

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 電腦與資訊學科

佳作

052505

無人機 SLAM 自主飛行與立體建模運用於橋樑
劣化檢測之研究

學校名稱：臺北市立內湖高級工業職業學校

作者： 職二 郭乃文 職二 劉軒廷 職二 孫瑋廷	指導老師： 陳昭安 陳永華
---	-----------------------------

關鍵詞：飛行器、橋墩安全檢測、
即時定位與地圖構建

摘要

本研究運用無人機透過自主飛行及 SLAM 技術，輔助維護人員進行安全而穩定橋樑劣化檢測機制。透過飛行穩定、姿態資訊明確的自主飛行無人機，運用 Python 撰寫 UDP 連線程式，即時接收並判讀無人機回傳的影像及姿態資訊，再傳送飛行命令給無人機以順利在橋樑間巡行，而接收的影像則提供目視判斷損害狀況及 LSD-SLAM 建立強梁的 3D 模型自動標示測量損害處的尺寸。最終結果證實無人機可取得符合橋梁優選指標 (PI) 的必要資訊，以安全、效率的方式，取代目前必須多人爬上爬下，分工目視及測量方式。

壹、研究動機

先前在新聞上看到，連接東海岸及花蓮市區的花蓮大橋，在莫拉克颱風過後出現 6 根橋墩裸露的情形，且都位於主要行水區，幸好花蓮地區雨勢不大，否則花蓮大橋恐將出現斷橋的危機。

後來又看到公路局利用無人機來對山區來檢查是否會有土石流的狀況，就在想若能運用飛行器輔助橋墩安全檢測，不僅能提高效率，還可以有效降低人為失誤造成的風險。



圖 1：橋墩劣化示意圖

透過從學校學習到的機器人基礎，我們改良市售飛行器，運用程式撰寫出自主飛行功能

使其往關鍵位置移動，再利用接收即時影像製作空間建模的功能。此作品利用影像處理及 SLAM 技術提升空拍機的特點有二：

- 一、運用空拍機可以彈性的克服空間差異，到多個地點進行影像拍攝。
- 二、將空拍機拍攝到的影像透過 SLAM 技術建立 3D 模型。

貳、研究目的

- 一、蒐集關於自主飛行的資料及研究。
- 二、研究運用影像辨識製作出自主飛行功能。
- 三、研究運用 SLAM 技術建構出地圖建模。
- 四、結合地圖建模與影像辨識技術，達成空間建模。
- 五、運用飛行器至橋梁各處進行拍攝後建模，輔助完成橋梁安全檢測。

參、研究設備及器材

一、軟體環境

名稱	版本	用途
Python	3.8.1	撰寫自主飛行程式
OpenCV	4.1.2	撰寫影像辨識程式
Ubuntu 14	14.04.6	使 ROS Indigo 可以開發使用
ROS Indigo	Indigo Igloo	使 LSD-SLAM 可以開發使用
Window 10	1909	作業系統
LSD-Slam		直接使用圖像進行地圖構建的大型直接

		單眼 SLAM
Visual Studio Code	1.41.1	撰寫 Python 程式語言的程式碼編輯器

二、硬體規格

名稱	型號	用途
四軸飛行器	DJI Tello EDU	市售飛行器，將飛行運動之代碼寫入
筆記型電腦	MSI GL62	編寫以上程式，及寫入飛行器

肆、研究過程或方法

本研究的構想是採用市面上可穩定飛行、具有 WiFi 連線可以發送及回傳數據及自帶的視訊攝影機的四軸飛行器。作品可利用上述的功能，運用回傳的姿態、速度及拍攝影像資訊進行程式進行特定空間的自主飛行及影像儲存。接著再利用 SLAM 技術進行空間建模，計畫將此空間建模的結果，應用橋樑劣化的輔助評估，系統運作的概念圖如圖 2 所示：



圖 2 使用 SLAM 進行橋樑建模輔助劣化評估的概念圖

作品必須可以讓飛行器自主飛行，飛行過程中進行有效的橋樑 3D 建模，再將建模結果

運用劣化檢測優選指標進行評估，研究架構如圖 3 所示，主要的研究規劃：

- 一、自主飛行：研究如何配合影像辨識進行某特定物品的位置鎖定，藉此物品的位置當參考定位，進行四軸飛行器的飛行控制，以達成飛行橋樑四周，拍攝完整的橋樑整體，並交由 SLAM 完成整體橋樑建模。
- 二、橋樑建模：研究使用 LSD-SLAM 直接法分析像素點，以及計算相機與物體間的距離，透過 Open3D 完成建模圖形，以達成遠端分析橋樑狀況。
- 三、劣化檢測優選指標：運用自主飛行對橋樑附近進行拍攝後，傳入 SLAM 建模。由於 3D 模型是利用點雲形成的，因此可以從得到模型中輕鬆地度量損害處的大小數據，使維護人員可以在遠距處方便而安全的評估橋樑狀況。研究中將探討 3D 模型與目前相關維護單位應用的指標是否具有輔助的價值。

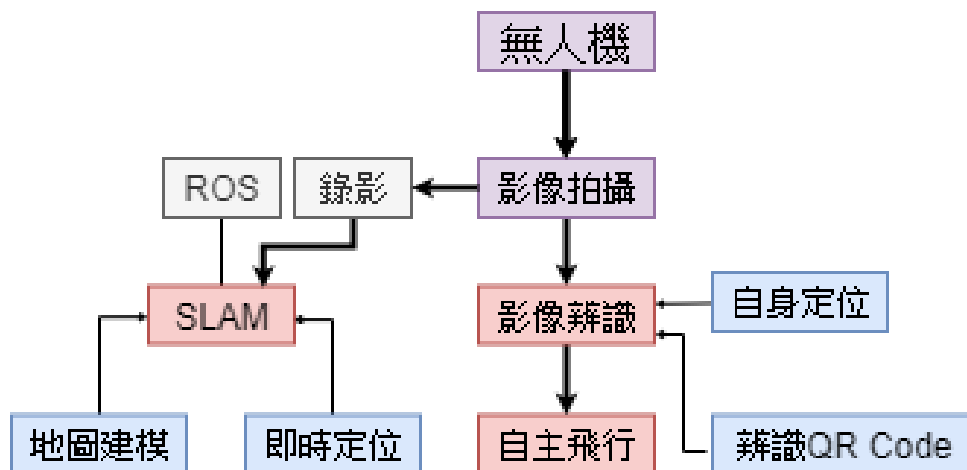


圖 3：作品架構圖

無人機 SLAM 建模運用於橋樑劣化檢測的運作流程主要有五個步驟，運作流程會透過自主飛行以最有利於完整拍攝的飛行路徑進行橋樑拍攝，再將拍攝的結果建模，建模結果產生後再交給專業的檢測人員們進行最後的評分，流程如圖 4 所示。

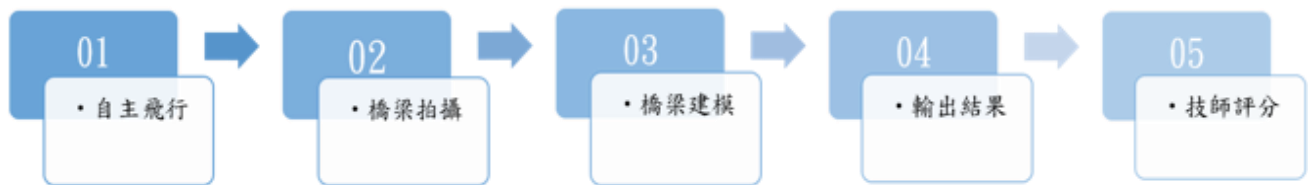


圖 4：作品流程圖

一、台灣橋樑安全檢測的實施方式

(一) 橋樑檢測的指標

目前在台灣橋樑檢測人員都以目視來完成檢測工作，採用的是 DER&U 評估法（中央大學營建管理研究所，2008），運用手動量測與橋樑優選指標（PI）來評斷橋樑目前的狀態，下列為橋樑優選指標（PI）公式。

$$I_{c_{ij}} = 100 - 100 \times \frac{D \times E \times R^a}{4 \times 4 \times 4^a}$$

此公式 $I_{c_{ij}}$ 為構件 i 之第 j 部分的狀況值，值域為 0 ~ 100；D 為橋樑的劣化嚴重程度 (Degree)；E 為評估橋樑的劣化範圍(Extend)；R 為考慮劣化對整體橋樑結構安全性之影響 (Relevancy)；a 為橋樑重要性參數，通常取 1，若強調構件重要性時取 2。這些變數都以檢測人員目視決定，範圍及標準如下表。

	0	1	2	3	4
D	無此項目 或良好	微	尚可	差	嚴重損壞
E	無此項目	< 10%	< 30%	< 60%	<
R	無法判定	微	小	中	大

圖 5：D、E、R 檢測範圍及標準（高工局審查標準, 2010）

 <p>D=2：橋基礎輕微沖刷，裸露程度尚可，基礎結構未損壞</p> <p>E=3：多數橋墩均有此劣化情形</p> <p>R=3：暫不影響橋墩穩定性，但因基礎結構屬小口徑基礎，若持續遭洪水衝擊侵蝕，可能會造成基礎損壞、橋墩傾斜等劣化情形。</p>	 <p>D=3：橋基礎裸露深度較大，局部基礎破壞</p> <p>E=2：應視現場各橋墩劣化情形而定</p> <p>R=4：沖刷已對橋墩穩定性造成影響</p>	 <p>D=4：沖刷情形嚴重，多數基礎斷裂</p> <p>E=2：應視現場各橋墩劣化情形而定</p> <p>R=4：嚴重影響到結構之穩定性，應儘速搶修</p>
輕度劣化	中度劣化	重度劣化

圖 6：劣化差異比較 (高工局審查項目, 2010)

(二) 檢測流程構想

因目前檢測方式主要採用人為目視，除了需要花費大量人力以外，還有人為失誤產生的風險，若使用本作品輔助檢測，不但可降低人事成本且也更加安全。



圖 7：人員進行橋樑檢測

預計若採用無人機協助檢測人員進入檢測橋樑各處進行拍攝，再將拍攝結果建模，讓檢測人員可以於 3D 模型中，取得檢測的數據進行劣化評估，將可以大大改善檢測人員的工作品質，預計與傳統的優缺比較如表 1。

表 1：傳統檢測與本作品輔助比較

比較項目 \ 檢測方式	工程人員人力檢測	無人機 SLAM 建模輔助檢測
作業方式	由專業人員目視檢測	運用飛行器拍攝橋梁各處照片並建模橋梁立體圖形，可加入預判功能。
判定方式	交由專業技師判定劣化	交由專業技師判定劣化程度

	程度	
檢測效率	中	高
精確程度	高	高
人力成本	需要多人分工完成	只需飛行器及一位操作員
人員安全	有人為失誤的風險	因不須人為檢測，因此降低人為失誤造成的風險

二、自主飛行

自主飛行必須建立在兩項基礎之上，「飛行控制」以及「影像辨識」。飛行控制部分，我們需先了解控制飛行器的基礎指令，例如：起飛、降落、各方向的運動等；影像辨識部分就較為複雜，藉由自飛行機接收的影像判斷標記點的位置，在參考標記點做各種姿態的飛行，以了解飛行機的定位，再透過 Tello 提供的 SDK 送出控制指令對飛行器進行飛行控制達成自主飛行。

(一) 飛行控制：飛行控制為本作品的基礎，了解如何控制飛行器，以及得出各項飛行器資訊的方法，以便了解如何控制及應用。

1. 通訊方式：Tello 本身為一個無線存取點，不論任何採用電腦、手機或平板裝置連接 Tello，都必須進行 WiFi 無線存取點的設定，才可獲取資料及發送訊息。Tello 的無線存取點 IP 為 192.168.10.1，連線完成後，可對這個 IP 進行 UDP 通訊協定進行訊息的發送與接收。使用的 UDP Port 有三個

表 2：各項通訊埠功能

UDP PORT	功能
----------	----

11111	接收影像資料
8889	發送飛行命令，請參考表 4
8890	接收飛行速度、姿態、溫度、高度…等感測資訊

電腦可以取得 Tello 的各項數據，以及影像資訊，同時也可對 Tello 下達飛行命令，下達命令的方式有很多種，例如 Scratch、Python、Swift 等程式語言都可編寫他的飛行命令。

2. Tello Python SDK：本研究使用 Python 語言，可與 Python 各種函式庫合併使用，能創造出更完整的飛程式，基本 Tello Python SDK 指令針對 Tello Drone 所提供的指令說明如下表。

表 3：Tello 飛行指令

指令	語法	功能
command	command	連結測試
takeoff	takeoff	起飛
land	land	降落
Rc	rc A B C D	透過遙控器的四個通道控制飛行器 A -> 左/右 (-100~100) B -> 前/後 (-100~100) C -> 上/下 (-100~100) D -> 旋轉 (-100~100)
streamon	streamon	啟動影像串流
streamoff	streamoff	關閉影像串流
speed	speed value	設定速度 (可用範圍 1-100)

指令	語法	功能
battery	battery?	讀取目前電池使用百分比
quit	quit	離開 Tello Python SDK

3. Tello 的感測器接收：利用 UDP Port 8890 接受回傳的資訊，如姿態、速度、溫度、電池…等資訊，當 8890 的連線完成，資訊就會用一整串的资料回傳，格式如下：

表 4：感測器回傳資料表

回傳資料	回傳內容	回傳單位
pitch	俯仰角度	度數 (°)
roll	橫滾角度	度數 (°)
yaw	偏航角度	度數 (°)
vgx	x 軸速度	公分/秒 (cm/s)
vgy	y 軸速度	公分/秒 (cm/s)
vgz	z 軸速度	公分/秒 (cm/s)
templ	主板最低溫度	攝氏度 (°C)
temph	主板最高溫度	攝氏度 (°C)
tof	絕對高度(測量最小值為 10)	公分 (cm)
h	相對高度	公分 (cm)
bat	當前電量百分比	百分比 (%)
baro	氣壓計測量高度	公尺 (m)
time	飛行器飛行時間	秒 (s)
agx	x 軸加速度	公分/秒 ² (cm/s ²)

agy	y 軸加速度	公分/秒 ² (cm/s ²)
agz	z 軸加速度	公分/秒 ² (cm/s ²)



圖 8：回傳資料

Tello 如果需要其中一項資訊，則必須將字串拆解。

4. Python SDK:Tello 可以使用各種程式語言進行控制程式撰寫，本研究使用 Python 語言，可與 Python 各種函式庫合併使用，能創造出更完整的飛程式。
5. 影像辨識：在空間中擺放 QR Code 做為關鍵點，並運用 OpenCV 及 Pyzbar 將飛行器拍攝到的關鍵點透過影像處理流程，強化辨識能力並分析。

表 5：使用 OpenCV 進行影像處理流程及結果

<p>(1) 原圖</p> 	<p>(2) 增加亮度</p> 
<p>將影像傳入電腦進行影像辨識處理。</p>	<p>拉高亮度，使後續處理畫面不會變得過暗不清。</p>
<p>(3) 銳利化</p> 	<p>(4) 增加對比度</p> 
<p>使 QR Code 邊緣更加明顯。</p>	<p>使色相相同，飽和度較接近的顏色有比較明顯的差異</p>
<p>(5) 灰階</p> 	<p>(6) QR Code 辨識</p> 
<p>使畫面色彩單純，強化辨識能力。</p>	<p>運用辨識 QR Code 供無人機攝影機鎖定，並下達相對命令。</p>

6. 自主飛行：擺設以知座標位置資訊的 Landmark，Landmark 採用 QR Code 可以讓無人機辨識後即得到資訊，藉有三個以上已知的 Landmark 來計算出自身的位置，藉此實現自主飛行的目標。以下的實驗是在一個 2D 的環境中，尋找綠色

點點的 Landmark，藉以推導無人機是否可以在黃色的規劃路線上行進。

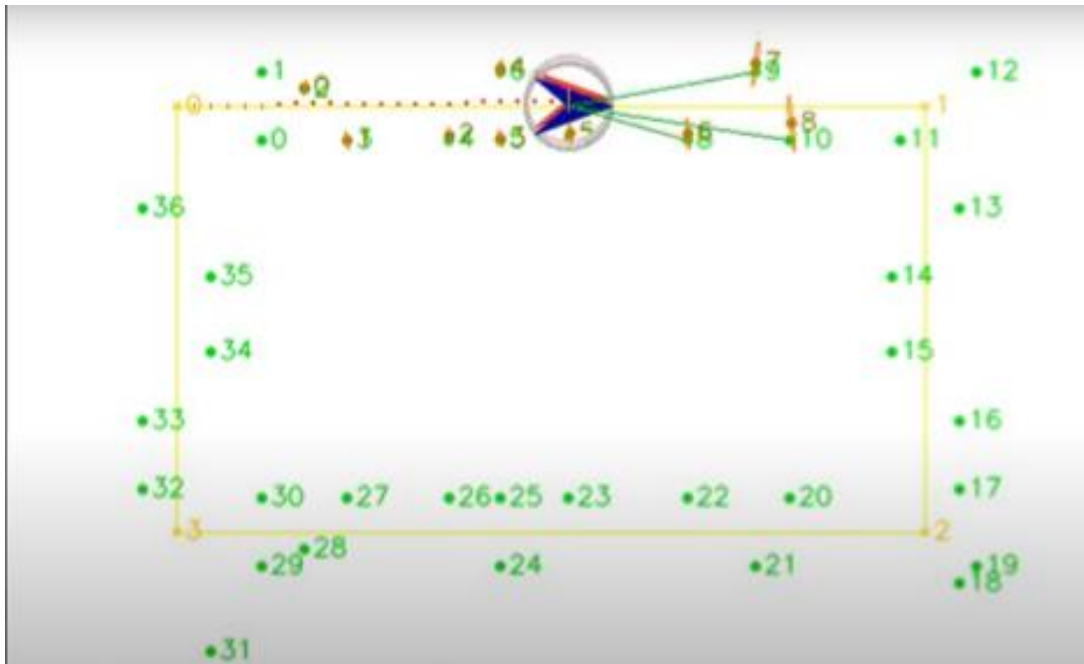


圖 9：Landmark 示意圖

三、室內空間建模

(一) SLAM 流程

1. SLAM：同步定位與地圖構建 SLAM，全稱為 Simultaneous Localization And Mapping，是一個讓機器人從未知的地點出發，經過重複的觀測地圖特徵，得以取得自己的位置及姿態，將自己的位置透過增量式構建出地圖，達到「構建地圖」及「自身定位」的目的。
2. ROS：Robot Operating System 是在製作機器人軟體時的一個開發框架，其提供許多工具及函式庫，也有許多實際會運用到的演算法，方便開發者撰寫使用，SLAM 是基於 ROS 開發而成，其時常應用於自駕車、工業機械手臂、無人飛行器等。

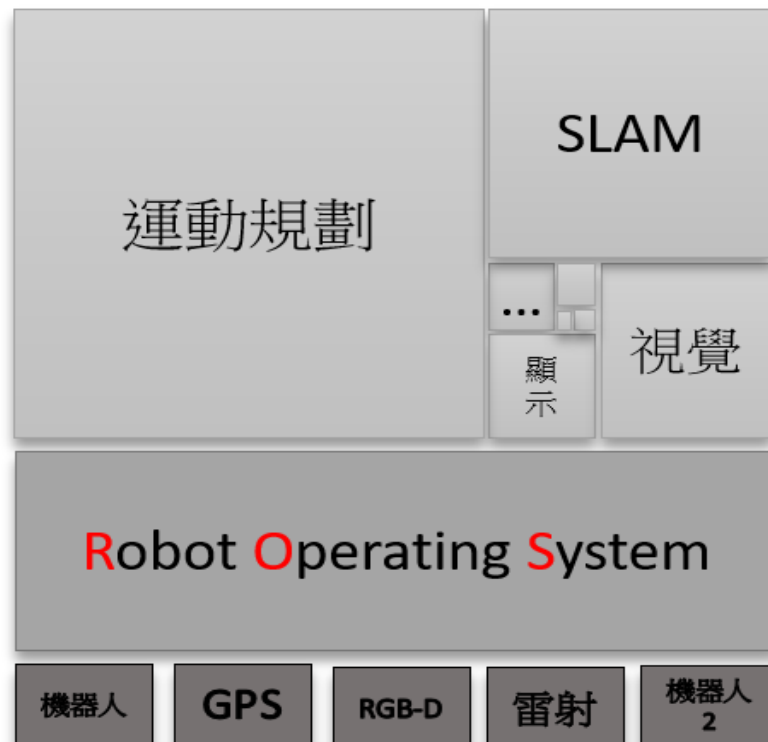


圖 10：ROS 應用領域

3. LSD-SLAM：SLAM 技術的一種，此方法不使用關鍵點，而是直接對圖像進行操作以達成位置估算和建置模型。使用圖像直接推算相機位置及姿態，同時以半密集深度圖的形式建模物體，該深度圖是通過對許多像素進行比較及校正而獲得的，使用其技術達成地圖建模的目的。

(二) SLAM 原理探討

1. 深度運算原理

影像隊距離深度計算，如下圖所示

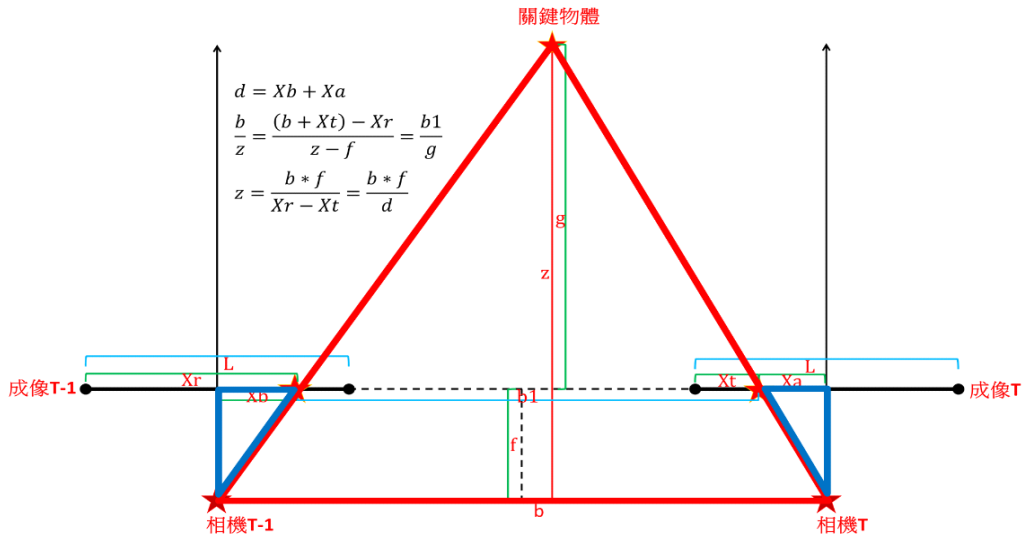


圖 11：視差定位法計算圖

因 $\triangle ADE$ 與 $\triangle ACB$ 為相似三角形，求得：

$$\frac{b}{z} = \frac{(b + Xt) - Xr}{z - f} = \frac{b1}{g}$$

因 Xr 的長度等同於 $Xt + Xa + Xb$ 的長度，令 d ：

$$d = Xa + Xb = Xr - Xt$$

因 $\triangle AFE$ 與 $\triangle EGB$ 為相似三角形且因 $\triangle AFD$ 與 $\triangle DHC$ 也為相似三角形，可求得：

$$\frac{b}{z} = \frac{Xa + Xb}{f} \quad b * f = Xa + Xb * z \quad z = \frac{b * f}{Xr - Xt} = \frac{b * f}{d}$$

由上述得知相機位移 b ，相機焦距 f 和特徵點成像位置 d (相機視差)，即可判斷出目標到相機位置的深度。

2. 自身定位原理

在 3D 空間用三個空間坐標來表示： $X = [x, y, z]$

2D 空間物體的位姿用兩個平移量 t_x, t_y 加入旋轉角 θ 表示。

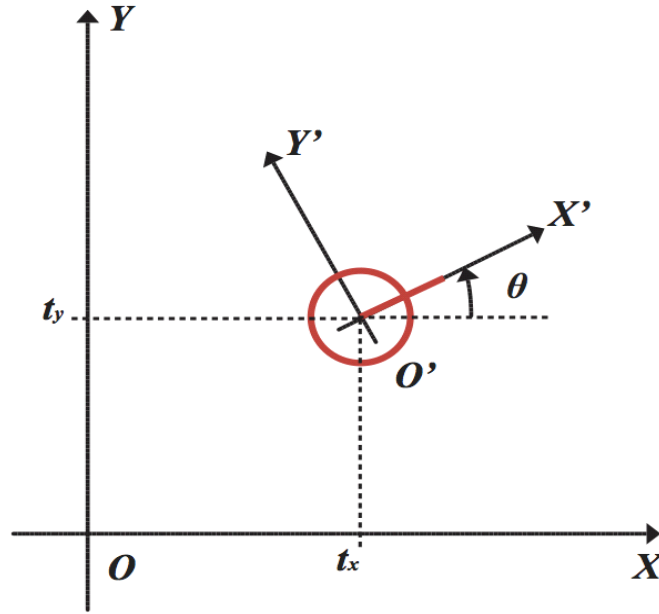


圖 12：二維空間姿態表示圖

那麼可推得：

$$X_w = x_r \cos \theta - y_r \sin \theta + t_x$$

$$Y_w = x_r \sin \theta + y_r \cos \theta + t_y$$

利用歐拉旋轉定推得 3D 姿態矩正

$$\begin{aligned}
 R &= \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_z & -\sin \theta_z & 0 \\ \sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_z & -\sin \theta_z & 0 \\ \cos \theta_x \sin \theta_z & \cos \theta_x \cos \theta_z & -\sin \theta_x \\ \sin \theta_x \sin \theta_z & \sin \theta_x \cos \theta_z & \cos \theta_x \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \sin \theta_y \cos \theta_x \\ \cos \theta_x \sin \theta_z & \cos \theta_x \cos \theta_z & -\sin \theta_x \\ r_{31} & r_{32} & \cos \theta_y \cos \theta_x \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

3. 特徵點分析原理：SLAM 主要有兩種分析方式，特徵點法與直接法，特徵點法是利用

找尋特徵點的方式，計算出點雲立體圖。屬於建模速度快速，但因點的數量較少、點距較長，所以建模圖形較為稀疏；直接法是利用整張影像做明暗比對的方式，計算出點雲立體圖。屬於建模速度較慢，但因點的數量較多、點距較短，所以建模較為精細

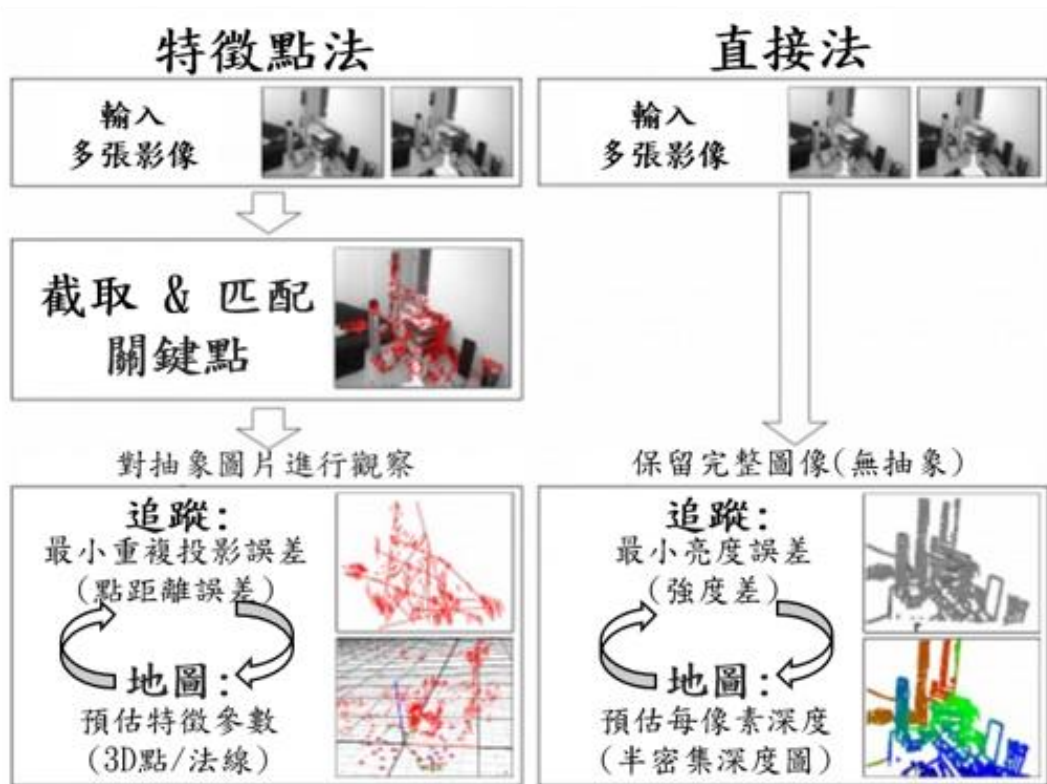


圖 13：SLAM 兩種方式比較

(三) SLAM 種類

1. LSD-SLAM

(1) LSD-SLAM 運作流程：LSD-SLAM 是利用相機取得所有像素訊息，不斷進行計算來取得相機所在位置後，等當前位置離上一個關鍵幀足夠遠，便會儲存當前的關鍵幀，然後在這過程中會不斷計算深度形成點雲圖，如此便可以構建出一個完整由關鍵幀和兩關鍵幀連成的線組合而成的點雲地圖。



圖 14：LSD-SLAM 演算法示意圖




(2) LSD-SLAM 優缺點：LSD-SLAM 演算法的優勢在於不用計算特徵，一般影像以 30 FPS 的速率進來，也就是一張影像只能處理 33 毫秒，要怎麼在這麼短的時間就處理完成一幀就是一個問題，特徵的演算法計算時間太長會佔掉大部分時間，不易及時派上用場，但由於是利用多張影像本身的差異，完成特徵點的運算，所以無需相機姿態，如此一來，可能造成相機位置推算錯誤導致建模不精確，或產生雜點等問題。

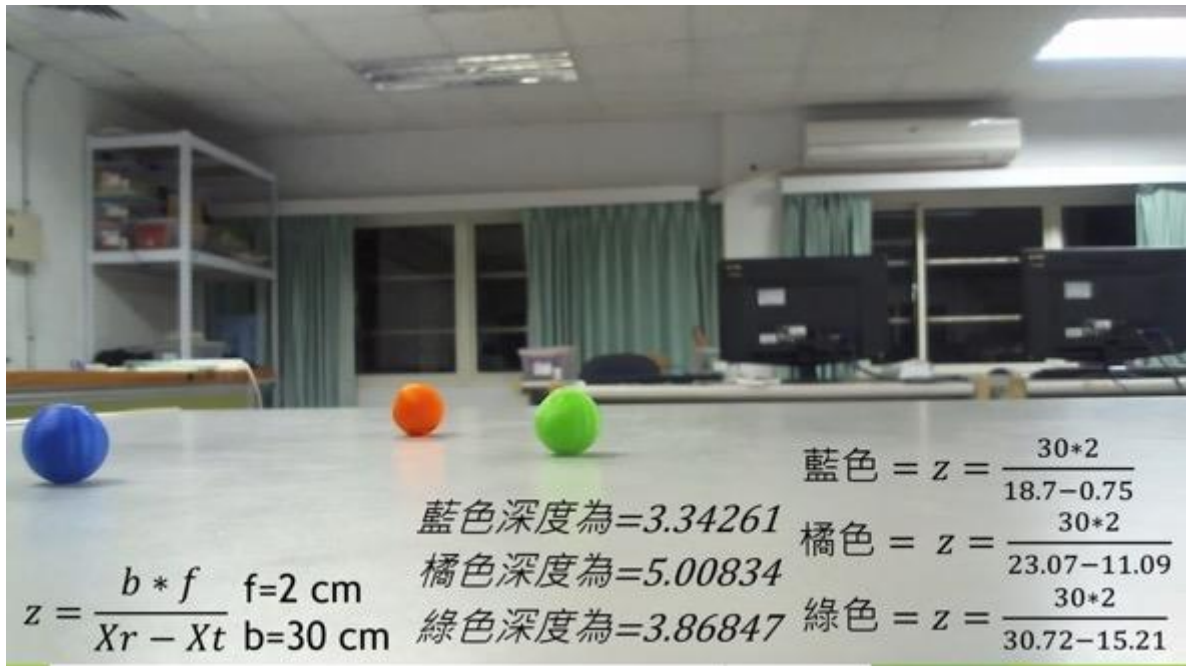
伍、研究結果

一、深度運算實驗

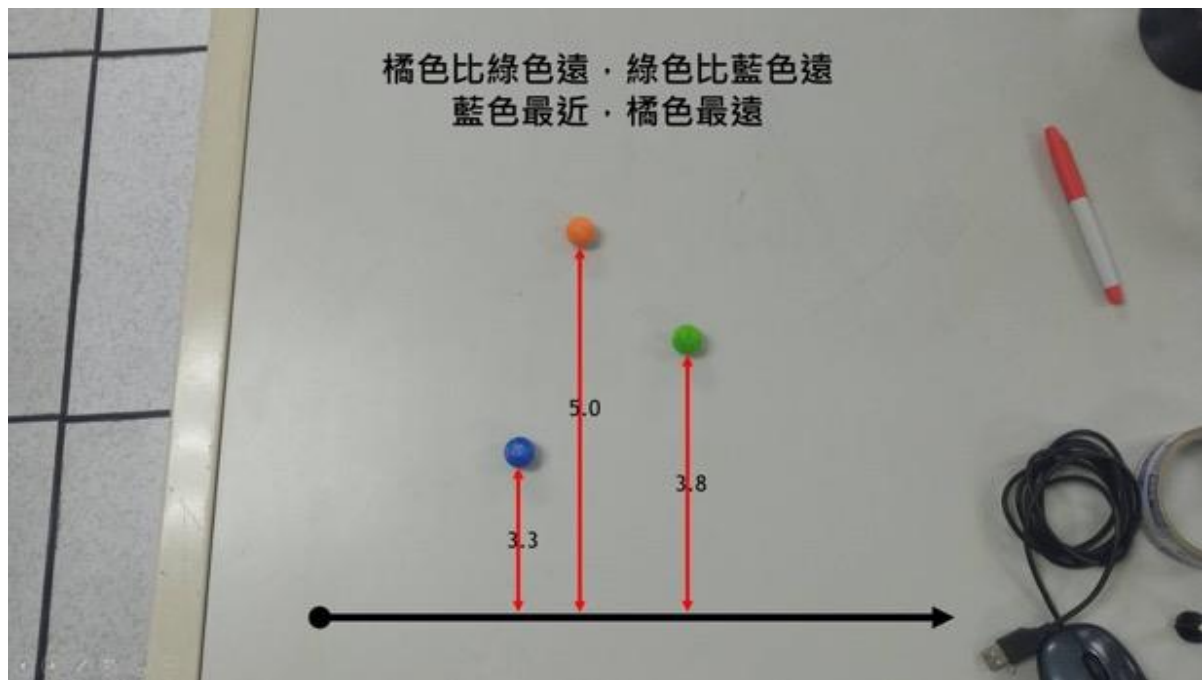
將目標物放置攝影機前，有了一張影像後(，將其攝影機移動一小段距離，在記錄下一張影像，將兩張影像關鍵點到邊的距離記錄下來，最後帶入公式計算計算出關鍵物體的深度。

表 6：深度運算實驗表

<p>步驟一：第一時間點的影像</p>	<p>步驟二：第二時間點影像</p>
	
<p>步驟三：標示色球（特徵點）與邊緣的距離</p>	
<p>第一時間</p>	<p>第二時間</p>
	
<p>步驟四：帶入視差定位法計算公式</p>	



步驟五：實測距離驗證計算結果



二、SLAM 特徵點分析實驗

表 7：直接法語特徵點法比較表

項目 方式	原圖	建模圖形	模型特性

特徵點法			內容粗略 點數量少 檔案較小 較為模糊
直接法			內容細緻 點數量多 檔案較大 較為精細

三、程式控制

使用 pyzbar 函式庫讀取 QR Code 資訊，用讀取到的每個特徵點時進行校準，完成校準後，以資訊進行路線判斷與飛行控制。

```

#=====校準=====
if vxy: #找到新的標記點時
    send("stop")
    time.sleep(3)
    while not ((vxi+70 > vtx) and (vxi-70 < vtx) and (vyi+70 > vty) and (vyi-70 < vty)):
        #若標記點不再中間時 飛機校準移動到正中間
        if (vxi+70 < vtx):
            send("right 20")
            time.sleep(3)
        if (vxi-70 > vtx):
            send("left 20")
            time.sleep(3)
        if (vyi+70 < vty):
            send("down 20")
            time.sleep(3)
        if (vyi-70 > vty):
            send("up 20")
            time.sleep(3)
#=====
vxy = False #結束校準

```

```
#=====飛行=====#
if(vtd == "no"): #若沒有偵測值
    continue
else:
    if(vtd == "04"): #若偵測到特殊值
        send("land")
        time.sleep(3)
        ok = False
    else:
        send("rc 20 0 0 -19") #若偵測到一般值
        time.sleep(3)
```

圖 15：自主飛行程式碼

四、自主飛行

完成基本飛行軌跡，並用多個 QR Code 讀取其中的座標，結合深度計算得出飛行器的姿態及位置，來完成自主飛行。



圖 16：讀取標記點

五、LSD-SLAM 建模

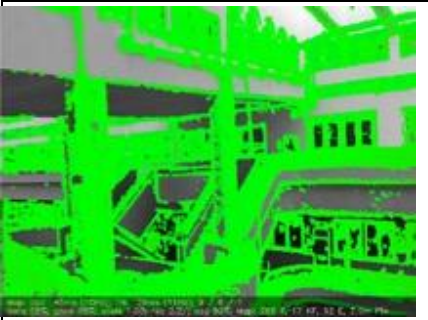
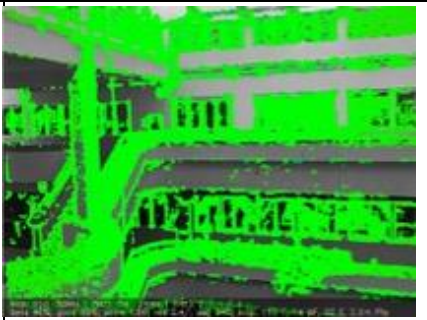
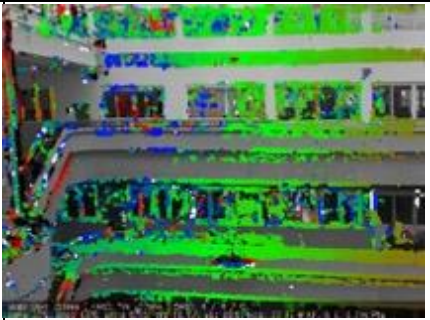
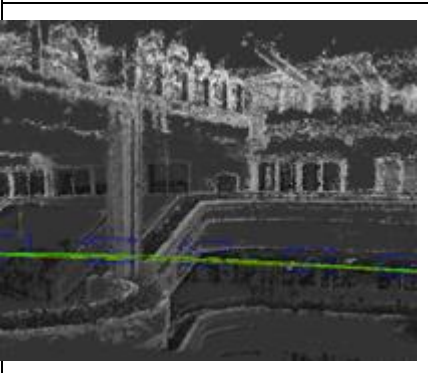
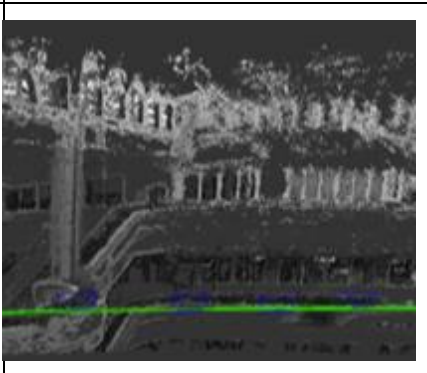
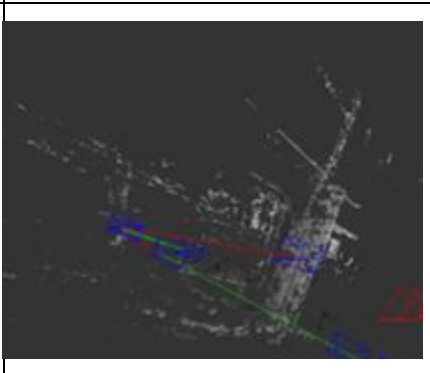
將影像資料傳回電腦，把影像轉成圖檔，把各圖檔進行比較，並用深度計算形成建模。



圖 17：影像建模結果

SLAM 需要有連貫性的影像，若飛行器飛行速度過快或幀數過低時，可能造成兩格影像相距過遠，造成 SLAM 無法推斷路徑等問題，將幀數調整為 30 幀後慢速飛行，即可輸出較好的 SLAM 建模。

表 8：影格間距對建模影響比較表

一倍速度	兩倍速度	四倍速度
		
		
<p>相機移動距離：較短</p> <p>影片影格：較多</p> <p>建模品質：細緻、完整</p>	<p>相機移動距離：中等</p> <p>影片影格：中等</p> <p>建模品質：較為簡略</p>	<p>相機移動距離：較長</p> <p>影片影格：較少</p> <p>建模品質：無法建模</p>

六、建模計算橋梁劣化範圍

利用建模出的橋樑點雲模型，兩點距離測量出長度，得知劣化面積。



圖 18：建模計算劣化面積

並請專業人士做判斷帶入優選址指標，得出橋墩優良分數。

陸、討論

- 一、在天候不佳的情況下，會增加建模難度及誤差，因此要讓整套系統進行長期的監測，這樣便可以在天氣變好後快速比對出前後的變化。
- 二、由於 SLAM 計算方式的問題，若影格間差異過大，會無法找到同關鍵點來做比對導致建模，需降低無人機飛行速度來控制影格的間距。
- 三、影像辨識原先是以球體作為特徵點，因為圓球本身不帶資料，所以使用顏色做為辨識依據，導致容易被周圍環境影響，後來改用 QR Code 取代球體，雖辨識視角受限，但能透過存取 QR Code 內部資料來強化自主飛行功能。

表 9：關鍵點的優缺分析

項目 \ 方式	帶顏色之球體	QR Code
拍攝視角	全視角皆可辨識	標籤正反對其辨識無影響，但有效拍攝視角較窄。
辨識準確度	低	高
是否攜帶資料	否	是
周圍環境影響	會被周遭光線以及環境相近顏色影響	環境對辨識能力影響小

四、使用無人機對橋墩進行檢測時會因為飛行法規的緣故，導致在部分區域如：機場、快速道路附近等無法進行飛行，需先提出飛行申請並讓一位操作員在場隨時注意飛行器狀況。

柒、結論

此研究以 ROS 為基底實做 LSD-SLAM 來完成無人機代長期紀錄橋墩狀況的系統，用事先擺好的 QR Code 作為自主飛行的關鍵物下達指令已完成自主飛行，並對橋墩進行拍攝，將影像資料傳回電腦後，再透過 LSD-SLAM 建模出橋梁 3D 模型，供橋樑檢測人員進行劣化分析。檢查人員能利用建模得到橋墩損害深度、範圍等資訊進而拿來做評估。

一、未來展望與應用領域

透過攝影機所得的資訊為平面照片，可以事後加上機器學習，透過類神經網路對所拍攝的照片，進行 D、E、R 三個檢測值的評比，以輔助檢測人員判讀。若將結果再帶入橋梁優選指標(PI)公式，達到電腦計算出橋梁安全分數，以及是否優先維修，最大化的節省人事成本。

而 3D 建模之後，也可以得到局部損害部位的長寬深及形狀的資訊，有利於遠距檢測的準確性。總結以上使用無人機進行橋樑檢測可對整套系統作改進的部分：

- (一) 機器學習輔助：透過從過往的資料和經驗中學習並找到其運行規則，並將建模後結果加以分類，檢測是否劣化及劣化成度的面積與深度，計算出橋梁安全分數，並且告知相關人員是否需優先維修保養。
- (二) 3D 建模運用：在飛行拍攝過程中，將橋樑整體錄製下來，回傳 SLAM 建模，讓為維修人員方便遠端檢測，並判讀出劣化面積，告知維修人員做出應對的維修準備。
- (三) 使用設備優化：目前所選用的是單眼相機，若改用雙眼深度相機，可不經過計算得出相機位置，因此能提升建模精及降低建模時花費的時間。

捌、參考資料及其他

- 崔國強、林志明。橋梁檢測之探討—以宜專一線公路多望橋 為例。國立宜蘭大學土木工程學系
- 蔡欣局。橋梁目視檢測作業及檢測範例說明。國立中央大學橋梁中心。
- Ark Lab 多旋翼工坊 (2015)。四軸飛行器自造手冊。台灣：碁峰。
- 整合 RBPF 與 ICP 實現 SLAM 及植基於 Q 學習法之避障策略於居家服務型機器人。2020 年 03 月 24 日，取自：國立成功大學電機工程學系碩士論文
- 高翔、張濤、劉毅、顏沁睿 (2019)。SLAM 視覺十四講：雙倍內容強化版。台灣：深智數位。
- 曾志煌 (2011)。橋梁目視檢測評估手冊。台灣：交通部運輸研究所。
- LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM。2019 年 12 月 25 日，取自：
<https://vision.in.tum.de/research/vslam/lsdslam?redirect=1>
- TelloHQ。2019 年 12 月 25 日，取自：
<http://Tellohq.com/official-dji-ryze-Tello-app/>

- Spmallick-OpenCV。2019 年 12 月 27 日，取自：
<https://OpenCV.org/>
- Tello Official Website-Shenzhen Ryze Technology Co.,Ltd.。2019 年 12 月 27 日，取自：
<https://www.ryzerobotics.com/zh-tw/Tello-edu>
- GitHub-tum-vision/lst_slam。2019 年 12 月 27 日，取自：
https://github.com/tum-vision/lst_slam
- Neel Joshi-Micro-Baseline Stereo - Microsoft Research。2019 年 12 月 27 日，取自：
<https://www.microsoft.com/en-us/research/publication/micro-baseline-stereo/>
- LSD-SLAM 深入學習（2）-演算法解析。2020 年 03 月 24 日，取自：
<https://www.itread01.com/content/1547787070.html>
- 轉換矩陣。2020 年 03 月 24 日，取自：
<https://openhome.cc/Gossip/WebGL/TransformationMatrix.html>
- 三維座標系中旋轉矩陣 R 的作用和演示。2020 年 03 月 24 日，取自：
<https://www.itread01.com/p/515329.html>
- Iterative Closest Point (ICP) implementation on python。2020 年 03 月 24 日，取自：
<https://stackoverflow.com/questions/20120384/iterative-closest-point-icp-implementation-on-python>
- 直接法解析。2020 年 03 月 24 日，取自：
<https://www.cnblogs.com/gaoxiang12/p/5689927.html>
- Loop closure during SLAM。2020 年 06 月 09 日，取自：<https://www.youtube.com/watch>

【評語】 052505

此作品運用無人機自主飛行及 SLAM 技術來輔助維護人員進行安全而穩定的橋樑劣化檢測。使用的技術包括影像處理、無人機自主飛行、即時定位與 3D 地圖構建，以及這些技術之間的整合。此作品是個可運作且功能完整的系統，具有實用價值，此外，對無人機自我空間定位時所需要使用的深度運算技術，也有進行實驗來探討深度估算的正確性。目前無人機自動飛行需 QRCode 協助，尚無法透過 SLAM 技術來即時建模來自主飛行，未來可繼續改進。

摘要

本研究運用無人機透過自主飛行及SLAM技術，輔助維護人員進行橋墩劣化檢測。運用Python撰寫UDP連線程式，即時接收並判讀無人機回傳的影像及姿態資訊，再傳送飛行命令給無人機以順利在橋墩間巡行，而接收的影像則提供目視判斷損害狀況及LSD-SLAM建立強梁的3D模型。

研究目的

- 一、研究以QR-Code 作為特徵點標記的自主巡弋飛行。
- 二、研究運用LSD-SLAM技術建構出地圖建模。
- 三、研究運用飛行器拍攝橋梁並建模，透過檢視立體圖或自動標示劣化區域，達成輔助橋梁安全檢測。

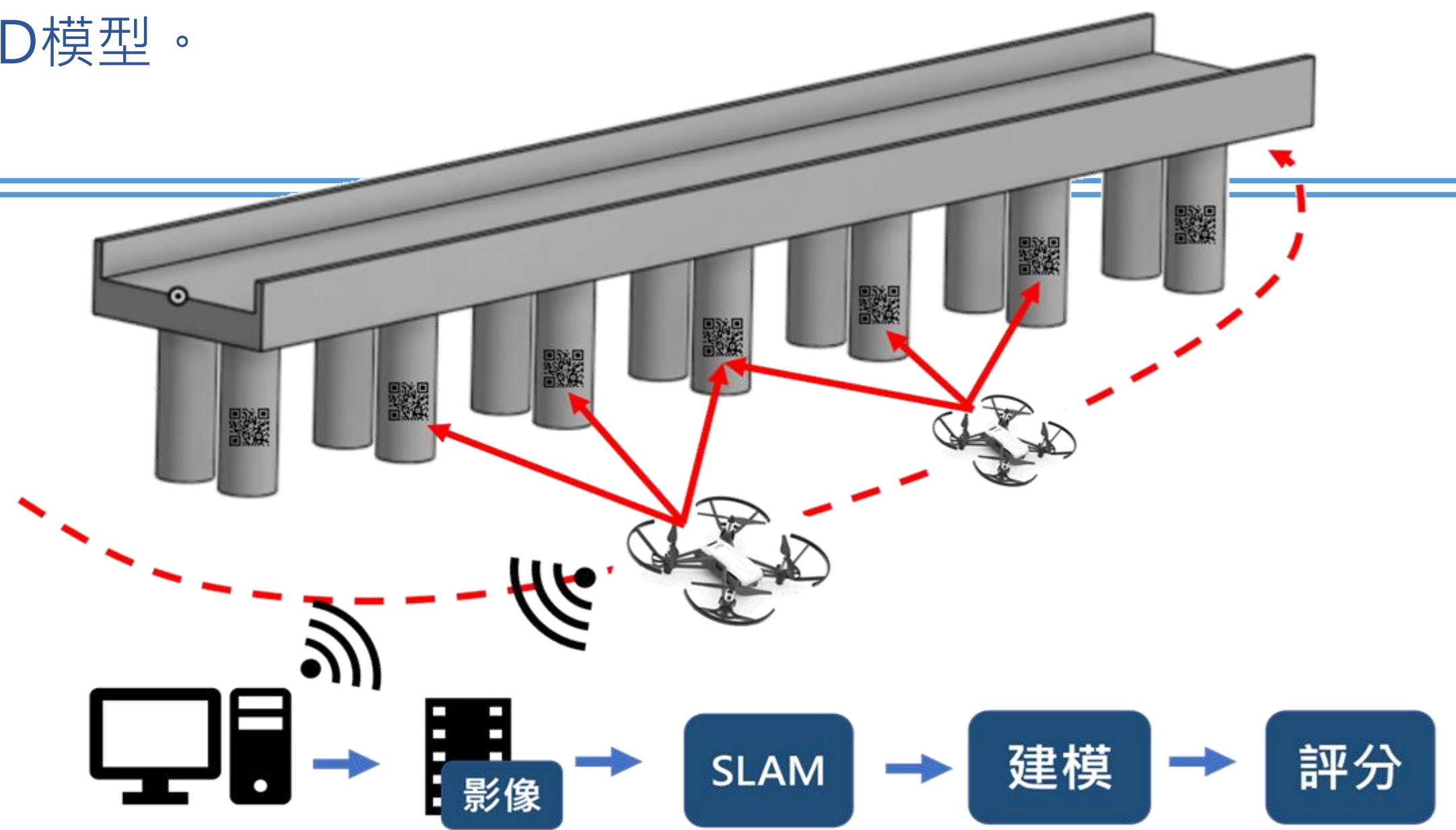


圖1 技術架構圖

研究方法及過程

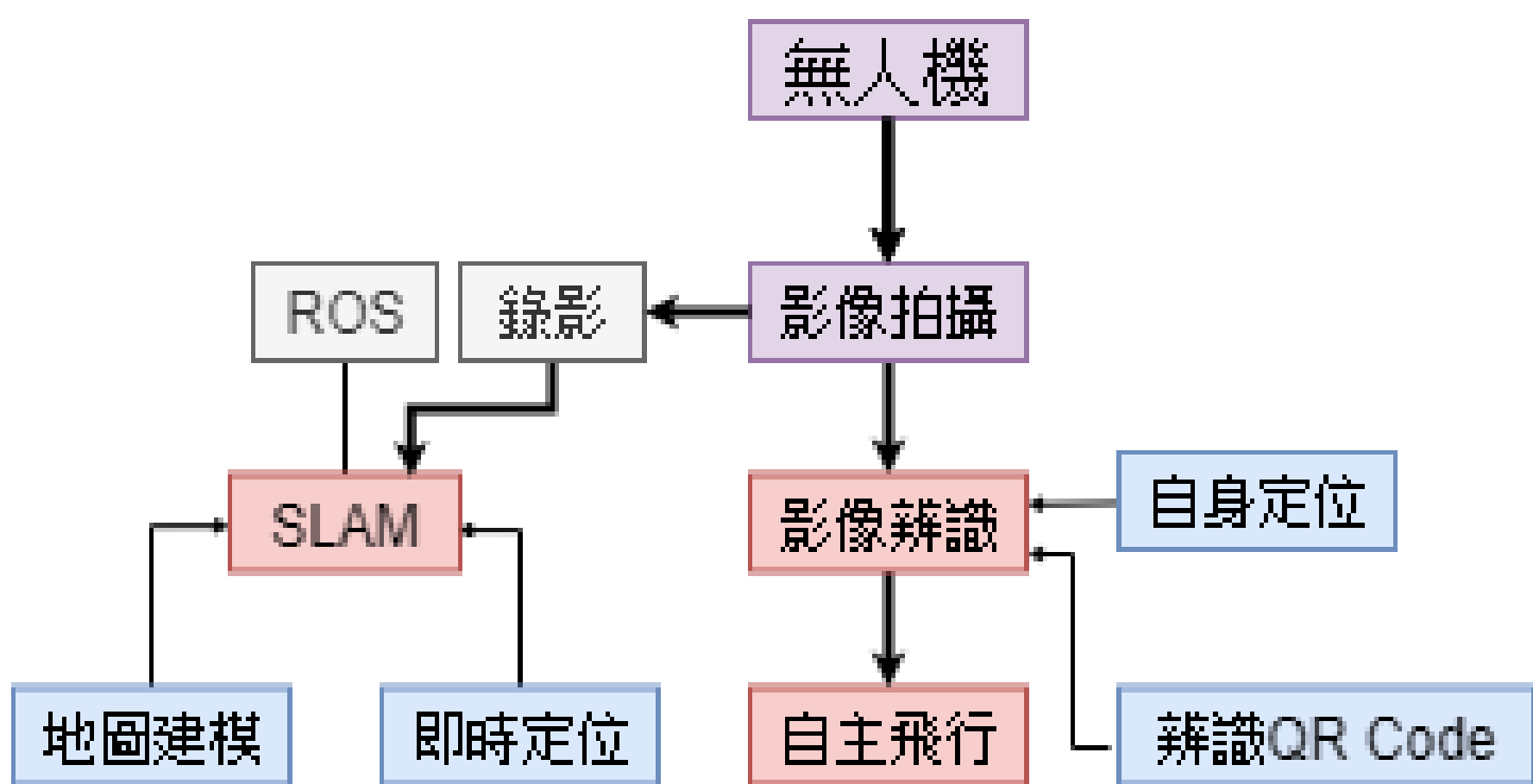


圖2 研究架構及規劃圖

比較項目	人力檢測	無人機SLAM建模輔助檢測
作業方式	目視檢測	飛行器拍攝橋梁立體建模，可加入預判功能。
判定方式	交由專業技師判定劣化程度	
檢測效率	中	高
精確程度	高	高
人力成本	需多人分工	只需飛行器及一位操作員
人員安全	較危險	安全

表1 傳統檢測與無人機輔助檢測比較表

✈️ 橋梁安全檢測指標

$$Ic_{ij} = 100 - 100 \times \frac{D \times E \times R^a}{4 \times 4 \times 4^a}$$

- Ic_{ij} ：構件i之第j部分的狀況值，值為0~100。
- D：橋墩的劣化嚴重程度(1-4)。
- E：評估橋墩的劣化範圍(1-4)。
- R：考慮橋墩劣化對整體橋梁結構安全性之影響(1-4)。
- a：強調橋梁重要性參數(1-2)。



圖3 橋墩劣化程度比較圖

✈️ 飛行控制

- 1. 透過Tello本身的WAP，回傳感測器資料及發送控制命令。
- 2. 透過UDP通訊協定進行通訊，各通訊埠應用說明如下：

PORT	功能
11111	接收影像資料
8889	發送飛行命令
8890	接收飛行感測資訊

- 3. 使用的Tello指令進行各種飛行的控制。
- 4. 接受回傳的資訊，如姿態、速度、溫度、電池...等資訊。

功能：連結測試 指令：command	功能：起飛 指令：takeoff	功能：降落 指令：land	
指令：left Value	指令：right Value	指令：forward Value	指令：Back Value
指令：up Value	指令：down Value	指令：cw Value	指令：ccw Value
High	Low		

圖4 Tello 飛行控制指令示意圖

✈️ 以QR-Code 作為特徵點標記的自主飛行

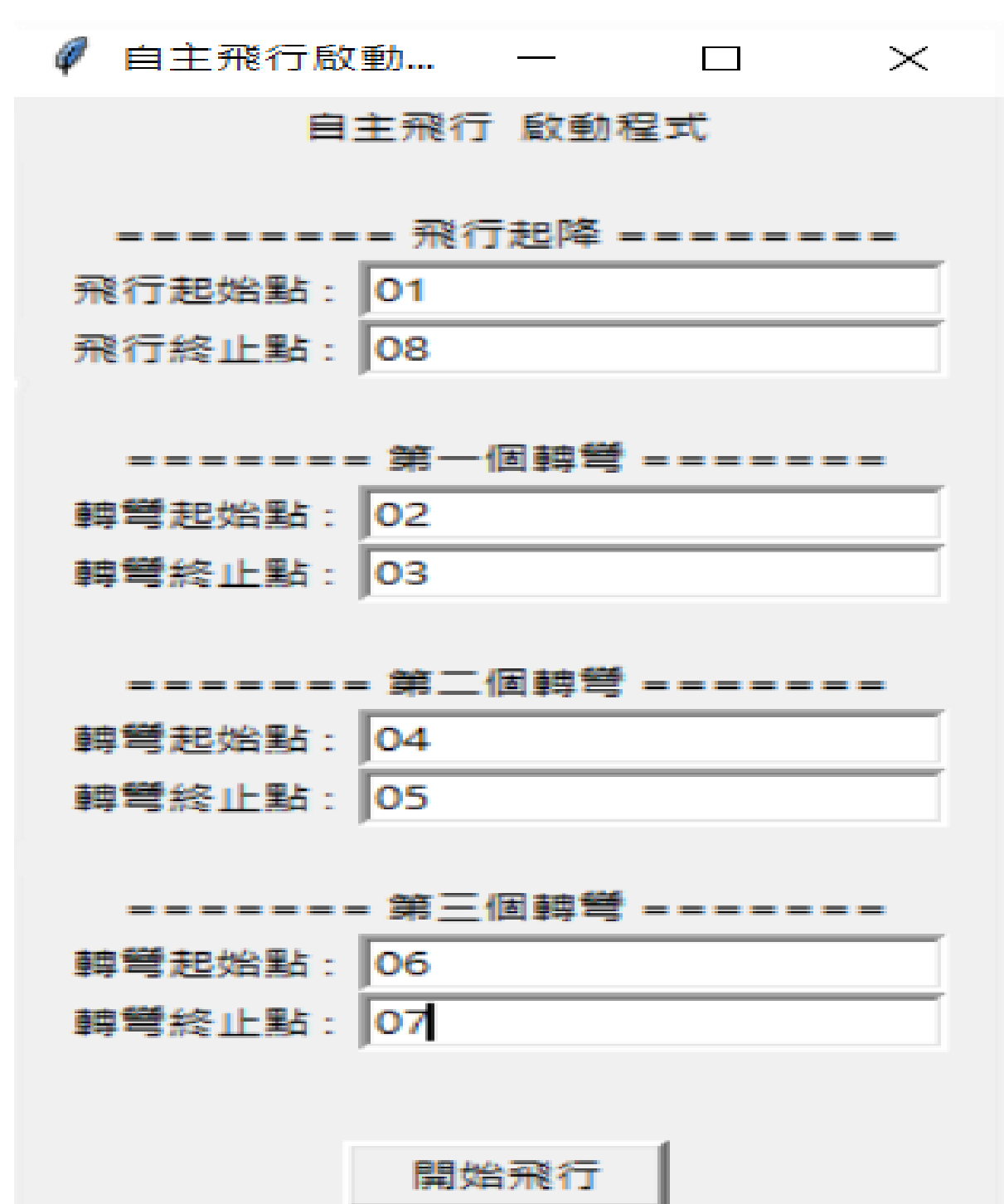


圖5 定義各點的飛行控制

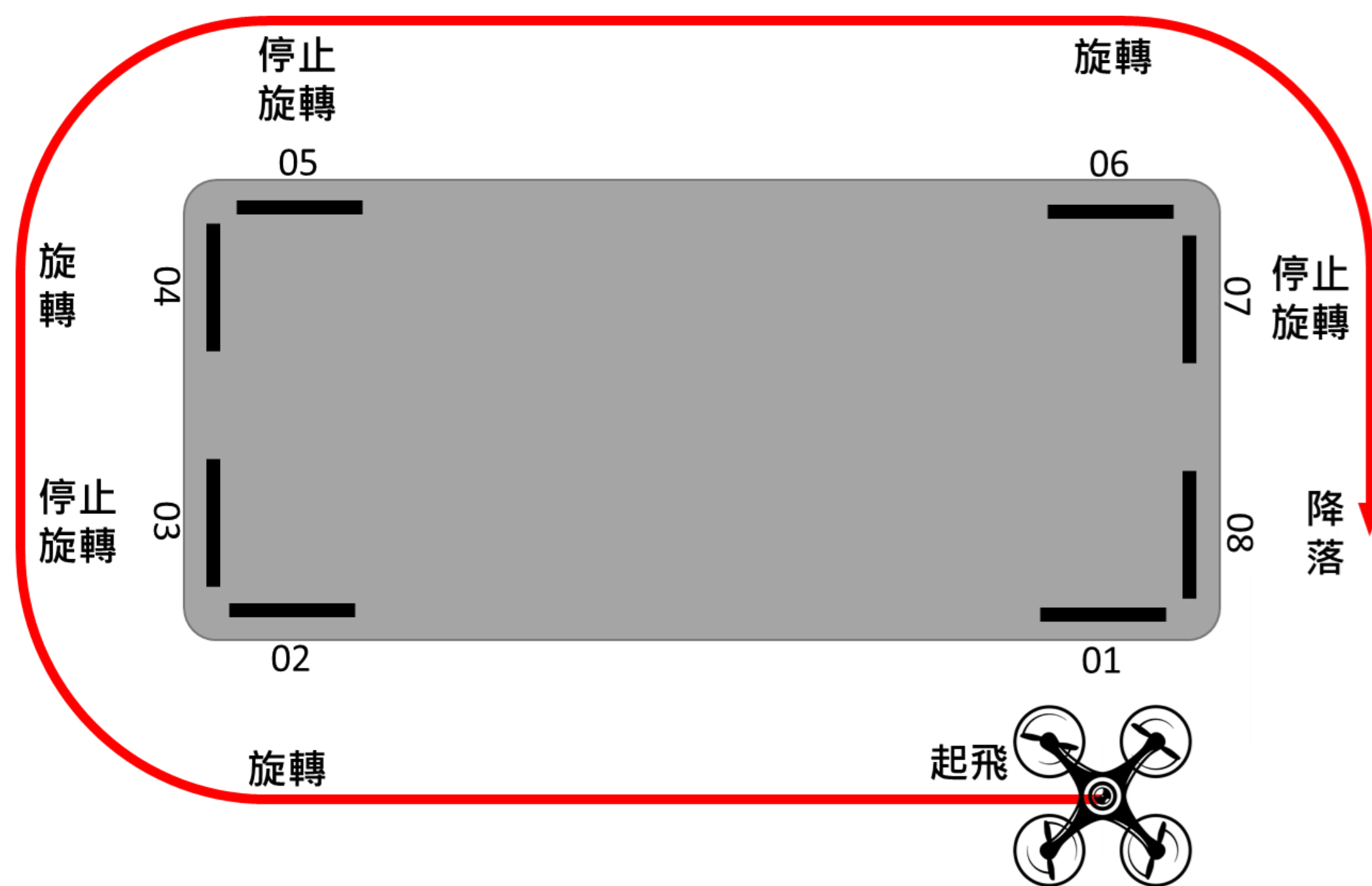


圖6 飛行路徑上視示意圖

- 1. 橋樑關鍵位置上擺設以QR-Code的關鍵點。QR-Code內含一數字，數字由小到大擺放在飛行軌道上。
- 2. 飛行時擷取影像進行關鍵點辨識。
- 3. 當辨識到第一個關鍵點，先進行校正動作，使無人機落在規劃位置上面。
- 4. 透過影像搜尋QR-Code關鍵點，每組數字都定義好起飛、旋轉、停旋轉及降落等飛行動作。
- 5. 完成飛行的軌跡，過程中錄製影像供後續的建模。

立體建模 使用地圖建模將自主飛行的拍攝結果建模成為3D圖形，以達成遠端分析橋梁狀況。

SLAM簡介

即時定位與地圖構建(SLAM)，經過重複的觀測地圖特徵，取得自己的位置及姿態，將自己的位置透過增量式構建出地圖，達到「構建地圖」及「自身定位」的技術。

LSD-SLAM簡介

LSD-SLAM是SLAM技術的一種，以ROS為基礎開發而成，其直接對圖像進行操作以達成位置估算和建置模型。

ROS簡介

ROS為一個開發框架，其提供許多工具及函式庫，也有許多實際會運用到的演算法，方便開發者撰寫使用。

LSD-SLAM原理探討-特徵點分析原理

1. 特徵點法是利用找尋特徵點的方式，計算出點雲立體圖。
建模速度快速，建模較為稀疏。
2. 直接法是利用整張影像做明暗比對的方式，計算出點雲立體圖。
建模速度較慢，建模較為精細。

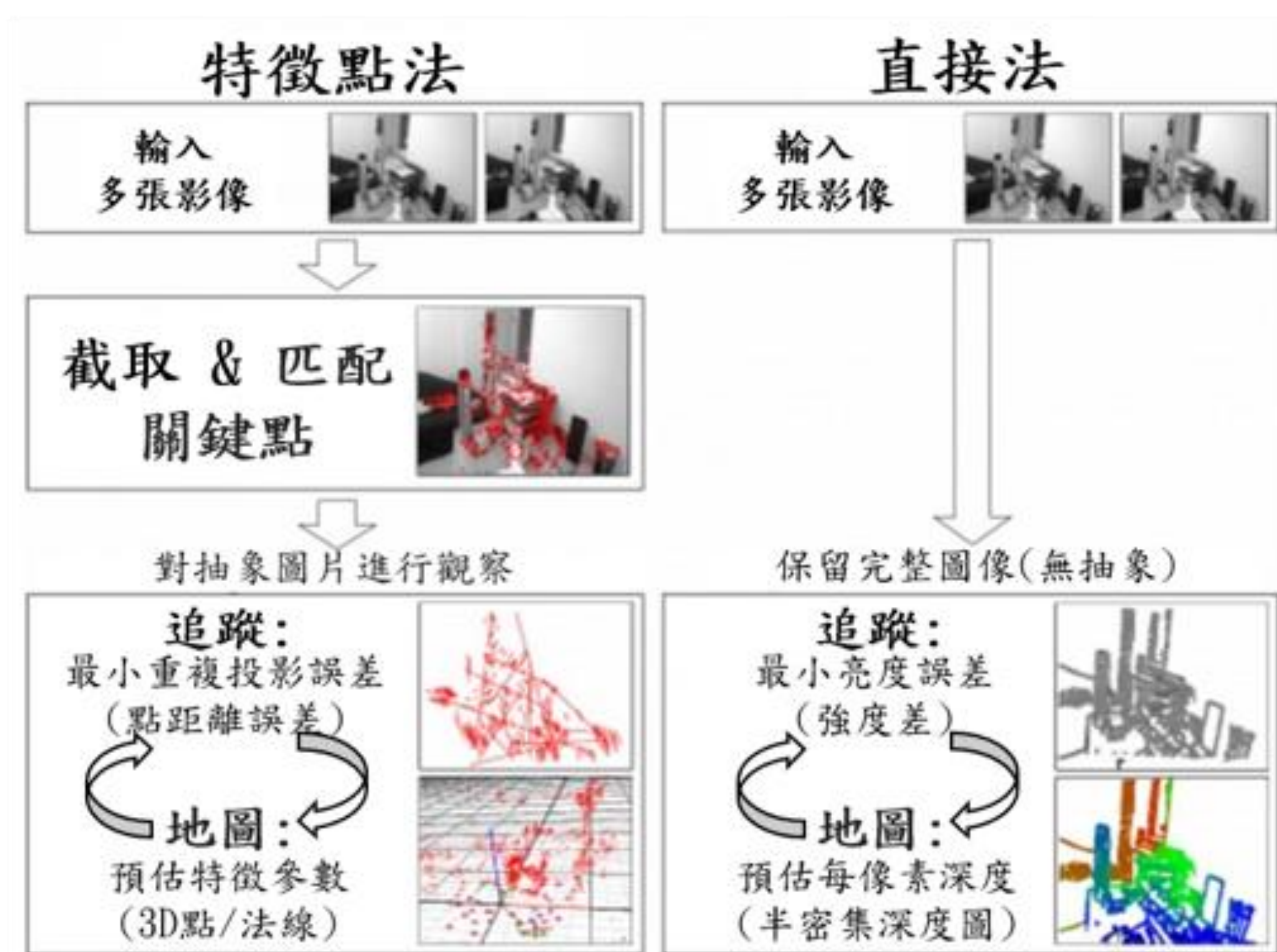


圖8 視差定位法計算圖

LSD-SLAM原理探討-深度運算原理

繪製立體點雲圖之前，必須先知道點的深度，在一個單眼視覺相機中，是無法直接知道點的深度，所以需使用視差定位來完成點的距離計算。

影像對距離深度 (Z) 計算，如下圖所示

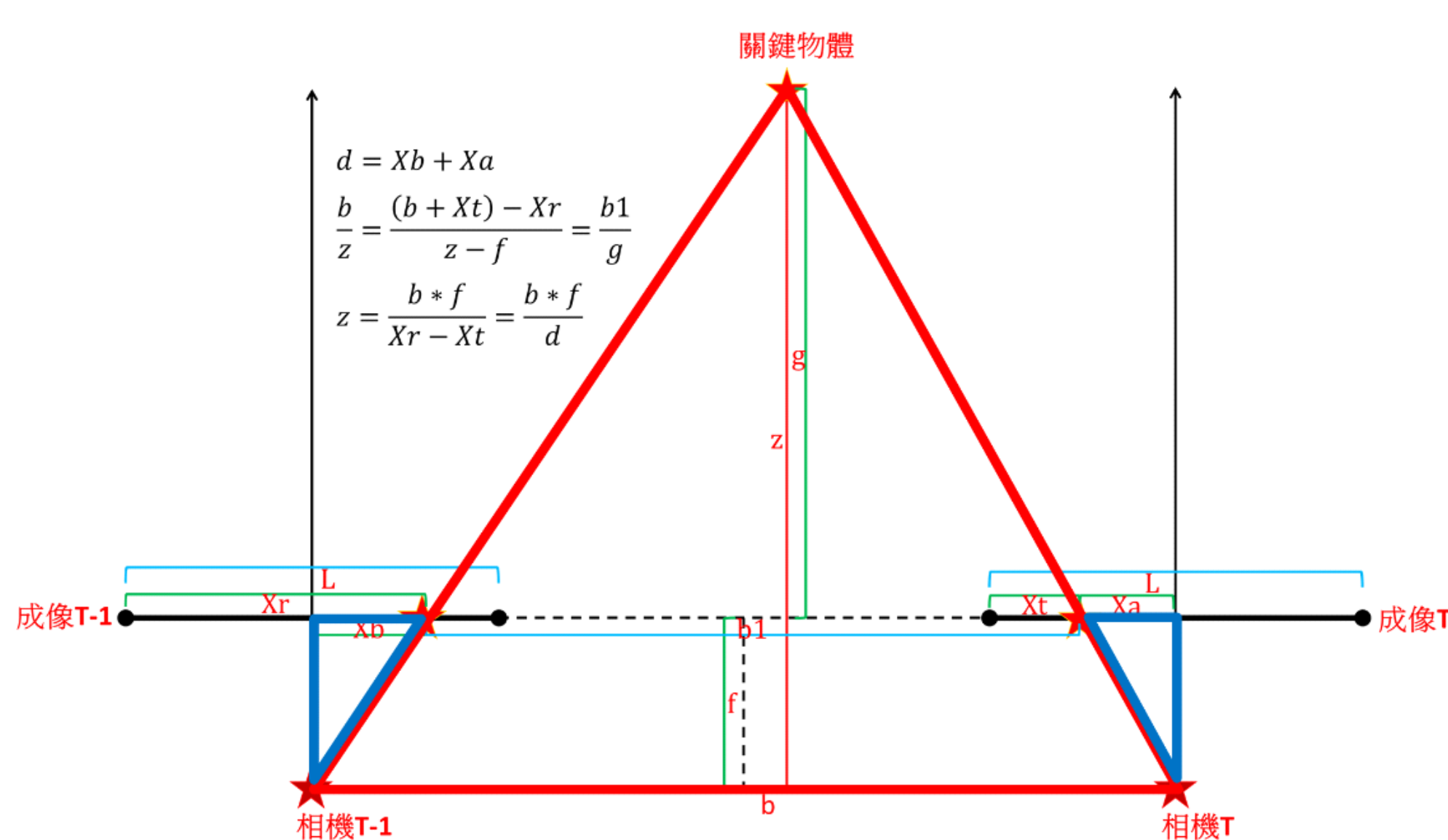


圖9 視差定位法計算圖

因 $\triangle ADE$ 與 $\triangle ACB$ 為相似三角形，求得：

$$\frac{b}{z} = \frac{(b + Xt) - Xr}{z - f} = \frac{b1}{g}$$

因 Xr 的長度等同於 $Xt + Xa + Xb$ 的長度，令 d ：

$$d = Xa + Xb = Xr - Xt$$

因 $\triangle AFE$ 與 $\triangle EGB$ 為相似三角形且因 $\triangle AFD$ 與 $\triangle DHC$ 也為相似三角形，可求得：

$$\frac{b}{z} = \frac{Xa + Xb}{f} \cdot b * f = Xa + Xb * z \cdot z = \frac{b * f}{Xr - Xt} = \frac{b * f}{d}$$

由上述得知相機位移 b ，相機焦距 f 和特徵點成像位置 d (相機視差)，即可判斷出目標到相機位置的深度。

LSD-SLAM進行流程

LSD-SLAM是利用相機取得所有像素訊息，不斷取得相機所在位置，並且在這過程中不斷計算深度，形成點雲圖。

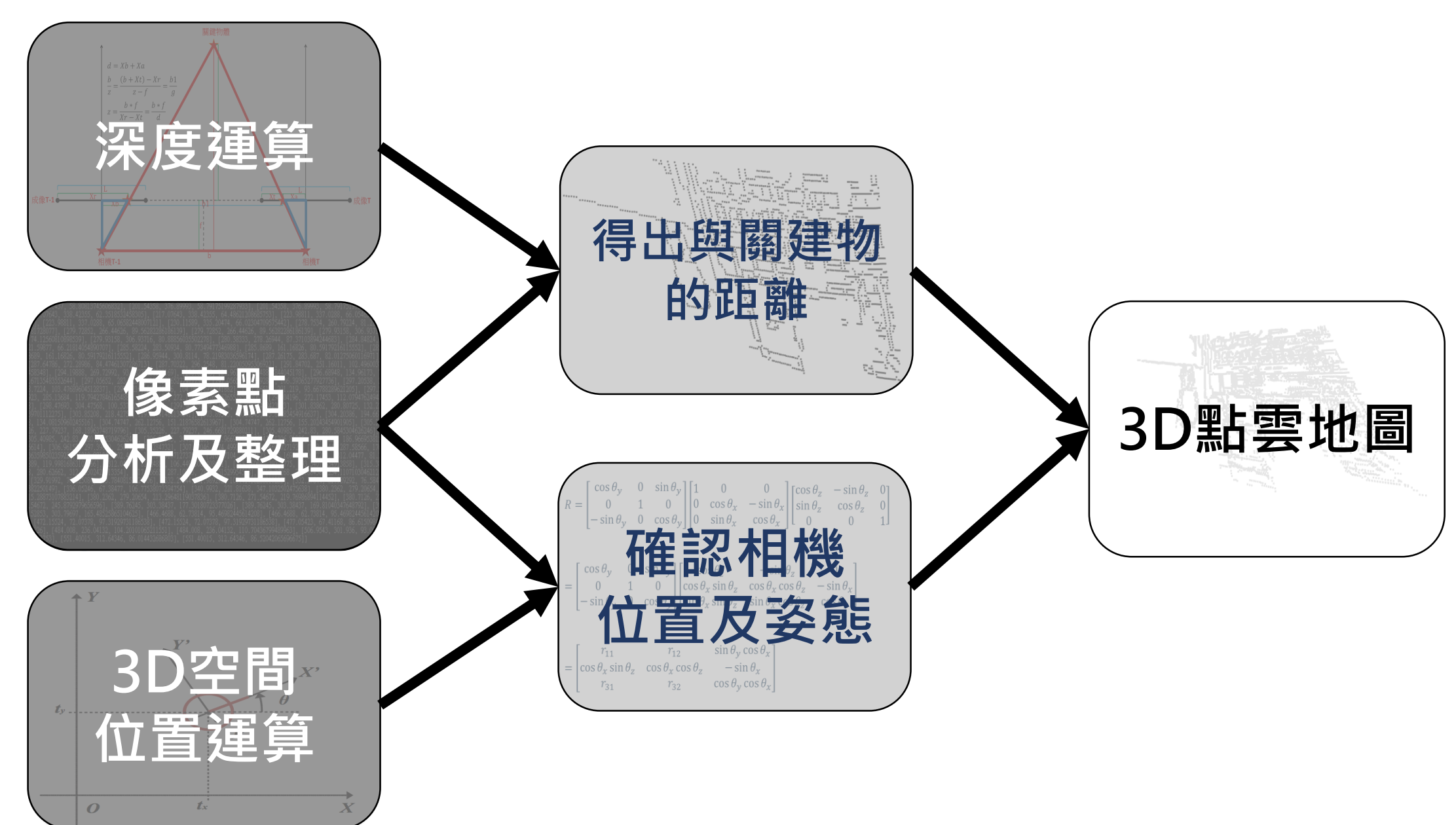


圖7 LSD-SLAM演算法示意圖

LSD-SLAM原理探討-自身定位原理

知道相機與點的深度距離後，必須知道相機的姿態，才能利用相機的姿態去繪製出相對的點雲圖，在姿態計算中，我們使用歐拉旋轉定理旋轉矩陣，來推算相機的姿態。

在3D空間用三個空間坐標來表示： $X = [x, y, z]$

2D空間物體的位姿用兩個平移量 tx, ty 加入旋轉角 θ 表示。

那麼可推得：

$$\begin{aligned} X_w &= x_r \cos \theta - y_r \sin \theta + tx \\ Y_w &= x_r \sin \theta - y_r \cos \theta + ty \end{aligned}$$

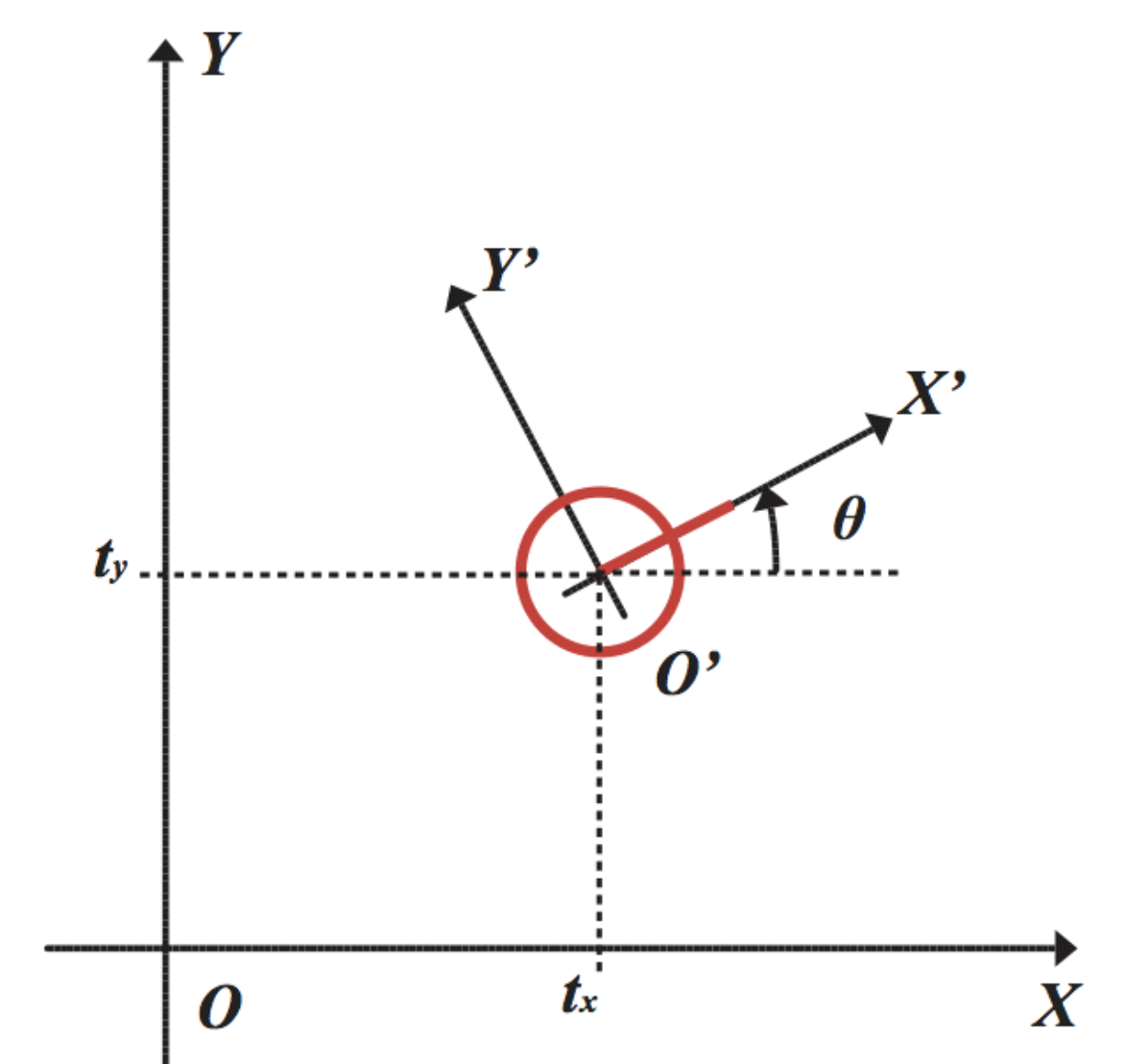


圖10 二維空間姿態表示圖

利用歐拉旋轉定推得3D姿態旋轉矩陣：

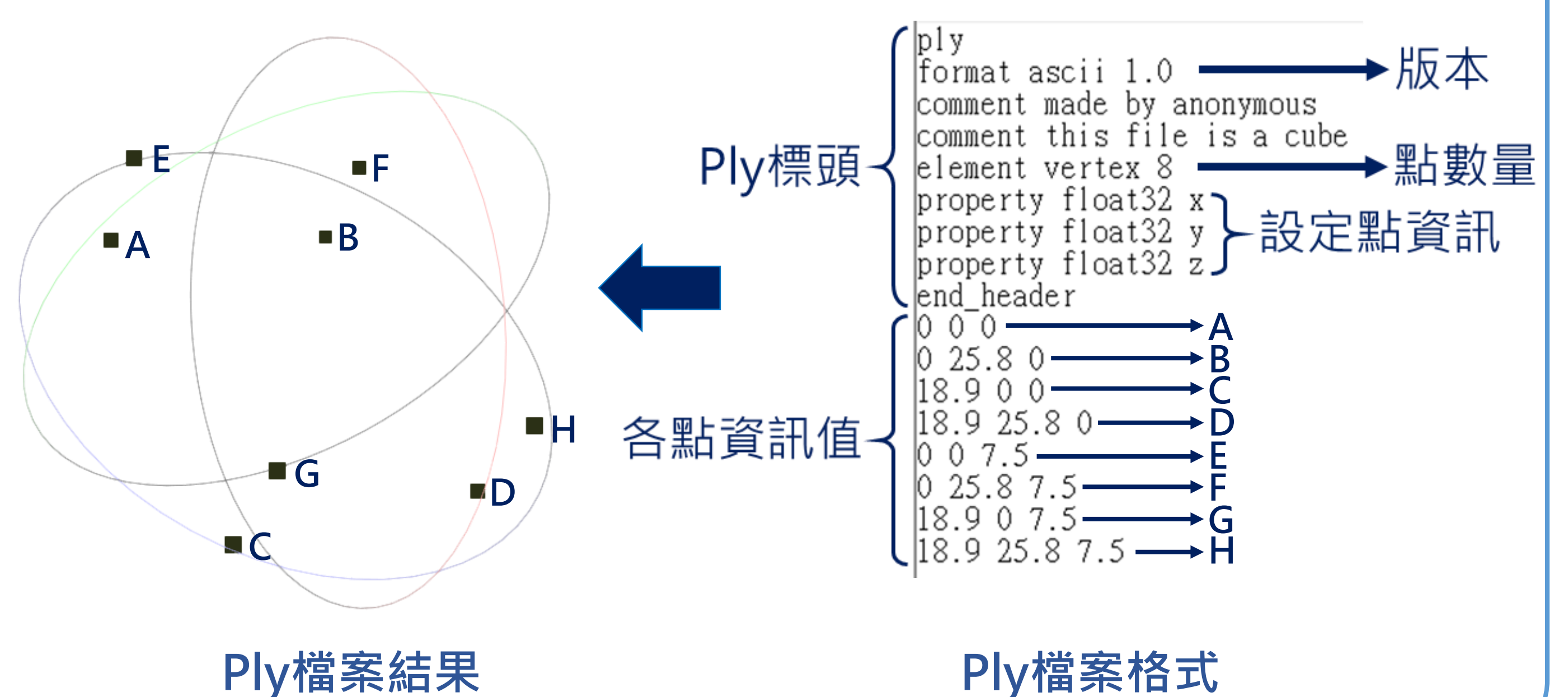
$$\begin{aligned} R &= \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_z & -\sin \theta_z & 0 \\ \sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_z & -\sin \theta_z & 0 \\ \cos \theta_x \sin \theta_z & \cos \theta_x \cos \theta_z & -\sin \theta_x \\ \sin \theta_x \sin \theta_z & \sin \theta_x \cos \theta_z & \cos \theta_x \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \sin \theta_y \cos \theta_x \\ \cos \theta_x \sin \theta_z & \cos \theta_x \cos \theta_z & -\sin \theta_x \\ r_{31} & r_{32} & \cos \theta_y \cos \theta_x \end{bmatrix} \end{aligned}$$

若要求得目前姿態 $\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$ ，須將旋轉矩陣 R 乘上先前姿態 $\begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix}$ ：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = R \times \begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix}$$

SLAM結果輸出

SLAM輸出會形成一個立體的點雲圖檔，在LSD-SLAM中輸出的檔案格式為ply檔，其檔案資料中有包括每一個點的資訊，可以做為距離量測的依據。



Ply檔案結果

Ply檔案格式

研究結果

✈️ 深度定位實驗

將目標物放置攝影機前，拍攝一張影像後，將攝影機移動一小段距離，再記錄下一張影像，將兩張影像關鍵點到邊距離記錄下來後，帶入公式計算，即可算出物體的深度。

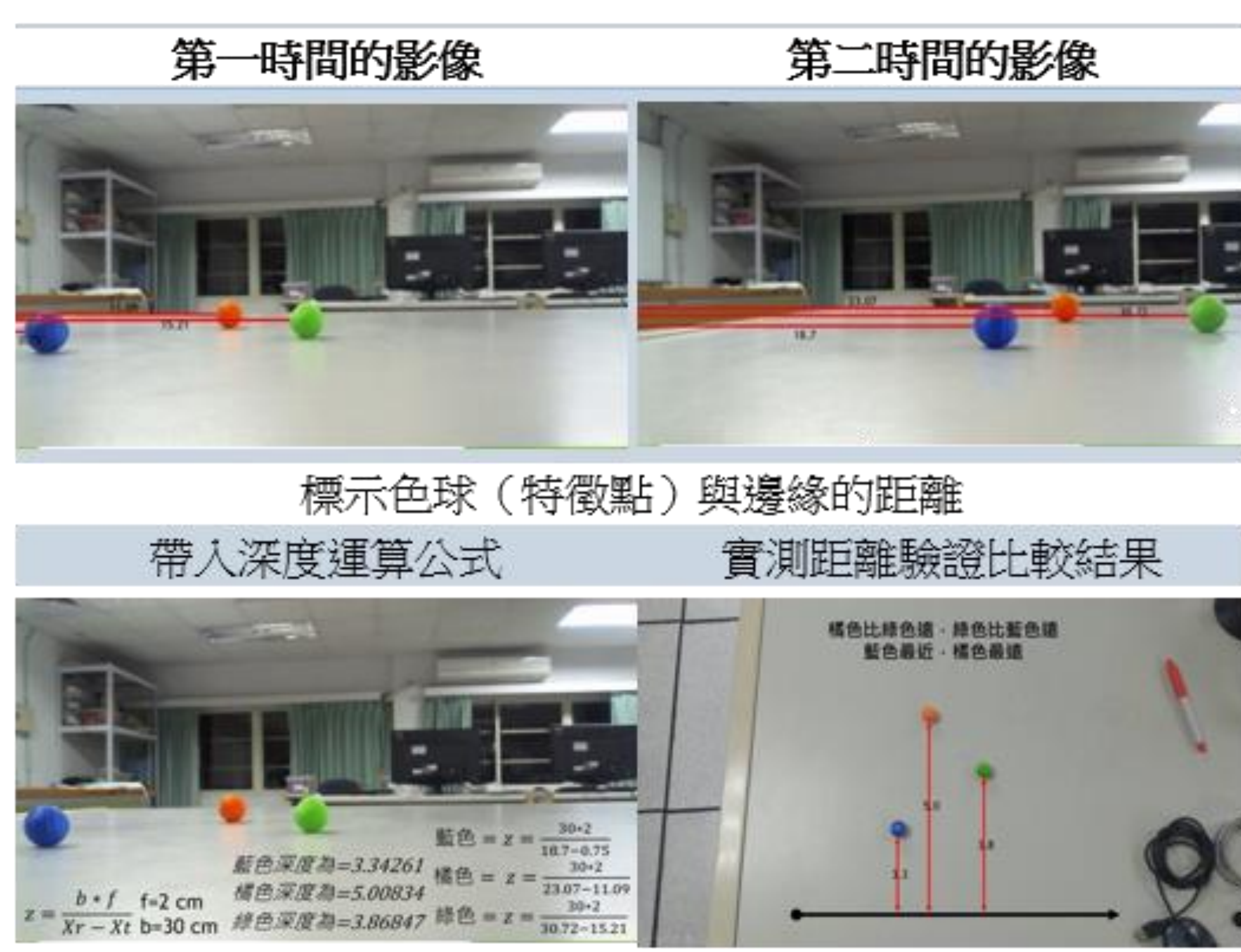
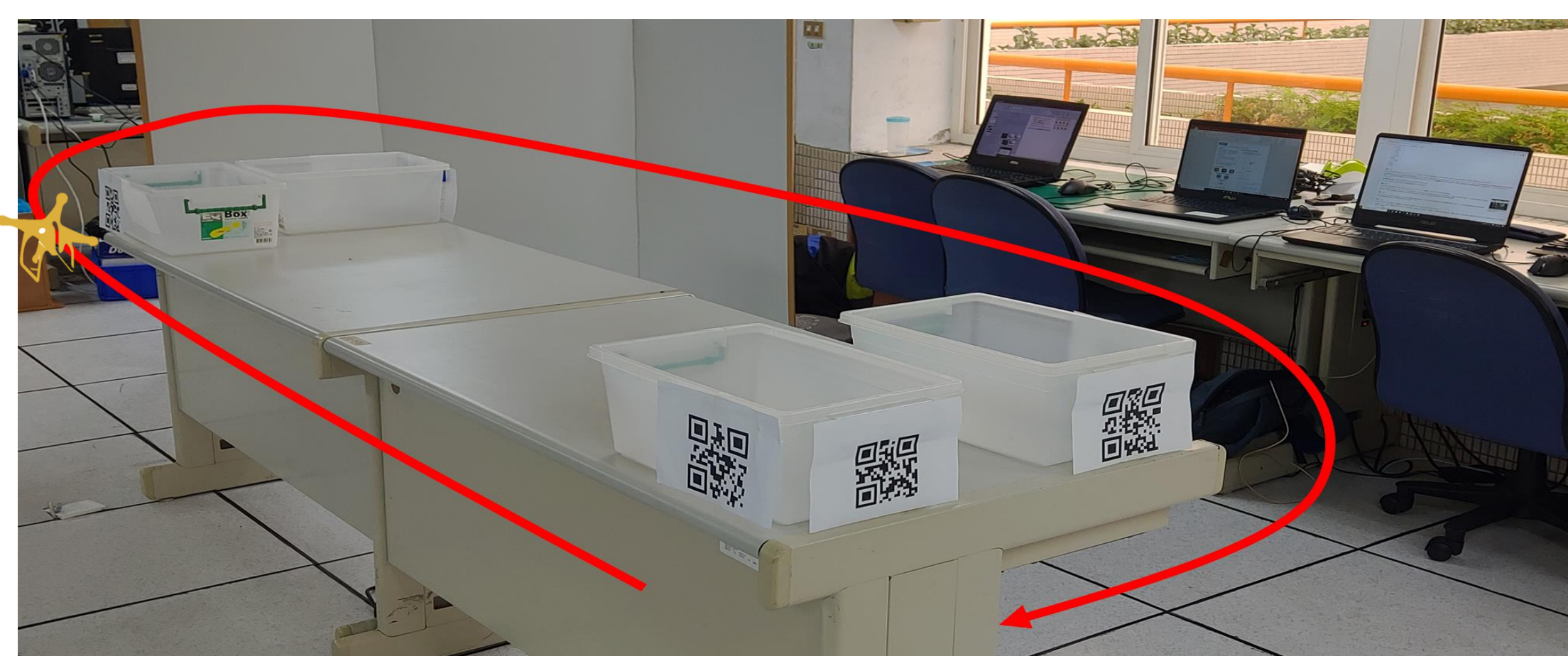


圖 深度定位實驗步驟及結果

✈️ 自主飛行實驗

運用QR-Code辨識程式，讀出QR-Code裡面的數據，下達飛行指令，以此完成自主飛行。

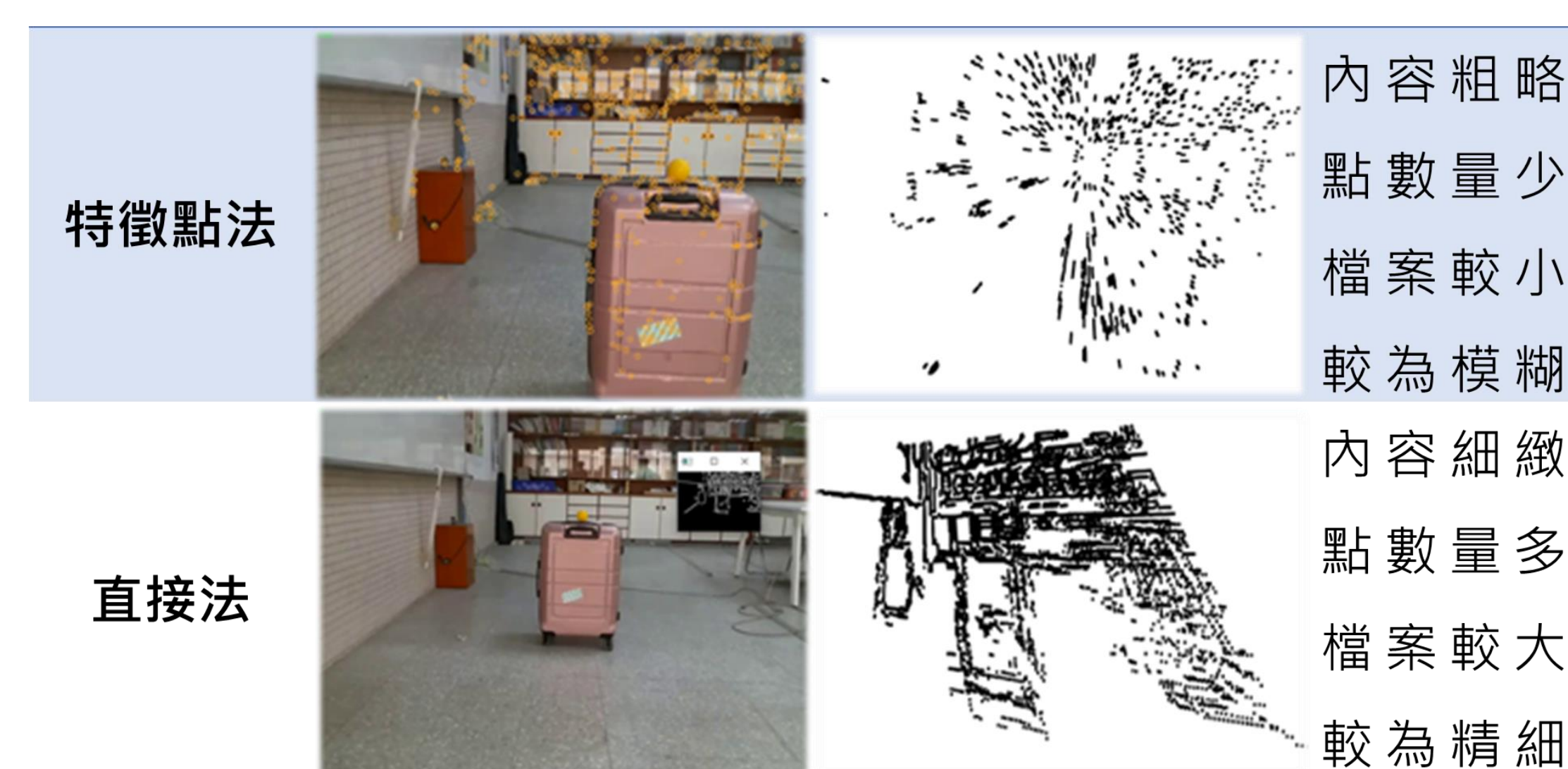


✈️ LSD-SLAM建模

將影像資料傳回電腦，由電腦把影像轉成圖檔，並讓各圖檔進行比較，結合深度計算形成建模。

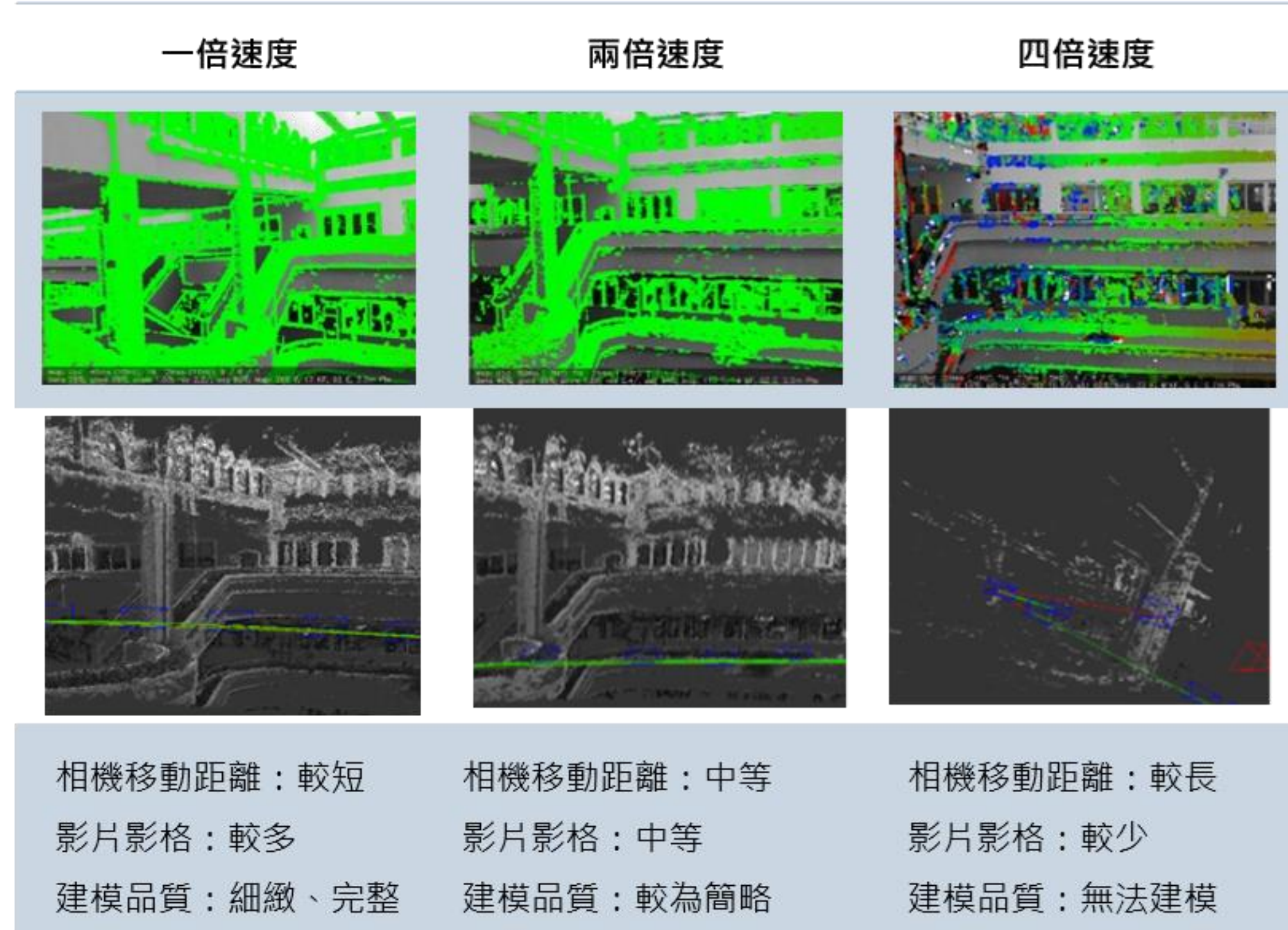


✈️ SLAM特徵點分析實驗



✈️ LSD-SLAM建模實驗

SLAM需要連貫性的影像，若飛行器飛行速度過快或幀數過低時，可能造成兩格影像相距過遠，造成SLAM無法推斷路徑等問題，將幀數調整為30幀並慢速飛行，即可輸出建模品質較好的建模圖形。



✈️ 以建模計算劣化範圍

利用建模出的橋樑點雲模型，可以大約兩點距離測量出長度，由左圖實際測量為44公分，右圖為建模後的測量約47公分，具有足夠的參考價值。



討論

- 一.在天候不佳的情況下，會增加飛行難度及建模誤差，因此要讓整套系統進行長期的監測，這樣便可在下次飛行後快速比對出前後的變化。
- 二.由於SLAM計算方式，若影格距離過大，會無法找到同關鍵點比對導致無法建模，需降低飛行速度來控制影格的間距。

結論

以自主飛行器為載體，拍攝出橋梁整體，並用LSD-SLAM的技術建模出來，再由建模做為橋樑劣化檢測的參考。整套系統能達到的效果如下：

- 用LSD-SLAM技術建模計算出劣化部分的範圍及深度。
- 使用整套系統能省下不少人力成本和降低讓工作人員現場測量的風險。
- 審查人員能利用建模計算出的數據，協助進行橋梁安全的評測，並留下建模於影像的資訊，可交由不同人進行審查找到不同的問題

未來展望

- 機器學習輔助：透過從過往的資料和經驗中學習並找到其運行規則，將建模後結果加以分類，檢測是否劣化及劣化成度的面積與深度，並加入YOLO技術，把劣化部分圈出。
- 提升拍攝效率：目前只能達到一對一飛行器自主控制，未來加入飛行器的多飛功能，達到提升效率、同步偵測等功能。

參考資料

- 崔國強、林志明。橋梁檢測之探討—以宜專一線公路多望橋 為例。國立宜蘭大學土木工程學系。
- 高翔、張濤、劉毅、顏沁睿 (2019)。SLAM視覺十四講：雙倍內容強化版。台灣：深智數位。
- 曾志煌 (2011)。橋梁目視檢測評估手冊。台灣：交通部運輸研究所。
- 蔡欣局。橋梁目視檢測作業及檢測範例說明。國立中央大學橋梁中心。