

軍用無人機圖像跟蹤算法之考量

趙雪兒¹ 方友霖² 洪兆宇³ 趙嘉琦⁴

¹ 東華大學諮商與臨床心理學系

² 國防大學理工學院機械及航空工程學系

³ 空軍軍官學校航空太空學系

⁴ 陸軍軍官學校機械系

摘要

無人機追蹤系統具有某些基本元件，組成各種不同的衍生構型，以完成各自特定的任務。本註釋文討論其性能要求與設計參數，闡述其所運用之跟蹤演算法，論及感測器與算法間的關係，並考量該等軟硬體與操作人員間之介面整合。圖像跟蹤演算法研究是無人機雲臺探頭的關鍵技術。本文對跟蹤開算法、相關性跟蹤融合算法、邊緣特徵跟蹤算法、雙重修正霍夫變換與線性擬合推測逼近等演算法進行了分析，並指出這些追蹤法則的發展趨勢及其在國防領域中的重要作用。

關鍵詞：影像處理，跟蹤開，相關融合跟蹤，演算法

一、前言

近年戰爭型態之變化，讓人目不暇給。人工智慧（AI）在軍事領域的應用日益廣泛，其蓬勃發展的態勢，改變了現代戰爭型態。包括烏俄戰爭、以哈衝突、印巴空戰等，讓世人見證了戰場上交戰雙方武器系統攻防、情報蒐集分析、軍事決策指揮輔助，皆已大幅導入 AI 尖端科技。而當各國紛紛投入和部署 AI 技術於軍事用途時，審視當前 AI 技術的軍事應用情形，主要涵蓋了無人機、軍用智慧機器人、自主武器系統，為各國國防科技發展爭相競逐的焦點。日本《日經新聞》報導，「澳英美三方安全夥伴關係」（AUKUS）去年底向日本政府提案，研擬合作開發採用人工智慧（AI）技術的無人機。該計畫研擬發展一款稱為「共同戰鬥機」的先進無人機，其兼具情監偵用途與打擊能力，可用於執行高風險任務[1]。

在近十年來的現代戰爭中，無人機顯然已不再是大國軍隊的專屬裝備，因為戰場上到處都是各種無人機，從經過專業訓練的戰士，到目不識丁的民兵，在稍加訓練操作要領後，都能將無人機投入特定軍事用途之中。會有這樣的結果，最主要的關鍵就在於微型無人機的普及化和飛控輔助的提升，使駕駛無人機門檻大幅降低。在無人空拍機快速發展後，隨之見到武裝化微型無人機，因為交戰方不一定有能力負擔起先進武器，但改裝商售無人機卻只需要精巧的手藝。透過能將畫面迅速回傳的空拍鏡頭，對目標進行監視與瞄準，接著投下事先掛在無人機上的彈械，藉此達到殺傷敵人目的，甚至還能進行作戰損害評估。這種戰術戰法，在後來發生的幾場戰爭中也愈來愈完善，無人機戰術更因人工智慧的出現而更加昇華。起先，無人機需要透過不斷地遠端遙控才能執行任務，

頂多具備一定程度自主化的能力，例如自主在目標區域上盤旋等。但此舉對於人員的依賴性高，且容易被外來手段所干擾，人工智慧的出現就是針對這兩點進行補強。但真正讓這種組合發揮最大作用的，則是新銳的人工智慧，如同許多軍用微型空拍機一樣，它也搭載了白晝全彩攝影機及熱像儀，可以進行全天候作戰，但透過鏡頭所得到的影像，無人機能夠自動判斷畫面中的物體並進行標定，而這背後的秘密，就在於具備機器學習能力的人工智慧，可以自主單憑畫面識別多達 64 種不同的目標，包括人員、民車、卡車、輕裝甲車和戰車等，大幅增加操作者的狀況覺知，且必要時還能增加識別的種類。有別於傳統精準武器使用的紅外線或雷達尋標器，這種憑藉影像進行自主導引的方式，整體用於尋標的系統大小和成本遠低於前兩者。儘管它的目標識別距離可能遜於高階的精準武器，但得益於載臺的小尺寸和滯空能力，無人機得以在更隱蔽、更近的位置上進行鎖定，從而消弭了識別距離的限制。在操作上，當操作者收到資訊回報後，便可以人力決策要攻擊哪一種目標，接著派遣自殺機自主進行攻擊。受制於其尺寸和出力，自殺機只能攜帶較輕巧的彈械，但實戰經驗已經證明，只要可精準攻擊，即便只有手榴彈的威力也能造成很大的損害，除了人員、後勤資源和輕裝甲的卡車容易受到破片殺傷外，許多重要的設備，例如雷達車、電戰設備甚至裝甲目標上的電子系統等，也都會因為破片而損毀[2]。

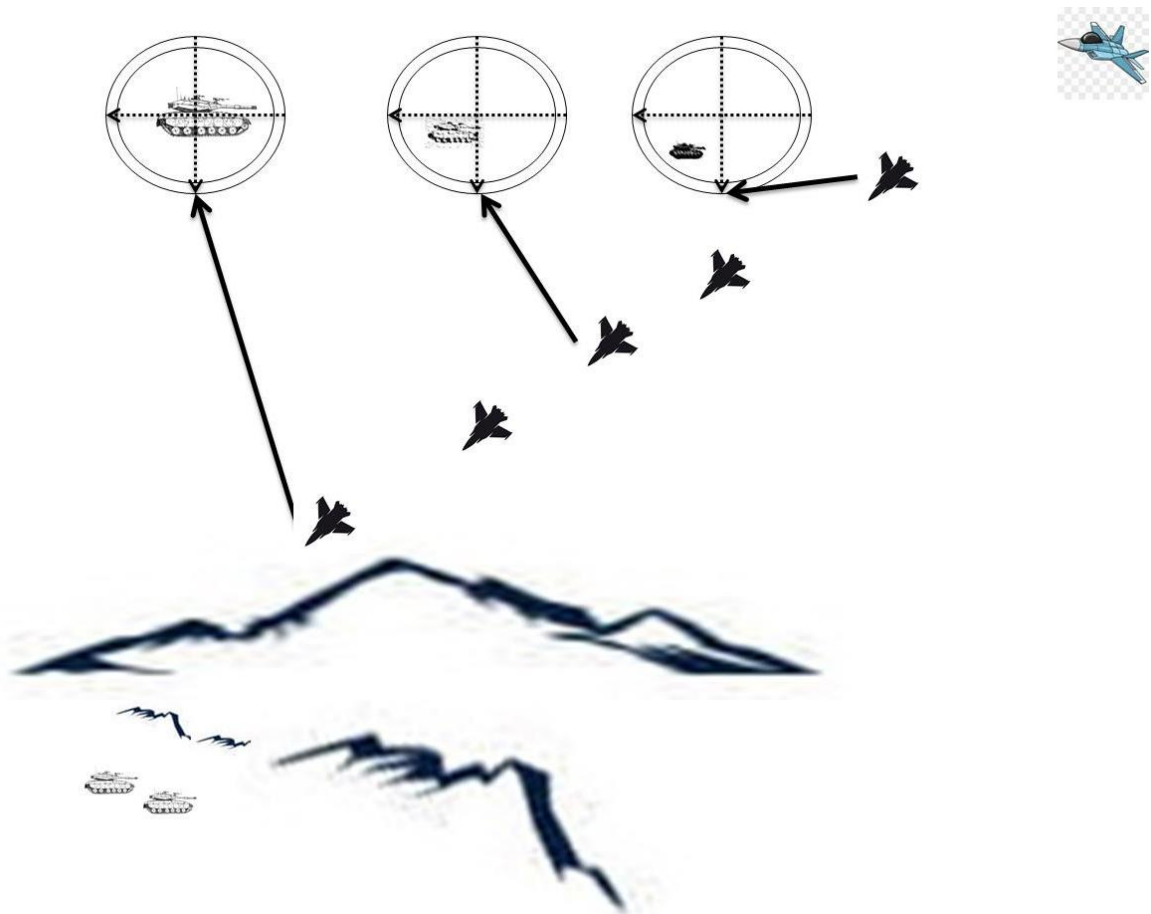
國軍教戰總則第 17 條「研究發展」述明，「保持現狀便是落伍，故研究發展，乃

軍隊進步之動力。近代國防科技發展快速，戰爭形態與戰法亦隨之不斷變化，國軍應依任務、敵情與未來趨勢，對建軍備戰與用兵藝術，發揮集體智慧，持續研究發展，以期日新又新，精益求精，建立現代化國軍」。所謂研究，是一項連續而科學的探討；而發展是應用已知的或已有的科學事實；針對戰略、戰術、戰法、戰技與戰具優先研發。

藉由上述無人機實戰經驗報導，認識其情報判斷、地形分析、偵察、目標識別、獲得、導引與瞄準等均經攝影圖像資訊作業而得，攝影圖像資訊是無人機的「眼睛」[3]，彷彿目標「頭上三尺有眼睛」。眼睛看到以後，後續功能目前仍由飛手人工操作，人因影響仍存在，若要進一步昇華至人工智慧(AI)無人機，亦即完全免除人工作業，或僅居於輔助地位，其間最關鍵者，首推圖(影)像處理技術，而核心軟體部分，非圖像跟蹤演算法莫屬。本文將常用之圖像跟蹤演算法及其基本算式蒐集並加以分析比較，俾利發展軍用 AI 無人機。

二、遙控式電視制導

現今服役中的軍用商規無人機尚多屬遙控式電視制導系統，機上裝設攝影機攝取目標的可見光圖像，經過傳送，顯示在飛手的控制器螢幕上，飛手透過觀察螢幕上目標的圖像，根據相應的操作規則作出判斷，發出導引命令給飛行中的無人機，無人機上的接收裝置收到指令後，由無人機上的控制系統根據具體指令內容調正無人機的飛行姿態，朝指令方向飛去，遙控式電視制導的操作示意如圖一。



圖一：遙控式電視制導的操作示意

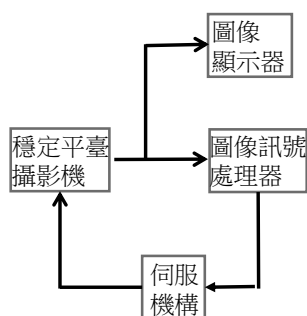
三、跟蹤式電視尋標

前瞻研究電視尋標制導具有精準制導能力，是 AI 無人機的第一步，攝影機鎖定目標後，能夠自動跟蹤，飛行狀態由它自身的導控系統負責，控制它飛向目標。其中雲臺相機攝影頭是無人機 AI 自動導引系統中最重要的部分，用以感測來自目標的影像，通常輸出都是電壓或電流，要經電腦影像處理比較參考值後產生差值訊號，並藉以修正，使鏡頭持續瞄準目標，又若鏡頭裝設在二軸或三軸環架上，則能隔離機體的繞動又能對準目標者稱之。其與飛彈系統中的尋標器原理相通，現今能生產雲臺相機者皆為尋標器硬體技術擁有

者，其間關係，不言而喻。但無人機雲臺相機精簡了飛彈尋標器架構，將若干部件採商規簡化，降低生產成本。

在越戰時，美軍首次使用電視精準制導炸彈，以極高的命中率摧毀了北越的眾多軍事目標。隨後又用於小牛(AGM-65)空對地飛彈，大放異彩。其後之環架穩定追蹤裝置隨著半導體技術、積體電路技術、電腦圖像處理技術和模式識別技術的發展，使尋標圖像跟蹤技術獲得了傲人的成就。其中電視跟蹤系統在衛星發射軌跡跟蹤、飛彈終端導引、射控系統對目標的自動追蹤、自動化監視和人臉辨識等領域受到空前的重視。目前無人機系統配備了各式各

樣的雲臺相機，但其原理皆出自電視跟蹤系統，其原理如圖二所示。



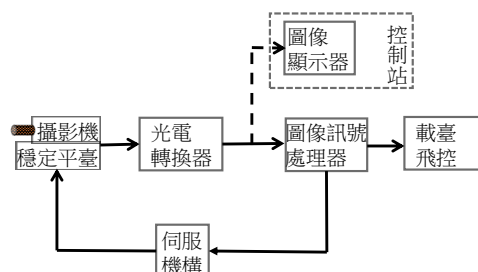
圖二：電視跟蹤系統原理方塊圖

電視跟蹤系統是一種被動式跟蹤裝置，具有跟蹤精度高、跟蹤狀態平穩、抗干擾能力強、分辨率高和成本低等特點。特別對於低空、超低空或地面目標也具有良好的使用性能，並且能即時顯示動目標圖像。電視跟蹤系統的基本原理如圖二所示，電視跟蹤系統依靠圖像感測器(常用電荷耦合元件，Charge-coupled Device, CCD)對目標成像，將光線轉換成電子訊號，所以也稱為成像跟蹤器。圖像感測器通過對目標景物進行掃描，產生視頻訊號，經採集成為數位訊號，由圖像訊號處理器處理後，輸出給誤差處理器，不斷地測量出鏡頭內景物的瞬時角位置，並形成相應的誤差訊號，經放大後輸出給伺服機構對目標進行跟蹤。

四、圖像跟蹤基本原理

電視尋標導控是以載臺的電視攝影機拍攝目標和周圍環境的圖像，從有一定反差的背景中自動選出目標並借助追蹤演算法對目標實施跟蹤，當目標偏離參考計算值時，產生偏差訊號，形成導引指令，並自動控制載臺飛向目標。圖像跟蹤系統的閉迴路簡要方塊圖如圖三所示。制導系統一般由電視攝影機、穩定平臺、光電轉換

器、誤差訊號處理器、伺服機構、載臺控制系統等組成。圖中「控制站」方塊為載臺外設備。



圖三：圖像跟蹤基本原理方塊圖

載臺朝向目標飛去後，攝影機把被跟蹤的目標光學圖像投射到映像管靶面上，並用光電敏感元件把投影在靶面上的目標圖像轉換為視頻訊號。誤差訊號處理器從視頻訊號中提取目標位置訊號，並輸出推動伺服機構的訊號，使攝影機光軸對準目標，同時控制載臺飛向目標。顯示器放在控制站(如地面、飛手控制器、戰情中心等)，目標選取獲得可由操作者選取，或由目標識別系統選取後，交給影像跟蹤系統繼續觀察和跟蹤目標[4、5]。

五、圖像跟蹤演算法

電視攝影機尋標器適用之演算法，基本上可分為跟蹤開算法、相關性跟蹤算法與其它跟蹤算法等三種方式。跟蹤開算法需要設計一個窗閘，窗閘尺寸略大於目標，並使窗閘緊緊套住目標圖像，使目標不受窗閘外的背景和雜訊干擾的影響。另外，由於視場內圖像數據量太大，難以即時處理整幅圖像，可以利用微處理器，借助於窗閘控制，對圖像實施局部的即時處理。相關性跟蹤算法是根據量測兩幅圖像之間的相關度函數去計算目標的位置變化，跟蹤點就是兩個圖像匹配最好的位置，即相關函數的峰值；在相關跟蹤的誤差訊號處

理中，對相關度的取值有一定的要求，相關跟蹤系統對與選定的跟蹤目標圖像的其他一切景物都不敏感，所以它有較佳的篩選跟蹤能力和抗背景干擾能力。綜合算法則為多種模式融合或其它雜系算法。另與跟蹤算法有密切相關的閾值(Threshold)演算法亦附帶提出[6]。

1. 跟蹤閾演算法

跟蹤閾演算法可分為固定式和自適應式兩種。前種在跟蹤目標的過程中，窗閾的大小始終不變。後者是在跟蹤目標的過程中，窗閾隨目標大小而變。當目標由遠到近變大時，或由於目標戰術閃躲姿態的變化導致投影形狀的大小變化時，都要求跟蹤窗閾也隨之變化。跟蹤閾演算法又可分為矩心跟蹤算法、邊緣跟蹤算法、雙邊緣跟蹤算法和區域平衡跟蹤算法等。而矩心跟蹤算法在分為形狀中心和亮度中心跟蹤算法[7]。

(a) 重心算法:

重心(Centroid)為慣用語，物理意義上為形狀中心-形心。本法為跟蹤閾演算法之最基本形式，亦稱(A+B)/2 重心法，也延伸為邊緣算法。設跟蹤誤差訊號為 X_{PE} 及 Y_{PE} ，則

$$\begin{cases} X_{PE} = \frac{X_{RE} - X_{LE}}{2} \\ Y_{PE} = \frac{Y_{BE} - Y_{TE}}{2} \end{cases} \quad (1)$$

上式中 X_{RE} 、 X_{LE} 、 Y_{TE} 、 Y_{BE} 分別為右、左、上、下邊之座標。本法可以跟蹤目標邊緣兩邊間的中點座標。本法之限制，誤差計算僅由每個方向軸上之二點決定，使誤差訊號非常依賴空間向量分析、圖像變異與雜訊含量，在低對比性(諸如鏡面反射)目標條件時，將顯示其為對稱性目標。

(b) 質心算法:

質心(Center of mass)法的原理係將立體物重心表現在二維平面。俾利運用x-y 平面電視螢幕與高速平行計時器，可將電視螢幕圖像分割成陣列，設定目標質量為各陣列元素質量的總和。

$$\begin{aligned} M &= m_1 + m_2 + \cdots + m_n \\ &= \sum_{k=1}^n m_k \end{aligned} \quad (2)$$

同義者，在x及y軸的質心力矩，可為

$$\begin{cases} M_X = x_1 m_1 + x_2 m_2 + \cdots + x_n m_n \\ \quad = \sum_{k=1}^n x_k m_k \\ M_Y = y_1 m_1 + y_2 m_2 + \cdots + y_n m_n \\ \quad = \sum_{k=1}^n y_k m_k \end{cases} \quad (3)$$

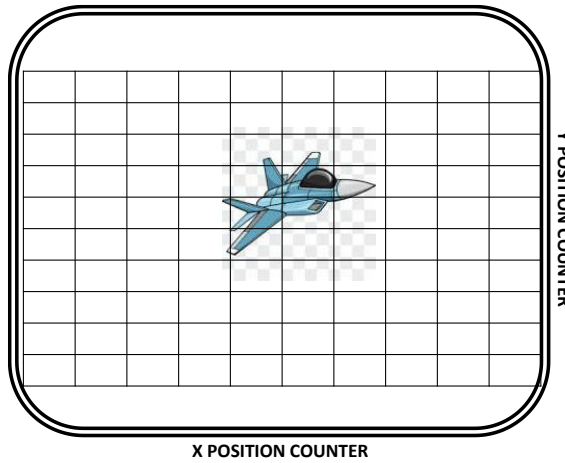
由上式，質心可定義為

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{\sum x_k m_k}{\sum m_k} \\ \bar{y} = \frac{\sum y_k m_k}{\sum m_k} \end{cases} \quad (4)$$

仿上作法，跟蹤誤差之算法為

$$\begin{cases} X_{PE} = \frac{\sum_{i=0}^m X_i}{\sum_{j=0}^n N_j} \\ Y_{PE} = \frac{\sum_{i=0}^m Y_i}{\sum_{j=0}^n N_j} \end{cases} \quad (5)$$

其中 X_i 為目標像素大於閾值者於x軸位置； Y_i 為在y軸位置。 m 、 n 為像素大於閾值之數目。圖四為質心法之跟蹤示意圖。



圖四：質心法之跟蹤示意

(c) 強度重心算法:

強度重心(Intensity centroid)是質心法的延伸,此處目標數據係將跟蹤閘內個別像素(Pixel)加以強度權重處理,位置解析度將較增加,算法如下:

$$\begin{cases} X_{IC} = \frac{\sum_{i=0}^m I_i X_i}{\sum_{j=0}^n I_j} \\ Y_{IC} = \frac{\sum_{i=0}^m I_i Y_i}{\sum_{j=0}^n I_j} \end{cases} \quad (6)$$

式中 I_i 為像素強度值(0-256)。

(d) 分割矩心算法:

基於自適應分割的算法是以自適應閾值分割圖像前處理為基礎確定目標中心位置(或亮度中心)的算法。首先計算窗閘內圖像的自適應閾值 T , 然後用 T 對目標圖像進行分割處理。將原來的灰度圖像 $\{f(x,y), x,y=0,1,\dots,N-1\}$ 變成二值圖像 $\{g(x,y), x,y=0,1,\dots,N-1\}$, 分割過程可用下式表示:

$$g(x,y) = \begin{cases} 0 & f(x,y) < T \\ 1 & f(x,y) \geq T \end{cases} \quad (7)$$

目標中心的座標為

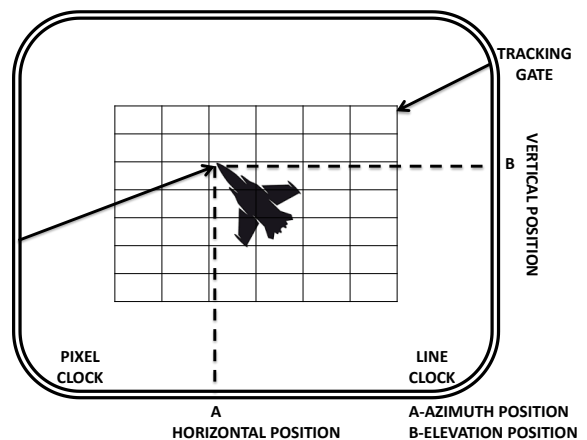
$$\bar{X} = \frac{[\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} xg(x,y)]}{[\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} g(x,y)]} \quad (8)$$

$$\bar{Y} = \frac{[\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} yg(x,y)]}{[\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} g(x,y)]} \quad (9)$$

此外,也可以根據投影原理,首先對目標進行二維投影,然後計算目標的幾何尺寸和形狀中心。矩心跟蹤算法計算簡便,精度較高,但易受目標的劇烈運動或目標被遮擋的影響。目標劇烈運動往往會使目標從窗閘中快速移出,造成脫鎖丟失目標。當目標接近另一物體時,兩者的特徵往往都進入窗閘,迫使形狀中心(亮度中心)偏移到兩物體之間的某點上,即所謂的瞄準點漂移。本法為電視追蹤最常用的算法。

(e) 端點算法:

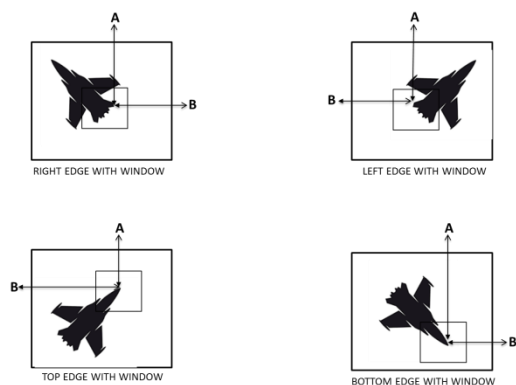
端點法是邊緣法的前身,其法利用跟蹤器在跟蹤閘內選擇最具意義的目標端點特徵,並保持跟蹤。擇定目標,當特徵影像之初始脈衝訊號產生時,儲存其水平與垂直位置,並加以計算產生誤差訊號,如圖五所示。本法內在有缺點為追蹤單點訊號資料,亦為隨機雜訊干擾而中斷追蹤。



圖五：端點法之跟蹤示意

(f) 邊緣算法:

依據端點法構建成邊緣法,跟蹤各種目標的邊緣如圖六所示,其功能用以彌補重心法類追蹤銳邊易產生偏差之缺點。



圖六：邊緣法之跟蹤示意

邊緣跟蹤算法是一種簡便的演算法,邊緣是圖像最基本的特徵,是圖像中灰度發生急劇變化區域的邊界。其可以用梯度算子、Sobel 算子、Laplace 算子等來檢測目標圖像的邊緣[8]。下面以 Laplace 算子來說明

$$\nabla^2 f(x,y) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (10)$$

為了計算方便,也可以寫成

$$\begin{aligned} \nabla^2 f(x,y) \\ \approx f(x,y) - 0.25[f(x,y+1) + f(x,y-1) + f(x+1,y) \\ + f(x-1,y)] \end{aligned} \quad (11)$$

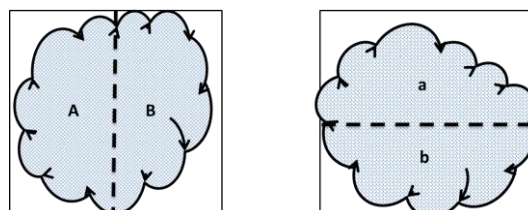
通過計算過零點,就可以找出圖像的邊界,這樣可以選定目標邊界的上、下、左、右邊界中的某一個,以抑制目標或背景的其餘部份。邊緣算法的缺點是易受干擾,跟蹤精度相對較低。

(g) 雙邊緣算法:

雙邊緣跟蹤算法是邊緣跟蹤算法的一種改良演算,即目標位置為兩個邊緣的中心: $x_0 = (x_R - x_L)/2$ 、 $y_0 = (y_D - y_U)/2$, 其中 x_L 、 x_R 、 y_U 、 y_D 分別為目標左、右、上、下邊緣點座標值。該算法跟蹤精度較高,適合於跟蹤比較對稱的目標或點源目標。

(h) 區域面積平衡算法:

面積平衡(Area balance)試圖平衡目標相反兩側空白點間之面積,以跟蹤窗閘的中心線為基準,可將目標分成四個象限或兩對象限,然後求每對象限內目標圖像的面積,如圖七所示。



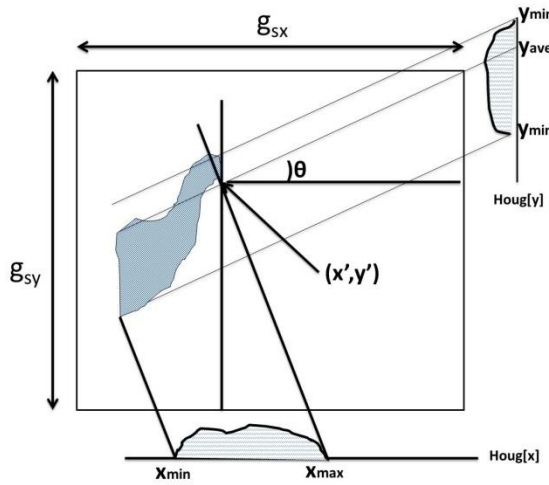
圖七：面積法之跟蹤示意

其中 A、B 象限代表方位, a、b 象限代表俯仰。如果目標處在窗閘中心線,則窗閘中心線上下和左右兩側的面積相等,否則不平衡。不平衡時產生的誤差訊號用來調整窗閘的位置。這種平衡與不平衡的交替過程,直至目標充滿跟蹤窗閘結束。為使被分的圖像面積達到平衡,窗閘不斷地調整中心線的位置,這樣常引起算法的不穩定,使精度和時間響應指標變差。本法受限於目標的大小及形狀,比較適用對稱之形狀。

(i) 雙邊改進霍夫變換邊緣算法:

該方法基於兩個方向的改進的霍夫變換(Hough transform)數據,將一個方向設為和水平方向成 θ 角,則另一個為 $\theta + 90^\circ$, 通過改進霍夫變換在 x 、 y 方向上的最先和最後一個非零值 x_{min} 、

$x_{\max}$ 、 $y_{\min}$ 、 $y_{\max}$ 及 y 方向的霍夫變換均值 y_{ave} 來決定跟蹤邊界點 (x', y') ，如圖八所示。



圖八：霍夫變換法之跟蹤示意

$$\tan \theta = (y_{ave} - y') / (y_{sx} - x') \quad (12)$$

$$\tan \theta = (x_{\max} - x') / y' \quad (13)$$

化簡為 $-x' \tan \theta + y' = y_{ave} - y_{sx} \tan \theta$ 與 $x' + y' \tan \theta = x_{\max}$ 。從而可以求解出 x' 及 y' ，得 $x' = (y_{ave} \tan \theta + y_{sx} \tan^2 \theta - x_{\max}) / (-\tan^2 \theta - 1)$ 與 $y' = (-y_{ave} + y_{sx} \tan \theta - x_{\max} \tan \theta) / (-\tan^2 \theta - 1)$ 。

2. 相關性跟蹤算法

相關(似)性跟蹤是將系統的基準圖像在即時圖像上以不同的偏移值位移，然後根據一定的相似性度量準則對每一個偏移值下重疊的兩個圖像-基準圖像及與基準圖像同樣大小的即時圖像進行相關性處理，根據判別準則和相關性處理結果，判斷目標在即時圖像中的位置。較之重心法、邊緣法等，相關性算法的優點是能夠跟蹤特殊形貌或鎖定群目標中之某一特殊者。通常相對性算法使用數幀影視圖框且同時處理，由於資料加總，雜訊將最小化，而目標則有

效強化。顯然相關性跟蹤算法在較低的雜訊條件(S/N)下提供更好的跟蹤性能。除減低雜訊干擾外，本法亦較能比較匹配性，當比對相符時，並將此最近一幀圖像儲存記憶及計算位移，並將產生誤差訊號。設基準圖像為 $f(x, y)$ ，大小為 $m \times m$ 個像素，及時圖像為 $t(x, y)$ ，大小 $n \times n$ 個像素，其中 $m \leq n$ ， (x_0, y_0) 為基準圖像在即時圖像中偏移植，則相關性跟蹤算法可用下列準則來計算相關值 [9]。

(a) 平均差值平方法：

相似性度量表述式 $d(x_0, y_0)$ 為

$$d(x_0, y_0) = \frac{1}{m^2} \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{m-1} [f(x, y) - t(x + x_0, y + y_0)]^2 \quad (14)$$

其中， $0 \leq x_0, y_0 \leq n-m$ 。

(b) 平均絕對差值法：

相似性度量表述式 $d(x_0, y_0)$ 為

$$d(x_0, y_0) = \frac{1}{m^2} \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{m-1} |f(x, y) - t(x + x_0, y + y_0)| \quad (15)$$

其中， $0 \leq x_0, y_0 \leq n-m$ 。

上述兩種方法，偏移值 (x_0, y_0) 滿足 $d(x_0, y_0)$ 為最小的子圖像就是與基準圖像最為相似的子圖像，該偏移值稱為匹配點。

(c) 序列相似性檢測算法：

序列相似性檢測算法 (Sequential Similarity Detection Algorithm. SSDA) 用來實施快速相關性處理，其相似性度量表述式與平均絕對差值相同。惟一區別在於從 $d(x_0, y_0)$ 的表述式可知，相關運算過程實際就是各像素對灰度值差

值的累積過程，差值的累積是逐漸增長的，累積誤差就是相似性度量值。累積誤差越小，則基準圖像與子圖像越相似。故計算 $d(x_0, y_0)$ 的過程中，若 $d(x_0, y_0)$ 大於預先設定的限定值時，就停止計算，這就縮短了相關計算的處理時間。

(d) 一般化相關性算法：

在類比(Analog)計算中，兩影視圖像可表示為

$$C_R(\tau) = \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} V_1(t) V_2(t + \tau) d\tau \quad (16)$$

式中 $C_R(\tau)$ 為 V_1 與 V_2 間的相關性函數， V_1 為初始訊號， $V_2(t+\tau)$ 為經 $t+\tau$ 時間後移轉的訊號，相關性運算可視為乘積、時間移轉之積分過程。

在數位(Digital)計算中，兩影視圖像可表示為

$$C_R(m) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} V_1(t) V_2(t + \tau) \quad (17)$$

此處 $k=t$ 且 $m=\tau$ 。

相似性度量 $\rho(x_0, y_0)$ 表述式為

$$\rho(x_0, y_0) = \frac{\sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{m-1} f(x, y) t(x + x_0, y + y_0)}{\left\{ \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{m-1} f^2(x, y) [t(x + x_0, y + y_0)]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (18)$$

其中 $0 \leq x_0, y_0 \leq n-m$ ， $\rho(x_0, y_0)$ 為大時的偏移植 (x_0, y_0) ，所處位置就是目標所在值。相關性跟蹤算法是應用較廣的一種跟蹤算法，透過相關性算法可將圖像資料進行前處理及後處理，與跟蹤開算法相比能得到更多的圖像資料，諸如目標尺寸、姿態、對比度變異等，可用來跟

蹤較小的目標或對比度比較差的目標。缺點是運算量較大，而且目標的劇烈運動、目標方位、透視變化和強度干擾等因素常會嚴重影響相關跟蹤方法的可靠性。

3. 其它跟蹤算法

除了前二類跟蹤算法外，尚有其它多種模式融合、非常規算法或雜系算法等，擇其重要者說明[10]。

(a) 多模跟蹤算法：

多模式跟蹤算法的基本想法是讓採用不同跟蹤算法同時計算，按照各自的圖像分割方法分離出目標與背景，抽取目標特徵，並輸出目標跟蹤訊息，再將相關訊息融合，依據各自的信賴度來選擇跟蹤控制訊號，讓各種跟蹤算法協調工作，這樣就可以克服單一算法的侷限性，提高對目標的跟蹤效率。多模跟蹤算法的優點是功能齊全，自適應能力強，抗干擾性能好，具有鎖定目標短暫丟失後再次捕獲能力，能在複雜背景下工作。軟硬體接比較複雜。

(b) 提邊差分算法：

提邊差分跟蹤算法通過比較目標在兩個不同時刻的畫面，識別由於物體運動而造成的區域差別。在實際計算過程中，差分是指將兩幀相鄰目標圖像逐點相減，形成差分圖。在差分圖中，如果差分值大於給定閾值，則相應的像素取「1」，否則取「0」。由此產生非零區，利用非零區就可以檢測出運動目標，計算出目標的位移視差。差分算法假定目標背景不動，只有目標在動；為了檢測出目標背景也運動和目標運動速度不同之情況下的目標，提出了基於提邊的差分跟蹤算法。首先將相鄰兩幅圖像進行邊緣提取，定選擇適當閾值，對提出的邊緣實施閾值運算，從而產生二值化

的提邊圖像。其次將同樣的兩幅圖像進行差分運算，通過分割形成一個二值化的差分二值圖；這樣將提邊形成的二值圖和差分二值圖邏輯相乘，生成目標的邊緣圖像。最後利用投影法就可以計算出目標的位移視差($\Delta x, \Delta y$)。

(c) 記憶外推算法

正常跟蹤目標時，目標突然被遮擋，若干秒後又正常復出，若按前面幾個算法處理，就會丟失目標，造成系統紊亂。為此提出了記憶外推跟蹤演算法，其法的基本原理是儲存記憶前幀與本幀的目標訊息，利用預測算法外推目標下一幀的參數。外推算法的研究成果非常多，各有優缺點，如逼近法簡單迅速，但精度較差；卡爾曼濾波(Kalman filter)算法先進，然計算複雜。實務中常採用微分線性擬合(Curve fitting)外推方法，其基本要點是，目標的運動可看作是慣性受限的非平穩過程。遮擋前的跟蹤數據(目標的中心位置)已存入處理器中(即記憶算法)，一旦目標丟失，須由處理器將以前的目標資料(已記憶)依據微分線性擬合外推來預測目標的下一個位置，依次循環，直至目標復出。本法運算過程如下，設 $X(t_i)$ 、 $Y(t_i)$ 為目標在時間 t_i 時 x 及 y 的座標， $i=0,1,2,\dots,N-1$ ，其微分差量表述為 $\Delta X_i = X(t_{i+1}) - X(t_i)$ 及 $\Delta Y_i = Y(t_{i+1}) - Y(t_i)$ ，按照下述兩種方法進行斜率擬合，確定 $\hat{K}$ 係數：

(1) 期望平均法

$$\hat{K} = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{\Delta X_i}{N} \quad (19)$$

(2) 最小二乘法

在期望平均法的基礎上對 $\hat{K}$ 係數做最小二乘逼近，求得其值：

$$\sum_{i=0}^{N-1} \frac{(\Delta X_i - \hat{K})^2}{N} = \epsilon_f \quad (20)$$

用 α 進行修正， $\alpha > 1$ 時得

$$\sum_{i=0}^{N-1} \frac{(\Delta X_i - \alpha \hat{K})^2}{N} = \epsilon_g \quad (21)$$

$\alpha < 1$ 時得

$$\sum_{i=0}^{N-1} \frac{(\Delta X_i - \alpha \hat{K})^2}{N} = \epsilon_l \quad (22)$$

分別比較 ϵ_f 、 ϵ_g 、 ϵ_l ，用遞推法使之值最小，所求的 $\alpha \hat{K}$ 極為最小二乘逼近斜率擬合值(及調適最佳化)。另 ΔY_i 也依次類推求得。

4. 閾值計算

在跟蹤演算時，常須將連續時間影視訊號轉換為合適的離散格式圖像資料，在影像處理中稱為閾值計算，係將混合的視頻訊號轉換為(1,0)訊號。閾值水準可由下式決定：

$$V_{th} = (V_{peak} - V_{ave})N + V_{ave} \quad (23)$$

V_{ave} 是跟蹤閘內視頻訊號平均水準， V_{peak} 是尖峰水準， V_{th} 是閾值水準， N 可從 0.1 至 0.9。為決定 V_{ave} 與 V_{peak} ，數個因素須列入考量，首先對一具有大、小窗閘的線性訊號而言， V_{ave} 由其窗閘面積而定，然大窗閘者反應時間較快，而小窗閘者較慢，此有利於小閘框對框變換之 V_{th} 計算。因此自我序列相關之最終閾值水準可表為

$$V_{th} = N(V_{peak} - V_{ave}) + V_{ave}^{\frac{-t}{RC}} \quad (24)$$

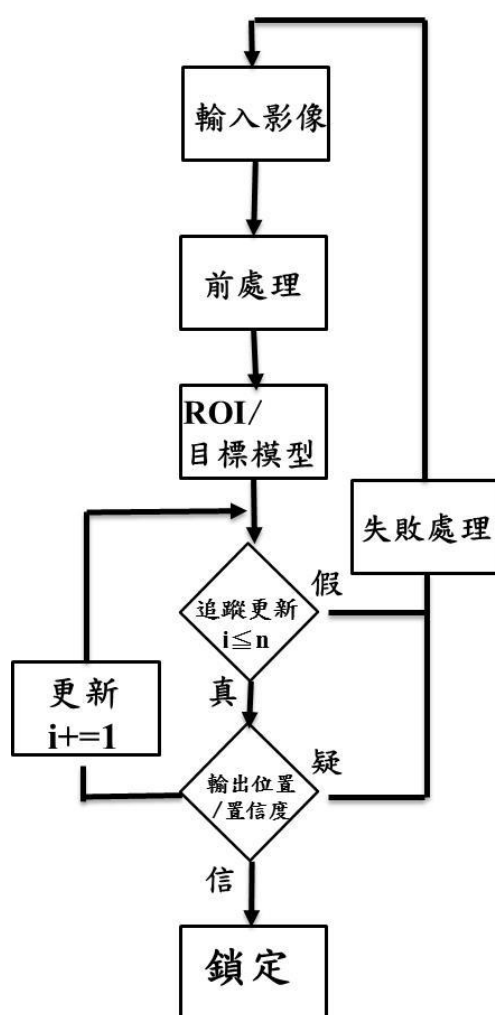
- 其中 R 是跟蹤閘面積函數，C 是常數。
5. 實施細節
- 在圖像跟蹤計算時需借助之工具為圖
- 像數位化，其前處理實施細節 (Implementation details) 概敘如表一，簡化流程見圖九：

表一:圖像數位化之概敘

項目	內涵
ROI 初始化方式	ROI (Region of Interest)，感興趣區域影像處理是透過方框、圓形或不規則多邊形圈定圖像中的關鍵部位，僅對該區域進行分析，以大幅減少計算量、提高影像處理速度與精度。ROI 從感測器輸出的影像中提取出的特定區域，可單獨儲存、處理或顯示。ROI 通常用於目標檢測、圖像分割，以及目標跟蹤中，值得特別關注的區域或對象。
色彩空間 (RGB/HSV)	色彩模型是一種數學和視覺模型，用於描述和表示顏色的方式。這些模型基於不同的原理和特性，可以幫助我們理解、分類、比較和操控顏色。不同的色彩模型將顏色表示為不同的數值或屬性，並在不同的應用中有不同的用途：
	RGB 色彩模型是基於顏色的發光原理，它將顏色表示為紅色 (Red)、綠色 (Green) 和藍色 (Blue) 三個通道的強度或亮度值的組合。每個通道的值通常在 0 到 255 之間，可以建立出各種不同的顏色。這種模型常用於顯示器、電視和電腦圖形。其廣泛用於顯示器、感光元件。RGB 色彩空間可以表示為一個三維立方體。這個立方體的每個座標點分別代表了紅、綠和藍的通道的不同亮度值。紅色、綠色和藍色通道的值分別對應於 X、Y 和 Z 軸的坐標位置。
	HSV 是一種用來描述和表示顏色的色彩模型，它的名稱代表著色相 (Hue)、飽和度 (Saturation)、明度 (Value)。HSV 是一個非常直觀和常用的色彩模型，通常用於影像處理、圖形設計、電腦繪圖和藝術創作等領域。HSV 色彩空間可以表示為一個圓錐或圓柱體。色相 (H) 環繞著中心軸，飽和度 (S) 從中心向外延伸，明度 (V) 則從底部向頂部延伸。
直方圖 bins	顏色質方圖係指一幅圖像中的顏色分佈，與圖像中的特定物體無關，僅用來表示偵測之圖像中顏色分佈情況。例如說，圖像中紅色佔多少比例，綠色佔多少比例。顏色質方圖中橫軸表示為 bins，也就是顏色分多少塊。假設 bins=256，也就是橫座標上，每個點表示一個數值，縱座標表示該像素點之數量。如果 bins=16，也就是把顏色範圍 0~255 從小到大分為 16 塊，然後圖像中落在每塊對應範圍像素點的個數，就是每塊對應的質方圖高度。
回投影閾值	Deep Back Projection Networks (DBPN) 方法更進一步使用到低解析度圖像和高解析度圖像之間共有的關係。DBPN 通過借鑒傳統方法中的反向投影 (Back Projection) 方法，構造了迭代式升降取樣 (Iterative

	up and downsampling)的方法，實現了超出以往的 SOTA(State Of The Art) 的表現。DBPN 專門設計用於解決圖像超分辨率問題，此技術通過一系列複雜的回投影操作，在保持圖像細節之同時，顯著提升圖像的清晰度和分辨率。DBPN 核心在於其獨特的深層回投影架構，利用閾值(T 值從 7 到 10 不等)來逐步重建高清圖像，這一過程模擬系統圖像處理中反投影法，且在深度神經網路架構下實現自動化和最佳化。
迭代終止條件	每一次迭代結束後，演算法將根據定義的終止條件決定是否繼續進入下一輪的迭代，而常見的終止條件有：(1) 在定義的迭代數量中，群體最佳解都沒有進步，(2) 到達指定的運算時間，(3) 到達指定的迭代數量。在整個演算法結束後，群體最佳解即為最終輸出。
更新頻率	更新頻率是指螢幕每秒更新畫面的次數，以 Hz 為單位，越高代表畫面越流暢，例如 60Hz、120Hz、144Hz。它影響圖像畫面的視覺流暢度，對快速移動的目標（飛機、車輛疾駛、人員狂奔...）尤其重要，能減少視覺拖影與閃爍。高更新率需要更強的 GPU、CPU 配合，並會消耗更多電量。搭配 GPU 和 CPU 協同工作產生的高畫面播放速率使用時，可以帶來更流暢的體驗與更高的 FPS。為了充分利用更高的更新率，必須考慮的三個首要元件是：(1)具有快速更新能力的螢幕，(2)一個速度夠快的 CPU，能夠提供關鍵的指令，(3)一個速度夠快的 GPU，能夠快速執行這些指令，並建立畫面上看到的圖形。螢幕只能以系統生成影像的速度顯示影像，因此 CPU 和 GPU 能否快速完成此程序至關重要。如果 CPU 和 GPU 無法為螢幕提供夠高的畫格數，則無論規格多好，螢幕都將無法生成高更新率影像。如果螢幕更新率為 144Hz，但 GPU 每秒僅提供 30 張畫格，代表將無法發揮更高的更新率。
追蹤失敗重置策略 (re-detection / re-initialization)	現行大部分低空無人機的追蹤識別方法都是透過雲台攝影機擷取影像，因為這是最直接且快速的方法，現追蹤失敗重置策略仍在發展中，本研究設想如下：目標重識別 (Target Re-identification, Re-id) 使用電腦的視覺技術判別圖片或影片中是否有目標存在，若因拍攝角度或相機分辨率，無法獲得較高質量的特徵圖像，一般目標識別方法就會降低準確率，這時 Re-id 便可發揮其功能，它可以從不同相機下搜索出相同的目標圖片。隨著近年深度學習的快速發展，包括基於局部特徵的 Re-id 方法、基於影片序列的 Re-id 方法、基於表徵學習的 Re-id 方法等等，最常見的就是表徵學習 (Representation learning) 方法，包括分類子網路 (Classification subnet) 和驗證子網路 (Verification subnet)，分別利用預測的 ID 屬性來訓練模型並計算分類誤差，以及驗證不同圖片的特徵，並判別其圖片是否為相同目標。針對特定目標的識別，目標辯證 (Target recognition) 也是其中一種方式。有些辯

	證的方法是透過目標的塗裝辨別，但塗裝容易被更換，若使用特徵識別則可以直接分辨目標，透過預先存取欲檢測目標的圖片，藉由關鍵識別的特徵擷取，獲得目標的位置相關資訊，並將結果做應用。此外非監督學習（Unsupervised learning）的特徵識別模型，以便自動適應各種環境和外觀變化，例如相機位置、光照，甚至不同的目標群體等等均可於未來發展中提供協助。
--	--



圖九:圖像跟蹤簡要程序

六、討論

在追蹤演算法則達成工程實踐時，主要考量感測器、環架、影像追蹤器與環架控制等四項次系統的設計配合能力，此些次系統能力評估時又需再評估操作模式要求、環境特徵、追蹤性能要求、硬體限制、數據收集要求與成本等。

1.目前低空微、輕型軍用無人機多運用遙

控式電視制導，且採單人單機操作模式居多，其目標識別、追蹤全賴飛手依回傳畫面訊號判定，構造簡單，操作靈活，成本極低，充分發揮不對稱作戰特性。雖談不上 AI 技術，卻因「高低配」、「下駟對上駟」、「低剋高」特性，大放異彩。在戰術戰法中，高低階裝備各有價值，不宜相互否定，或完全取代。惟其發展受限者為全程均須飛手操作，多架次操作不易達成。

2.感測器包括感知裝置、光學及感測電路等，即軍用商規無人機之攝影機。概估言之，對從事低空可見光頻譜任務已具有技術備便能量，惟須注意選擇適當之 S/N 比，評估其反應時間與更新速率尚能適用於地面目標即較低速之空中目標跟蹤。

3.遙控式電視制導模式通常含有射(飛)手迴路，其目獲、識別、追蹤均由人工遙控完成。俄烏戰場中異軍突起、大放異彩者多非 AI 導引，仍屬傳統遙控式電視制導藉飛手操控者，面對地面密接支援作戰，強化飛手導引技術更顯實用。其由於構造簡捷，配合戰場需要攻擊速度較慢目標，反而能發揮特性，賦予圖像跟蹤之自動功能實無必要。其發展之方向，依用兵考量，應為飛手顯示器、遙控器(搖桿、滑鼠、追蹤球...)、人因工程等方向。

4.傳統 CCD 受光元件 525 行系統，每個圖框大約需處理 30 萬像素，以構成視頻影

像，其由內建時鐘配合水平與垂直方向之掃瞄，鑲嵌成圖像，影像訊號被時序、位置座標等編碼，運用同步器抽取追蹤閘內訊號，時間定序決定圖像順序與在掃瞄光軸上排列位置及相關變異性。

5. 影像處理時，數據插入(Data insertion)提供編碼方法，將時序、位置、環架角度相對於每一圖片或影像予以定序，並以設定格式(Format)處理。在無人機自動追蹤系統建置時，如設於機上，需考量經濟、省時、微型化等要求將數據紀錄、壓縮；如設於地面控制站時，需考量其上行與下行之傳輸效率。目前學術界尋找最佳化設計，針對像素之排序法建構一套可回復之圖像隱藏儲存方法，在提取加密壓縮影像時，可以還原原始影像[11]，應可加以利用。
6. 因補於民，傳統電視追蹤器多以 CCD 架構描述；現代商規雲臺多以 CMOS 為主。現軍用商規無人機之雲臺相機多採互補式金屬氧化物半導體(Complementary Metal-Oxide Semiconductor, CMOS)主動像素感測器，長久以來，CCD 感光元件是市場上最常見的影像感光元件。然而，隨著產業的不斷發展，CMOS 感測器的創新，方興未艾，其感光元件逐漸佔領市場[12]。CCD 感光元件是一個基於類比訊號的設備。當光投射到其表面時，將有訊號電荷產生。電荷訊號可以轉換成電壓，並按指定的時序將圖像信息輸出。而 CMOS 感光元件是一類利用 CMOS 半導體的主動像素感測器。每個光電感測器附近都有相應的電路直接將光能量轉換成電壓訊號。與 CCD 不同的是，它並不涉及訊號電荷。在設計上可能也需要類比數位轉換器將它的輸出訊號轉換成數位訊號。同等條件下，CMOS 感光元件所用的元件數相對更少，從而

功耗較低，數據吞吐速度也比 CCD 更高。由於雲臺相機 CMOS 感光元件可以直接製作在主板電路上，因此它的訊號傳輸距離較 CCD 短，電容、電感和寄生延遲降低。另外，資料輸出採用 X-Y 尋址方式，速度更快。CCD 的數據輸出速率一般不超過每秒 70 百萬像素，而 CMOS 則可以達到每秒 100 百萬像素。然而，CCD 感光元件在追蹤運用方面已顯成熟，但是 CMOS 感光元件運用於自動追蹤時，許多內建原始程式需重新編寫，此外，CMOS 數據插入亦須大幅更新。

七、結論

軍用高階無人機發展重點是智能跟蹤器，技術備便佳者為電視圖像跟蹤技術系統，核心軟體為圖像跟蹤演算法。AI 跟蹤技術是智能跟蹤器的發展趨勢，在已有多項跟蹤演算法的功能基礎上，再加利用微處理器、電腦圖像處理和人工智慧技術，模擬人的分析、推理、判斷及決策的邏輯，可以有效地提高跟蹤器的自適應能力。這種技術正在應用研究中，無人機使用這種技術將具有對整個視場內的多目標探測、分類、識別和跟蹤的能力，可在複雜背景或低 S/N 環境下，具備前景預測能力，估測在目標前進方向上的障礙物或背景突變，一旦有障礙物出現，它將採用記憶外推等算法保持對目標的跟蹤。隨著圖像跟蹤算法研究不斷深入和最佳化，國造軍用 AI 無人機的前景變得更加看好。

參考文獻：

- [1] 賴名倫，"AUKUS 對日提案 擬合作開發 AI 無人機"，"臺北：青年日報，國際-寰宇安全 20250305，2025。
- [2] 李思平，"【韜略談兵】智慧翱翔 AI 加持 無人機戰術昇華"，"臺北，青年日

- 報論壇-軍事論壇 20240307，2024.
- [3] 宋真堯(編授)，趙嘉琦(抄錄)，武器系統分析講義，中正理工學院兵器系統工程研究所，1996.
- [4] 莫辭中，飛彈系統專題講座，中正理工學院，1994.
- [5] 莫辭中、宋真堯，武器系統工程短期講座，中正理工學院，1995.
- [6] ed., Wolf, Zissis, The Infrared Handbook, Office of Naval Research, Department of the Navy, chapter 22, pp. 3-102, 1985.
- [7] Shen, Z., Han, Z., and Zhao, M., “High Accuracy Tracking Algorithm Based on Iterating Tracking Window Center Towards the Target Center,” Proc. SPIE 1482, Acquisition, Tracking and Pointing V, 1991.
- [8] Hill, P. D., Walsh, T. R., “Real-time Video Edge Tracking Algorithms,” Proc. SPIE 1950, Acquisition, Tracking and Pointing VII, pp. 141-151, 1993.
- [9] Montera, D. A., Rogers, S. K., Ruck, D. W., and Oxley, M. E., “Object Tracking through Adaptive Correlation,” Optical Engineering, 33(1), pp. 294-301, 1994.
- [10] Gilbert, A. L., Giles, M. K., Flachs, G. M., Rogers, R. B., and Hsun, U. Y., “A Real time Video Tracking System,” IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence PAMI-2, pp. 47-56, 1980.
- [11] 劉興漢、楊顯豪、林永祥，”植基於像素排序法之可恢復資訊隱藏技術，”中正嶺學報，第五十二卷，第一期，pp. 13-30, 2023.
- [12] 林鈺城，”植於三層矽波導的表面電漿共振感測器設計，”中正嶺學報，第五十三卷，第二期，pp. 19-31, 2024.

Considerations on Image Tracking Algorithms in Military Drone

Hsueh-Er Chao¹, Yu-Lin Fang², Chao-Yu Hung³, Chia-Chi Chao⁴

¹Department of Counseling and Clinical Psychology, National Dong Hwa University

²Department of Mechanical and Aerospace Engineering, CCIT, NDU

³Department of Aeronautics and Astronautics, ROC Air Force Academy

⁴Department of Mechanics, ROC Military Academy

Abstract

A drone tracking system can be viewed as having certain essential elements which can be structured in a variety of configurations to meet specific mission. The tutorial paper discusses the performance requirements and design parameters for drone tracking systems. Descriptions of algorithms for tracking system are discussed. The relationships between sensors and algorithms are examined. The design considerations related to the operator interfaces are also discussed. The study of image tracking algorithm is a key technique in drone seeker tracking system. Several image information-based tracking algorithms are introduced and analyzed. It includes gate tracking algorithm, correlation tracking algorithm, edge-based difference tracking algorithm, double modified Hough transform algorithm and linear-fitting predicting approach etc. The development tendency of drone seeker tracking system and its application into defense frontier is also described.

Key words : image processing, gate tracking, correlation tracking, algorithm