

# 第二十一屆旺宏科學獎

## 成果報告書

參賽編號：SA21-325

作品名稱：利用變形霍夫轉換尋找小行星之研究

姓名：張皓凱

關鍵字：霍夫轉換、小行星搜尋、openCV

# 目錄

摘要.....	1
壹、前言.....	1
一、研究動機.....	1
二、研究目的.....	1
三、文獻回顧.....	1
(一) 影像處理.....	1
(二) SExtractor.....	4
(三) 霍夫轉換.....	5
貳、研究設備及器材.....	6
參、研究過程或方法.....	6
一、檔案屬性.....	6
(一) 泛星計畫 (Pan-STARRS) .....	6
(二) 國際天文搜索合作組織 (International Astronomical Search Collaboration, IASC) .....	6
(三) ps1、ps2.....	7
(四) 檔案.....	7
二、小行星定義.....	8
三、IASC 法.....	8
四、尋找小行星程式.....	10
(一) 第一種－對減.....	10
(二) 第二種－openCV .....	11
(三) 第三種－變形霍夫轉換.....	12
五、程式輔助影像搜尋小行星成效.....	14
六、程式與 IASC 法尋找比較.....	15
七、驗證變形霍夫轉換輔助影像搜尋小行星成效.....	15

肆、研究結果.....	17
一、尋找小行星程式.....	17
(一) 第一種－對減.....	17
(二) 第二種－openCV .....	18
(三) 第三種－變形霍夫轉換.....	18
二、不同程式輔助影像搜尋小行星成效差異.....	19
三、比較程式尋找與 IASC 法尋找之成效差異.....	20
四、驗證變形霍夫轉換輔助影像搜尋小行星成效.....	21
伍、討論.....	21
一、第一種－對減.....	21
二、第二種－openCV .....	22
三、第三種－變形霍夫轉換.....	22
陸、結論.....	23
柒、參考文獻資料.....	24

# 摘要

研究者在參加「國際天文搜尋聯盟」(International Astronomical Search Collaboration, IASC) 主辦之泛星計畫小行星搜尋活動後，產生利用合適程式運算以取代肉眼尋找小行星的想法，進而撰寫出不同的演算法以嘗試尋找小行星，並期望能夠超越原先小行星搜尋活動中利用肉眼搜尋的成效。研究中一共嘗試了三種方法，分別為：對減法、openCV 法及變形霍夫轉換法，其中前兩種是基於在不同時間的天文影像中尋找移動物體的原理，霍夫轉換則是將天文影像資料轉換成數值資料，且增加定義小行星運動規則的條件，使程式能夠透過運算尋找小行星。經實驗後得到對減法及 openCV 法的成效不佳，而變形霍夫轉換法可以找出較原先 IASC 法較多的小行星，顯示利用變形霍夫轉換法在尋找小行星上具有較佳的成效。

## 壹、前言

### 一、研究動機

研究者在一時加入了學校參與的 IASC 國際泛星計畫小行星搜尋活動，在活動期間，IASC 會釋出尚未經過科學家分析的影像，學生利用軟體找出望遠鏡影像資料中相較固定背景恆星的移動光點(如：小行星或彗星)，經過比對若非已知天體，便算初步發現。活動中，發現肉眼比對判讀移動光點的效率並不理想，不容易比對出物體是否移動。此外，圖片中移動距離較大的物體也不易找出。因此產生利用程式嘗試不同的演算法以自動在觀測影像中尋找出小行星的想法。

### 二、研究目的

本研究希望透過程式來達成以下目的：

- (一) 探討程式輔助影像搜尋小行星之成效
- (二) 比較不同程式輔助影像搜尋小行星成效差異
- (三) 比較程式尋找與 IASC 法尋找之成效差異
- (四) 驗證變形霍夫轉換輔助影像搜尋小行星成效

### 三、文獻回顧

#### (一) 影像處理

##### 1. 二值化

二值化是指將灰階照片轉換為只有黑白兩種顏色的步驟。二值化需要先設定一個閾值(threshold)，將所有灰階值大於閾值的像素點轉換為白色(255)，小於閾值的所有像素點轉

換為黑色(0)即完成二值化(如圖 1.1)。在本研究中，二值化可以用於將目標物與背景分離，應用於本研究將以將物體與背景分離恰可適用。

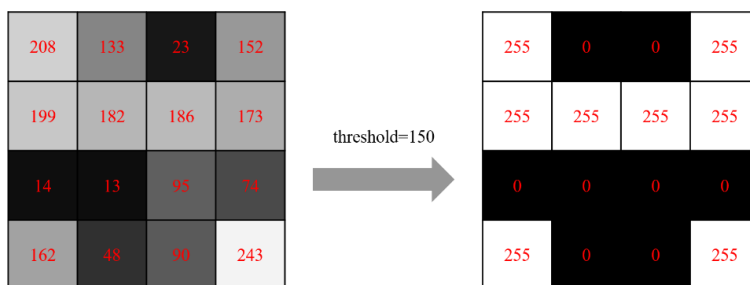


圖 1.1：二值化示意圖

## 2.輪廓

Suzuki algorithms 是一種用於尋找二元影像（只有 0 與 1）輪廓及同時確定輪廓之間階層式關係的演算法，於 1985 年由 Satoshi Suzuki 提出。本研究所使用的找輪廓為 openCV 套件內的 findContours 函式，根據 github-openCV (2021) 程式碼得知 openCV 函式是使用 Suzuki algorithms 來進行輪廓尋找。其詳細作法如下：首先，定義  $(i, j)$  為第  $i$  行第  $j$  個像素、 $f_{i,j}$  為第  $i$  行第  $j$  個的像素值，初始化  $NBD = 1$ ，初始化  $LNBD = 1$ （每新的一行都需初始化一次），在過程中像素值可以為任意整數，演算法中的像素值代表輪廓編號，並非影像顏色。完成初始化後，由上而下、由左而右對所有像素值大於 0 的像素執行下列步驟以找出輪廓（Satoshi Suzuki, 1985; kang & atul., 2019）：

第 1 步：找到輪廓開頭並判斷其為外輪廓 ( $f_{i,j} = 1$  且  $f_{i,j-1} = 0$ ) 或內輪廓 ( $f_{i,j} \geq 1$  且  $f_{i,j+1} = 0$ ) (如圖 1.2)。

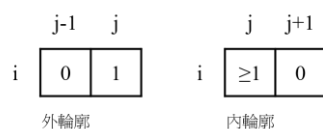


圖 1.2：內、外輪廓示意圖

1.1.若為外輪廓則  $NBD$  加一，且令  $(i_2, j_2) = (i, j-1)$ 。

1.2.若為內輪廓則  $NBD$  加一，令  $(i_2, j_2) = (i, j+1)$ ，且如果  $f_{i,j} > 1$ ，令  $LNBD=f_{i,j}$ 。

1.3.若非外、內輪廓，則跳到第三步。

第 2 步：逆時針描繪輪廓

2.1.令  $(i_1, j_1)$  為從  $(i_2, j_2)$  開始，以順時針方向繞  $(i, j)$  外圍八格所找到的第一個非 0 像素(如圖 1.3)，若無非 0 像素，則令  $f_{i,j} = -NBD$ ，且跳過剩餘步驟。

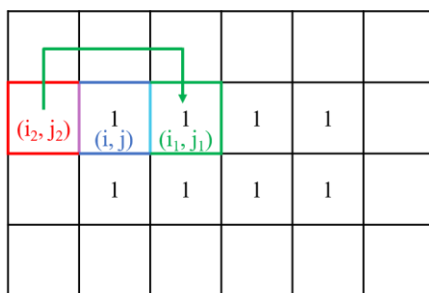


圖 1.3：Satoshi Suzuki 2.1 步作法

2.2. 令  $(i_2, j_2) = (i_1, j_1)$ 、 $(i_3, j_3) = (i, j)$

2.3. 令  $(i_4, j_4)$  為以  $(i_3, j_3)$  做中心且逆時針從  $(i_2, j_2)$  的下一像素開始，進行繞外圍八格的方式所找到的第一個非 0 像素（如圖 1.4）。

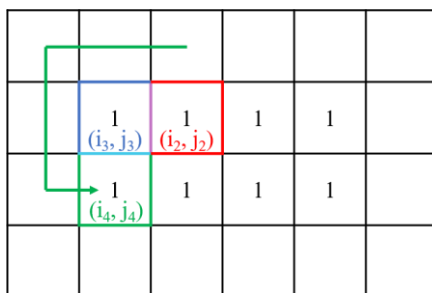


圖 1.4：Satoshi Suzuki 2.4 步作法

2.4. 若  $(i_3, j_{3+1})$  屬於輪廓外值為 0 的像素，令  $f_{i_3, j_3} = -NBD$ 。若  $f_{i_3, j_{3+1}}$  不為 0 且  $f_{i_3, j_3}$  為 1，令  $f_{i_3, j_3} = NBD$ ，否則不變動  $f_{i_3, j_3}$ 。但若有改變值，且該改變後的值為首次出現，即設定該值的絕對值為原值的子節點。

2.5. 若  $(i_4, j_4)$  等於  $(i, j)$ 、 $(i_3, j_3)$  等於  $(i_1, j_1)$ （即回到輪廓開始的點），則跳到第三步。否則令  $(i_2, j_2) = (i_4, j_4)$ 、 $(i_3, j_3) = (i_4, j_4)$  後跳回 2.3 步。

第三步：若  $f_{i, j}$  不等於 1，令  $LNBD = |f_{i, j}|$ 。

圖 1.5 a 為一張二元影像範例，經過 Suzuki algorithms 標記後如圖 1.6 b, c。圖 1.6 b 中像素值之絕對值相同者（不包含 0）為一個輪廓，而圖 1.6 c 的樹代表所有編號為子節點數值得輪廓皆為父節點編號輪廓的一部分，用於區分外邊界及洞邊界，但在本研究中不會需要區分外邊界及洞邊界。在本研究中，因為需要計算物體面積大小，故須先使用找輪廓演算法找出物體範圍。

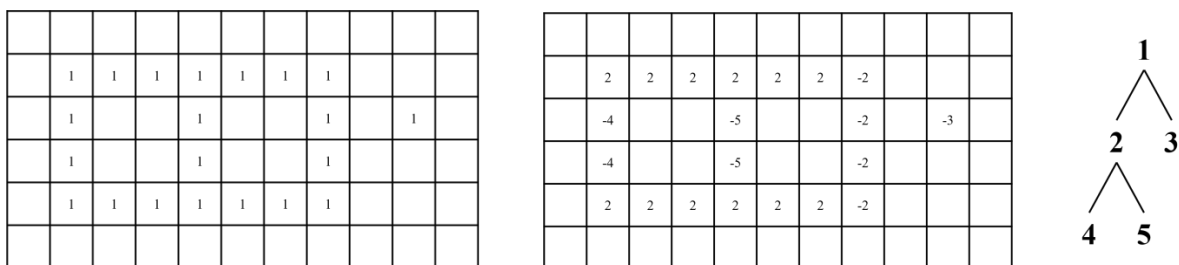


圖 1.5：(a) Suzuki algorithms 範例輸入圖，(b) (a) 運算後的輸出圖，(c) 輪廓間關係樹

## (二) SExtractor

SExtractor (Source-Extractor) 是一個程式輔助，用於生成天文影像中物體的目錄，主要用途是用於簡化測光程序 (SExtractor doc)，可以將原先的影像圖片轉換成數值資料。故而，本研究可以藉此程式先將檔案中所有物體找出後再篩選符合小行星運動條件的物體來達成研究目的。

根據 SExtractor doc (2017) 得知，SExtractor 主要分為三個部分：偵測及分隔、加權、標記 (如圖 1.6)。偵測及分隔主要透過背景減去、卷積 (convolution)、定限 (thresholding)、去混合 (deblending) 等方法將所有物體從背景中凸顯出來；加權利用不同的 map 將不良像素進行修復；標記則是將此物體的警告標出，例如：此物體原先與其他物體混和、物體過於靠近圖片邊緣.....，而若有多餘一個的警告則將所有警告代碼相加。實作上，研究者只需要輸入指令：sextractor 檔名，SExtractor 即可將該輸入檔案中的所有物體找出後並產生目錄 (如圖 1.6)，透過目錄可以得知該物體的 7 項屬性，分別為：1. SExtractor 給予所有偵測物體的編號、2~4.與通量相關的一些數值，此屬性不再本研究範圍、5, 6.標記物體在圖象中的位置，為本研究主要取用的參數、7.此物體的警告標記。因為 SExtractor 有將物體從背景中提取出的能力，而本研究洽有此需求，故在後續研究中使用此程式作為輔助。

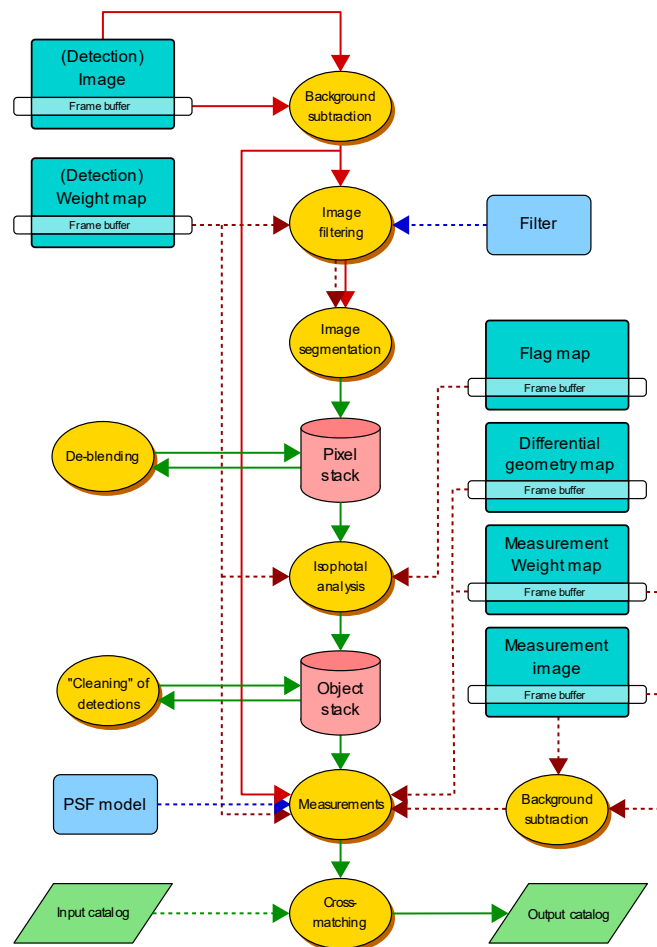


圖 1.6：SExtractor 影像處理流程圖 (圖片來源：SExtractor 2.24.2 documentation)

#	1	NUMBER	Running object number					
#	2	FLUXERR_ISO	RMS error for isophotal flux					[count]
#	3	FLUX_AUTO	Flux within a Kron-like elliptical aperture					[count]
#	4	FLUXERR_AUTO	RMS error for AUTO flux					[count]
#	5	X_IMAGE	Object position along x					[pixel]
#	6	Y_IMAGE	Object position along y					[pixel]
#	7	FLAGS	Extraction flags					
	8	1	3764.868	747448.2	10492.93	22.754	235.479	16
	9	2	828.0099	39704.37	2326.987	1348.835	25.609	0
	10	3	1063.672	76492.82	2480.167	831.184	18.702	0
	11	4	667.3866	42440.16	2460.729	2201.163	15.110	16
	12	5	1087.915	77256.33	3082.092	91.439	13.187	16

圖 1.7：SExtractor 產生之物體目錄（僅列出前五列作為範例）

### （三）霍夫轉換

霍夫轉換 (hough transform) 是由 Paul Hough 於 1962 提出的一種用於尋找二元圖片中規則形狀的演算法，1981 年 D.H. Ballard 則提出了能偵測不規則形狀的泛用霍夫轉換 (Generalized Hough Transform)。在此針對本研究中使用的霍夫轉換直線偵測說明如下：

在二元圖片中，已知若干點在同一直線上，則所有點必皆符合同一直線方程式。霍夫轉換是將圖片中每一個黑色像素通過該點的所有直線列出，並利用累積器 (accumulator) 記錄每一條直線方程式出現的次數，若某一條直線方程式出現次數大於設定值則代表此直線方程式為圖中某一條直線。在實作上，直線方程式會採用  $r = x \cos \theta + y \sin \theta$  (如圖 1.8 a) 而非  $y = mx + c$ ，因為對於每一個點程式需列出所有其所有通過該點的直線斜率，而斜率範圍介於正負無限之間無法全數列出。而使用  $r = x \cos \theta + y \sin \theta$ ， $\theta$  可限定在  $0^\circ$  到  $180^\circ$  之間，只需將所有  $\theta$  帶入方程式即可。圖 1.8 b 為範例輸入圖片，經過霍夫轉換後可以得到圖 1.8 d，其中較多線的焦點即為直線方程式的  $(r, \theta)$ ，其中圖 1.8 d 中的橫向為  $\theta$  縱向為  $r$ ，其圖形為正弦函數。

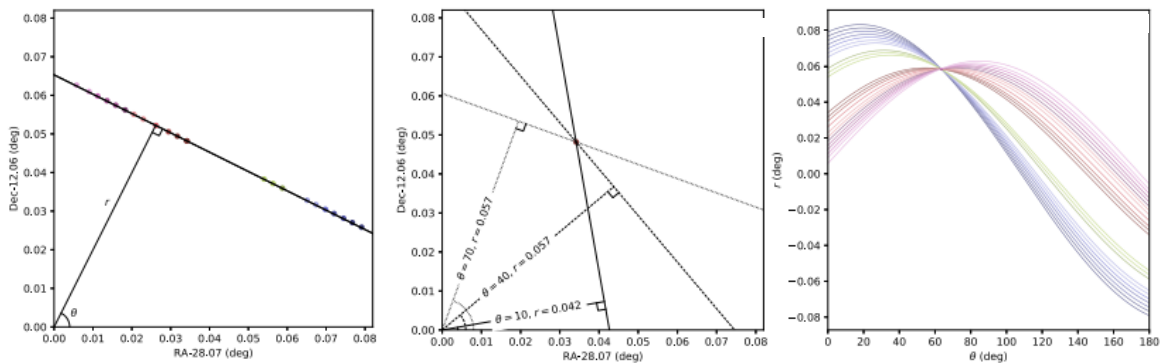


圖 1.8：(a)霍夫轉換範例輸入，(b)一個點可以由不同  $(r, \theta)$  參數的直線方程通過，(c)霍夫轉換累積器（圖片來源：Kai-Jie Lo et al, 2020）

承上述說明，透過霍夫轉換此一分辨二元圖片中規則形狀的演算法，推測可以用在分辨本研究目的的影像中之移動光點。



## 貳、研究設備及器材

本研究所使用的設備與器材，硬體方面為桌機（CPU：R7-3700x，32GB 記憶體），而軟體方面可分為開發環境、程式所使用相關套件及其他軟體套件，完整細項詳列如下：

### 一、開發環境

（一）Window 10 作業系統：用於撰寫大部分的程式，Vscode、python 3.8.8。

（二）Linux Ubuntu 14.04（安裝於 VirtualBox）：用於使用 sextractor 套件，Vscode、python 3.4.3。

### 二、程式所使用相關套件

astropy 4.3.1、kapteyn 3.0、numpy 1.19.5、opencv-python 4.5.1.48、pandas 1.3.2、pillow 8.4.0、sklearn。

### 三、其他軟體套件

Astrometrica、fv fits viewer、sextractor。

## 參、研究過程或方法

### 一、檔案屬性

#### （一）泛星計畫（Pan-STARRS）

泛星計畫為嶄新的國際合作大型巡天計畫，是基於避免天體撞擊地球可能帶來的全球性災難，進而發展出搜尋可能危害地球的小型天體計畫（中央大學天文所，2010）。此計畫利用夏威夷的天文望遠鏡在全天區進行天文測量和光度測定。藉由比較同一天區不同時間的變化以期能發現彗星、小行星、變星等光度變化明顯或移動距離明顯的天體；尤其是有撞擊地球威脅性的近地天體。

#### （二）國際天文搜索合作組織（International Astronomical Search Collaboration，IASC）

IASC 為是一項公民科學計畫，主旨在為世界各地的公民科學家提供天文數據，使這些公民科學家可以參與實踐天文學。此計畫目前主要關注小行星搜索活動，在一個月的資料分析期間，公民科學家可以取得泛星計畫(Pan-STARRS)的影像資料，並透過天文軟體 Astrometrica 分析觀測資料以找尋小行星，其觀測資料透過 Astrometrica 開啟後呈現如圖 3.1。

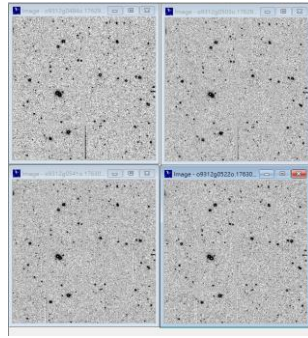


圖 3.1 IASC 提供的原始檔案（資料來源：IASC，2021）

### （三）ps1、ps2

本研究所使用的圖片皆由 PS1 及 PS2 望遠鏡（如圖 3.2）拍攝，根據 Spanish Virtual Observatory（2021）'Filter Profile Service'目錄，可以得知 PS1 望遠鏡所偵測的波段範圍會隨著它所使用的濾鏡而改變，且一共有 7 種濾鏡，分別為 g、r、w、open、i、z、y，其所對應到的波長如圖 3.3，而 PS2 所使用的濾鏡與 PS1 相同。本研究所使用的官方資料濾鏡皆為 w，其範圍為波長 3966.3~8343.70Å，大約為可見光與少部分的紅外線。



圖 3.2 望遠鏡 PS1 的照片（圖片來源：Pan-STARRS1）

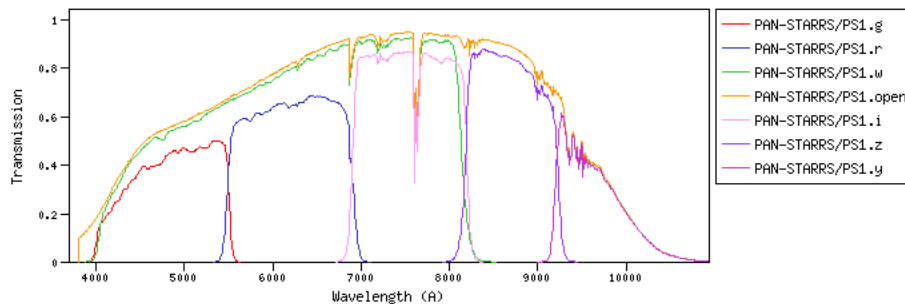


圖 3.3 濾鏡與波長對應圖（圖片來源：SVO）

### （四）檔案

本研究使用的檔案為 2013、2019~2021 年 IASC 所提供之檔案，其格式皆為.zip 檔，解壓縮後可得到一個包含 4 個 FITS（Flexible Image Transport System）檔的資料夾。

從 FITS 官方網站（2021）得知，FITS 是一種天文標準檔案格式，儲存含有照片及其他描述照片內容的相關資訊，其可使用 fv fits viewer 軟體（以下皆簡稱 fv）開啟，開啟後會得到三個類項，分別為：image、header、table。內容說明簡述如下：

- 1.image，顯示的是檔案 table 中數值以對應的色塊呈現所轉換出的圖片。
- 2.header，儲存與照片的所有相關資訊，例如：拍攝時間、拍攝時望遠鏡所對的天球座標、

坐標軸旋轉角度、濾鏡等。

3.table，則是記錄每個像素之數值，然而這裡的數值並未在檔案或官方資料中找到所代表的意義，但依據數值與圖像之間的對應關係，本研究推估是接收到的電磁波強度。因為在圖中有物體之處，所包含範圍對應到的數值較高，愈往中心愈高，無物體處則較低。

## 二、小行星定義

本研究所指的小行星為任何具有 IASC 要求條件之物體，是否真實為小行星須交由 IASC 進行軌道運算的判定，而判定方法不在本研究範圍內，故假設所有找到符合條件的物體皆為小行星。根據 IASC 搜尋指引《Astrometrica guides - 3. Signature Guide》(2022) 指出，小行星須符合三個條件：1.運動軌跡為直線，2.運動速度需穩定，3.星等需穩定。因為星等大小無法從圖像中直接取得，所以在後續研究中將以前兩個標準作為小行星的判定依據。

## 三、IASC 法

本研究所指的 IASC 法為參加 IASC 計畫時尋找小行星的方法，此方法為透過天文軟體 Astrometrica 完成，利用此方法尋找小行星一組影像檔所花費的時間大約為 20~30 分鐘/組，具體作法如下：

1.在 Astrometrica 中開啟四張 fits 檔案，圖 3.4 的檔案。

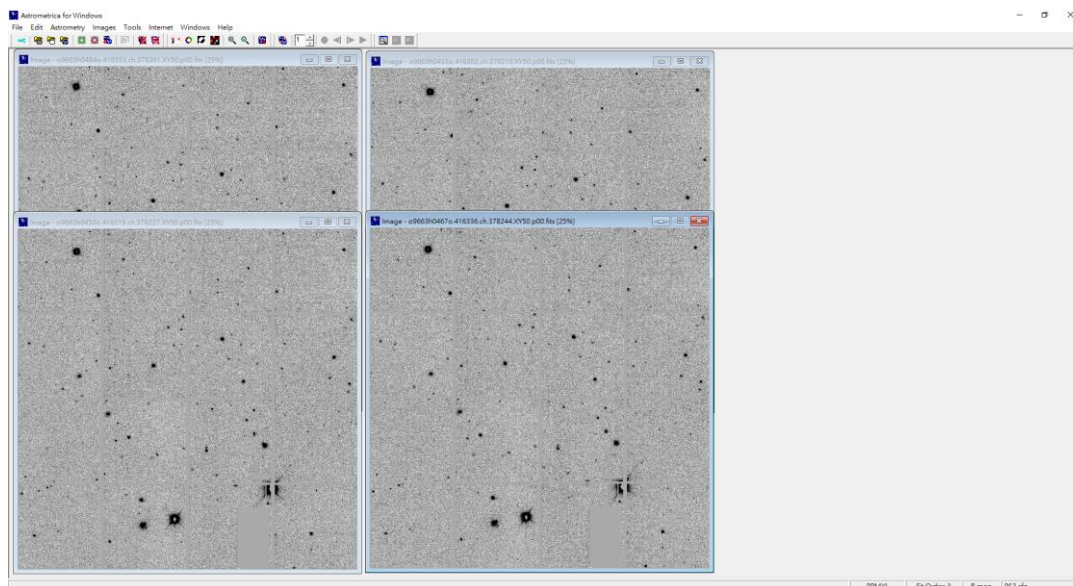


圖 3.4 IASC 提供的原始檔案圖（資料來源：IASC，2022）

2.使用「Astrometric Data Reduction」及「Known Object Overlay」兩個功能標記出圖 3.4 物體及已知小行星，圖 3.5 後的檔案。

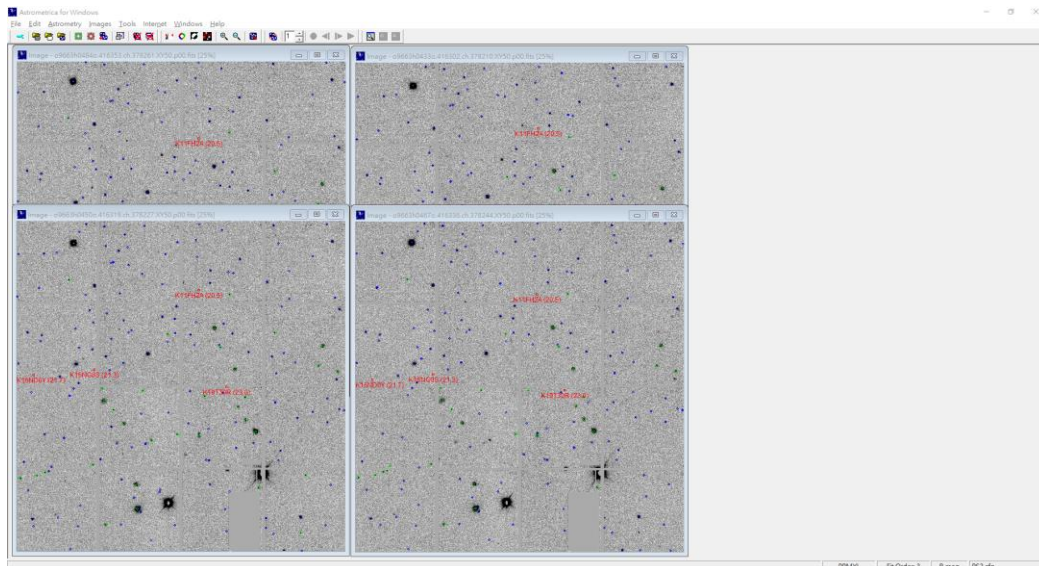


圖 3.5 Astrometrica 標記後檔案（資料來源：IASC，2022）

3.使用「Blink Current Images」使四張照片於同一視窗中快速閃爍，並用肉眼在快速閃爍的圖片中找到符合小行星移動方式的物體，圖 3.6 標記為一顆小行星（圖中紅圓框）於四張圖中的位置變化。

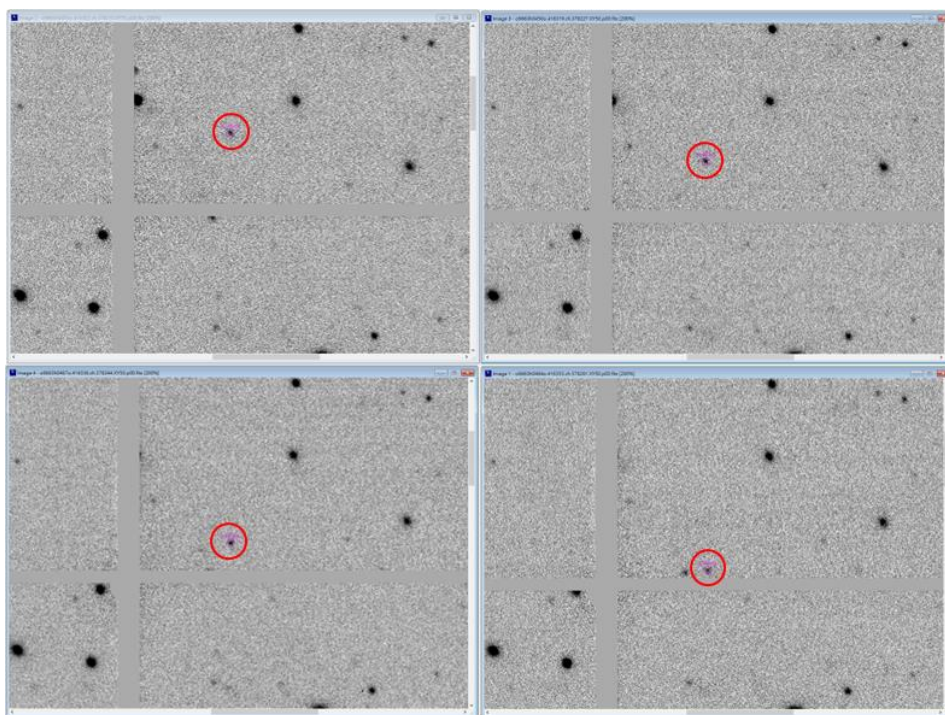


圖 3.6 IASC 法標記後其中一顆小行星示意圖（資料來源：IASC，2022）

4.最後，將 Astrometrica 自動生成的 MPC<sup>1</sup>報告（如圖 3.7）繳交給 IASC 即完成一份資料的尋找。

<sup>1</sup> 小行星中心（Minor Planet Center）是負責蒐集小行星和彗星觀測資料、計算其軌道的官方組織，並通過小行星通報發布相關訊息。

```

ps2-20220325_1_XY50_p00.txt - 記事本
檔案(F) 編輯(E) 格式(O) 檢視(V) 說明
COD F52
OBS J. Bulger, T. Lowe, A. Schultz, M. Willman
MEA T. Vorobjov, PS1 Science Consortium
TEL 1.8-m f/4.4 Ritchey-Chretien + CCD
ACK MPCReport file updated 2022.04.02 22:17:40
NET PPMXL
K16ND0Y C2022 03 25.48760413 09 02.218+00 19 43.97 21.3 R F52
K16ND0Y C2022 03 25.49851913 09 01.585+00 19 48.25 21.3 R F52
K16ND0Y C2022 03 25.50932513 09 00.985+00 19 51.91 21.2 R F52
K16NG0S C2022 03 25.48760413 09 05.538+00 21 26.28 21.4 R F52
K16NG0S C2022 03 25.49851913 09 04.924+00 21 30.69 21.3 R F52
K16NG0S C2022 03 25.50932513 09 04.372+00 21 35.67 21.1 R F52
K16NG0S C2022 03 25.52014213 09 03.757+00 21 40.48 21.0 R F52
TFH2001 C2022 03 25.48760413 09 19.363+00 23 37.73 20.3 R F52
TFH2001 C2022 03 25.49851913 09 18.810+00 23 41.18 20.1 R F52
TFH2001 C2022 03 25.50932513 09 18.265+00 23 44.75 19.6 R F52
TFH2001 C2022 03 25.52014213 09 17.739+00 23 48.19 20.4 R F52
----- end -----

```

圖 3.7 IASC 法標記後的 MPC report

#### 四、尋找小行星程式

##### (一) 第一種一對減

因為小行星係指在影像中有移動軌跡的物體，故本研究一開始朝向尋找在影像中有移動的物體，來達成尋找小行星的目的。本研究嘗試的第一種方法為利用物體於不同時間的位置差異進行判定。若圖像中有小行星，則該物體在兩張照片的位置必不同；反之，若有不移動物體，則在兩張照片之位置相同。IASC 所提供之同組資料夾中的四個檔案為同一天區不同拍攝時間的影樣。將兩張照片同一位置的像素值相減，做為相減後照片該像素的值。如此，對減後的圖像只會留下在兩張照片中位置不同的物體，即移動物體。根據各項數值的差異，會在對減後的數值加上絕對值，以期能將結果圖像化。例如：圖 3.5 中原本於 (2, 0) 的物體移動到 (0, 3) 後，將兩張照片對減後即可得到移動物體的位置，而無移動的物體位如圖 3.5 中的 (3, 2)，在對減後就會遭到刪除。

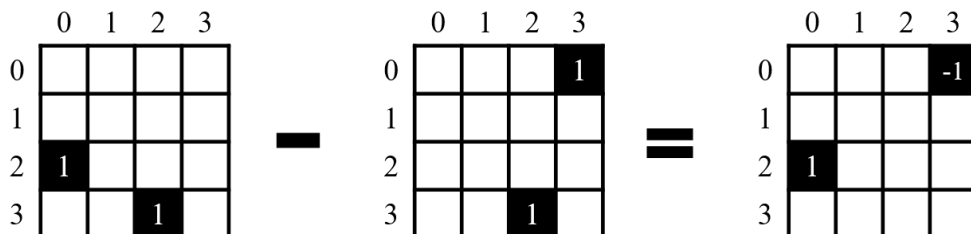


圖 3.5：對減方法示意圖

本研究進行時間差異運用的流程圖如圖 3.6，在輸入 fits 檔後先將同一資料夾內的四張圖片利用 `kapteyn` 套件對齊天球座標，使圖片在相減時能更加精確，接著將四張圖片都以閾值

1300 與 10000 做二值化，用於去除影像中的背景雜質。需進行二值化是因為在測試時發現，背景中的雜訊的分布過多且雜亂，若未將影像先做二質化，則會使得對減後圖像中的雜訊增為兩倍影響，而讓判讀時的難度隨之增加（如圖 3.7）。研究中此的閾值是根據 fv fits viewer 開啟後切換至與在 Astrometrica 軟體中相同的色階，比對影像的色塊與圖 3.8 所列的 colorbar 進而估計閾值大小而定。閾值使用觀察法是因為在 python 的函式庫中找不到相似的色階，因此無法準確取得黑白兩種顏色的分隔點做為兩個閾值。定義此研究中影像閾值，再利用照片對減，即可得到有移動物體的位置，一組照片中的小行星數量不多，再透過肉眼篩選挑出符合小行星移動條件的物體即完成。

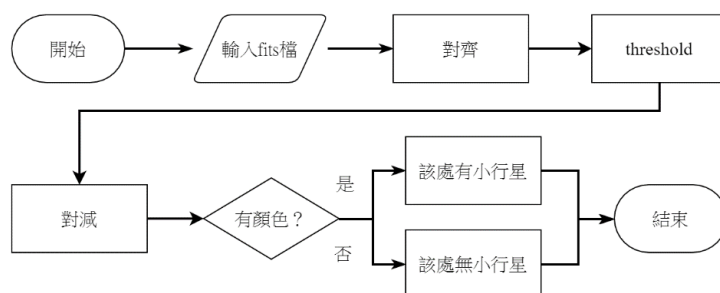


圖 3.6：對減方法流程圖

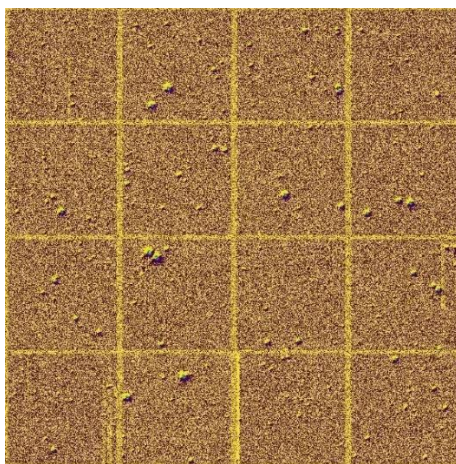


圖 3.7：未經二值化對減結果圖



圖 3.8：Bowlerhat colorbar

## (二) 第二種—openCV

由於第一種對減的方法成效不佳，可顯著辨識出的小行星正確度低，故而本研究將對減法的後半部分改良以做為第二種方法再進行試驗。分析完對減方法的結果圖後，發現造成結果圖中的雜訊多數為面積較小輪廓，推測為物體大小變化、物體些微移動等影響。故於對減後再進行一次二值化以強化兩張圖之間的差值，接著利用 openCV 針對對減後的圖像進行輪

廓尋找，並計算輪廓面積後，將面積大於 50 像素的圖形標記並輸出成圖片，藉此去除物體大小變化、物體些微移動等影響，輸出圖中含有標記的圖像即為有小行星移動之位置，其流程圖如圖 3.9。

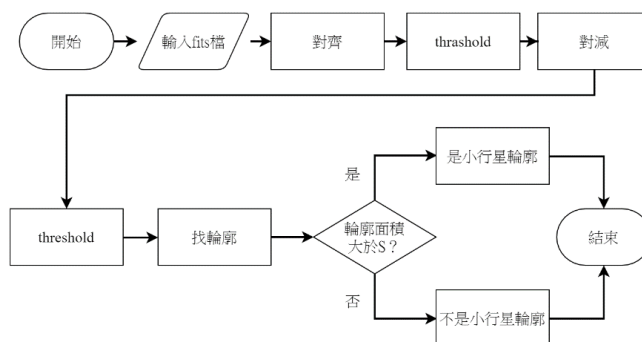


圖 3.9：openCV 方法示意圖

### (三) 第三種－變形霍夫轉換

由於前兩種方法的效果皆未達本研究預期，故再嘗試第三種方法。從前兩種方法得知，若想要改進尋找小行星成效則必須改變小行星從背景中分離出來的方法。在前述方法中，程式未能辨別雜訊與目標光點間的差異，以至於過多的背景雜訊影像程式辨別。不同時間的影像變化，會因為背景雜訊等因素而不易區辨，估思考將影像資料轉換為數值資料。本研究透文獻探討後發現 SExtractor 簡化且大量測定影像光點，此特性應可以協助達成研究目的。而因為 SExtractor 尋找出的物體為數值資料，無法繼續使用之前圖像處理的方式尋找，因此得找尋其他演算法。

根據 Kai-Jie Lo et al (2020) 指出，可以透過霍夫轉換尋找直線的特性來尋找小行星。故本研究第三種方法即利用 SExtractor 搭配霍夫轉換取代時間差異來尋找小行星，流程圖如圖 3.10。首先透過 SExtractor 找出照片中所有的物體（如圖 3.11），並以這些物體位置做為霍夫轉換運算時的基準點。一開始嘗試過使用 openCV 中的 HoughLinesP 函式進行霍夫轉換，找出所有通過三個點以上的直線，但因為此函式無法將不同照片的點分開判別，故產生過多線的情形，如圖 3.12 中原先設定使用綠色將程式找出的線畫出，但在圖中可見因為現過多而導致整張圖都變成綠色。

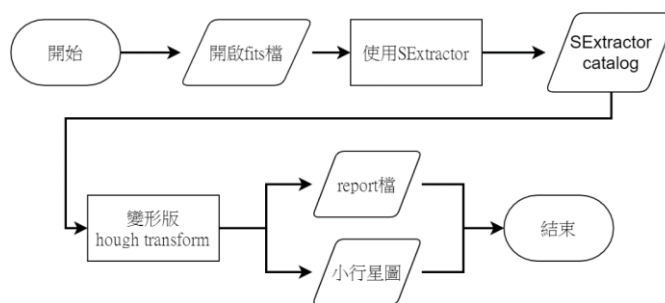


圖 3.10：變形霍夫轉換示意圖

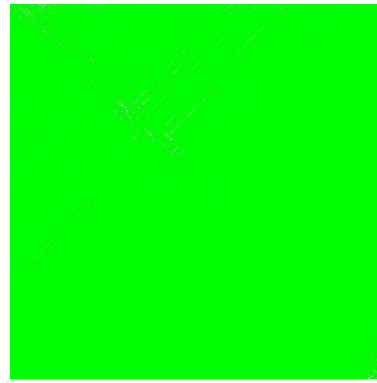
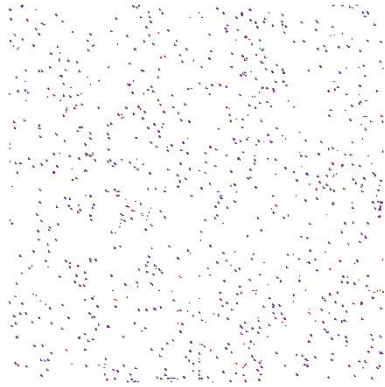


圖 3.11：SExtractor 找出的所有物件 圖 3.12：利用 HoughLinesP 進行霍夫轉換後的結果

為解決程式產生過多直線最後無法判讀的問題，本研究重新撰寫霍夫轉換函式將原本的霍夫轉換稍作變形以更符合研究之需求，命名為變形霍夫轉換。在變形霍夫轉換（部分範例如圖 3.13），將直線方程式成立的條件增加原則：必須由三張以上圖片的點構成、點與點之間的距離需和其照片順序差成正比（ $\frac{d}{\Delta t} = C$ ），以此篩選運動速率相等的物體。例如：圖 3.13 中的(3)綠色點與紫色點距離需為紅色到綠色點距離的兩倍，因為前者差了兩張圖片，而後者只差了一張，故在變形霍夫轉換中仍認定其為一直線。變形霍夫轉換於開始尋找直線前會將四張圖都在同一位置的點刪除，藉此減少最後輸出的直線數量。實做上本研究所使用的參數如下： $\theta$  每次改變  $0.1^\circ$ ， $r$  值相差小於  $0.0001^\circ$  且  $\theta$  相同就視為同一條直線。霍夫轉換所得的直線為小行星的運行軌跡，而線上的點即為小行星在不同時間的位置。

	(1)	(2)	(3)	(4)
紅 - 第一張 綠 - 第二張 藍 - 第三張 紫 - 第四張				
霍夫轉換	是	是	否	是
變形霍夫轉換	是	否	是	否
判準原則	<input checked="" type="checkbox"/> $\frac{d}{\Delta t} = C$ <input checked="" type="checkbox"/> 由三張以上點構成	<input type="checkbox"/> $\frac{d}{\Delta t} = C$ <input checked="" type="checkbox"/> 由三張以上點構成	<input checked="" type="checkbox"/> $\frac{d}{\Delta t} = C$ <input checked="" type="checkbox"/> 由三張以上點構成	<input checked="" type="checkbox"/> $\frac{d}{\Delta t} = C$ <input type="checkbox"/> 由三張以上點構成



圖 3.13：霍夫轉換與變形霍夫轉換對不同狀況之結果

變形霍夫轉換執行完後會輸出兩個檔案，分別為數值檔（如圖 3.14）及一張圖片（如圖 3.15）。數值檔為程式自動找到的小行星在第  $n$  張時的天球座標數值，而圖片則是將數值檔紀錄的小行星位置以圖像方式比標記，以利後續判讀。繪製時不同圖片使用不同顏色繪製，一到四張分別為紅、綠、藍、紫，同一顆小行星之間的點用一條黑色線段連接。從圖 3.14 可以看出雖然在數值檔中顯示找到了 6 顆小行星，但其中有兩顆從圖 3.15 b 中明顯可被認定為相同的小行星，故本研究在後續統計中，將此類狀況合併記為 1 顆小行星。

3	230.79789791729522	-13.19370191922331
2	230.86421370916918	-13.169783570307407
1	230.93081486198056	-13.145672731801204
1	230.80977090134326	-13.06213129004493
2	230.8698668669873	-13.071233077603958
3	230.93034710924147	-13.080131225822948
3	230.85985146796034	-13.107690060327581
2	230.86174539495457	-13.108388949581482
1	230.86364447880493	-13.109079863285269
3	230.85985146796034	-13.107690060327581
2	230.86174539495457	-13.108388949581482
0	230.86553263181847	-13.109875700625599
2	230.87193853079643	-13.099973030444675
1	230.8737026949075	-13.100774629884699
0	230.87547701533907	-13.101584835690106
2	230.84367109737806	-13.050172687381469
1	230.84462833953125	-13.050842128358354
0	230.84564919046312	-13.051421909962613

圖 3.14：變形霍夫轉換法結果數值檔（紅框為同一顆小行星）

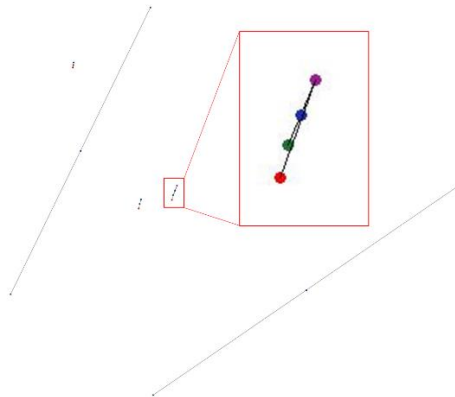


圖 3.15：(a) 將圖 3.14 繪製於圖上的結果（底圖），(b) 紅框處局部放大圖

## 五、程式輔助影像搜尋小行星成效

本研究中對於程式搜尋小行星成效之優劣主要使用四個指標來衡量：尋找到的小行星數量、找到已知小行星的比例以、圖片中的雜訊（任何無法確定為小行星之物體）量及從開始處理資料到標記完縮花時間。每種方法將利用三組資料中的已知小行星與程式找尋後的結果進行比對，計算出四項指標。四項指標以尋找到的小行星數量越多、越接近雜訊為 0、找到

已知小行星比例越接近 100%及所花費時間越少者成效越佳。尋找到的小行星數量及找到已知小行星的比例代表此方法找尋小行星的能力，而圖片中的雜訊量則代表後續對於判讀程式結果之難易度，而花費時間則可以評估程式的效率，藉此找出適合搜尋小行星的程式。

## 六、程式與 IASC 法尋找比較

本研究最後將以比較最終選定程式及 IASC 法找到的所有小行星數目差異及兩者花費時間做為評斷程式尋找小行星的效益。一共將所有的小行星分為三類：(1)僅 IASC 法尋得、(2)僅程式尋得、(3) IASC 法及程式皆尋得。分類標準為將 IASC 法及程式所找到的小行星全數列出，並利用小行星於不同圖片的天球座標位置逐一比對找出程式及 IASC 法都有找到的小行星。最理想的狀態為，程式不僅能找到所有 IASC 法找到的，且還能找到 IASC 法找不到的小行星，即只有 IASC 法找到的數量為 0，只有程式找到的數量越多越好，代表能達到優於 IASC 法的成效。

## 七、驗證變形霍夫轉換輔助影像搜尋小行星成效

此部分為驗證變形霍夫轉換程式的成效，驗證方法為，以第二次參加泛星計畫時，計劃期間所取得的全部資料經過變形霍夫轉換尋找後，與相同資料使用 IASC 法尋找結果比較。程式採用的評斷方法於前面相同，將找到的未知小行星一樣分為三類：(1)僅 IASC 法尋得、(2)僅程式尋得、(3) IASC 法及程式皆尋得，並利用小行星於不同圖片的天球座標位置逐一比對找出程式及 IASC 法都有找到的未知小行星。此處只考慮未知小行星原因為，已知小行星無論有無在程式中被找出，最後在標記時皆可透過 Astrometrica 找出，不影響最後繳交的 MPC report。

前述「程式與 IASC 法尋找比較」與「驗證變形霍夫程式成效」的差異在於，前者為類似 AI 中的訓練資料，會依照程式的結果對程式進行更改，而後者則是類似 AI 中的測試資料，僅驗證程式成效，不會再對程式進行更改。

評斷是否為小行星的方法為，將變形霍夫轉換找出的圖像疊在原本的影像檔上，以此確認小行星在影像中的位置。同時篩選掉有 1（當該小行星有 3 個點時）或 2（當該小行星有 4 個點時）個以上點在邊界上的物體（如圖 3.16）。會產生在邊界上的物體原因為 Sextractor 在提取物體時，對於圖像邊界的處理不佳，容易將邊界視為物體。評斷變形霍夫轉換與 IASC 法找出是否為同一顆小行星方法為，將變形霍夫轉換的數值檔座標與 MPC report 的座標做對

應（如圖 3.17），若為相近則視為同一顆。

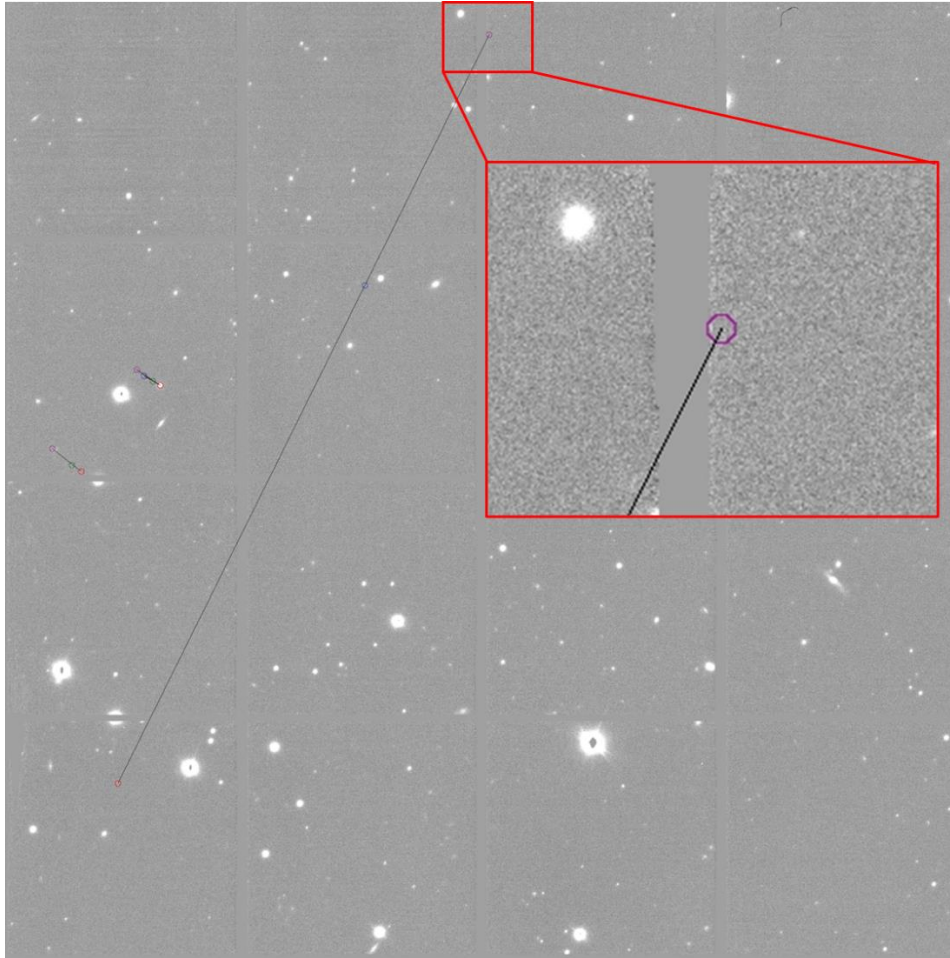


圖 3.16：（紅框處為位於邊界上的其中一點）

MPC report

```

COD F52
OBS J. Bulger, T. Lowe, A. Schultz, M. Willman
MEA T. Vorobjov, PS1 Science Consortium
TEL 1.8-m f/4.4 Ritchey-Chretien + CCD
ACK MPCReport file updated 2022.04.02 22:17:40
NET PPHXL
K16ND0Y C2022 03 25.48760413 09 02.218+00 19 43.97 21.3 R F52
K16ND0Y C2022 03 25.49851913 09 01.585+00 19 48.25 21.3 R F52
K16ND0Y C2022 03 25.50932513 09 00.985+00 19 51.91 21.2 R F52
K16NGOS C2022 03 25.48760413 09 05.538+00 21 26.28 21.4 R F52
K16NGOS C2022 03 25.49851913 09 04.924+00 21 30.69 21.3 R F52
K16NGOS C2022 03 25.50932513 09 04.372+00 21 35.67 21.1 R F52
K16NGOS C2022 03 25.52014213 09 03.757+00 21 40.48 21.0 R F52
TFH2001 C2022 03 25.48760413 09 19.363+00 23 37.73 20.3 R F52
TFH2001 C2022 03 25.49851913 09 18.810+00 23 41.18 20.1 R F52
TFH2001 C2022 03 25.50932513 09 18.265+00 23 44.75 19.6 R F52
TFH2001 C2022 03 25.52014213 09 17.739+00 23 48.19 20.4 R F52
----- end -----
    
```

變形霍夫轉換數值結果

3 13 09 22.341 +00 19 56.40	3 13 09 17.894 +00 23 50.24
2 13 09 26.231 +00 22 18.53	1 13 09 18.977 +00 23 42.95
1 13 09 30.175 +00 24 41.90	0 13 09 19.526 +00 23 39.40
0 13 08 51.353 +00 21 21.58	3 13 09 03.845 +00 21 43.76
1 13 09 04.537 +00 23 03.06	2 13 09 04.442 +00 21 39.23
3 13 09 31.129 +00 26 27.89	0 13 09 05.629 +00 21 29.71
1 13 09 14.448 +00 28 59.48	0 13 09 12.075 +00 27 26.21
2 13 09 23.917 +00 28 05.82	2 13 09 24.076 +00 25 45.59
3 13 09 33.475 +00 27 11.52	3 13 09 30.062 +00 24 55.44
1 13 09 08.058 +00 24 14.75	2 13 09 01.700 +00 27 11.57
2 13 09 16.811 +00 23 24.89	1 13 09 01.780 +00 27 09.37
3 13 09 25.587 +00 22 34.34	0 13 09 01.872 +00 27 07.28
3 13 09 14.042 +00 29 05.99	1 13 09 14.448 +00 28 59.48
2 13 09 23.898 +00 28 06.83	2 13 09 20.248 +00 25 40.39
1 13 09 33.809 +00 27 06.90	3 13 09 26.111 +00 22 19.85
2 13 09 18.430 +00 23 46.75	
1 13 09 18.977 +00 23 42.95	
0 13 09 19.526 +00 23 39.40	

圖 3.17：（圖中顏色相同的方框為對應到的小行星，綠色在變形霍夫轉換中有兩個是因為程式將點個數為 4 的小行星分為兩段點個數為 3 的線標出，在後續統計中計為同一顆）

## 肆、研究結果

### 一、尋找小行星程式

#### (一) 第一種一對減

圖 4.1 為輸入的照片，透過對減方法得出的結果圖片如圖 4.2。圖 4.1 紅框處為一顆為一個等距直線移動的物體即小行星，由此可知利用此方法尋找小行星是可行的，但在圖 4.1 中藍框處及其他許多點皆為肉眼明顯可判斷沒有在移動的物體即雜訊，此方法的各項指標統計如圖 4.3。從圖中可以看出在三組資料當中只有找到 1 顆小行星，雜訊數量卻高達平均每張 65 筆，尋找到已知小行星的比例也只有 13%。故此方法對於尋找小行星之成效尚可。此方法所花費時間約為 10 分鐘/組，大多時間花費於對照三張照片中的移動物體。

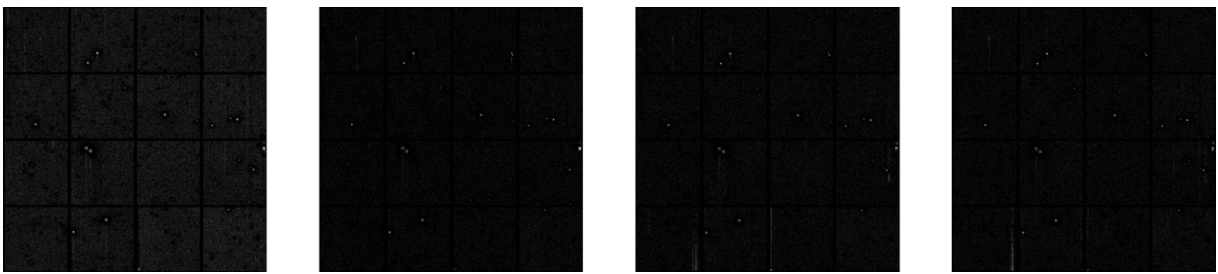


圖 4.1：輸入資料（資料來源：IASC）

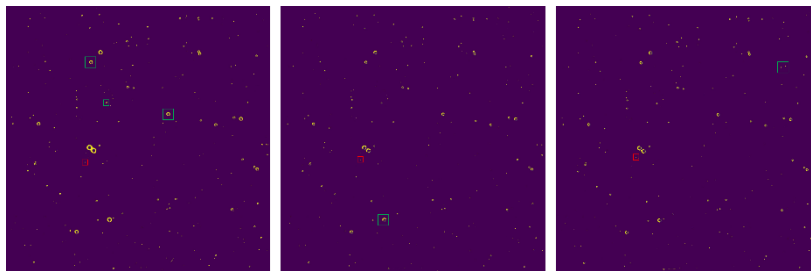


圖 4.2：對減方法輸出結果圖

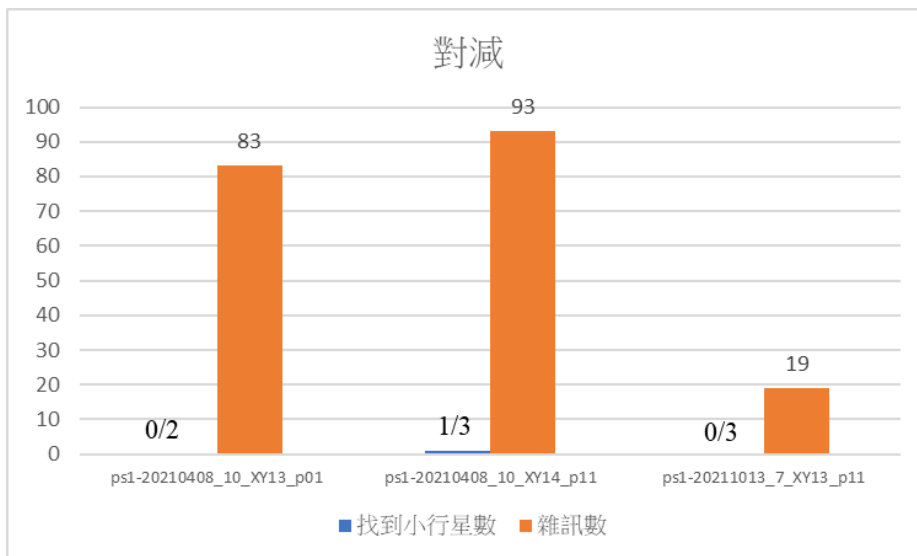


圖 4.3：對減方法指標圖（圖中分數代表：找到的已知小行星/影像中的小行星）

## (二) 第二種—openCV

利用第二種方法所得到的結果圖如圖 4.4，輸入的圖片同樣為圖 4.1，其各項數據如圖 4.5。從圖 4.5 可以看出雜訊數量大幅降低至平均每張 20，但原本第一種-對減方法可以找到的小行星，使用第二種—openCV 法反而無法找出，另外找到已知小行星的比例為 0%，故此方法對於尋找小行星之成效極差，此方法所花費時間約為 10 分鐘/組，大多時間花費於判斷程式標記出的物體為小行星或雜訊。



圖 4.4：openCV 方法結果圖

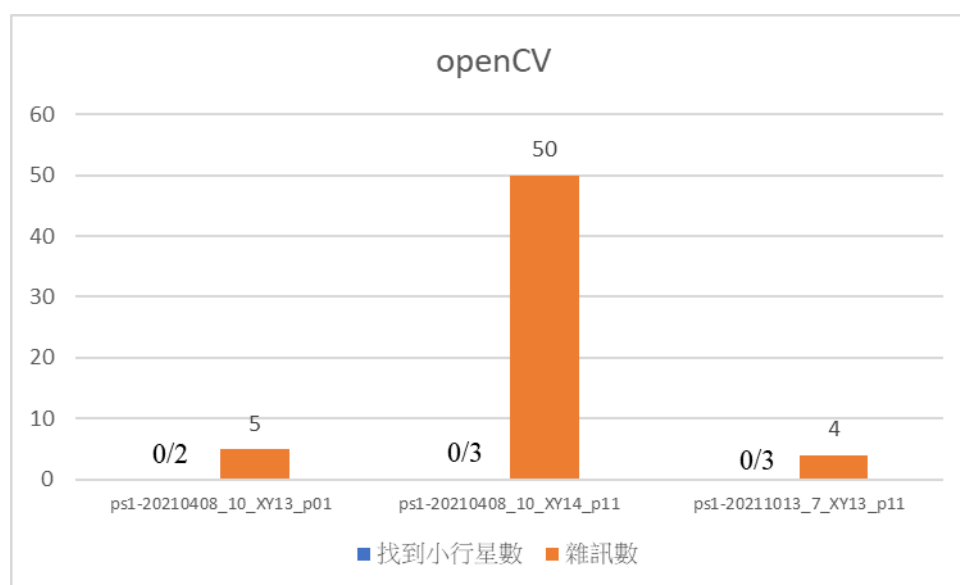


圖 4.5：openCV 指標統計圖（圖中分數代表：找到的已知小行星/影像中有的小行星）

## (三) 第三種—變形霍夫轉換

利用變形霍夫轉換所得到的數值檔如圖 4.6、影像圖片如圖 4.7、其輸入檔依然為圖 4.1。圖 4.8 顯示，找到的小行星數總共有 12 顆，而找到已知小行星的比例為 75%。此程式表現可以發現此方法對於小行星之尋找能力相對於前兩種方法有大幅提升，。利用變形霍夫轉換判讀，因在計算影像資料後，本研究設定使過條件的限定，讓程式只輸出為小行星的點，故後續判讀時不受雜訊影響，圖 4.8 中所有雜訊數皆為 0，可以省去程式輸出後尚需人工去除雜訊的步驟，此方法所花費時間約為 3 分鐘/組，因為只需將跑出的結果圖在 Astrometrica 找到相對應位置並標記即可。

。

```

3 230.79789791729522 -13.19370191922331
2 230.86421370916918 -13.169783570307407
1 230.93081486198056 -13.145672731801204

1 230.80977090134326 -13.06213129004493
2 230.8698668669873 -13.071233077603958
3 230.93034710924147 -13.080131225822948

3 230.85985146796034 -13.107690060327581
2 230.86174539495457 -13.108388949581482
1 230.86364447880493 -13.109079863285269

3 230.85985146796034 -13.107690060327581
2 230.86174539495457 -13.108388949581482
0 230.86553263181847 -13.109875700625599

2 230.87193853079643 -13.099973030444675
1 230.8737026949075 -13.100774629884699
0 230.87547701533907 -13.101584835690106

2 230.84367109737806 -13.050172687381469
1 230.84462833953125 -13.050842128358354
0 230.84564919046312 -13.051421909962613

```

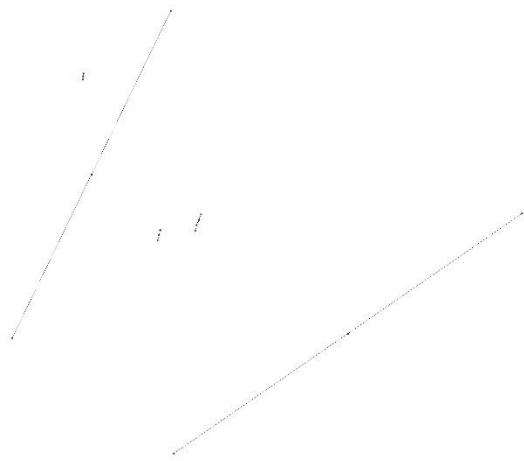


圖 4.6：變形霍夫轉換法結果 report 圖 4.7：將圖 4.6 繪製於圖上的結果

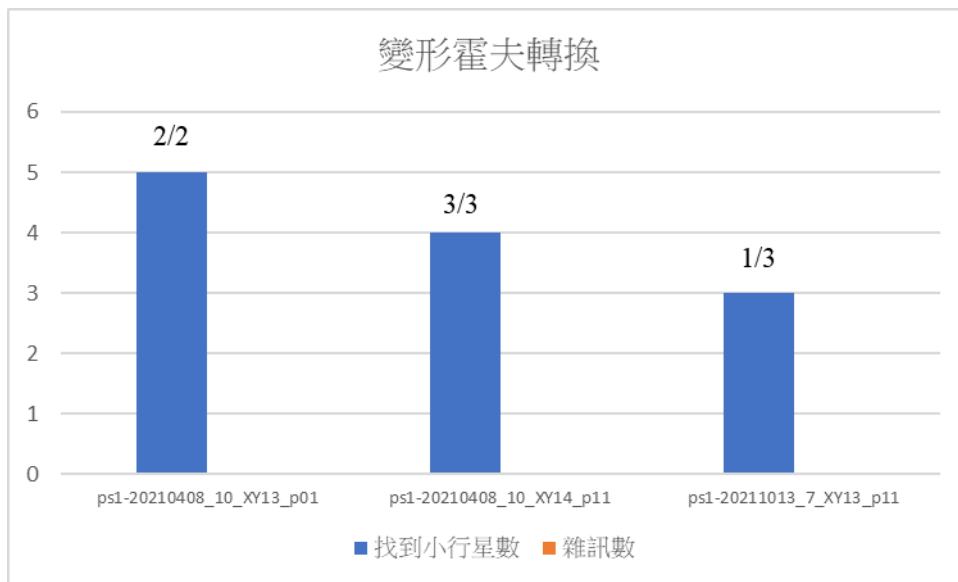


圖 4.8：變形霍夫轉換方法指標圖

## 二、不同程式輔助影像搜尋小行星成效差異

圖 4.9 可以明顯看出在三種方法中以變形霍夫轉換的雜訊數最低，且其所找到的小行星數共計 12 顆，相較於其他兩種方法有著更高的準確性。變形霍夫轉換在尋找出已知小行星比例也為其他方法的 5 倍以上。三種方法中前兩者的雜訊數量都非常高，而變形霍夫轉換因為篩選完了所有不符合移動條件的天體，故其雜訊數可以降低至 0 並去除後續人工判讀的難度，另外，在總花費時間上變形霍夫轉換速度約為其他兩者的三倍，故從以上可以得知三種不同尋找小行星的方法中以變形霍夫轉換方法為最佳。

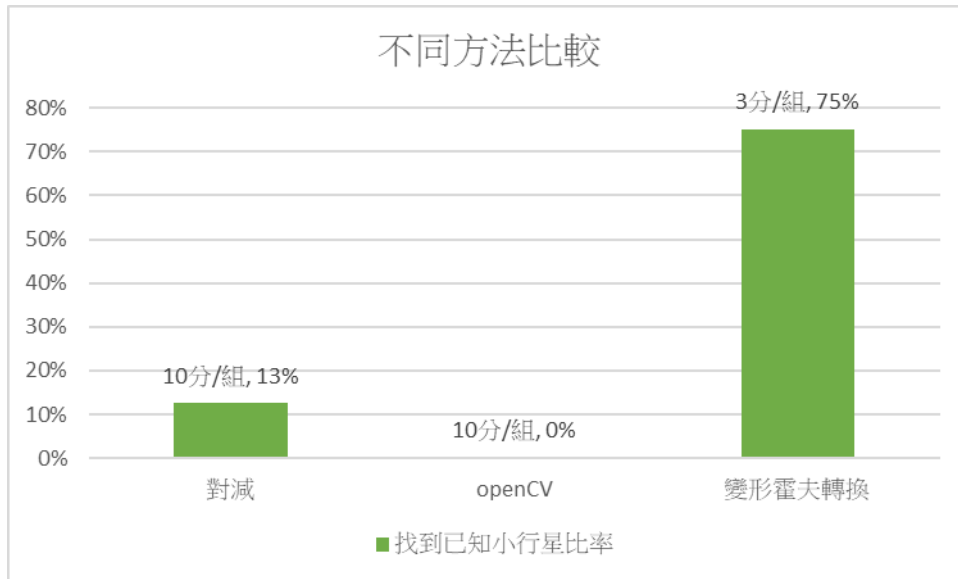


圖 4.9：三種方法比較指標圖

### 三、比較程式尋找與 IASC 法尋找之成效差異

將成效最佳的程式（變形霍夫轉換）與 IASC 法比較的結果整理如表一、圖 4.10，只有程式能找到的為 46 顆小行星、只能透過 IASC 法找到為 10 顆小行星、兩者均能找到的為 21 顆，且程式只需花 3 分鐘/組而 IASC 法則需要 20~30 分鐘/組。由此可見，程式除了能夠在較短的時間內找到多數 IASC 法找到的，還能夠找到額外 IASC 法無法判讀的小行星代表程式成效較 IASC 法在搜尋小行星上更具效益。

表一：IASC 法與變形霍夫轉換找尋結果統計表

項目	只有 IASC 法	只有程式	都有	總計（15 組資料中）
數值	10（13%）	46（60%）	21（27%）	77（100%）

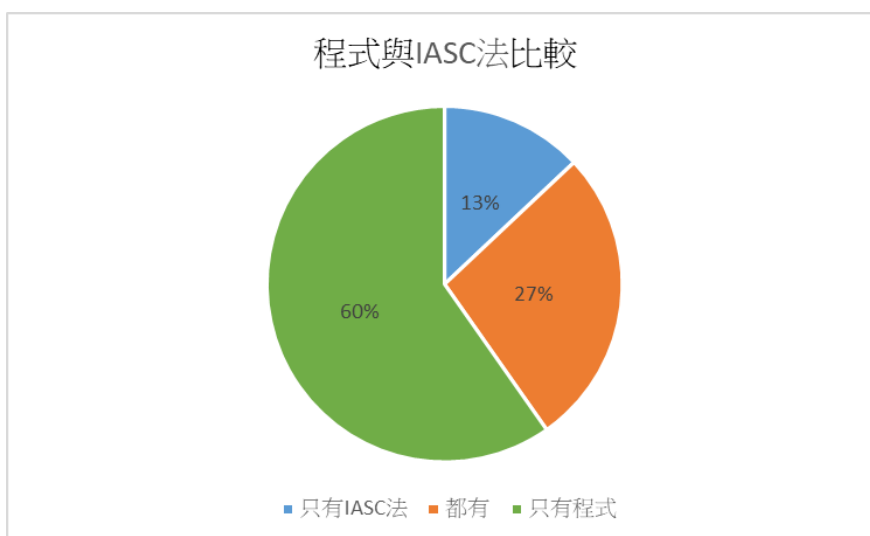


圖 4.10：IASC 法與變形霍夫轉換找尋結果圖

#### 四、驗證變形霍夫轉換輔助影像搜尋小行星成效

在第二次參加的計畫中一共有 22 組，其中一組資料有 PS1 CCD 損毀的情形，導致 Sextractor 於空白處提取出過多的物體，使變形霍夫轉換程式無法運算，故後續統計皆不計入此組資料。

將變形霍夫轉換與 IASC 法比較的結果整理如表二、圖 4.11，只有變形霍夫轉換找到的為 23 顆小行星、只能透過 IASC 法找到的為 4 顆小行星、兩者均能找到的為 4 顆。由此可見，變形霍夫轉換能有效的輔助影像尋找小行星，並且在相同的資料中較 IASC 法找到較多的小行星。

表二：IASC 法與變形霍夫轉換找尋結果統計表

項目	只有 IASC 法	只有變形霍夫轉換	都有	總計 (21 組資料中)
數值	4 (13%)	23 (74%)	4 (13%)	31 (100%)

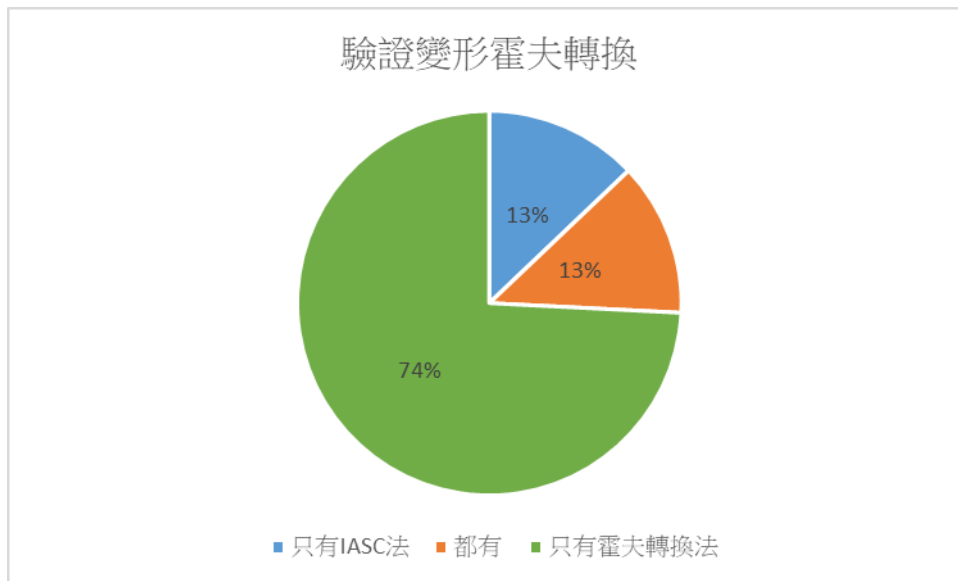


圖 4.11：IASC 法與變形霍夫轉換找尋結果圖

## 伍、討論

### 一、第一種一對減

本研究探討第一種方法成效不佳的原因，分成雜訊與小行星數量兩部分探討。首先是運算結果雜訊量過多的原因，從程式中每一步的結果，推測運算結果雜訊過多原因可能有二。



第一是閾值的值，閾值的大小會直接影響到被刪除物體的數量，數值必須剛好介於能刪除背景雜訊及不刪除小行星之間。在函式庫中無預設閾值、檔案數量不夠多以致無法由影像資料判讀精確閾值數值，以致無法利用程式閾值以凸顯小行星數值，以致出現過多雜訊。第二個原因推測為檔案中各影像資料的天球座標無法完全對齊、物體仍有些微移動及物體大小改變（同一光源在影像中的光點大小隨時間有所差異）所造成。在觀察各個雜訊時發現許多雜訊皆為環狀（如圖 5.1），比較對減的兩張照片發現，此圖形為一大小改變的物體相減後的結果。另一常見雜訊為大小約 2 至 4 像素大小的圖形，同樣比較對減的兩張照片發現，此為物體小距離移動，可能為物體本身移動或在對齊時因為無法完全對齊部分。此兩種形狀都有一共通點，其物體所佔面積皆較小，故在第二種方法中嘗試利用面積篩選對減後的形狀。



圖 5.1：對減方法中常見雜訊圖形

再來為尋找到小行星數量較少之原因，因為雜訊量過多，反而使得輸出後的圖像更不易判讀小行星，在實際尋找上反而變得更困難，故在之後的方法中嘗試將小行星做標記以方便辨認。

## 二、第二種—openCV

第二種方法中尋找小行星成效極差，本研究分析後發現，方法二雖利用篩選面積較大的輪廓達成減少雜訊的目的，但同時也將本身就較為小顆的小行星刪除，所以才會產生方法一找到的小行星到了方法二找不到的問題。而在刪除雜訊後尋找到的小行星數量仍少，代表方法一找不到小行星之原因並非僅因為雜訊過多，而是不少小行星在進行二值化時被刪去。故若想要改善則必須調整處理影像背景的方法。

## 三、第三種—變形霍夫轉換

本研究在第三種方法時得到非常高的成效，探討其較為成功之原因，認為有兩個主要原因：第一，利用 **SExtractor** 提取物體成功解決背景雜訊過多，可以有效得知某處是否為物體或只是長得像物體的雜訊。第二，因為 **SExtractor** 提取物體後可以精準得知其座標，在後續計算是否為直線及兩兩之間之距離時，能更加準確的計算，完全減少肉眼判斷的偏差。

在第三種方法進行中，有發現到某一部份的資料無法正常運算，檢視之後發現其有一共同點，圖像中物體普遍較少，視覺效果為一片空白如圖 5.2，此圖像為 IASC 計畫中提供的影像本就有部分會因 CCD 損毀、研究倫理與國防機密等而資料殘缺。在 **SExtractor** 運算此類型

資料時會受到大量空白處影響而二值化之閾值取得不理想，造成邊界及資料殘缺處會提取出大量（ $\geq 10000$ ）肉眼明顯可辨識為背景或殘缺區域的物體，導致在後續進行霍夫轉換時電腦無法運算。此類影像本研究因無法運算故不列入統計範圍。

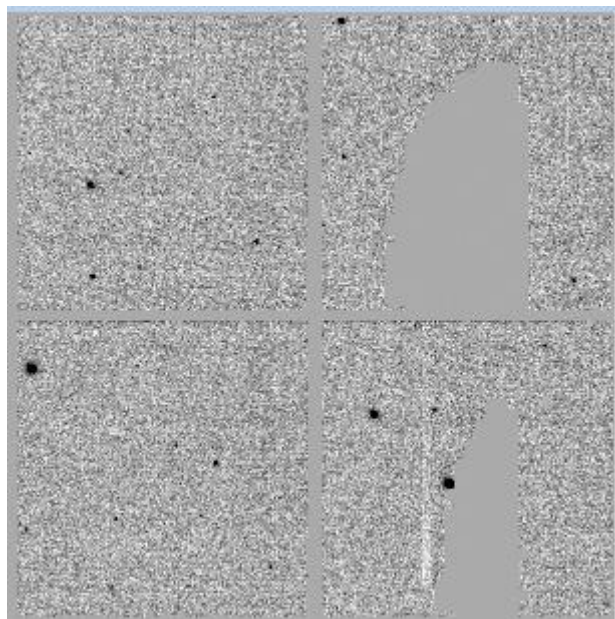


圖 5.2：無法運算之影像示意圖（資料來源：IASC）

#### 四、比較程式尋找與 IASC 法尋找之成效差異

本研究分析 IASC 法與程式所尋找到的小行星，發現程式未能找到的小行星多半具有兩個特徵：移動距離較短、在圖形中顏色較淺。移動距離太短會造成一開始在刪除未移動點時，就被誤判而導致被刪除。而圖形中顏色較淺會因為 SExtractor 在執行時就被二值化刪除，導致 SExtractor 無法提取到該物體，在後續的變形霍夫轉換中自然也無法被找到。另外，程式能額外找到的小行星多半為移動距離較長的小行星，此類型小行星在使用 IASC 法尋找時，會因為距離過長而不易察覺其移動後的位置。

## 陸、結論

經過本研究的嘗試之後，得出可以利用影像對減、openCV、SExtractor+變形霍夫轉換三種方法來尋找小行星，其中以 SExtractor+變形霍夫轉換方法最佳。在相同的資料中 SExtractor+變形霍夫轉換所能找到的資料為另外兩種方法的十倍以上，且不須再另外肉眼輔助，可完全僅依靠程式尋找。此種方法與 IASC 法相比也能夠有更好的成效，在 15 組資料中程式能夠找到 67 顆的小行星，同時 IASC 法只能只找到 31 顆，其中程式對於移動距離較長較長之小行星能夠有更好的尋找能力。

若希望再提升尋找小行星的程式能力，或許可以取得影像數較多或較大天球範圍影像的資料，讓程式所演算的同一條直線方程式需有更多的點才成立，以利透過程式判別小行星特

徵。此外，設法取得更詳細的影像數值資料以增進 SExtractor 提取影像中星點的效益，或是修改 SExtractor 中的檔案參數以減少 SExtractor 誤將影像邊界判定為星點的狀況，再利用變形霍夫轉換找出小行星。

## 柒、參考文獻資料

- E. BERTIN. (2006, July 14). SExtractor v2.5 User's manual Draft [user manual]. Retrieved from <http://astroa.physics.metu.edu.tr/MANUALS/sextractor/sextractor.pdf>
- IAP/CNRS/UPMC. (2017). SExtractor User Manual [documentation]. Retrieved from <https://sextractor.readthedocs.io/en/latest/index.html>
- IASC. (2020, March 1). Astrometrica guides, 3. Signature Guide. Retrieved from <http://iasc.cosmossearch.org/Content/Distributables/Quick%20Start%20Guide.zip>
- Images by Border Following. COMPUTER VISION, GRAPHICS, AND IMAGE PROCESSING. 30, 32-46. doi: 10.1016/0734-189X(85)90016-7
- Kai-Jie Lo, Chan-Kao Chang, Hsing-Wen Lin, Meng-Feng Tsai, Wing-Huen Ip, Wen-Ping Chen, Ting-Shuo Yeh, K. C. Chambers, E. A. Magnier, M. E. Huber, and R. J. Wainscoat. (2020). Asteroid Discovery and Light Curve Extraction Using the Hough Transform: A Rotation Period Study for Subkilometer Main-belt Asteroids. *The Astronomical Journal*. 159, 25. doi: 10.3847/1538-3881/ab564a
- kang & atul. (19 Nov 2019). Suzuki's Contour tracing algorithm OpenCV-Python [Web blog message]. Retrieved from <https://theailearner.com/2019/11/19/suzukis-contour-tracing-algorithm-opencv-python/>
- NASA, FITS Working Group. (2008). Definition of the Flexible Image Transport
- Satoshi Suzuki. (1985). Topological Structural Analysis of Digitized Binary System (FITS). Retrieved from [https://fits.gsfc.nasa.gov/standard30/fits\\_standard30.pdf](https://fits.gsfc.nasa.gov/standard30/fits_standard30.pdf)