

2025仰望盃全國科學HomeRun實作大賽

決賽成果報告書

隊伍名稱: 沒有包含可辨識學校之資訊

作品名稱: 有動量盤, 不撥自轉

科學概念1: 轉動與角動量

當一物體自身合力矩不為零時, 所產生的角加速度讓角速度改變, 進而造成轉動, 而一物體未受外加力矩狀況下, 其自身的角動量不會改變, 這便是角動量守恆。

本次的研究涉及許多力矩與轉動的控制, 包括透過控制動量輪的轉速操控無人機機體轉動慣量的方式以控制無人機方向、平衡機身等。

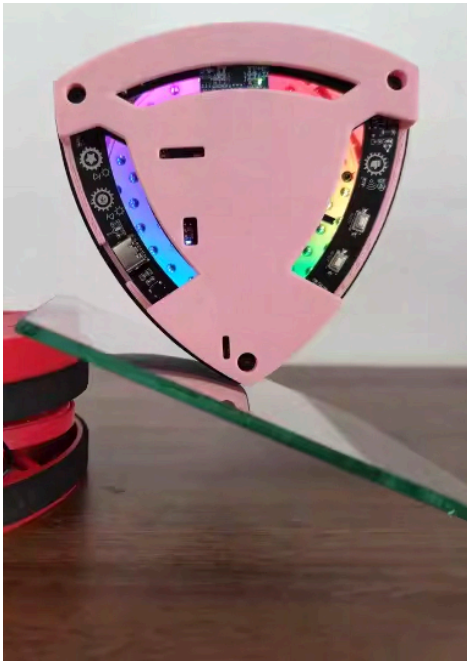
科學概念2: 牛頓力學

牛頓力學主要用於計算施力與物體的運動狀態的關係, 其中包含受力及加速度等量值的運算, 為了要控制飛行器在立體的空間中移動, 我們必須設計飛控演算法, 而其中包括俯仰、滾轉及偏航等操作等都會涉及許多力量與加速度的計算。

決賽成果報告書內文

1. 發想動機：

某天在逛夜市時，因為遊玩了打彈珠遊戲換取獎品而得到一個球形的飛行玩具(下圖一)，作為一個重度中二病的高中生，在心中自然給了他很高的評價，美中不足的一點是，這個玩具只能偵測與地面的距離，垂直向上飛，並沒辦法控制方向以及角度等自身姿態，不久後的物理課，學校物理老師為了演示角動量守恒而帶來給我們看的三角形平衡小玩具(下圖二)，這是一個透過控制中心旋轉的動量輪來控制自身傾斜角度，讓三角形能以頂點平衡站立的小玩具，當時，我便想到若把這兩項概念結合，說不定就能創造出一個獨特的飛行控制結構，於是我們便開始了本次的專案。

圖(一) 球型飛行玩具	圖(二) 三角形平衡小玩具
	

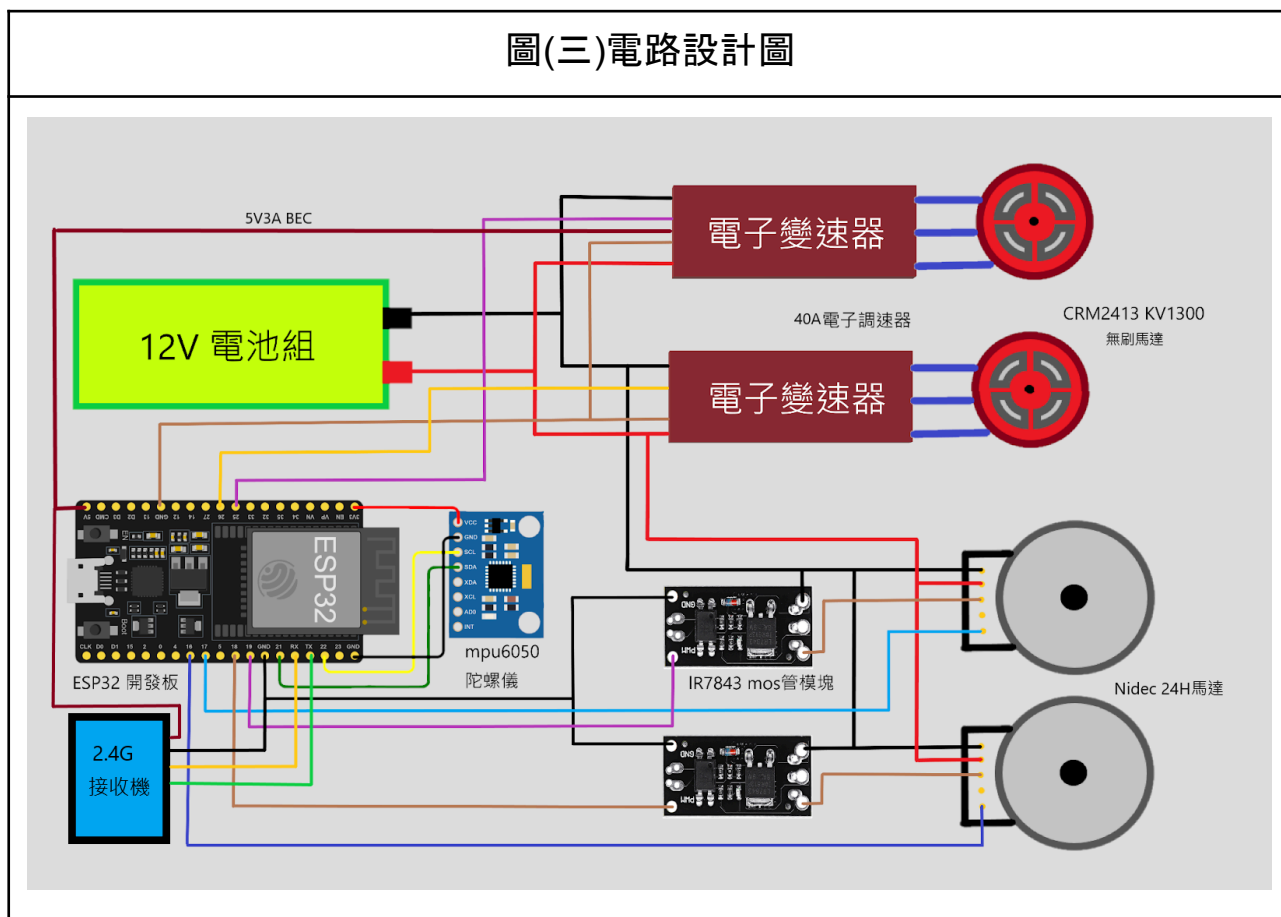
2. 作品創意性：

我們的作品從生活中常見的玩具小物發想，融合目前高中課程所學內容，如角動量守恒、牛頓力學等概念，並透過Esp-32開發板以及傳感器的應用，將書上的科學原理與觀念真正運用到實作中，達到學以致用的目標。

本作品主要創意性在於，利用動量輪來控制飛行器的方式，與以往的單軸飛行器大不相同，以往單軸飛行器通常利用槳盤改變旋翼螺距，造成升力差而讓機體產生傾角，我們的設

計則不需對旋翼螺距進行控制，而是直接利用動量輪改變旋翼的推力向量，透過動量輪產生反扭力矩的方式直接改變傾角，這樣的方式直接以自身為旋轉軸心，能夠以比改變升力差的方式還要更快速調整機身傾斜角。

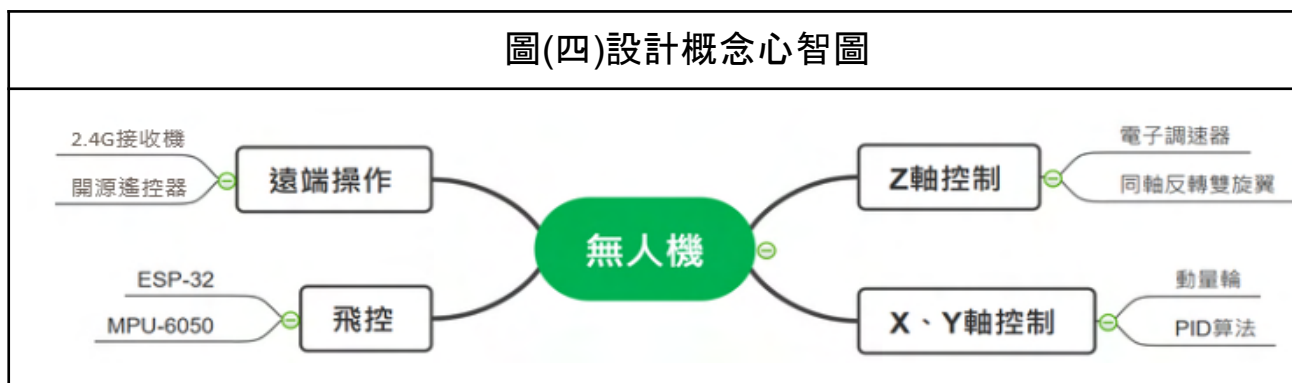
3. 硬體及電路架構圖：



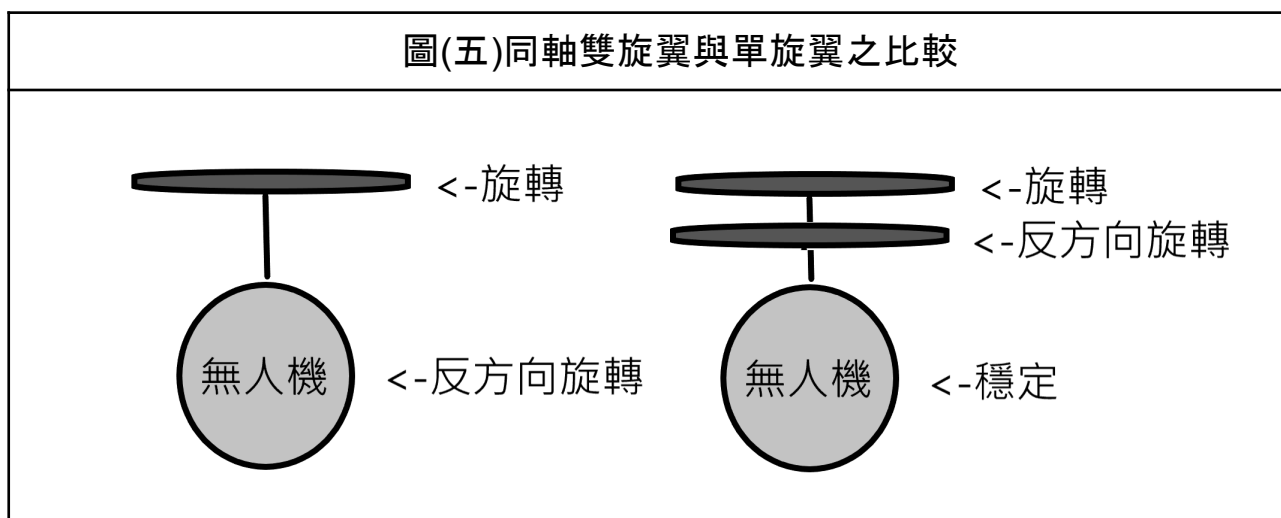
整體動力採用12V(3S)電池組進行供電，圖中有4個馬達，上面兩個紅色的馬達為同軸雙旋翼結構的兩個旋翼馬達，透過電子變速器簡化控制，而下面灰色的馬達則負責控制動量輪。主控部分我們採用ESP-32開發板搭配MPU6050陀螺儀模組進行姿態的截取與飛行控制，並利用2.4G接收機來接收操作指令。

4. 作品成果報告：

(一)設計概念



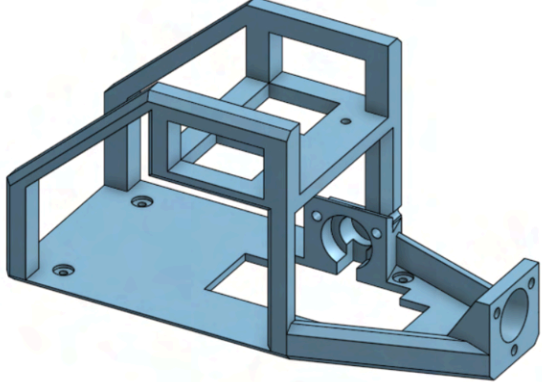
無人機需要在三軸空間中進行移動，必須對飛行器的三個軸進行控制，我們首先透過螺旋槳控制Z軸，由於單旋翼會因為反作用力對機身產生反扭力矩，讓Z軸方向產生轉動，為了避免這個問題，我們在設計上採用同軸雙旋翼的結構來抵銷反扭力矩，如此便不需要再設計平衡尾翼等結構，也可更專心控制動量輪，而X、Y軸，我們便裝設了動量輪，透過動量輪控制傾斜角後，便可以改變旋翼的推力向量，達到在空間中移動的效果。



(二)機架結構設計

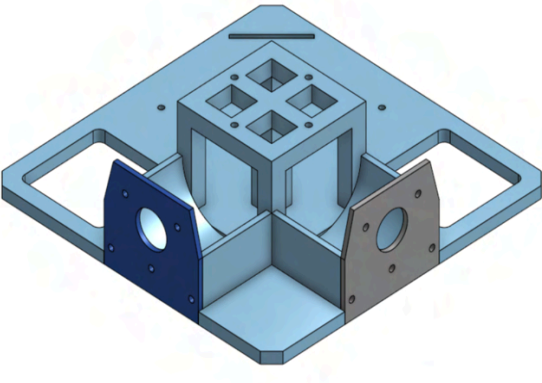
由於將動量輪結構應用於單軸無人機是一個嶄新且冷門的設計，我們必須要自行設計機架以將動量輪與無人機做結合，並對其優缺進行改善，找出最好的設計。

第一版機架實體以及建模

圖(六)第一代機架組裝照片	圖(七)第一代機架結構建模
 A photograph of the first generation robot chassis. It features a black motor, a silver servo, and a black propeller. The chassis is built with black and yellow components, and it is shown on a white surface.	 A 3D CAD model of the first generation robot chassis. The model is shown in a blue color and illustrates the structural layout of the chassis, including the motor, servo, and propeller.

第一版機架在測試中，我們發現由於位於中心的俯仰軸電機固定於機架右側，會導致機身不停向右滾轉，且由於重心過度偏離中心軸，使得透過小小的動量輪控制姿態非常難，推油門離地後便高速向右滾轉墜毀，我們便著手設計第二版的機架。

第二版機架實體以及建模

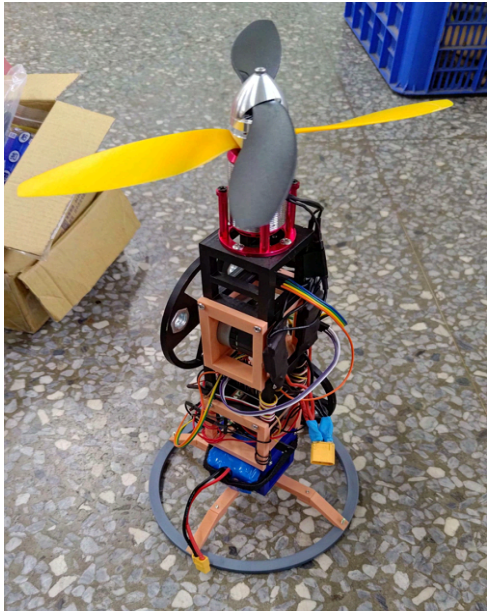
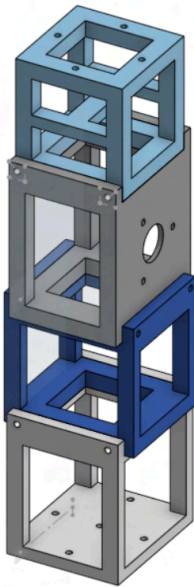
圖(八)第二代機架組裝照片	圖(九)第二代機架結構建模
 A photograph of the second generation robot chassis. It features a black motor, a silver servo, and a black propeller. The chassis is built with black and yellow components, and it is shown on a grassy surface.	 A 3D CAD model of the second generation robot chassis. The model is shown in a blue color and illustrates the structural layout of the chassis, including the motor, servo, and propeller.

第二版機架我們也在兩個方向安裝了動量輪，有別於上次設計，我們將機身設計為完全左右對稱的方形，並將動量輪裝在兩軸的軸線上，且由於這次動量輪位於機身外，我們可以使用直徑更大的動量輪來讓馬達能產生更大的反作用力。

第二版機架在平衡控制上更加優秀，由於動量輪及機身的對稱設計，兩組動量輪可以使用一樣的平衡參數，較易調整，可以透過動量輪進行控制，但因為扁平狀的機

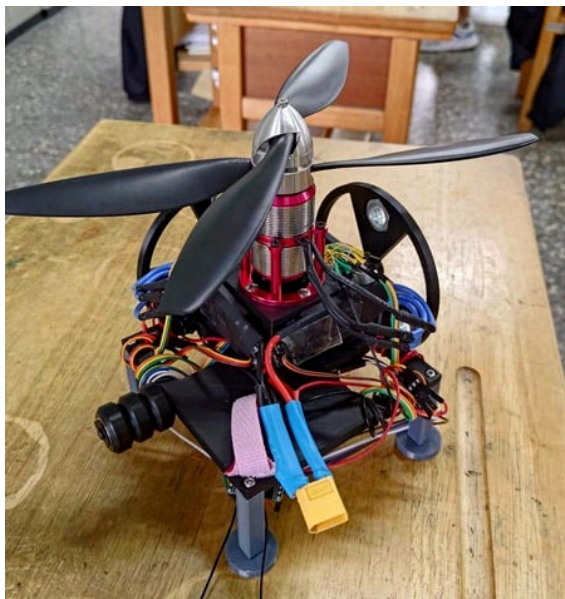
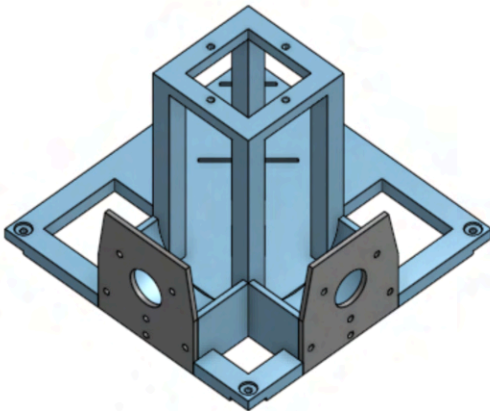
身遮擋了大多數旋翼產生的氣流，造成起飛油門過高難以起飛，所以我們又進入了下一次的結構改進。

第三版機架實體以及建模

圖(十)第三代機架組裝照片	圖(十一)第三代機架結構建模
	

第三代機架我們一樣在兩個方向裝設動量輪，並且我們將所有結構垂直疊放，減少旋翼底下結構的遮擋，大大增加了旋翼氣流的效益，雖然這種結構可以順利產生足夠升力，但由於機身整體過長，造成力臂過大，動量輪能夠產生對機身的控制能力相對較小。

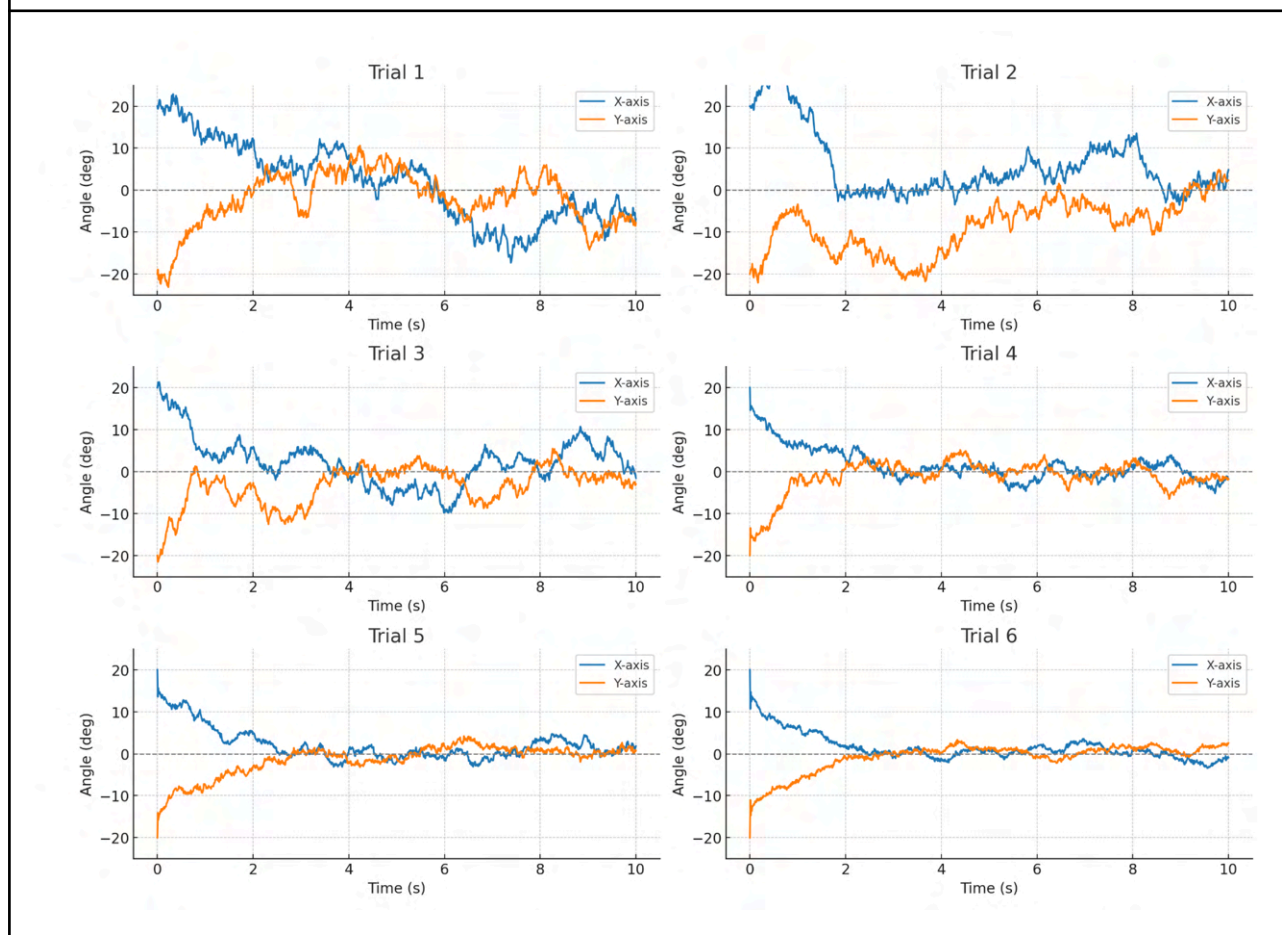
第四版機架實體以及建模

圖(十二)第四代機架組裝照片	圖(十三)第四代機架結構建模
	

第四代機架解決了以前遇到的所有問題，我們首先採用與二代機架相同的設計，將動量輪固定於X、Y兩個軸線垂直處，並進一步縮小機身體積、增加挖孔來減少機身的遮擋，同時我們也對旋翼進行加高的處理，並更換面積更大的旋翼，這樣的設計成功地在保證動量輪對機身的控制力足夠的情況下，又不會產生旋翼升力不足的問題。

(三)PID參數調整

圖(十四)PID調整-陀螺儀數據圖



我們藉由動量輪的轉動慣量，來調整機身在飛行中的姿態，而PID算法即是用以控制動量輪應該要以什麼轉速來控制機身回到平衡點。

參數調整邏輯：在PID調整圖(圖一～圖三)中，我們先將Kp值調高，在調高的過程中我們會發現機身開始在平衡點附近發生震盪(圖三； $P = 37$)，這時代表Kp值已經接近適當值，因此可以開始增加Kd以減少因為慣性超出平衡點而產生的振幅(圖四～圖五)，將Kd逐漸增加後，我們可以看到振幅逐漸減少，當Kd逐漸調升至最佳值(上下調整都會增加震幅時)，可能會發現其平衡點相對預設平衡點有時會偏向某個方向(圖五； $P = 41, D = 13$)，稱為穩態誤差，這是由於重心距離對稱軸有細微偏差造成，此時我們可以藉由將Ki值增大來消持掉此穩態誤差，最終我們便得出可以快速平衡並且不會有過大振幅的參數(圖六； $P = 39, I = 0.7, D = 16$)

PID控制器計算函式

```
void computePID(double input, double setpoint, double &output, double Kp,
double Ki, double Kd, double &prevError, double &integral) {
    double error = setpoint - input;
    integral = constrain(integral + error, -1000, 1000); // 限制積分發散
    if (abs(error)<3){
        integral = 0;
    }
    double derivative = error - prevError;
    output = constrain(Kp * error + Ki * integral + Kd * derivative, -255,
255);
    prevError = error;
}
```

(四)姿態控制

互補濾波：

在本專案中，我們採用互補濾波器作為無人機姿態估算的核心演算法，主要因為使用的六軸 IMU 結合了三軸加速度計與三軸陀螺儀，各自雖具優勢，卻也存在限制。加速度計在靜態時能穩定提供方向，但在運動中容易受到干擾；陀螺儀則反應靈敏，但長時間會產生角度漂移。互補濾波器透過簡單的加權融合方式，結合兩者的優點，讓角度估算結果同時具備即時反應與長期穩定性。

讀取角度並以互補濾波估算角度程式碼函式

<pre>void angle_read(){ Wire.beginTransaction(MPU6050); Wire.write(0x3B); Wire.endTransmission(false); Wire.requestFrom(MPU6050, 14, true); int16_t AcX = Wire.read() << 8 Wire.read(); int16_t AcY = Wire.read() << 8 Wire.read(); int16_t AcZ = Wire.read() << 8 Wire.read(); Wire.read(); Wire.read(); int16_t GyX = Wire.read() << 8 Wire.read(); int16_t GyY = Wire.read() << 8 Wire.read();</pre>	<pre> ax = AcX / 16384.0, ay = AcY / 16384.0, az = AcZ / 16384.0; gx = GyX / 131.0, gy = GyY / 131.0, gz = GyZ / 131.0; accRoll = atan2(ay, az) * 180.0 / PI; accPitch = atan2(-ax, sqrt(ay * ay + az * az)) * 180.0 / PI; unsigned long currTime = millis(); double dt = (currTime - prevTime) / 1000.0; prevTime = currTime; roll = alpha * (roll + gx * dt) + (1 - alpha) * accRoll; pitch = alpha * (pitch + gy * dt) + (1 - alpha) * accPitch;</pre>
---	--

<pre>int16_t GyZ = Wire.read() << 8 Wire.read();</pre>	<pre>yaw += gz * dt; }</pre>
--	------------------------------

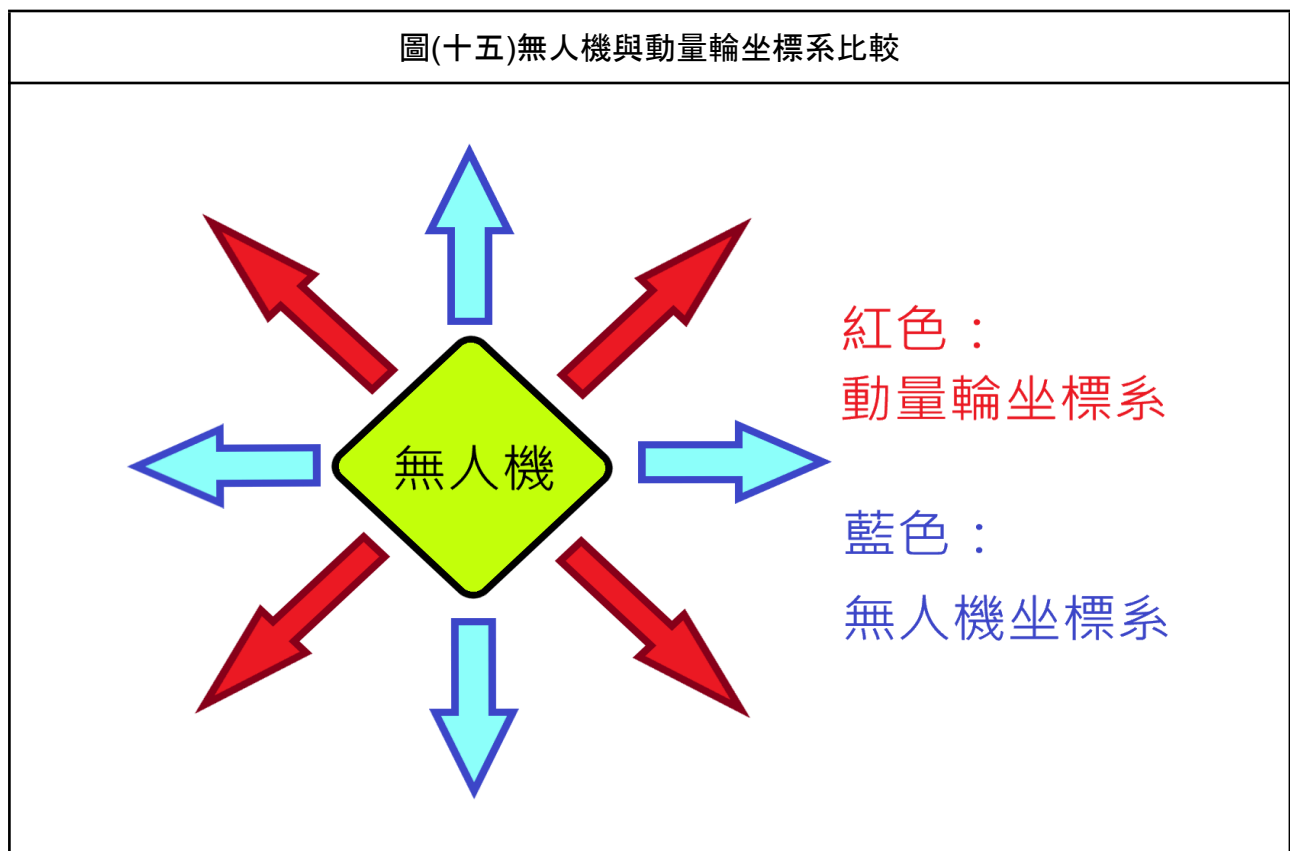
控制方向：

若要對無人機進行姿態控制，只需將平衡點更改一個傾斜角，便可以透過PID控制算法搭配動量輪將機身傾斜特定角度，由於在我們設計中，陀螺儀與動量輪的坐標系跟飛行器實際飛行時的坐標系在同個平面上相差45度，因此我們需要控制飛行方向時需要將陀螺儀所得到的X、Y軸角度再經過計算，才可以使飛行器以符合其坐標系的方式前進，透過空間向量的分解，我們可以推導出此公式，假設飛行器的旋轉軸pitch=x、roll=y，動量輪的控制角度是x',y'，則：

$$x' = \frac{1}{\sqrt{2}}(x + y) \quad (\text{對應到動量輪 X 軸})$$

$$y' = \frac{1}{\sqrt{2}}(-x + y) \quad (\text{對應到動量輪 Y 軸})$$

圖(十五)無人機與動量輪坐標系比較



5. 結論與探討：

本作品成功設計並驗證了將動量輪裝設於同軸雙旋翼無人機的作法，利用mpu6050的數據搭配互補濾波算法來估算無人機的姿態，並在esp32開發板上編寫PID控制算法，也在實作中調整其PID參數進行了飛行穩定性控制的最佳化。作品在動量輪的幫助下能夠有效地控制無人機的機身傾斜角度，並能將飛行器維持在較為穩定的姿態。動量輪技術不僅能提高單軸飛行器的穩定度，還能減少對尾翼或螺距控制盤等機構的依賴，從而簡化無人機設計。

但仍有許多問題值得探討與改進，我們在實作動量輪無人機時，在機架結構上就因為相關應用不多，結構難以設計而屢屢碰壁，未來可以針對如何將動量輪結構更完美的配置到無人機上做延伸探討，例如將電池等必要負載與動量輪結合，減少動量輪結構產生的呆重。而在PID控制器的部分，雖然我們已做出能夠達成穩定的控制效果，但參數仍需手動調整，調整過程也很容易因為參數不對而墜毀，增加試錯成本，未來可以加入例如LQR或利用強化學習等技術的演算法，或是研究系統的數學模型，以提高穩定性調整的效率，並追求更精確有效的控制。

6. 參考文獻：

- 1.林秀豪. (2020). 選修物理II力學二與熱學。龍騰文化事業有限公司.
- 2.科學Online. (2009). 角動量 (Angular Momentum). Retrieved from <https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=2859>
- 3.Github - ReuleauxTriangle 作者 : Smallpond
<https://github.com/SmallPond/ReuleauxTriangle>
- 4.Helicopter Physics Series - #2 Chopper Control - Smarter Every Day 46 - YouTube
<https://www.youtube.com/watch?v=MaB4k1SgfUg&t=4s>
- 5.鍾明翰. (2017). 同軸雙旋翼載具前進飛行氣動力特性之研究 [Master's thesis, Feng Chia University]. National Digital Library of Theses and Dissertations in Taiwan. Retrieved from <https://hdl.handle.net/11296/kz7tcc>