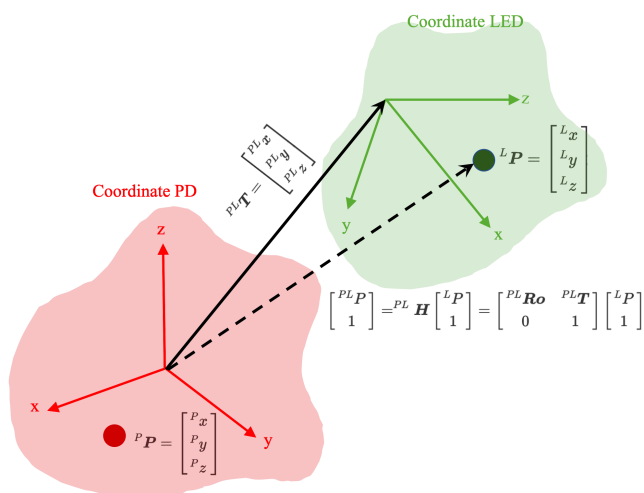


圖 2.1: LED 座標系與 PD 座標系及相對關係

其中，兩座標系之間的平移關係 ${}^{PL}\mathbf{T}$ 即為欲得到的相對位置資訊，共有三個自由度。

2.2 定位方法介紹

(這段或許可以省略) - 定位方法介紹：RSS、TDOA 這些

- 先用方法得到角度、距離資訊：利用 RSS、TDOA 比較 - 組合角度、距離資訊得到位置：Multilateration, Fingerprinting

2.3 定位技術介紹

室內定位所使用的技術 (Technique) 十分多樣，包含使用電磁波段內的 Wifi、藍芽、RFID (Radio Frequency Identification, 無線射頻辨識)、可見光定位以及相機定位等，其他使用非電磁波斷的室內定位技術主要為超聲波，應用 ToF 方法量測訊號發射至接收的時間，然而該技術受溫度影響，且對目標物的辨識能力不佳，目前著重在自駕車與載具中障礙物的有無偵測上 [3]，並不符合研究目標，因此以下章節聚焦在電磁波斷的定位進行分析。



2.3.1 以電磁波頻率切入

如讓所述，電磁波段內有許多不同現今受到關注的量測技術，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。

本段落由電磁波的頻率切入，頻譜圖如圖2.2，大致分為三部分探討：頻率高於 790THz 的高能量波段、頻率介於 790THz 與 300GHz 之間的光波段、頻率低於 300GHz 的低頻波段 [4]。

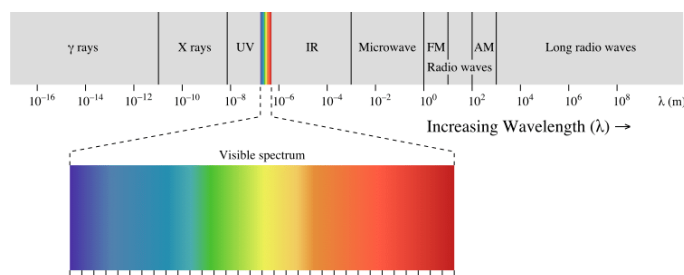


圖 2.2: 電磁波頻譜度 [5]

首先，電磁波頻率越高所含能量越高，此特性使得高頻波段（X 光、紫外線、伽瑪射線）對人體有害，因此無法使用於定位。

比較光波段與低頻波段的特性：首先，光波段無法穿透障礙物，僅能進行可視範圍內（LoS）的定位；反之低頻波段擁有穿透大多障礙物的特性，因此可用於跨房間、非可視範圍（NLoS）的定位 [2]。非可視範圍定位增加了應用場域，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。舉 RFID 定位來說，大多應用在固定的場域中建立數據庫，或是利用大量的感測器與訊號發射器來判斷定位 [6]。

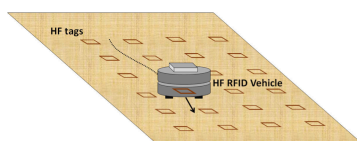


圖 2.3: RFID 定位系統示意 [6]

電磁波另一個特性為：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 [7] 且能耗低，而 RFID 的感測器常見量級為 cm [8]。

綜上所述，比較低頻波段與光波段，從精度層面來看，光波段捨棄非可視範圍的定位以減少影響訊號的因素，加上波長較短的特性，較符合本研究目標；針

對靈活應用的需求，光波段無論是小體積還是低能耗，都是較佳的選擇。因此，根據本研究目標所需，將研究方法聚焦在光波段的定位上。



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（LC, Light Communication）的發展。光通訊吸引了不少研究人員的注目，尤其是可見光波段的通訊，因能搭配室內的照明光源進行系統建制，以上原因帶動與光通訊息息相關的光定位領域，互相提升附加價值。

光波段的分類可從兩方向切入：使用波段與感測器硬體選擇，以下依序進行探討：

使用波段選擇：可見光或紅外光

研究普及度

首先，現今室內定位的研究主要著重在可見光的部分 [9]，搭配著室內環境都具有的光源，其優點強調在不對室內環境進行過多改動上即可進行定位量測。然而本研究需能靈活將光源安裝於任意被觀察物上，因此室內充足的可見光光源並不能成為訊號載體，因此雖然可見光波段擁有較多文獻與研究，其並不符合本研究目標，僅能參考方法與眼算法等，所以挑選光波段重點將著重在降低誤差上。

硬體技術

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。這也是為什麼普遍對紅外光波段的硬體都有價格昂貴的印象，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 [10]。因此，考量到硬體的價格與普遍性，挑選可見光與近紅外光波段較為合適。

誤差

利用 Photodiode 定位最大的困難就是要克服其他光所造成的雜訊（Shot Noise），因此在選擇工作波長時，挑選自然環境中強度較低的波段。日常環境中的光源包含太陽光與燈，太陽光可以從圖 2.4 太陽輻射波譜（Solar Irradiance Spectrum）觀察強度與波長的關係，低谷出現在 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 [11]。

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（Ambiguous Light Source），其中環境光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。

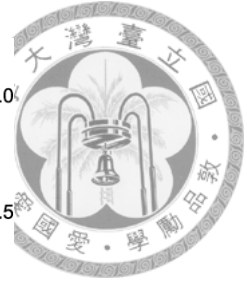
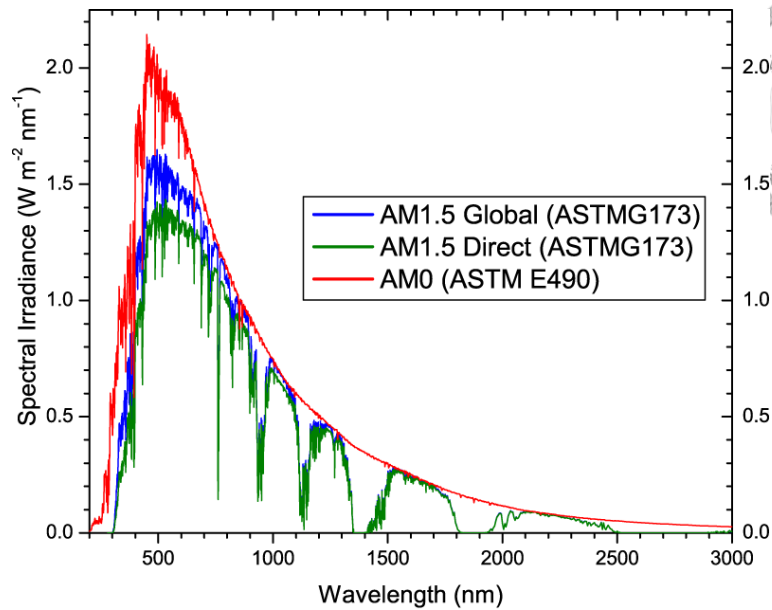


圖 2.4: 太陽輻射波譜 [12]

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，而太陽光源的強度則隨頻率增減。從太陽光頻譜圖可以觀察到，太陽光於光波段受到大氣層吸收有三處的能量較低，藉由挑選低谷頻率，即可有效降低太陽光對系統的影響。

times intensified. This phenomenon is called n

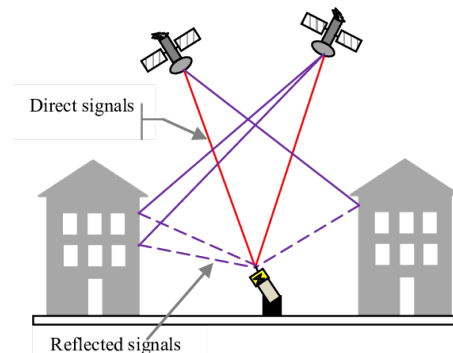


圖 2.5: 多重路徑傳輸 [13]

對人眼影響

本研究目標需應用於移動物體上，因此紅外光呈現優勢，即使光源在環境中的使用者面前直射，紅外光無法在視網膜成像的特性讓使用者並不會感受到影響；反之，朝人眼照射可見光源會造成干擾。除此之外，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。

硬體選擇：PD 或影像感測器

小節

(補圖)

權衡之下，挑選於太陽光輻射光譜中低谷的 760nm 與 940nm 波段，同時享有硬體選擇多且價格低的優勢，又減少了太陽光源所影響的程度，並使裝置保持輕巧低成本又不干擾人眼與日常生活的優點。

2.4 LED 與 PD 的定位方法

LED 與 PD 的定位方式，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。

為深入了解系統運作方式，從基本的光領域常用單位切入，開始介紹 LED 與 PD 的硬體特性與參數，以及光傳播上的模擬建模，再進入系統整體的細節，以及此領域的文獻探討。

2.4.1 光領域基本介紹

由於光領域所使用的單位與機械領域差距較大，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，描述光照的單位在文獻上經常有些混亂，單位分為兩種制度，且常有混用以及口語省略，令人感到困惑，因此以下進行釐清：光領域中的計量單位大致分成兩種系統，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。[14]

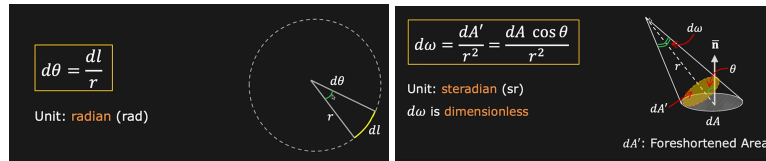
Radiometric				Photometric		
Quantity	Symbol	Unit	Definition	Quantity	Symbol	Unit
Radiant Energy	Q_e	Joule		Luminous Energy	Q_v	Talbot
Radiant Power	Φ_e	Watt	$\Phi = \frac{dQ}{dt}$	Luminous Power	Φ_v	Lumen (lm)
Radiant Intensity	I_e	Watt/sr	$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$	Luminous Intensity	I_v	candela (cd) = Lumen/sr
Radiance	L_e	Watt/m ² sr	$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dA_{\perp}}$	Luminance	L_v	Lumen/m ² sr
Irradiance	E_e	Watt/m ²	$E = \frac{d\Phi}{dA}$	Illuminance	E_v	Lux=Lumen/m ²

本研究聚焦在近紅外光波段，因此本論文所使用的單位系統為輻射測量學的系統，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簡單敘述。



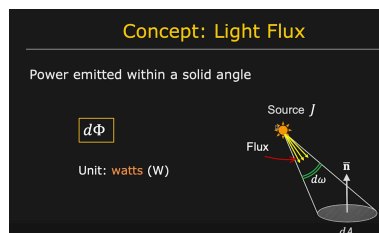
立體角 Solid Angle Ω

描述二維空間中的角度單位為弧度，表示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（Solid Angle），該物理量代表錐狀立體角在球面上的表面積與半徑平方的比例，其中，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 。



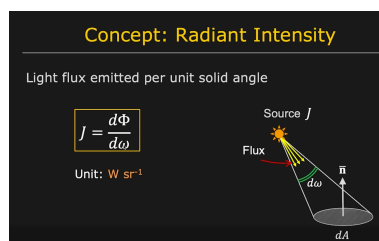
輻射通量 Radiant Flux Φ

描述光照功率的物理量單位為通量（Flux）或稱輻射功率，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

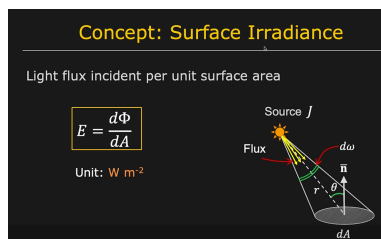
每單位立體角所含的通量稱為輻射強度，此物理量常用於描述光與角度之關係，其與距離無關。



輻照度 Irradiance E

每單位面積所含的通量稱為輻照度，其中照射面積隨著距離 D 增加而平方遞增，在已知距離的情況下，即可利用立體角的定義，換算輻射強度與輻照度之間的關係^{2.3}， ω 為入射表面與光源之夾角。

$$E = I \cos \omega / D^2 \quad (2.3)$$



2.4.2 LED 與 PD 的硬體參數與特性

為建立一完整描述光傳遞的模型，需先介紹實際實際硬體挑選時所需注意的參數。

首先 LED 包含總輻射強度、半角度

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 Lambertian Radiation Pattern，本論文也只考慮此類硬體。軸對稱代表當 LED 或 PD 僅對出射角或入射角以及距離有敏感度，以球座標系來看，凡在同一仰角與距離，無論方位角為何，光照強度與感光強度皆相同。

2.4.3 光傳遞模型

LED 與 PD 的照射與接收模式 (Pattern) 可以用 Lambertian Radiation Pattern 量化，代表感光與發光強度隨著 LED 出射角與 PD 入射角的增加而變小，其衰減模式可用餘弦函數 (cosine) 的 M 次方 (power) 表示，M 代表的是 Lambertian Order。

以二維的角度來看如圖，LED 光照射的能量隨出射角度增加而減少，在 LED 中心軸的方向強度最高，在此描述 LED 強度時不考慮距離。如先前所述，LED 為軸對稱，因此三維的照射模式即為二維模式以中心軸旋轉。在同樣出射角下，光 intensity 相同。

有了光 intensity 在不同入射角的關係，將整個半球中的 intensity 積分，得到 LED 在整個半球上所照射的總瓦數比例，將該值倒數，即可由 LED 發射之總能量推算各入射角的光 intensity。

討論完 LED 與角度的關係後，再來考慮光能量與距離的關係。考慮同一 Solid angle 下的一束光，隨傳遞距離拉長，所照射到的表面積增加，因此「能量」隨距離平方遞減。

綜合角度與距離的影響，空間中任一點的「光大小」如式

接著考慮 PD 接收的 Model，PD 的接收能量與入射角同樣遵守 Lambertian Pattern，變數一樣包含入射角以及 Lambertian Order。除了角度以外，藉由乘上 PD 的硬體參數感光面積得到該 PD 所感測到的瓦數，PD 會將感受到的光瓦數轉換為電流輸出，其中轉換比例為 Responsivity。

舉具體的例子來描述 lambertian order 的影響，M 越大的 LED，光強度隨出射角度衰減的速度越大，而照射範圍則越小。在挑選硬體時，M 的選擇則為強度與範圍的取捨。同樣總輻射能量的 LED，不同 M 隨角度的發光強度如圖示，首先可以觀察到 M 越小所覆蓋的角度範圍越大，而中心軸的光強度也小很多，其原因是



因為其照射範圍大，因此在半球面上大角度的積分，入射角度越大時在半球面上的面積越大。

從硬體層面來看，LED 與 PD 的照射範圍

2.4.4 LED 與 PD 定位系統

LED 與 PD 的相對定位量測系統中，根據2.1目標物為 LED 座標系，剛體上裝載著主動發送訊號的 LED；而量測者為 PD 座標系，上面裝載著傳感器收取資訊；兩座標系上的感測器與訊號發送器皆為固定的，可以想像成將 PD 焊於電路板上，封裝成一量測儀器，並以螺絲等固定在量測者剛體上，隨著量測者與目標物移動時，兩座標系之間的座標轉換關係會改變，然而 PD 與其座標轉換關係並不會改變，LED 亦然。

2.4.5 LED 與 PD 定位文獻探討

了解 LED 與 PD 定位系統的運作方式後，本章節介紹現有文獻的成果，並舉實例情境來凸顯此領域不足之處，提出可改善之方向。

(不確定走向，所以先用列表整理在 Notion 之後確定再補上)

⌵ Name	LED	PD	LED_Ja...	PD_Jamb	硬體	演算法	2D
Single LED Based Indoor Positioning System Using Multiple Photodetectors	1	3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	線性代數解 (把cos換成xyh)	
Indoor Positioning System Based on Single LED Using Symmetrical Optical Receiver	1	5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	線性代數 + ref point	
Accurate Visible Light Positioning Using Multiple-Photodiode Receiver and Machine Learning	4	6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	RSS, WkNN	
Three-Dimensional Visible Light Indoor Localization Using AOA and RSS with Multiple Optical Receivers	1	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	exponential model, trilateration, AOA, 3D利用150公分迭代找誤差最小	
HyperCube: A Small Lensless Position Sensing Device for the Tracking of Flickering Infrared LEDs	3	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	三個朝九十度擺放，兩兩比較得兩個角度，AOA	
An Indoor Visible Light Positioning System Using Tilted LEDs with High Accuracy	4	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Polynomial fit計算每個LED強度與反射次數(不太準)	

2.5 結論

雖然此種做法已被討論且有潛力，但缺少完整考慮 [三維、組態、硬體參數] 的方式，因此本論文有以下研究成果：

- 利用 LED 與 PD 進行三維相對位置量測的方法，於第三章詳述。


- 為了將第三章所提出之相對位置量測方法，靈活應用於不同情境，提出針對不同使用情境的最佳化方法，藉由調整硬體參數、LED 與 PD 的組態 (Deployment)，改善系統表現，於第四章詳述。
- 第五章將提出之最佳化方法實作，以不同情境做為模擬案例，為各自設計最佳的量測系統參數與組態，並進行分析與比較。
- 第六章針對本論文的研究成果總結，並提出未來改善方向。





參考文獻

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Z. Qiu, Y. Lu, and Z. Qiu, “Review of ultrasonic ranging methods and their current challenges,” *Micromachines*, vol. 13, no. 4, p. 520, 2022.
- [4] D. J. Griffiths, “Introduction to electrodynamics,” 2005.
- [5] Y. Abdelrahman, A. Schmidt, and P. Knierim, “Snake view: exploring thermal imaging as a vision extender in mountains,” pp. 1067–1071, 09 2017.
- [6] A. Motroni, A. Buffi, and P. Nepa, “A survey on indoor vehicle localization through RFID technology,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 17921–17942, 2021.
- [7] OSRAM Opto Semiconductors Inc., *High Power Infrared Emitter (940 nm)*, 11 2021. Ver 1.8.
- [8] Avery Dennison Corp., *UHF RFID Inlays*, 2015.
- [9] 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.
- [10] 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.

- 
- [11] 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.
- [12] *Standard Solar Spectra*. No. ASTM G-173-03 (International standard ISO 9845-1), 1992.
- [13] 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.
- [14] W. McCluney, *Introduction to Radiometry and Photometry 2nd ed: Title Page & Table of Contents*. 11 2015.