

# 電機專題競賽題目：智慧型四軸追蹤無人機之設計與實作

## Design and Implementation of a Intelligent Tracking UAV

現今產業販售的智慧型無人機，其飛安事故仍不斷發生，原因是其辨識系統無法在多人物中分辨特定目標，避障與追蹤也無法妥善應對許多變因，最終導致無人機偵測誤判或失控而造成危害。有鑒於此，本研究之目的開發一套整合型智慧無人機系統，讓無人機具備保鏢、助理等功能，使其可以在不同環境下穩健飛行，並持續辨識與追蹤特定目標，同時與目標保持一定的距離與方位。本研究將開發自適應目標辨識系統搭配 YOLO 演算法進行目標追蹤，並使用本團隊構想的空間探測理論開發出的輪廓及螺旋卷積空間偵測演算法(Contour and Spiral Convolution Space Detect algorithm, CASCSD algorithm)來達到避障之目的。

### 3.1 自適應目標辨識系統

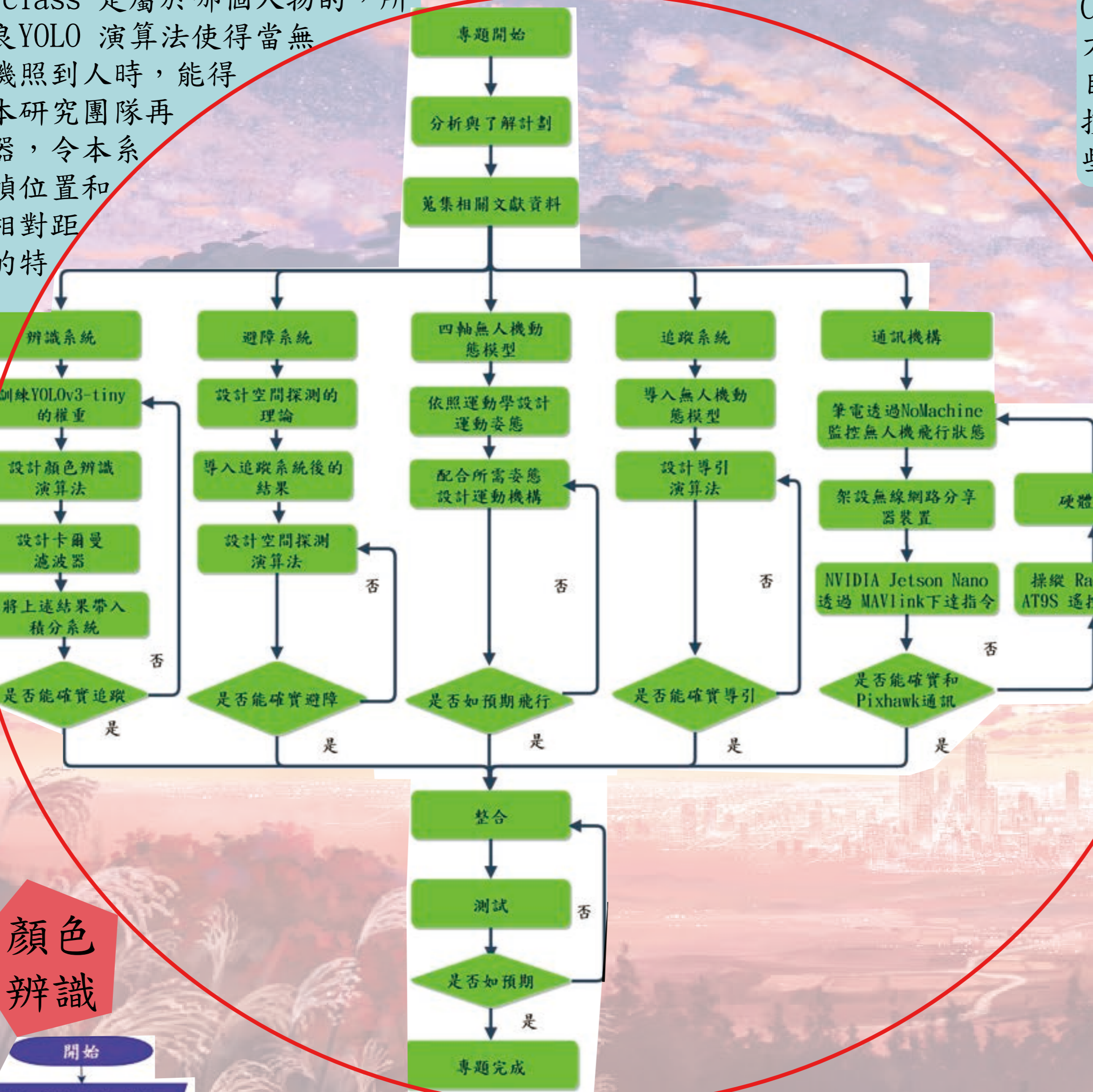
因 YOLO 演算法本身的輸出只有 bounding box 的  $b_x$ ,  $b_y$ ,  $b_w$ ,  $b_h$  和信心程度，並不能去辨識顏色，及去判斷 class 是屬於哪個人物的，所以本研究團隊去改良 YOLO 演算法使得當無人機上的深度照相機照到人時，能得知以上訊息。此外本研究團隊再加上用卡爾曼濾波器，令本系統可得知目標下一幀位置和上一幀質心位置的相對距離，以及目標身上的特徵去進行評分，以達到目標即使再多人中仍能辨識到。

用 HSV 定義不同顏色色域的上下限，並以此來劃分顏色，再分別處理各顏色，將非該顏色的部分遮罩，只剩該顏色並膨脹它，是為了避免若該顏色區塊不明顯而沒被程式辨識到的狀況。之後擷取膨脹後的輪廓並計算這些輪廓的面積，將面積小於一定值的顏色先去掉，並紀錄剩下的面積，再從這些顏色區塊找出最大及第二大的顏色記錄下來，其餘的捨去。

### 顏色辨識



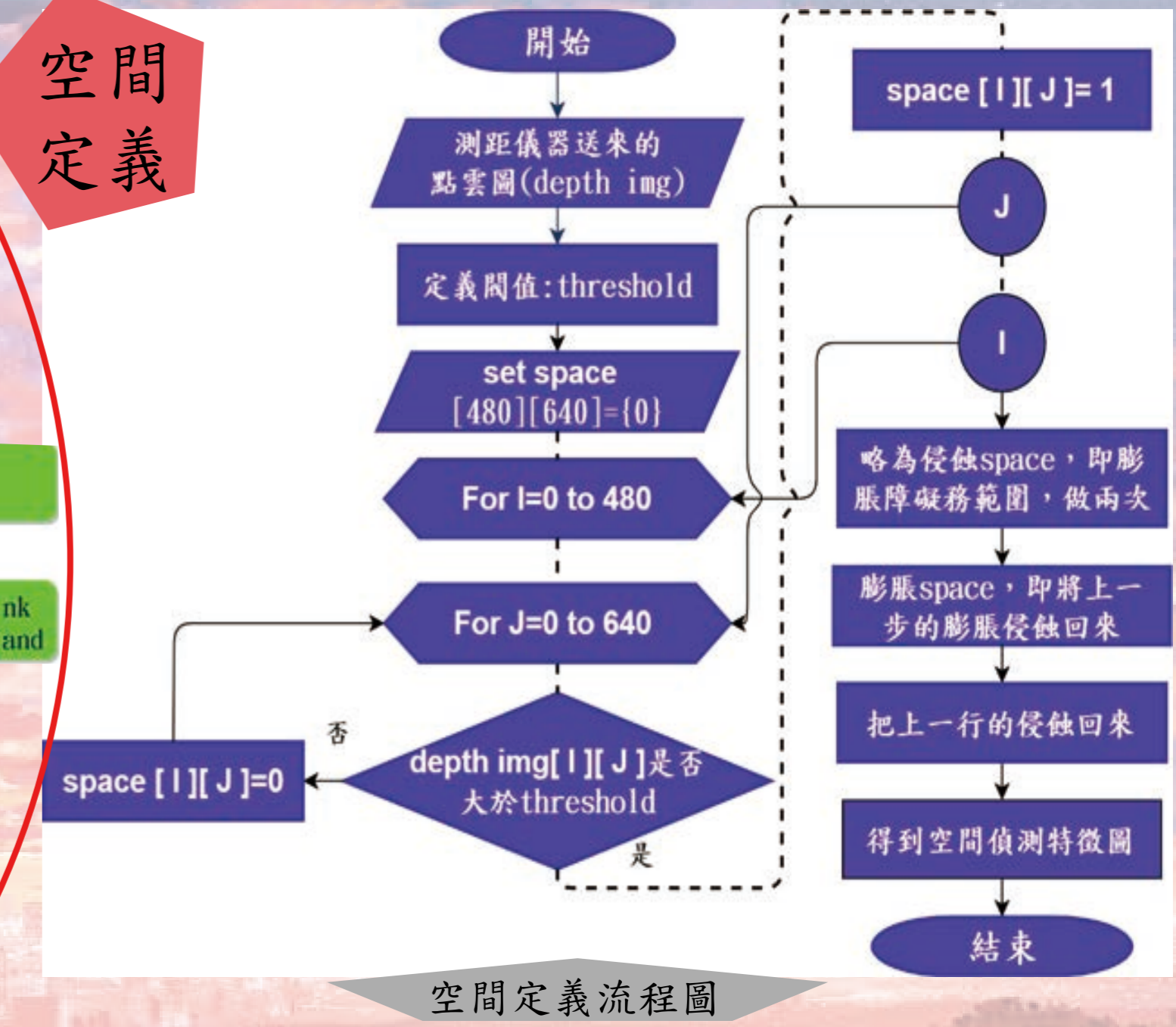
### 2 研究步驟



### 3.2 避障系統

本研究團隊先定義何謂空間，再依此定義自行研發出輪廓及螺旋卷積空間偵測演算法(Contour and Spiral Convolution Space Detect algorithm)用來探測無人機前方是否有空間供無人機飛行，若都沒有，接下來就不執著在目標周圍的最短路徑，直接開始搜尋剩下的部分，採取輪廓搜尋法，尋遍空間偵測特徵圖剩餘部分的空間輪廓，看看那些輪廓的面積和形狀能不能提供無人機飛行。

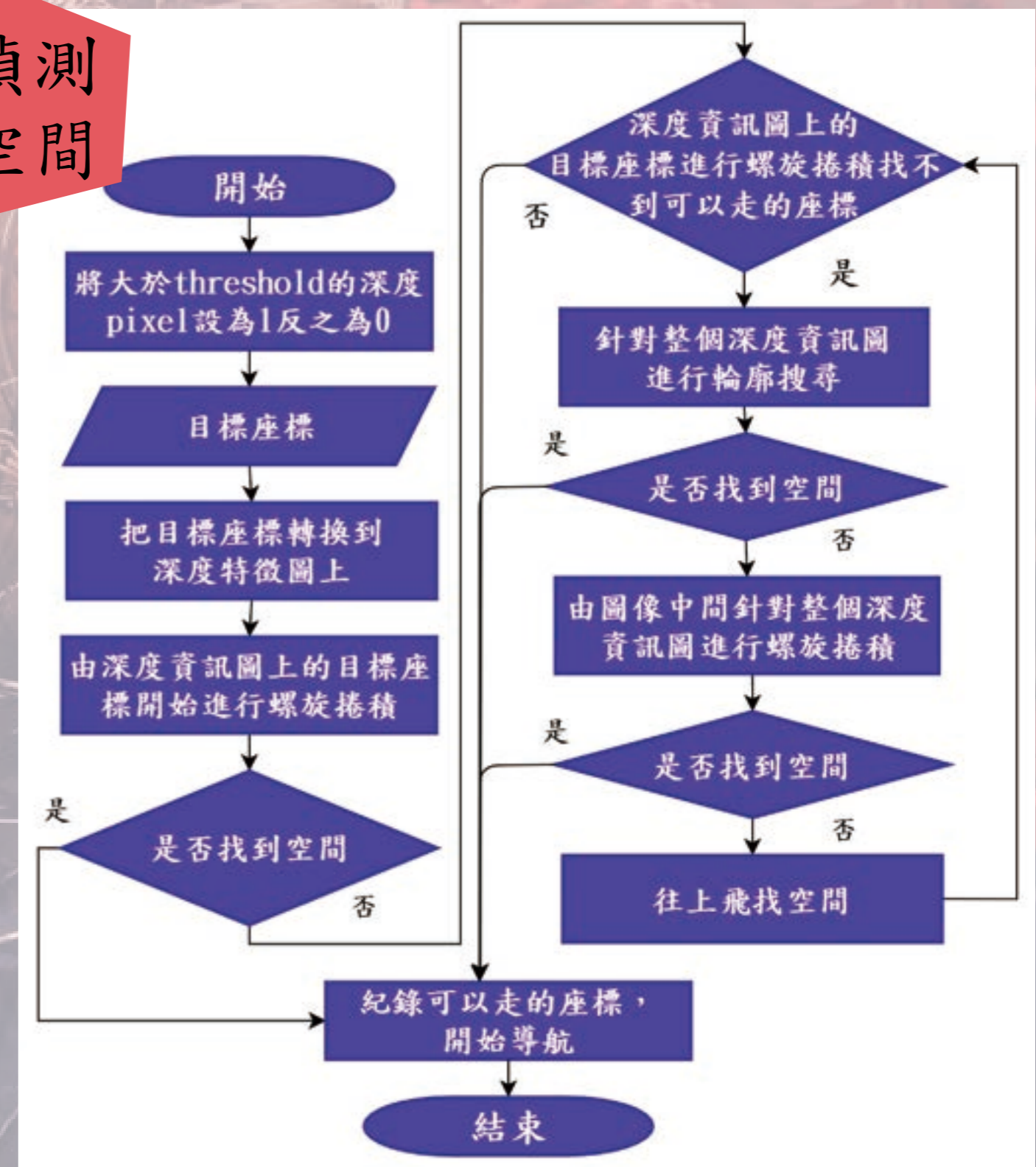
### 空間定義



空間定義流程圖

將點雲圖分為兩區塊，可理解為1跟0(可走跟不可走)，因易受到光害影響，所以先略為侵蝕掉空間的範圍，即膨脹障礙的範圍，這是為了等下在膨脹空間的時候不至於將一些不大的障礙當作雜訊去掉，再來膨脹空間範圍將一些因光害或是各種雜訊而測不出的距離濾掉，然後再侵蝕回來，中侵蝕的空間範圍並沒有被膨脹回來，這是因為無人機在飛的時候不會完全穩定的固定在原位，會有點左右飄移，所以在障礙邊緣保留一點緩衝距離。

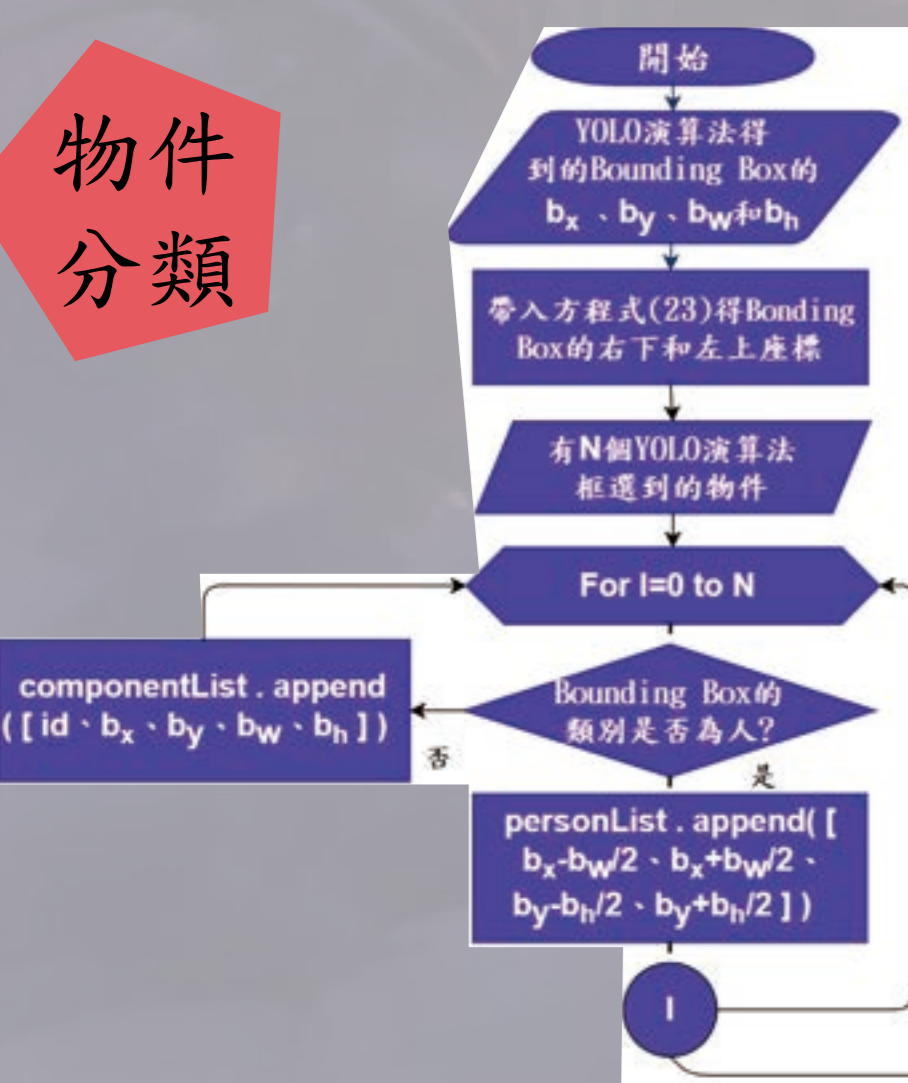
### 偵測空間



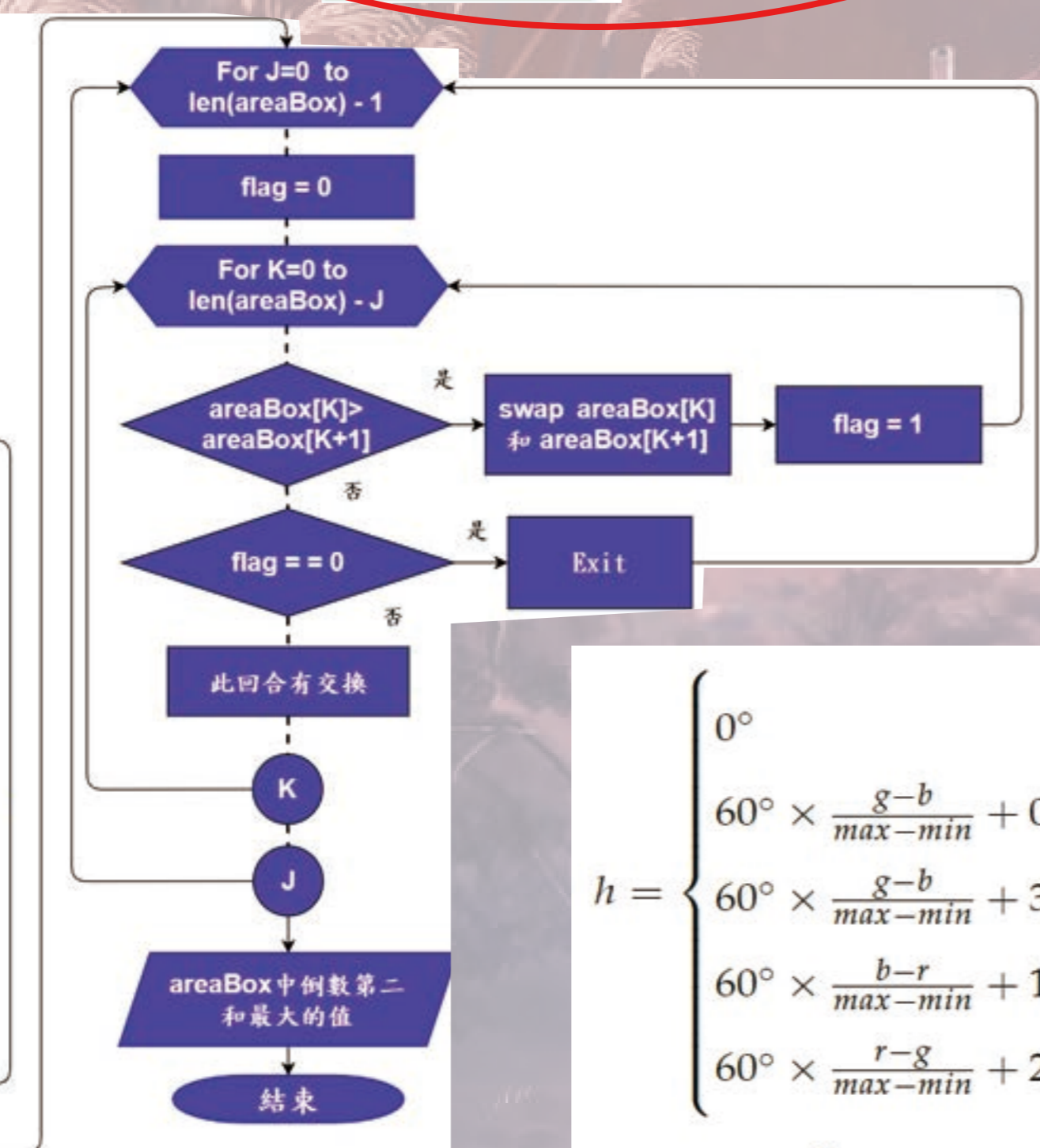
偵測空間流程圖

CASCSD 是由目標在像素座標上的質心位置開始由內向外找可以走的空間，若找不到，就會用下個方法去尋找，因為在上述螺旋捲積的部分已經尋遍目標周遭的空間，但都沒有，所以接下來就不用執著在目標周圍的最短路徑，直接開始搜尋剩下的部分，這裡採取輪廓搜尋法，尋遍空間偵測特徵圖剩餘部分的空間輪廓，看看那些輪廓的面積和形狀能不能提供無人機飛行。

### 物件分類



物件分類流程圖



$$h = \begin{cases} 0^\circ & \text{if } max = min \\ 60^\circ \times \frac{g-b}{max-min} + 0^\circ, & \text{if } max = r \text{ and } g \geq b \\ 60^\circ \times \frac{g-b}{max-min} + 360^\circ, & \text{if } max = r \text{ and } g < b \\ 60^\circ \times \frac{b-r}{max-min} + 120^\circ, & \text{if } max = g \\ 60^\circ \times \frac{r-g}{max-min} + 240^\circ, & \text{if } max = b \end{cases}$$

$$s = \begin{cases} 0, & \text{if } max = 0 \\ \frac{max-min}{max} = 1 - \frac{min}{max}, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$v = max$$

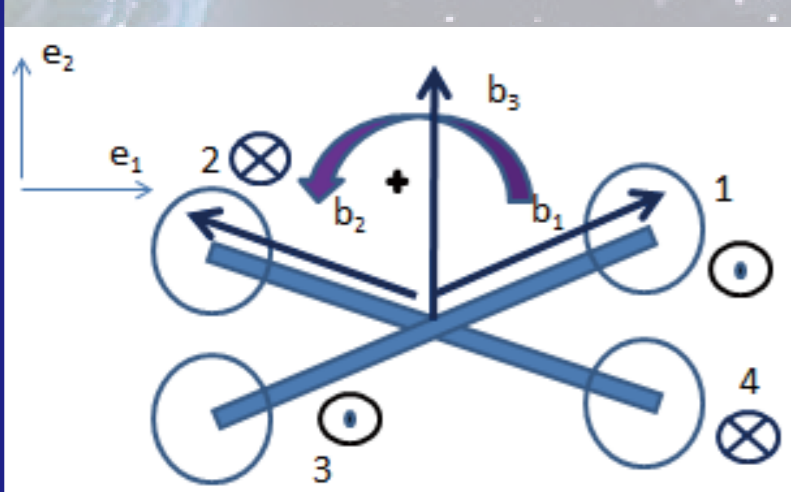
$$a : \left( b_x - \frac{b_w}{2}, b_y - \frac{b_h}{2} \right), b : \left( b_x + \frac{b_w}{2}, b_y - \frac{b_h}{2} \right),$$

$$c : \left( b_x - \frac{b_w}{2}, b_y + \frac{b_h}{2} \right), d : \left( b_x + \frac{b_w}{2}, b_y + \frac{b_h}{2} \right)$$

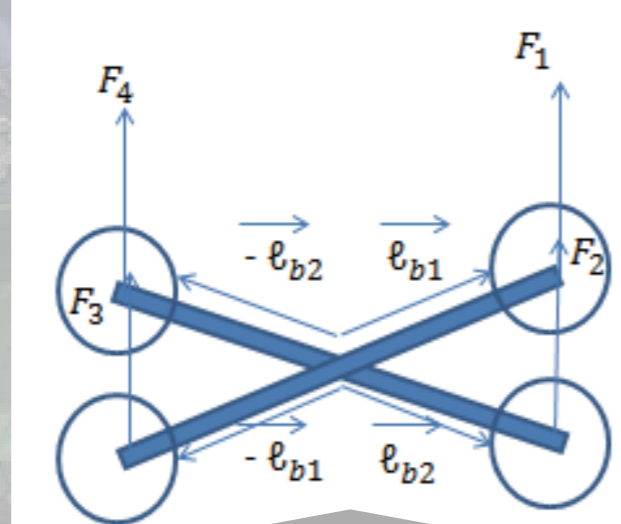
### 3.3 導航系統

無人機的加速度和角加速度的方程式

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \frac{1}{M} k_2 G_{R^3}(\vec{b}_3, \vec{e}_1) (\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \\ \ddot{y} &= \frac{1}{M} k_2 G_{R^3}(\vec{b}_3, \vec{e}_2) (\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \\ \ddot{z} &= \frac{1}{M} (k_2 G_{R^3}(\vec{b}_3, \vec{e}_3) (\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) - M_g) \\ \dot{\theta} &= \frac{1}{I_{11}} l k_2 (\omega_4^2 - \omega_3^2 - \omega_2^2 + \omega_1^2) \\ \dot{\beta} &= \frac{1}{I_{22}} l k_2 (\omega_3^2 - \omega_2^2 - \omega_1^2 + \omega_4^2) \\ \dot{\alpha} &= -\frac{1}{I_{33}} k_1 (\omega_1^2 - \omega_2^2 - \omega_3^2 + \omega_4^2) \end{aligned}$$



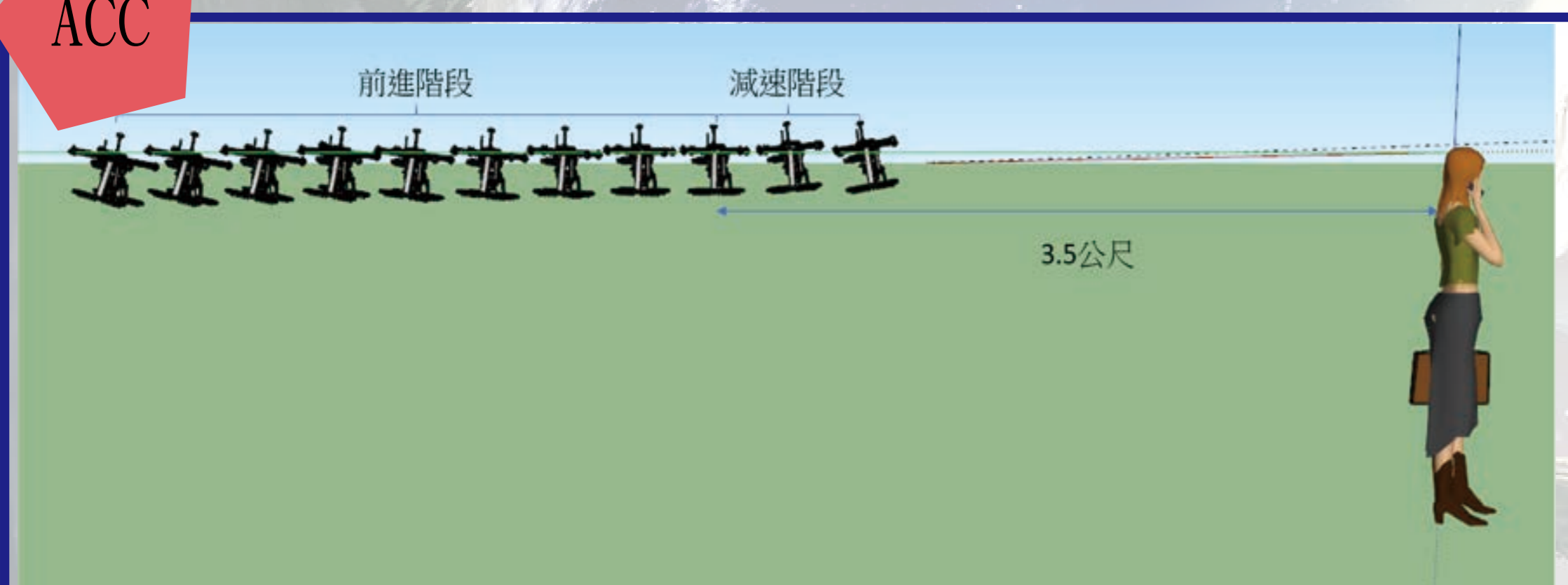
世界坐標系和無人機的剛體坐標系的示意圖



無人機的向量方向示意圖

利用上述方程式，便可知道如何驅動馬達，和無人機的加速度(前三式)是由傾角(後三式)決定，所以只要透過傾角就可以決定出無人機的三軸加速度，轉動慣量 $I_{xx}$ 、臂長 $l$ 與係數 $k_2$ 皆為常數，馬達轉速可藉由馬達規格知每伏特幾轉，就可以推算出當下輸出電壓的轉速，這樣就可以知偏移角度的加速度值。因此本研究團隊可透過變更傾角來修正無人機的飛行方向。

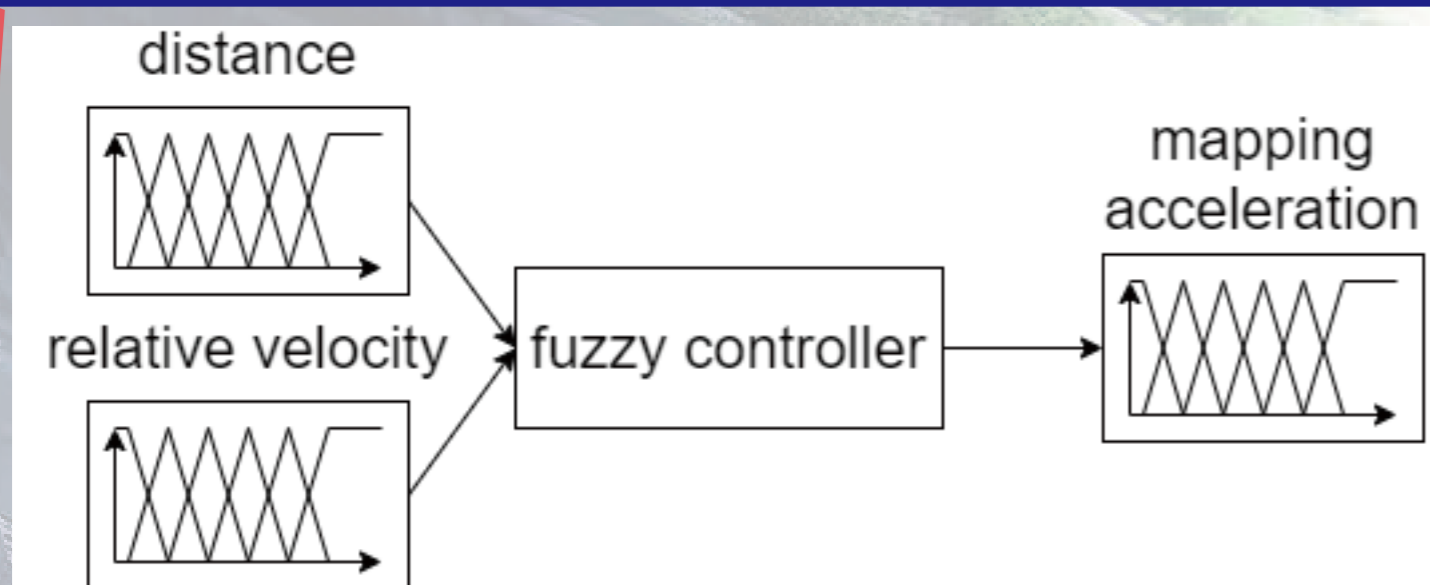
### ACC



ACC示意圖

如果一開始無人機距離目標很遠，飛行控制命令會讓無人機pitch軸的傾角很大，所以無人機會以很快的速度接近目標，但隨著離目標人物越來越近後傾角開始變小，直到進入3.5公尺後開始急煞將依照慣性飛行的無人機停下來，之後人若開始向前，則無人機根據與人的距離以及當下的速度決定傾角，這樣人走得越快則無人機飛得越快，若人走得慢甚至停下來則無人機也跟著減速停下來，以此來做到ACC(適應性巡航系統)。

### 模糊控制

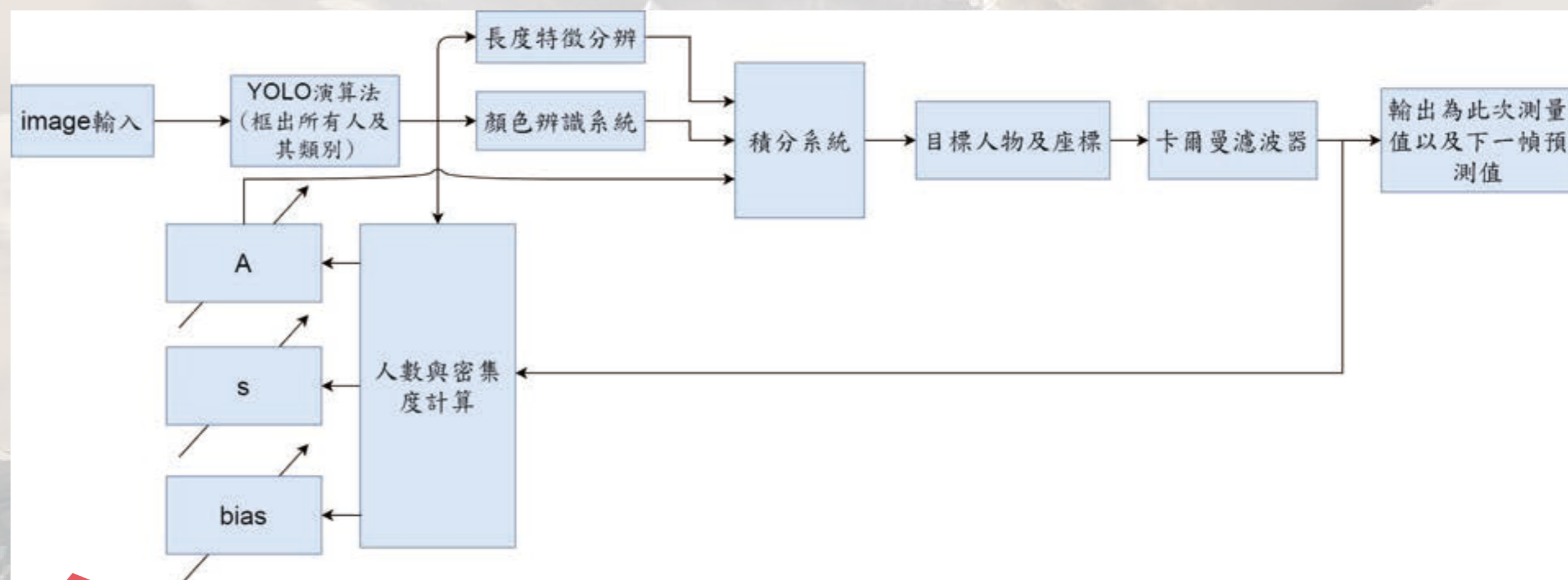


模糊控制架構圖

		距離				
		NB	NS	ZO	PS	PB
相對速度	NB	ZO	ZO	PS	PB	PB
	NS	ZO	ZO	PS	PS	PB
	ZO	NS	NS	ZO	PS	PB
	PS	NB	NS	NS	ZO	ZO
	PB	NB	NB	NB	ZO	ZO

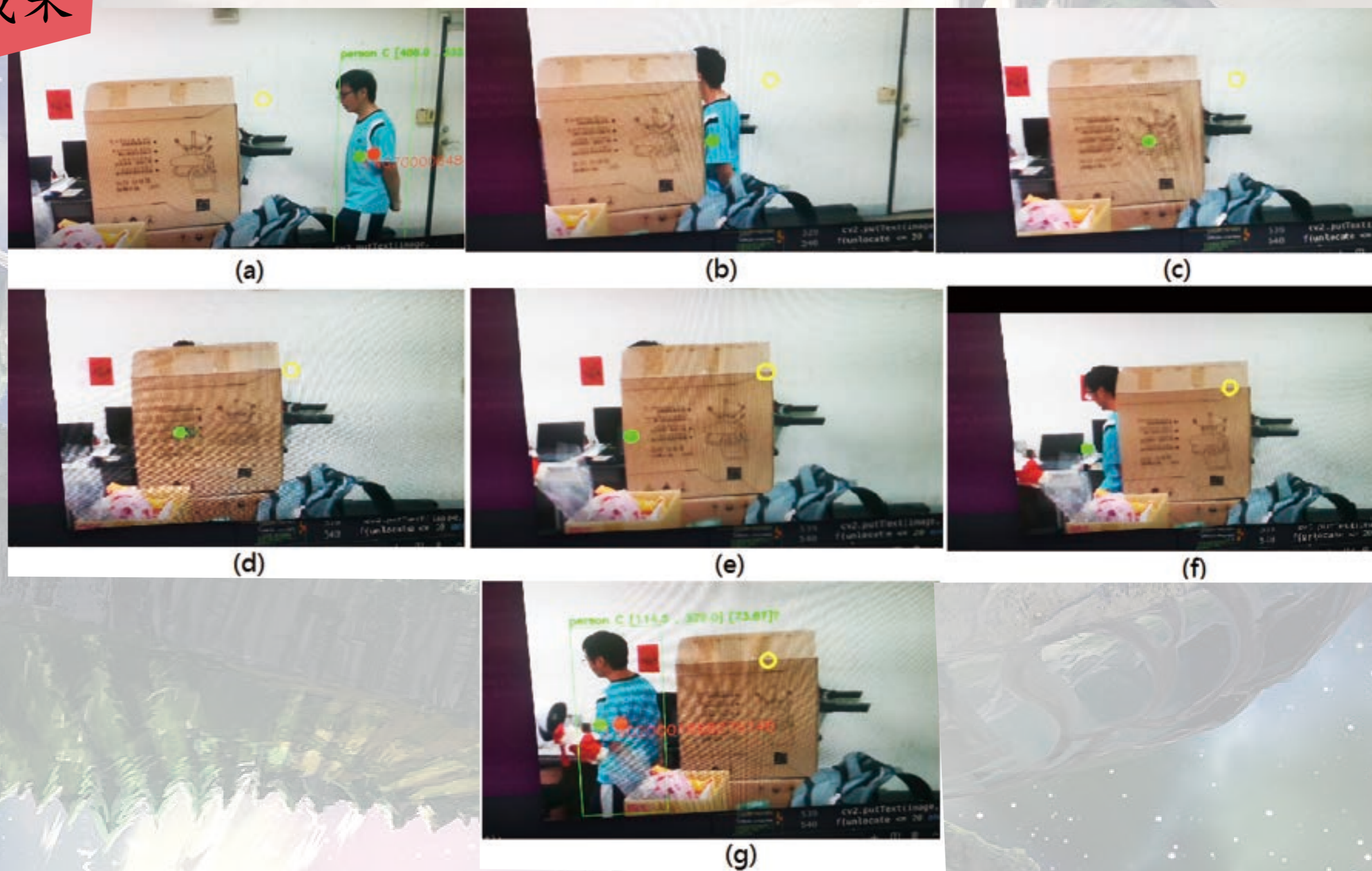
模糊規則表

$$Output = \frac{\sum_{i=0}^N x_i Out_i}{\sum_{i=0}^N x_i}$$

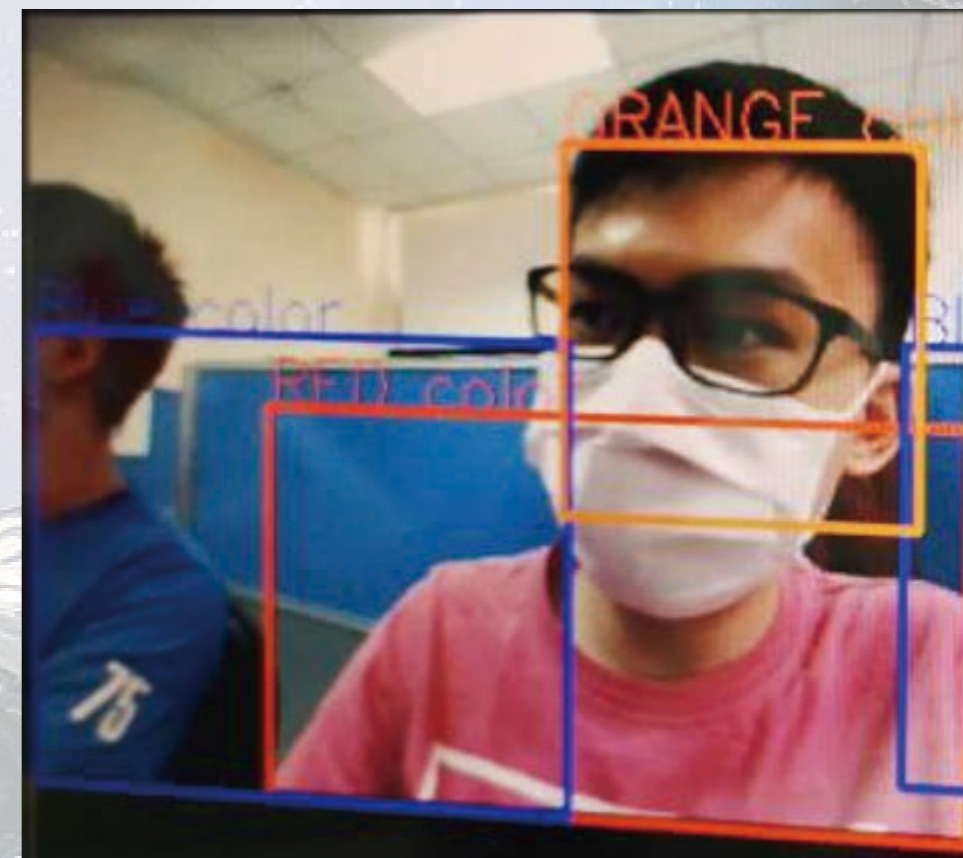


### 實體成果

自適應目標辨識系統示意圖



卡爾曼濾波器實測圖



顏色辨識實測圖



自適應目標辨識系統實測圖(兩人)

自適應目標辨識系統實測圖(多人)

### 3.4 動態模型

#### 牛頓力學

$$F_i = k_2 \omega_i^2 \vec{b}_3 \quad \text{無人機的馬達之向上推力}$$

$$\tau_i = k_1 \omega_i^2 \quad \text{無人機的馬達之扭矩}$$

$$\tau_{Fi} = \ell \|F_i\| \vec{b}_i \quad \text{各個推力產生的扭矩}$$

然後因為在牛頓力學中的式子是二階非線性微分方程，十分難解，故本研究團隊將以拉格朗日力學來探討無人機的動態力學。

$$\frac{dP_i}{dt} = F_{i,ex}$$

$$\frac{dL_i}{dt} = \tau_{i,ex}$$

#### 拉格朗日力學

在一個旋轉群SO(3)，其中的一個元素可被表示成剛體在空間中的取向，所以可將SO(3)的元素設為矩陣。

$$R = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 \end{bmatrix}$$

其中b1, b2, b3是相互垂直且為時間的函數，是剛體相對於世界坐標系e1, e2, e3的方向向量，且R矩陣是正交矩陣，可用簡單的旋轉特性歸納出b1, b2, b3 三個向量的關係式。

$$b_1 = -\beta b_3 + \alpha b_2$$

$$b_2 = \theta b_3 - \alpha b_1$$

$$b_3 = -\theta b_2 + \beta b_1$$

其中a, b, q 分別是yaw、roll和pitch的變化率

而  $R^T R = \begin{pmatrix} 0 & \alpha & -\beta \\ -\alpha & 0 & \theta \\ \beta & -\theta & 0 \end{pmatrix} = \hat{\Omega}$ ， $\hat{\cdot}$ 是指將  $\mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^{3 \times 3}$  即為外積變成線性運算

所以  $\Omega = (\theta, \beta, \alpha) \in \mathbb{R}^3$ ，是一個角速度向量。

將無人機的馬達向上推力和扭矩，各推力產生的扭矩，線、角速度帶入，且  $F_{(t,v,q)}$  是對偶向量，可因線性映射寫作： $F = F_x dx + F_y dy + F_z dz + F_\theta d\theta + F_\beta d\beta + F_\alpha d\alpha$

$$F_x = k_2 G_{R^3}(\vec{b}_3, \vec{e}_1) (\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2)$$

$$F_y = k_2 G_{R^3}(\vec{b}_3, \vec{e}_2) (\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2)$$

$$F_z = k_2 G_{R^3}(\vec{b}_3, \vec{e}_3) (\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) - M_g$$

$$F_\theta = \ell k_2 (\omega_4^2 - \omega_3^2 - \omega_2^2 + \omega_1^2)$$

$$F_\beta = \ell k_2 (\omega_3^2 - \omega_2^2 - \omega_1^2 + \omega_4^2)$$

$$F_\alpha = -k_1 (\omega_1^2 - \omega_2^2 - \omega_3^2 + \omega_4^2)$$

經過運算後得

$$\ddot{x} = \frac{1}{M} ((C\psi s\phi c\varphi + s\psi s\varphi) u_1 - C_{D1} \dot{x})$$

$$\ddot{y} = \frac{1}{M} ((s\psi s\phi c\varphi - c\psi s\varphi) u_1 - C_{D2} \dot{y})$$

$$\ddot{z} = \frac{1}{M} ((c\phi c\varphi) u_1 - M_g - C_{D3} \dot{z})$$

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{I_{11}} (\ell u_2 - C_{1DR} \dot{\theta})$$

$$\ddot{\beta} = \frac{1}{I_{22}} (\ell u_3 - C_{2DR} \dot{\beta})$$

$$\ddot{\alpha} = \frac{1}{I_{11}} (\ell u_4 - C_{3DR} \dot{\alpha})$$

組力係數  $C_{D1}, C_{D2}, C_{D3}$  與轉動組力係數  $C_{1DR}, C_{2DR}, C_{3DR}$

轉為狀態方程式，設狀態  $X = [x \ y \ z \ \dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ \phi \ \psi \ \theta \ \beta \ \alpha]$  則  $\dot{X} = AX + Bu$   
 $y = CX$

set A =

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{C_{D1}}{M} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{C_{D2}}{M} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{C_{D3}}{M} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{C_{1DR}}{I_{11}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{C_{2DR}}{I_{22}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{C_{3DR}}{I_{11}} & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

set B =

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{M} (c\psi s\phi c\varphi + s\psi s\varphi) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{M} (s\psi s\phi c\varphi - c\psi s\varphi) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{M} (c\phi c\varphi) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

set u =

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2 \\ \omega_1^2 + \omega_4^2 - \omega_2^2 - \omega_3^2 \\ \omega_3^2 + \omega_4^2 - \omega_1^2 - \omega_2^2 \\ \omega_1^2 + \omega_3^2 - \omega_2^2 - \omega_4^2 \end{pmatrix}$$

set C =

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

透過模擬輸入u讓無人機得以在模擬系統上追蹤特定的目標點進行歸機規劃，PID將三軸訊號以及油門訊號後透過MMA演算法轉到四軸馬達上作為u的參數。

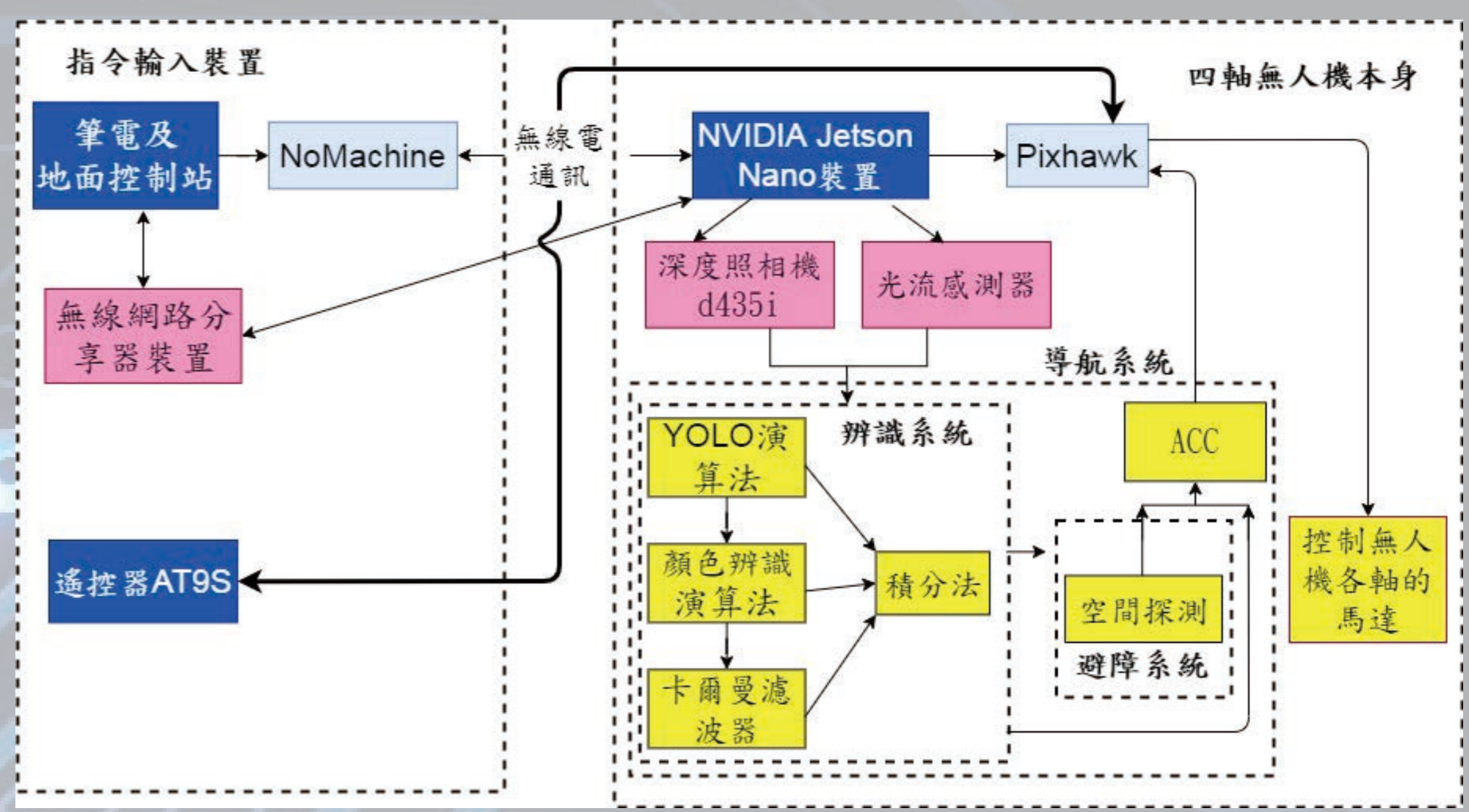
$$M_{front,right} = Thrust_{cmd} + Roll_{cmd} + Pitch_{cmd} + Yaw_{cmd}$$

$$M_{front,left} = Thrust_{cmd} - Roll_{cmd} + Pitch_{cmd} - Yaw_{cmd}$$

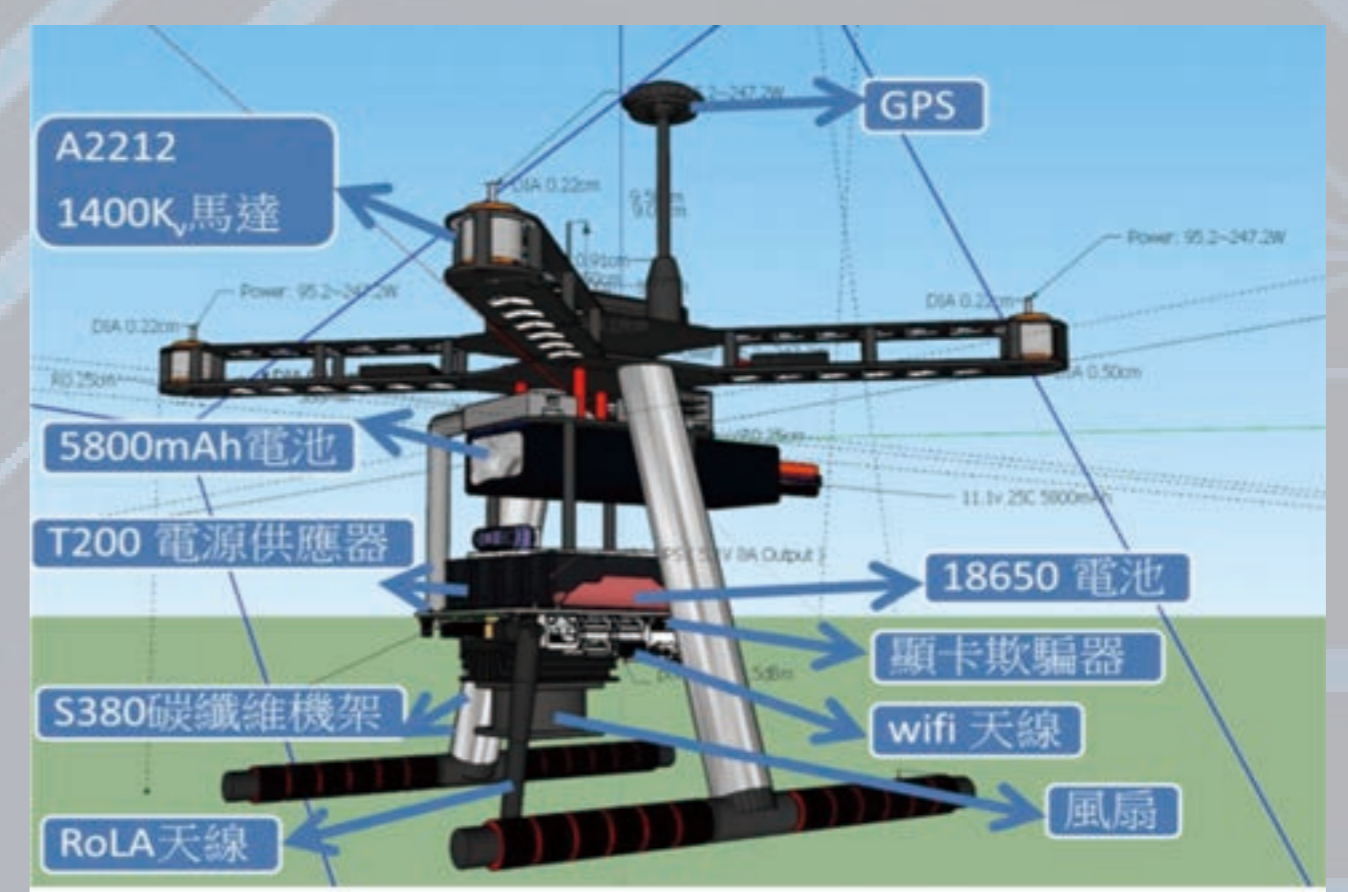
$$M_{back,right} = Thrust_{cmd} + Roll_{cmd} - Pitch_{cmd} - Yaw_{cmd}$$

$$M_{back,left} = Thrust_{cmd} - Roll_{cmd} - Pitch_{cmd} + Yaw_{cmd}$$

### 4 系統裝置



整體系統架構圖



### 5 結論

在對本專題中進行研究的過程中，我們深刻的體會到了研究是一種主動的對要達成的目的進行問題分析，分類，并在之後尋找解決方法。然後在這過程中不斷對遇到的問題進行同樣的步驟。反復循環，直至完成為止。其中如果有什麼功能要添加或移除的話也依然如此。其中發現與課堂上最不同的是知識的吸收和應用的循序和主動性是和專題研究是相反的。在專題的研究上，我們解決遇到的問題所需要的知識往往都不會在遇到之前就聽過或知道的。因此我們常得主動地去尋找解決的方法。不管是網絡上也好，或是詢問其他人。

### 6 未來發展

會由室外轉入室內，因為無人機在追蹤人時不可能永遠都在 GPS 訊號良好的地方，可能隨著目標人物進入騎樓或是走入大樓這些地方，這時無人機將不能依靠 GPS 進行定位，所以在未來此專題將引入慣性導航系統，透過此系統提供無人機在失去 GPS 訊號後的座標參考。同時將原來的深度相機所提供的紅外線點雲圖改為由光達提供點雲資訊，因為在這專題中本研究團隊發現紅外線測距並不十分精確且有不少死角，便可讓整個系統變得更為強健與穩定。