



應用距離與流場角度濾波器 改善無人機上單鏡頭距離偵測

莊旻哲^{1,*} 呂政修²

¹ 國立臺灣科技大學電子工程系碩士生

² 國立臺灣科技大學電子工程系教授

摘要

隨著科技發展，無人機被廣泛應用於空拍、農業、救災、空中送貨及競速等等。然而，無論何種應用，如何防止無人機撞擊障礙物，始終是不容忽視的課題。無人機體積縮小並輕量化是現代的趨勢，除了保留原本的攝影鏡頭之外，在不增加其他感測元件的情況下，如何實現前方障礙物距離偵測是個值得討論的議題。本論文在無人機上不增加額外感測器的情況下，使用單鏡頭實現無人機前方深度距離偵測，加上流場濾波器與無效距離濾波器降低深度圖與標準答案之間的誤差，並且比較無人機晃動影響判斷結果程度，點出穩定攝影機拍攝畫面的重要性。驗證方面，將無人機於室外飛行收集影像與飛行速度資訊，經過深度圖幾何運算後，結果圖表分別以速度、距離與時間為單位，標示深度圖誤差。

關鍵詞：單鏡頭、深度圖、無人機、濾波器、計算距離

* 通訊作者：莊旻哲

電子郵件：M10802139@mail.ntust.edu.tw

（收件日期：2021 年 12 月 1 日；修正日期：2022 年 1 月 4 日；接受日期：2022 年 1 月 11 日）



Applying Distance and Field Angle Filters to Improve Single Lens Distance Detection on Drones

Min-Zhe Zhuang^{1,*}, Jenq-Shiou Leu²

¹Master Student, Department of Electronic and Computer Engineering, National Taiwan University of Science and Technology

²Professor, Department of Electronic and Computer Engineering, National Taiwan University of Science and Technology

Abstract

Drones are widely used in photography, agriculture, rescue, goods delivery, and racing. How to avoid that drone from hitting an obstacle is indispensable for any task. Developing lightweight drones is the modern trend. This study focuses on how to calculate depth maps without installing other sensors. After computing the depth map with geometric analysis, we applied the flow filter and distance filter to decrease the error rate. In experiments, we tested performances in data that we extracted from the real world.

Keywords: mono camera, depth map, drone, filter, calculated distance

* Corresponding Author: Min-Zhe Zhuang
E-mail: M10802139@mail.ntust.edu.tw

壹、緒論

隨著科技進步，由駕駛遠端操控的無人航空載具逐漸盛行。航空載具的種類繁多，在生活中最常見的商用機型為多旋翼飛機（Multi-Rotor Helicopter）。然而隨著世代發展，無人機應用的領域越來越廣泛，例如農業水道播種（Worakuldumrongdej, Maneewam, and Ruangwiset, 2019）、人道救援（Samblek and Ivasic-Kos, 2021）、橋梁工程檢測（Obradović, Vasiljević, Kovačević, Marinković, and Farkas, 2019）與第一人稱視角（First Person View, FPV）無人機競賽（Delmerico, Cieslewski, Rebecq, Faessler, and Scaramuzza, 2019），還有最近兩年全球所面臨的嚴重特殊傳染性肺炎（Coronavirus Disease-2019, COVID-19）疫情防堵策略中，也有無人機參與非接觸式貨物運送（Shen et al., 2020）。然而不管是應用於哪種領域，無人機在行駛當中皆面臨相同問題——防止飛行過程中需避免撞到障礙物。

近年來無人機日漸盛行（Delmerico et al., 2019），不管是競賽、娛樂或者影視拍攝當中，常看到無人機的參與。通常在無人機飛行時，「飛手」也稱作無人機駕駛員，需要在能接收到遙控影像之無線訊號的範圍內，觀看 FPV 來操控高速行駛的無人機。然而當因為環境干擾而信號接收不良時，飛手會有段時間看不到飛行畫面，進而可能導致撞擊障礙物墜機。若能提供飛手一套無人機前方距離資訊的輔助系統，將可能避免這種情況發生。

另外計算出來的前方距離資訊的深度圖，亦可以應用於無人機飛行路徑自動規劃（Carrio, Vemprala, Ripoll, Saripalli, and Campoy, 2018），利用深度圖進行三維空間定位，這對於避免無人機碰撞極為有用。

但是，在透過光流演算法與幾何數學計算距離時會遇到例外狀況，本篇論文將提出濾波器改善這些情況。除此之外，如圖 1 所示，由於無人機飛行時機身會產生震動，進而導致攝影機拍攝畫面跟著晃動。震動大致分為高頻與低頻兩類：

- 一、高頻震動：螺旋槳選轉所造成的震動。
- 二、低頻震動：飛手操作飛行閃避之震動。

畫面晃動將造成光流流場崩潰，進而導致深度圖失效，本論文將於實驗結果篇章進行說明無穩定與穩定攝影機畫面之實驗結果。

貳、距離量測與過濾器相關技術

若依照常見的感測器分類，大致可以區分為以下五類：

- 一、超音波測距（Ultrasonic）：有效感測距離為 0.5 到 5 公尺（Suherman, Putra, and Pinem, 2020），具有高穿透力，但會受到環境聲音干擾。
- 二、飛時測距（Time of Flight, TOF）：有效感測距離為 4 到 10 公尺（Ximenes, Padmanabhan, Lee, Yamashita, Yaung, and Charbon, 2018），偵測速度比超音波快，但會受環境中強烈光線影響。
- 三、紅外線（Infrared Ray）：有效感測距離為 1 到 8 公尺（Zhong, Li, Liao, Qin, Zhang, and Guo, 2021），在暗光環境偵測效果佳，但同樣會受環境中強烈光線影響。

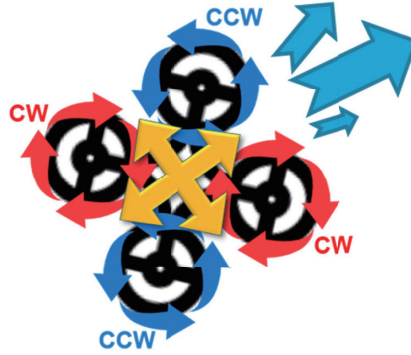


圖 1 無人機飛行方向（淺藍箭頭）、機身震動方向（水平面黃箭頭）與螺旋槳旋轉方向（藍紅箭頭）示意圖

資料來源：作者自行研究整理。

四、光達（Light Detection and Ranging, LiDAR）：功率高的光達有效感測距離為 120 公尺（Geiger, Lenz, and Urtasun, 2012），體積大，價格昂貴。

五、單雙攝影機（Mono/Stereo cameras）：感測距離能達 100 公尺以上，價格便宜，但晚上偵測效果不佳。

關於光達應用於避障無人機參考 Devos, Ebeid, and Manoonpong (2018) 介紹，在無人機機架上安裝 40 A 的電子變速器（Electronic Speed Controller, ESC）、馬達、旋翼、PIXHAWK 飛行控制器、遙控接收器、光達感測器 LIDAR-Lite v3、GPS 模組、樹梅派 Zero。樹梅派透過 MAVLink（Micro Air Vehicle Link）協定與無人機的飛行控制器進行通信。

由於本篇論文希望能減少無人機負載，在不增加額外感測器之情況下進行距離偵測，且偵測距離能達 100 公尺以上，因此攝影機成為本論文之最佳選擇。

單鏡頭連續幀深度方法，可以只憑藉單鏡頭錄製連續幀影像與鏡頭移動速度資訊，即可計算距離深度圖（Depth Map）。這裡參考（楊豐瑞，2020）所提出的方法，透過光流（Optical Flow）法可以得到相鄰兩幀同樣物體之運動方向。並利用流場方向計算擴張焦點（Focus of Expansion, FOE），在已知攝影機移動速度的情況下，套用幾何深度公式即可計算出距離深度圖。

光流為連續幀影像畫面中，物體運動方向如圖 2 所示（Narasimhan, 2016），假設有一物體於時間 T 時在畫面的中間，攝影機於下一幀往物體右邊前進，在時間 $T + 1$ 時物體在畫面偏左地方，則此兩幀之光流流場運動關係如圖 3 所示。

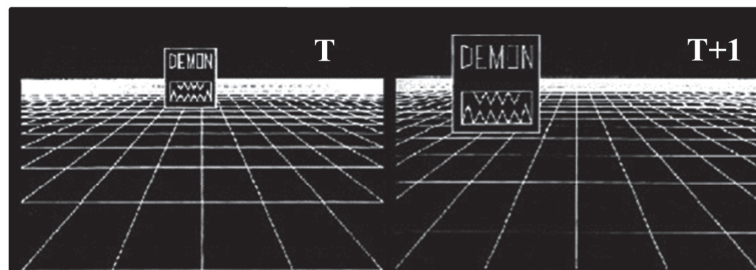


圖 2 前後兩幀位置示意圖

資料來源：Narasimhan (2016)。

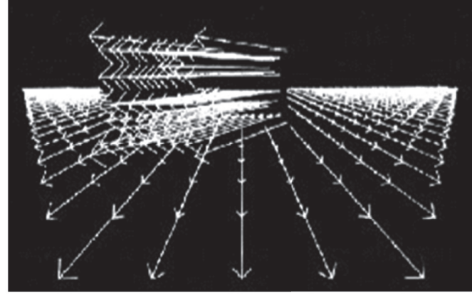


圖 3 光流流場示意圖

資料來源：Narasimhan (2016)。

FOE 為畫面中景物因移動產稱運動之軌跡的匯聚核心點 (Jain, 1983)。也是攝影機前進之方向點。我們可以利用相鄰兩幀光流軌跡之運動關係，推算出 FOE 位置。如圖 4 所示，三維空間中有一 P 點於下一幀移動到 P' 點，運動方向如式 (1) 表示，映射於攝影機畫面上之二維成像 p 點位移到 p' 點，如式 (2) 表示，將時間回推到光流產生之來源，使時間負無限大，座標 (x', y') 即為 FOE。

其中， u ： P 點於 x 軸之光流位移量（單位：像素）； v ： P 點於 y 軸之光流位移量（單位：像素）； w ： P 點於 z 軸之光流位移量（單位：像素）； t ：經過時間（單位：秒）； f ：焦距（單位：公尺）。

$$(x, y, z) = (x_0 + ut, y_0 + vt, z_0 + wt) \quad (1)$$

$$(x', y') = \left(\frac{x_0 + ut}{z_0 + wt}, \frac{y_0 + vt}{z_0 + wt} \right) \xrightarrow{t \rightarrow -\infty} (x', y') = \left(\frac{u}{w}, \frac{v}{w} \right) \quad (2)$$

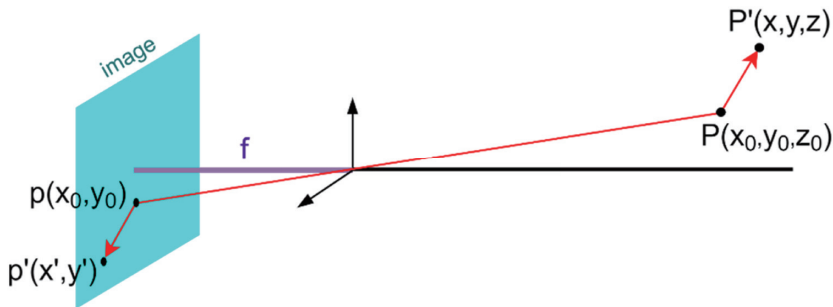


圖 4 單一像素 (pixel) 光流運動方向示意圖

資料來源：Narasimhan (2016)。

透過幾何關係 (Baraldi, Micheli, and Uras, 1989) 之公式如 (3)，假設有一 p 於下一幀移動至 p' 點，並且已知移動速度與間隔時間，在計算出光流資訊後，帶入公式 (3)，即可算出該像素深度距離資訊。

其中， Z ：攝影機與計算距離像素點之實際距離（單位：公尺）， v ：光流強度（單位：像素）， D ：計算像素點與 FOE 之直線距離（單位：像素）， V_{cam} ：攝影機移動速度（單位：公尺／秒）， t ：經過時間（單位：秒）。

$$Z = V_{cam} \cdot \frac{D}{v} \cdot t \quad (3)$$

參、流場濾波器與無效距離濾波器的設計

系統運作運算流程如圖 5 所示，當程式開始執行後，會將影像與速度資訊從儲存裝置逐幀提取出來。影像轉灰階後做直方圖均衡化 (Histogram Equalization)，以利於提高光流運算之準確性。紅色框選處為本文的重點——流場濾波器與無效距離濾波器。開發者可以手動調整流場濾波器與無效距離濾波器，以便於驗證效果時能夠快速轉換切換測試模式。當計算完全部影像後，最後會生成報表，並儲存於儲存裝置中。

在計算影像深度圖過程中，會先使用 Farneback (Farneback, 2003) 計算影片中連續兩幀整張畫面之光流，並且在計算出該幀 FOE 後，套用幾何數學公式 (3) 計算出帶有距離資訊的影像深度圖。但為了防止例外狀況發生，比如飛手操作或螺旋槳震動，皆可能導致緊密流場崩潰，導致測距失準；或者畫面中出現過於光滑的物體表面，會使流場向量長度趨近於零，進而導致誤判成距離趨近無限遠。因此本論文提出兩種濾波器分別為流場濾波器與無效距離濾波器。

一、流場濾波器

由於有些物體邊緣會造成流場混亂，會導致後續的深度圖運算失準。為了改善判斷誤差，這裡參考楊豐瑞 (2020) 所提出的緊密流場濾波器設計方法，計算流場直線方程式與該流場像素至 FOE 直線方程式的交角 θ ，如公式 (4)。若交角 θ 計算計算結果大於 180 度，則減 360 度取絕對值做為此點的交角，如公式 (5)。最後設定一個閾值，把高於交角閾值的光流全部濾除，如公式 (6)。其中：

u ：光流 x 軸位移量； v ：光流 y 軸位移量； (x, y) ：像素座標； (x_{FOE}, y_{FOE}) ：FOE 座標； $Mask$ ：濾波器遮罩； $\Delta\theta$ ：流場直線方程式與該流場像素至 FOE 直線方程式的交角， $\Delta\theta_{acute\&obtuse}$ ：流場直線方程式與該流場像素至 FOE 直線方程式的小於 180 度邊的交角。

$$\Delta\theta = \left| \arctan\left(\frac{-v}{u}\right) - \arctan\left(\frac{-y + y_{FOE}}{x - x_{FOE}}\right) \right| \cdot \frac{180}{\pi} \quad (4)$$

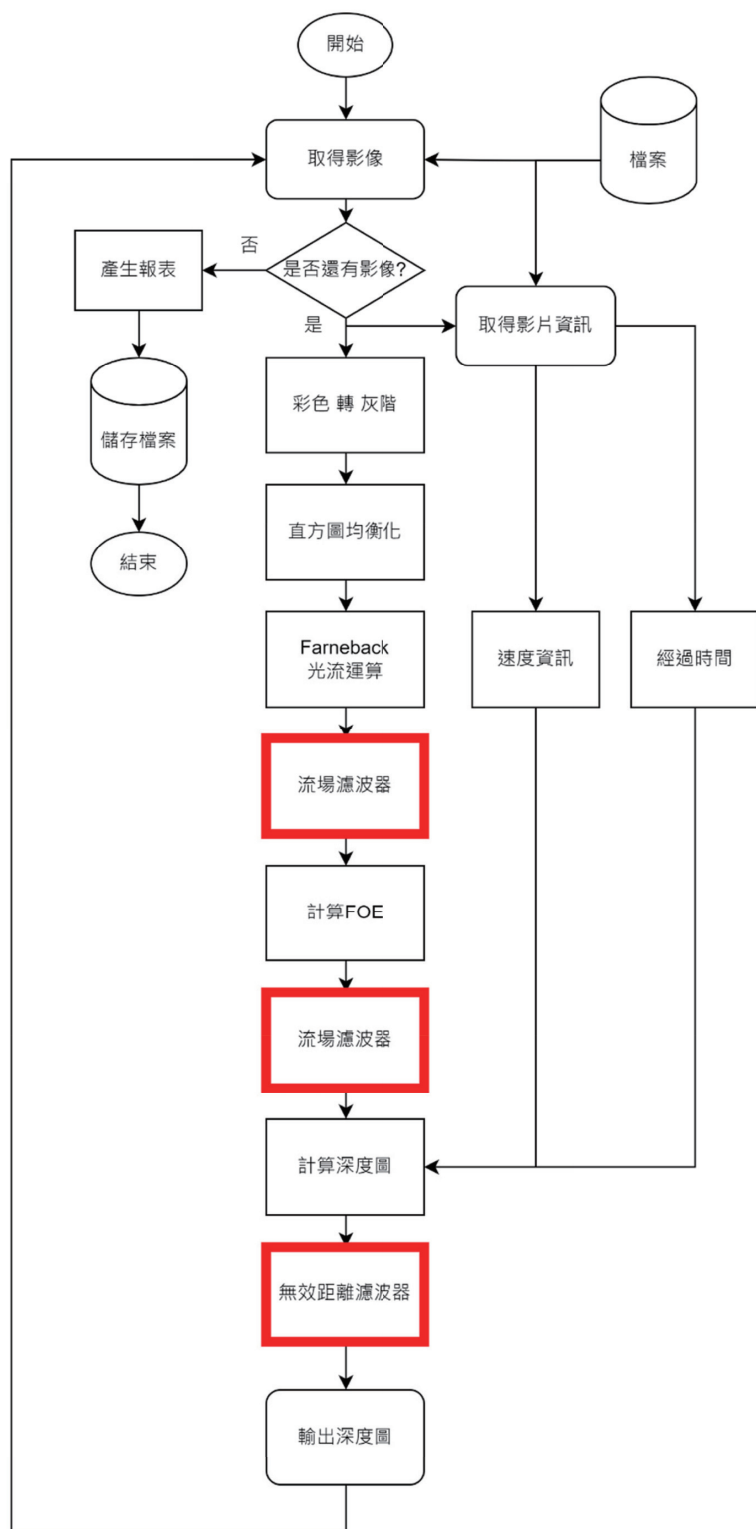


圖 5 系統架構流程圖

資料來源：作者自行研究整理。

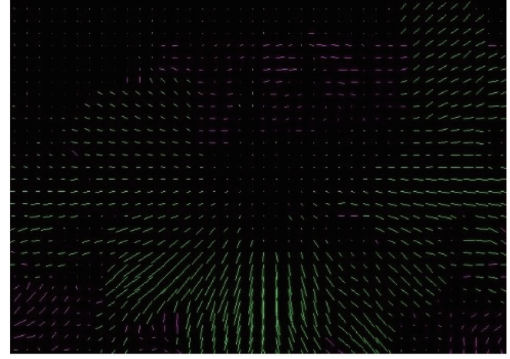
$$\Delta\theta_{acute\&obtuse} = \begin{cases} 360 - \Delta\theta, & \text{if } \Delta\theta > 180 \\ \Delta\theta, & \text{if } \Delta\theta \leq 180 \end{cases} \quad (5)$$

$$Mask = \begin{cases} Invalid, & \text{if } \Delta\theta_{acute\&obtuse} > Threshold \\ Valid, & \text{if } \Delta\theta_{acute\&obtuse} \leq Threshold \end{cases} \quad (6)$$

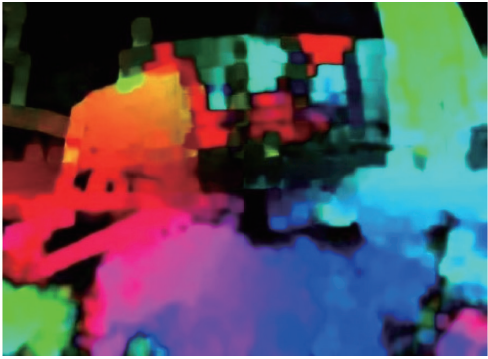
圖 6 (a) 為原影像；圖 6 (b) 為光流圖，紅色為流場濾除部分；圖 6 (c) 為無過濾異常流場之流場角度，可以看到邊緣對比過高的物體，光流角度會與之平行；圖 6 (d) 為過濾後的流場角度示意圖。經實驗將交角閾值限制在 90 度是本論文實驗之最優解。而濾波器使用於以下兩個地方。



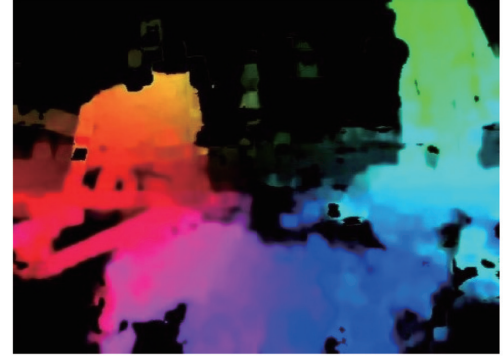
(a) 原圖



(b) 光流流場



(c) 無過濾異常流場



(d) 有過濾異常流場

圖 6 異常角度之流場過濾前後比較示意圖

資料來源：作者自行研究整理。

(一) 計算 FOE

採用迴授機制過濾，上一幀之 FOE 與目前幀的流場做交角計算。並將濾除後符合資格的流場納入計算該幀之 FOE。

（二）計算距離深度圖

用目前幀的 FOE 與目前幀的光流做交角計算，並將過濾完成後的流場納入深度圖之計算。

二、無效距離濾波器

由於過於光滑的物體表面，會使流場向量長度趨近於零，使距離被判斷趨近無限遠。本論文提出將距離限制在制訂閾值以內，高於閾值距離則該深度區域被標示成無效區域，如公式 (7)。其中， Z ：深度圖距離， $Mask$ ：濾波器遮罩。

$$Mask = \begin{cases} Invalid, & \text{if } Z > Threshold \\ Valid, & \text{if } Z \leq Threshold \end{cases} \quad (7)$$

圖 7 (a) 為計算原圖，圖 7 (b) 天花板處的光滑面被判斷成無限遠距離。套用無效距離濾波器後得到圖 7 (c) 所示，全黑區塊為無效距離區域。經實驗將距離閾值限制在 225 公尺與 120 公尺是本論文實驗最優解。

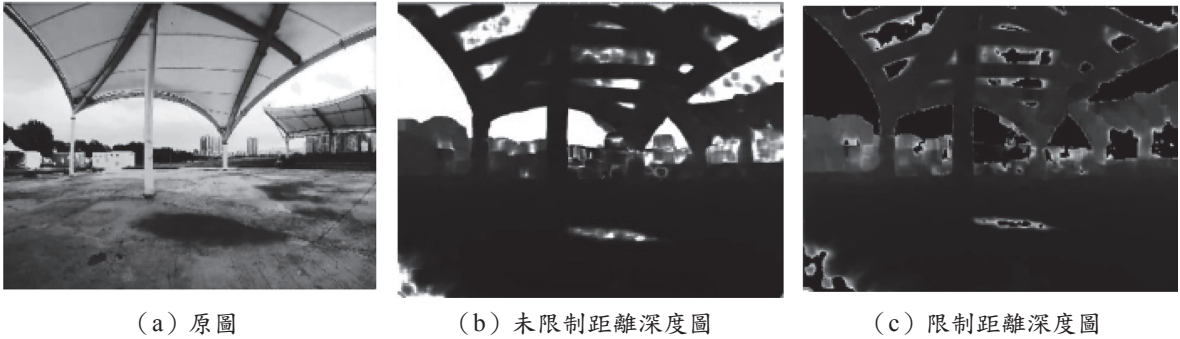


圖 7 有無濾波器前後差異圖

資料來源：作者自行研究整理。

肆、實驗測試與評估結果

實驗電腦用於驗證演算法精準度之運算設備，規格如表 1。

本論文開發軟體所使用的程式語言使用 Python，主要套件使用 OpenCV、Numpy 與 Matplotlib。

將採集到的資料集利用本論文所提出的計算深度圖方法進行計算。接下來將本論文方法計算運算結果跟標準答案 (Ground Truth) 進行誤差比較。

表 1 電腦規格表

項目	規格
處理器	Intel(R) Xeon(R) CPU E3-1230 v5 @3.40GHz(8CPU) 3.4GHz
記憶體	64.0 GB DDR4
作業系統	Windows10 64bit
GPU	NVIDIA GeForce GTX980Ti 6GB

資料來源：作者自行研究整理。

以距離為單位，測試無人機在靠近指定障礙物時，每段距離之間的誤差，並將實驗分成測試濾波器與測試穩定畫面之影響兩種模式：

- 一、測試有濾波器與無濾波器的誤差結果。
- 二、在多指定障礙物的場域進行測試，比較項目分別為有穩定畫面與無穩定畫面兩種情況比較。

如圖 8，這裡採集資料所使用的攝影設備分為兩種，其中 GoPro hero 7 運動攝影機採集穩定畫面資料集，樹梅派 Pi Camera 則採集原始影像資料集，樹梅派 Pi Camera 設備搭載 ublox M8 GPS、160 度廣角拍攝鏡頭、MPU9255 九軸姿態感測器與 BME280 氣壓計；無人機搭載 30 A ESC、2,300 KV 無刷馬達、Matek F7 飛控、FPV 攝影鏡頭與圖傳發射器；控制部分為 FrSky Q X7 遙控器，5.8 G 接收螢幕，如圖 8。收集資料過程中，將攝影機架設在無人機上，並透過飛手親自操作無人機進行資料採集，並且使用 GPS 定位，算出前方障礙物距離，並逐幀標記標準答案，如圖 9。圖 9 與圖 10 為高速飛行場域，用於測試濾波器效果；圖 11 與圖 12 為低速飛行場域，用於測試畫面穩定度影響。

一、濾波器效果

無人機平均飛行速度為 44.559 公里／小時，最高速度為 46.773 公里／小時，使用 GoPro 錄製並開啟 Hyper Smooth 1.0 防手震功能。套用章節參提出的流場濾波器與無效距離濾波器，結果如表 2 所示，僅加入流場濾波器即有明顯改善誤差值，均方誤差百分比下降將

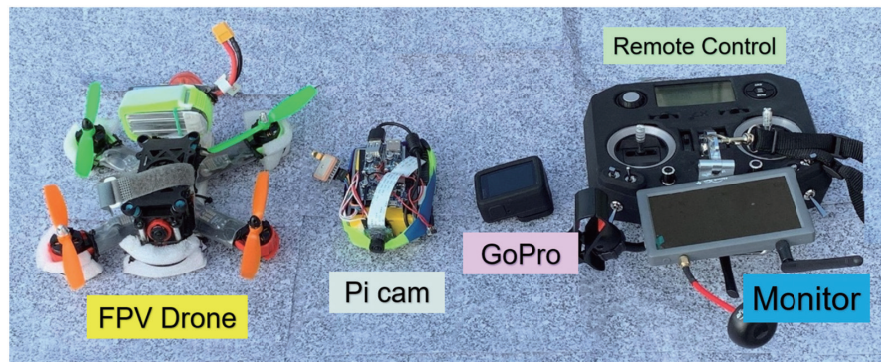


圖 8 無人機硬體設備展示

資料來源：作者自行研究整理。

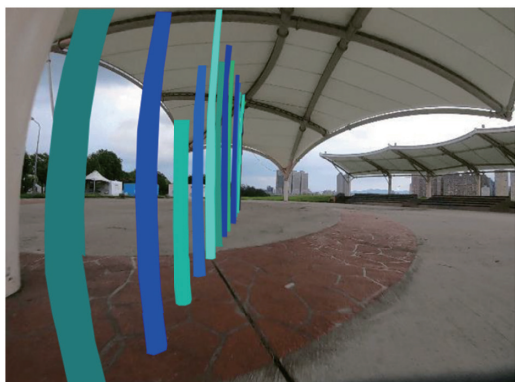


圖 9 高速飛行場域逐幀手動標記標準答案

資料來源：作者自行研究整理。

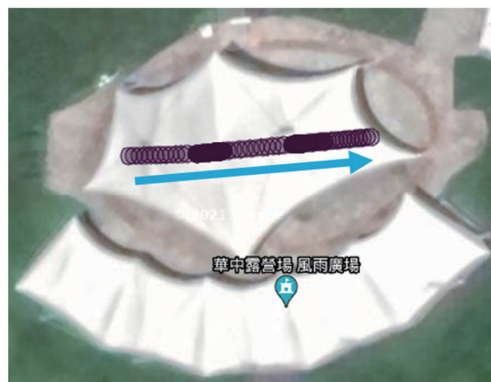


圖 10 高速飛行場域無人機飛行路徑

資料來源：作者自行研究整理。



圖 11 多障礙物場域無人機飛行路徑

資料來源：作者自行研究整理。

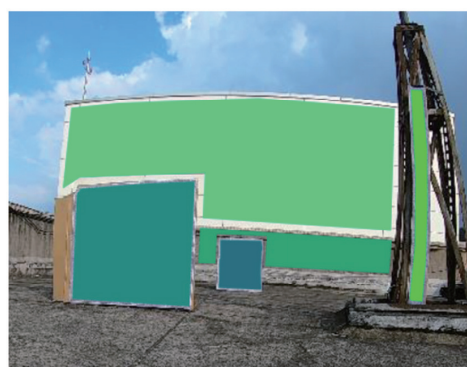


圖 12 多障礙物場域單幀手動標記標準答案

資料來源：作者自行研究整理。

近 19%；僅加入無效距離濾波器也使均方誤差百分比下降將近 5%。不過因為加入額外的運算，平均運算 FPS 下降 0.06 與 0.04 左右。以未加入濾波器與同時加入流場濾波器與無效距離濾波器相比，除了平均運算 FPS 從 3.153 降至 2.439，深度圖誤差皆有顯著下降，其中平均絕對誤差百分比從 47.848% 降至 40.529%。

表 2 濾波器效果比較誤差表

誤差指標	未加入濾波器	僅加入 流場濾波器	僅加入 無效距離濾波器	加入流場濾波器與 無效距離濾波器
MSE (m^2)	65.932	34.385	56.036	31.239
RMSE (m)	6.755	5.069	6.428	4.938
MAE (m)	4.620	3.739	4.548	3.712
MSPE (%)	60.128	41.005	55.288	39.875
MAPE (%)	47.848	40.695	47.346	40.529
平均運算 FPS	3.153	3.090	3.115	2.439

資料來源：作者自行研究整理。

二、穩定畫面影響

無人機平均速度 5.847 公里／小時，最高速度 7.692 公里／小時。圖 13 與圖 14 為 GoPro 之慣性量測單元 (Inertial Measurement Unit, IMU) 所量測之數值。飛行路線為直線飛行，非穩定畫面由 PiCam 收集，穩定畫面由 GoPro Hero 7 收集並開啟 Hyper Smooth 1.0 防手震功能。



圖 13 陀螺儀數值記錄圖

資料來源：作者自行研究整理。

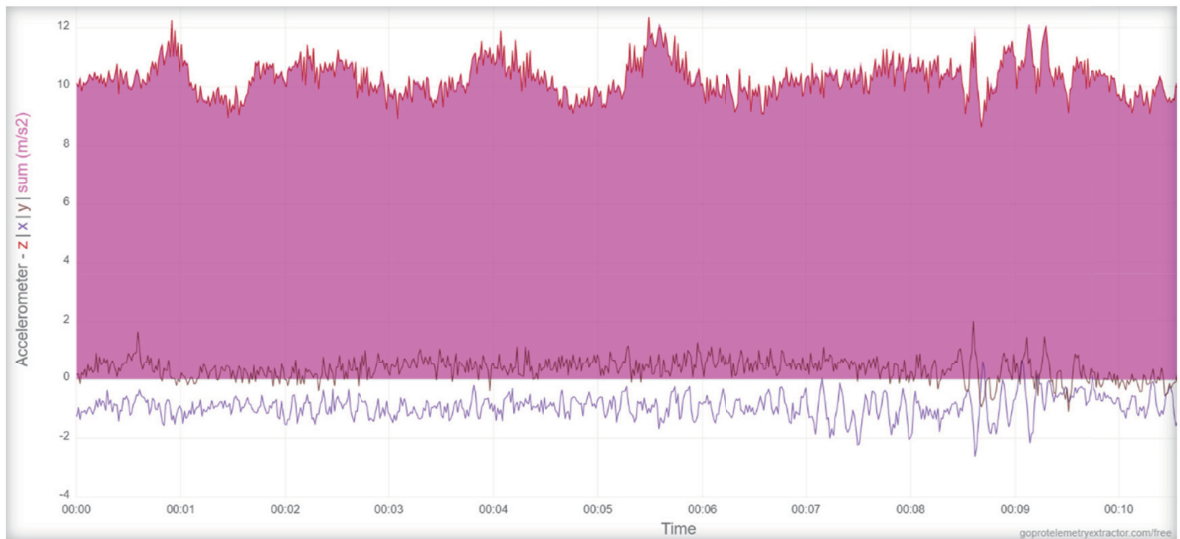


圖 14 加速度計數值紀錄圖

資料來源：作者自行研究整理。

由圖 13 得知，陀螺儀波形在 7 分 30 秒時間點開始出現大幅度角速度的改變，是因為無人機飛行到接近指定障礙物時，飛手操控翻滾（Roll）軸讓無人機先向右再向左微微閃避，因此波形起伏大。

由圖 14 所示，加速度計的 z 軸因為垂直於地面，記錄上數值呈現最高。由於無人機飛行時機身無大幅度轉動與上下起伏，因此這裡波形的低頻震盪較為平緩，而波形的高頻震盪大部分為螺旋槳旋轉震動與小部分雜訊混和所產生。

（一）未穩定畫面

此實驗使用 Pi Camera 做測試，平均記錄影像幀數為 11 fps，記錄之影像格式為 JPG，總共錄製 26 張照片。隨機選出 5 張照片標記正確答案，並與計算結果做誤差比較。

如圖 15 誤差結果表示，當無人機越靠近指定障礙物，預測值與標準答案的誤差就越高。這個原因可能是無人機的飛行震動離近指定障礙物越近時，畫面中的物體移動變化就越大，空間一致性無法被滿足，導致流場崩潰，誤差提升，如圖 16 所示。

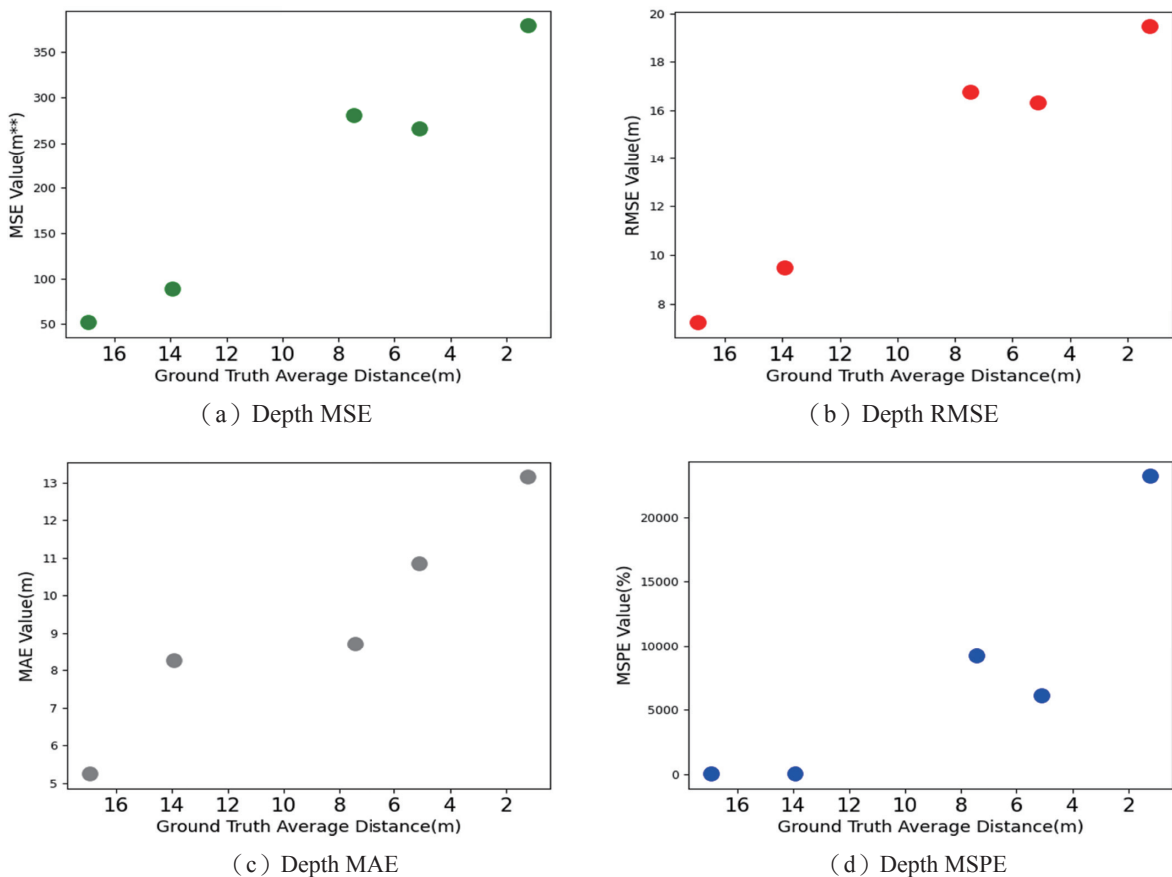
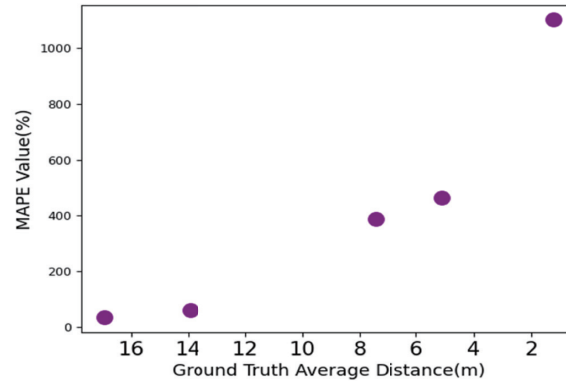


圖 15 距離誤差時態圖

資料來源：作者自行研究整理。



(e) Depth MAPE

圖 15 距離誤差時態圖 (續)

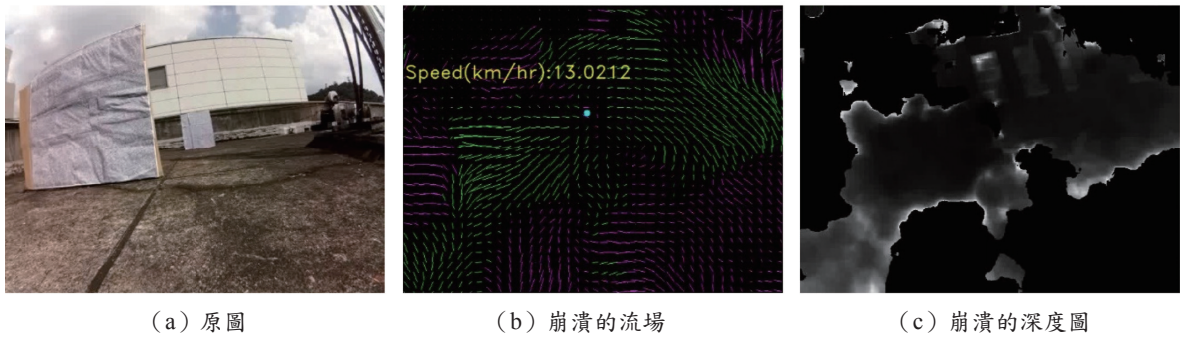


圖 16 震動畫面導致流場崩潰示意圖

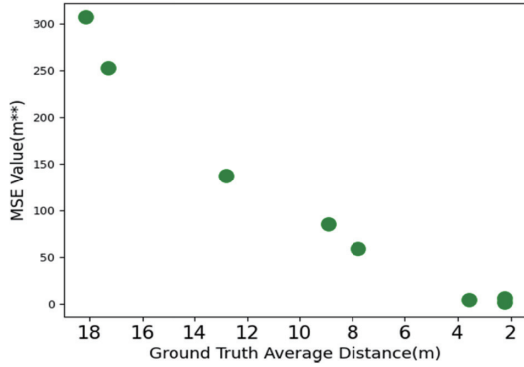
資料來源：作者自行研究整理。

(二) 穩定畫面

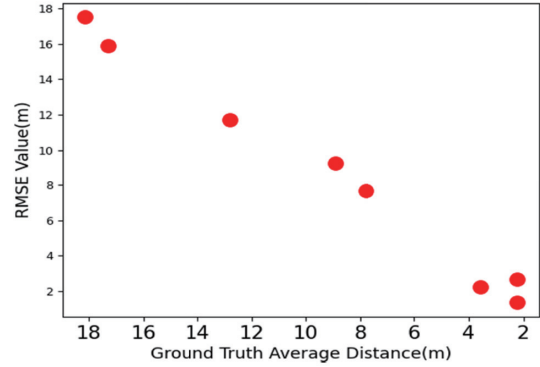
此實驗使用 GoPro 記錄，並啟用 Hyper Smooth 1.0 穩定畫面功能，記錄檔案格式為 MP4，幀數為 59.94 fps。之後將錄影資料轉換成圖片檔，總張數為 666 張圖，隨機選出 8 張照片標記正確答案，並與計算結果做誤差比較。

如圖 17 誤差所示，當越靠近指定障礙物時，誤差就越低。與未穩定畫面的結果相比，選用穩定畫面的誤差有顯著的下降。如圖 18 所示，流場運算結果也比較乾淨。

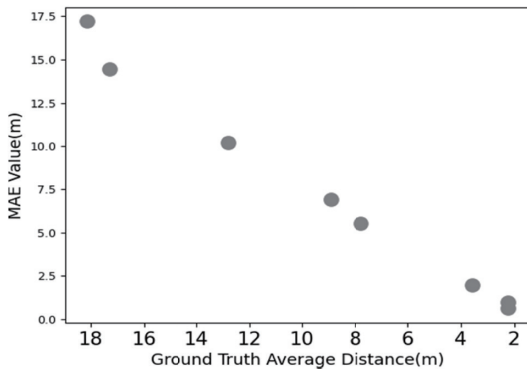
由表 3 結果得知，無人機飛行導致畫面的晃動會造成深度圖有極大的誤，其中平均絕對誤差百分比由 408.328% 降至 62.266%。另外影片幀數、GPS 定位有無校正，也是可能造成誤差的原因。因此在無人機上若要實現單鏡頭 FOE 計算深度圖，取得穩定的影像是非常重要的課題。



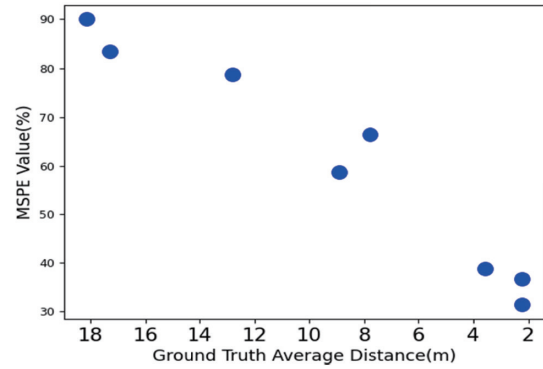
(a) Depth MSE



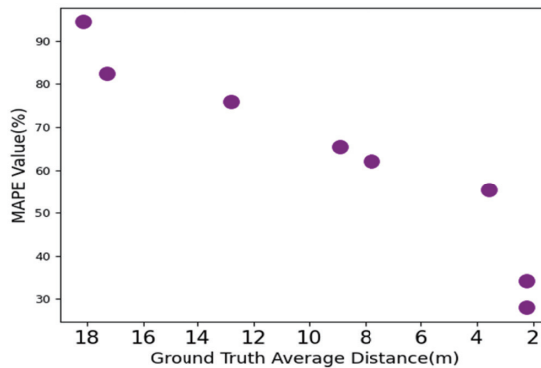
(b) Depth RMSE



(c) Depth MAE



(d) Depth MSPE



(e) Depth MAPE

圖 17 距離誤差時態圖

資料來源：作者自行研究整理。

伍、結論與未來展望

本篇論文中，在無人機不增加額外感測器情況下，我們提出了流場濾波器與無效距離濾波器，降低計算無人機單鏡頭飛行影像的深度圖誤差，並且使用防手震與無防手震的飛行影像，試驗計算深度圖的影響程度。綜合上述，本論文貢獻如下：

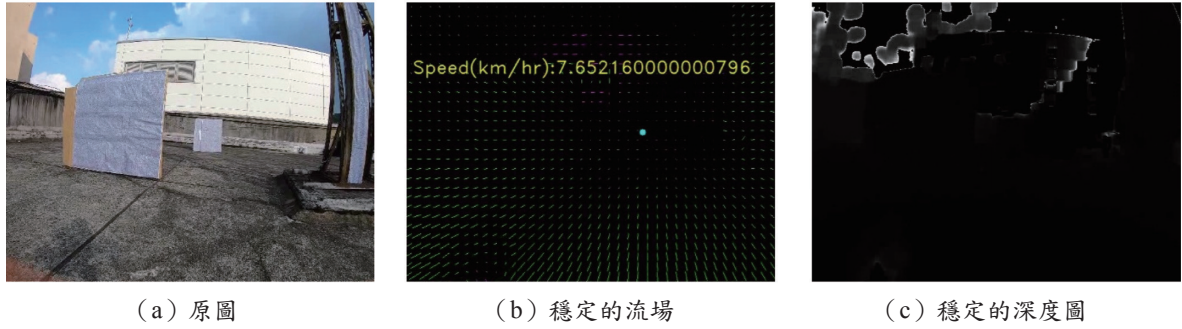


圖 18 震動畫面導致流場崩潰示意圖

資料來源：作者自行研究整理。

表 3 穩定畫面效果比較誤差表

誤差指標	無穩定畫面	穩定畫面
MSE (m ²)	213.497	106.979
RMSE (m)	13.838	8.539
MAE (m)	9.248	7.236
MSPE (%)	7723.799	60.579
MAPE (%)	408.328	62.266
Average FPS	4.688	4.829

資料來源：作者自行研究整理。

一、利用流場濾波器與無效距離濾波器改善精準度。

二、晃動與穩定影響程度報告。

本論文實驗在計算深度圖前加入濾波器後，使均方百分比誤差下降 20%；實驗無人機震動情況下，驗證穩定畫面的重要性，並使用濾波器排除造成誤差的流場例外狀況，使平均絕對百分比誤差下降 10%。

未來可以結合物件偵測，與本研究提出的深度圖演算法，將可以實踐前方障礙物距離偵測，或無人機避障。

參考文獻

- 楊豐瑞，2020，《單鏡頭前方視覺於先進駕駛輔助系統之應用》，國立高雄科技大學電子工程系碩士論文。
- Baraldi P., Micheli E. D., and Uras S., 1989, “Motion and Depth from Optical Flow,” in K. D. Baker (Ed.), *Proceedings of the Alvey Vision Conference 1989*, Manchester, UK: Alvey Vision Club. doi:10.5244/C.3.35
- Carrio A., Vemprala S., Ripoll A., Saripalli S., and Campoy P., 2018, “Drone Detection Using

- Depth Maps,” paper presented at *the 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Madrid, Spain. doi:10.1109/IROS.2018.8593405
- Delmerico J., Cieslewski T., Rebecq H., Faessler M., and Scaramuzza D., 2019, “Are We Ready for Autonomous Drone Racing? The UZH-FPV Drone Racing Dataset,” paper presented at *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Montreal, Canada. doi:10.1109/ICRA.2019.8793887
- Devos A., Ebeid E., and Manoonpong P., 2018, “Development of Autonomous Drones for Adaptive Obstacle Avoidance in Real World Environments,” paper presented at *the 2018 21st Euromicro Conference on Digital System Design (DSD)*, Prague, Czech Republic. doi:10.1109/DSD.2018.00009
- Farnebäck G., 2003, “Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion,” in J. Bigun and T. Gustavsson (Eds.), *Image Analysis*, Berlin, Germany. pp. 363-370. doi:10.1007/3-540-45103-X_50
- Geiger A., Lenz P., and Urtasun R., 2012, “Are We Ready for Autonomous Driving? The KITTI Vision Benchmark Suite,” paper presented at the *2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Providence, RI. doi:10.1109/CVPR.2012.6248074
- Jain R., 1983, “Direct Computation of the Focus of Expansion,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 5(1), 58-64. doi:10.1109/TPAMI.1983.4767345
- Obradović R., Vasiljević I., Kovačević D., Marinković Z., and Farkas R., 2019, “Drone Aided Inspection during Bridge Construction,” paper presented at *2019 Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference (ZINC)*, Novi Sad, Serbia. doi:10.1109/ZINC.2019.8769345
- Narasimhan S., 2006, “Optical Flow and Motion,” *Computer Vision Spring*, <https://slidetodoc.com/computer-vision-spring-2006-15-385-685-instructor-14/> (accessed July 21, 2021).
- Sambolek S., and Ivasic-Kos M., 2021, “Automatic Person Detection in Search and Rescue Operations Using Deep CNN Detectors,” *IEEE Access*, 9, 37905-37922. doi:10.1109/ACCESS.2021.3063681
- Shen Y., Guo D., Long F., Mateos L. A., Ding H., Xiu Z., Hellman R. B., King A., Chen S., Zhang C., and Tan H., 2020, “Robots Under COVID-19 Pandemic: A Comprehensive Survey,” *IEEE Access*, 9, 1590-1615. doi:10.1109/ACCESS.2020.3045792
- Suherman S., Putra R. A., and Pinem M., 2020, “Ultrasonic Sensor Assessment for Obstacle Avoidance in Quadcopter-Based Drone System,” paper presented at *2020 3rd International Conference on Mechanical, Electronics, Computer, and Industrial Technology (MECnIT)*, Medan, Indonesia. doi:10.1109/MECnIT48290.2020.9166607
- Worakuldumrongdej P., Maneewam T., and Ruangwiset A., 2019, “Rice Seed Sowing Drone for Agriculture,” paper presented at *2019 19th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, Jeju, South Korea. doi:10.23919/ICCAS47443.2019.8971461

- Ximenes A. R., Padmanabhan P., Lee M.-J., Yamashita Y., Yaung D. N., and Charbon E., 2018, "A 256×256 45/65nm 3D-Stacked SPAD-Based Direct TOF Image Sensor for LiDAR Applications with Optical Polar Modulation for up to 18.6dB Interference Suppression," paper presented at *the 2018 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*, San Francisco, CA. doi:10.1109/ISSCC.2018.8310201
- Zhong J., Li M., Liao X., Qin J., Zhang H., and Guo Q., 2021, "Real-Time Depth Map Estimation from Infrared Stereo Images of Rgb-D Cameras," *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2, 107-112. doi:10.5194/isprs-annals-V-2-2021-107-2021