

植被及國土變遷觀測儀 B2 幾何精度評估

An Evaluation for the Geometric Properties of VCDi Band 2 Image Module

林修國、黃鼎名

Shiou-Gwo Lin, Ting-Ming Huang

本文介紹國科會精密儀器發展中心研製的機載遙測儀器—植被及國土變遷觀測儀綠光波段 Band 2 幾何校正的過程，並比較實際機載影像產生之正射影像與地面已知座標的點位，評估其正射影像精度，以中央 1 個及外圍 5 個點位為控制點進行座標轉換，得到控制點的均方根誤差 RMS 為 0.51 像元 (換算地表的精度約為 25.7 公分)，另以其餘 8 個點位為檢核點得到 X 軸的 RMS 為 0.74 像元 (37.5 公分)，Y 軸的 RMS 為 0.45 像元 (22.6 公分)。

This paper introduces the Vegetation and Change Detection imager (VCDi) Band 2 image module and its geometric calibration process. Estimating accuracy of VCDi image by comparing air-borne orthographic image with ground control points. Pairs of image and ground coordinate at five boundary points and one central point are used as controls to estimate transformation coefficients, the estimated residual is 0.51 pixel (around 25.7 cm on ground). At 8 check points, RMS is 0.74 pixel (37.5 cm) on X-axis and 0.45 pixel on Y-axis (22.6 cm).

一、簡介

精密儀器發展中心 (以下簡稱精儀中心) 以累積多年之光、機、電及儀器整合技術為基礎，於 86 年度開始跨足遙測技術的領域，並著手研製高解析力鏡頭及地面取像之遙測儀器，並參與中華二號衛星計畫遙測酬載及科學酬載設計、組測工作。同時間精儀中心亦著手進行機載遙測儀器研製的評估，綜觀國內，可提供測試的航測飛行平台有許多

選擇，如農委會、華毅、大鵬及漢翔等。另外許多星載的遙測系統，也多會利用飛機作為儀器原型的測試平台。因此於 90 年度精儀中心開始研發以飛機為載具的植被及國土變遷觀測儀 (vegetation and change detection imager, VCDi)，此系統歷經系統設計、元件製造及系統整合校正三個階段後，第一組的綠光取像模組 B2 於 91 年度 4 月初完成，緊接著於 4 月 23 日及 26 日與農委會農林航空測量所及交通部民航局航空隊合作，進行實際機載測試。

VCDi 是由空照相機、取像平台及系統控制器三個部分所組成。空照相機包含四組獨立的鏡頭及 CCD 取像模組，分別對應到紅、綠、藍及近紅外波段，波段範圍為藍光 (450–520 nm)、綠光 (530–610 nm)、紅光 (630–690 nm) 及近紅外光 (780–900 nm)。鏡頭設計時考慮到焦平面光量的均勻性，因此採用遠心鏡頭的設計，因為像差的影響，不同波段的鏡頭在最佳化後，設計上有些微的差異，鏡頭的分光採用於焦平面前放置濾波器來進行。另外，在機載取像時，需透過機艙底部玻璃視窗進行取像，為確定此視窗是否會影響到成像品質，以軟體模擬的方式進行分析，得到「若視窗與鏡頭第一片鏡片距離大於 20 mm，則影響微乎其微」的結論，此點結論亦以機構設計的方式達成。CCD 部分採用 2k × 2k 的科學等級面型 CCD (Redlake MegaPlus 4.2i)，組成系統之瞬間視角為 0.25 mrad，視角為 ±20 度。本文僅就已完成機載測試的 B2 進行幾何精度的評估。另外，系統詳細的介紹及 B2 輻射校正可參考文獻 1。

二、幾何校正理論基礎

量測用相機在進行實際取像前，必須進行率定的工作以了解相機的特質並修正系統性誤差，同時利用率定後殘餘的誤差亦可初步了解觀測影像的精確度。率定的項目包含兩個部分：(1) 輻射校正：即建立入射至鏡頭的光輻射強度與取得影像灰度值間的關係，此部份已於參考文獻 1 中有詳細的介紹。(2) 幾何校正：即針對相機造成物體成像扭曲的修正。本文主要討論 VCDi 幾何校正部分，VCDi 為一數位相機，其焦平面是由科學等級面型 CCD (Redlake MegaPlus 4.2i) 組成，CCD 像元的相對位置及其平坦度遠小於由鏡頭畸變差所造成的影響，因此焦平面的平坦度、相對位置及距離的率定可予以省略，故本文幾何校正率定的部分僅包含相機的焦距及畸變差兩項。

相關的率定參數如下⁽²⁾⁽³⁾：

1. 等效焦距 (equivalent focal length, EFL)：選取相機中央區域，不考慮畸變差，直接計算得之焦

距稱之為等效焦距，此焦距僅在相機中央區域有效。

2. 率定焦距 (calibrated focal length, CFL)：使輻射畸變差均勻分布，所選定的焦距稱之為率定焦距。
3. 自準直像主點 (principal point of autocollimation, PPA)：相機主軸於焦平面的垂足或光線交會的中心，稱之為自準直像主點。
4. 對稱像主點 (principal point of symmetric, PPS)：透鏡輻射畸變的對稱中心稱之為對稱像主點。理想的相機其 PPA 與 PPS 應重疊，但實際上會存在著些許差距 x_0, y_0 ，一般而言是採用 PPS 為像平面座標的原點，則其座標為 (x_0, y_0) 。
5. 輻射畸變 (radial distortion)：因鏡頭具有輻射對稱的特性，通常假設鏡頭造成的畸變與輻射方向的距離成某種比例且為對稱的關係，對像平面座標可成立下列之改正式⁽²⁾：

$$\begin{aligned}\Delta x &= x' \cdot k_1 \cdot r^2 + x' \cdot k_2 \cdot r^4 + x' \cdot k_3 \cdot r^6 + \dots \quad (1) \\ \Delta y &= y' \cdot k_1 \cdot r^2 + y' \cdot k_2 \cdot r^4 + y' \cdot k_3 \cdot r^6 + \dots\end{aligned}$$

其中 $x' = x - x_0$, $y' = y - y_0$, $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$, Δx 為投影於 x 軸之畸變差 (像元), Δy 為投影於 y 軸之畸變差 (像元)。

6. 偏心變形 (decentering distortion)：其產生的原因為鏡片組裝時未能將鏡片的中心與相機的主軸對準，或者製造鏡片時兩面的中心對準之誤差所造成，此種變形是一種非對稱性的變形，可利用輻射方向 (radial) 及正切方向 (tangential) 的組合來描述，Brown 氏於 1972 年提出下式來描述偏心變形：

$$\begin{aligned}\Delta x &= \left(1 - \frac{f}{s}\right) \cdot [P_1(r^2 + 2x'^2) + 2P_2x'y'] \quad (2) \\ \Delta y &= \left(1 - \frac{f}{s}\right) \cdot [P_2(r^2 + 2y'^2) + 2P_1x'y']\end{aligned}$$

其中， s 為物距 (m)， f 為焦距 (m)， P_1 及 P_2 為偏心變形參數。若同時考慮輻射畸變及偏心畸變可將畸變量表示為：

$$\begin{aligned}\Delta x &= x'(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + P_1(r^2 + 2x'^2) + 2P_2 x' y' \\ \Delta y &= y'(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + P_2(r^2 + 2y'^2) + 2P_1 x' y'\end{aligned}\quad (3)$$

其中因 f/S 於機載測試時其數值相當小，可將 f/S 設為零。

相機率定參數求解的方法相當多，基本上皆是利用於物空間相對位置固定的特徵點成像在焦平面上，再反推成像時因相機造成的誤差。率定的方法主要分為三大類：(1) 實驗室法，(2) 恆星法，(3) 實驗場法。實驗室法是在實驗室內以特殊設計的率定儀器來完成，一般是由相機製造廠或政府單位所採用，本文即利用此法進行。恆星法是對天球上的恆星取像，再利用恆星的已知座標 (由恆星星曆可獲得) 及量測得像空間的座標，以數學運算的方式解算得率定參數。實驗場法是利用事先建立包含陣列式點位的實驗場，再針對這些點位取像，即可藉由數學運算來獲得率定參數。此種方法多由相機使用者進行，可用於確定或再率定實驗式法的率定資料。

三、VCDi B2 幾何校正

本文利用 Ealing 公司之 EROS 量測儀進行 VCDi B2 幾何校正的量測工作，該系統首先以準直儀 (collimator) 製造一道平行光，投射出一道狹縫影像，再以可旋轉之平面鏡控制平行光入射待測系統之入射角，藉由電腦控制不同的入射角度，可以得到已知入射角成像在焦平面的位置，該系統入

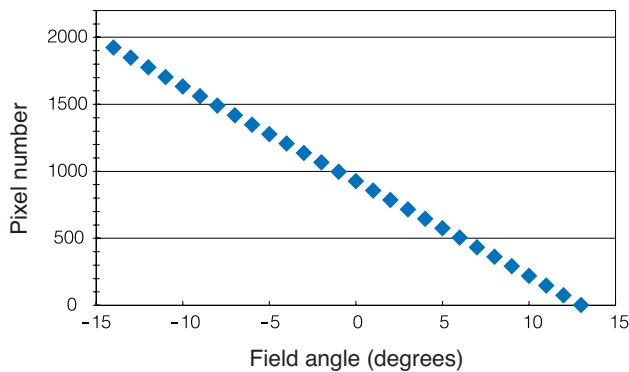


圖 1. 沿 X 軸不同入射角與成像位置之關係圖。

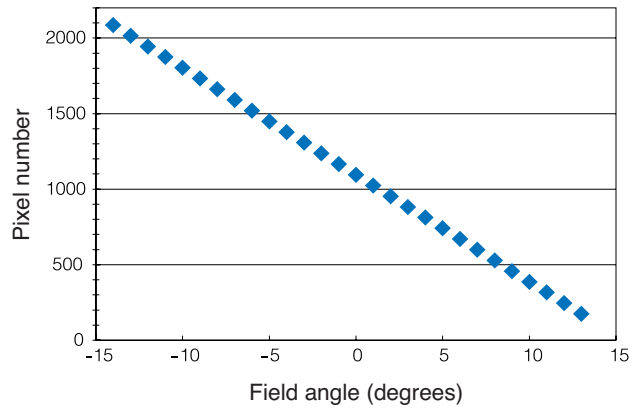


圖 2. 沿 Y 軸不同入射角與成像位置之關係圖。

射角精度為 $2''$ ⁽⁴⁾，圖 1 及圖 2 分別為沿 X 軸及 Y 軸量測的成果，每個量測點相隔的角度為 1 度。

1. 焦距估算

任意角度 θ 量測得之像元值與零度量測得之像元值相減，差值定義為 N ，可成立下式：

$$f = \frac{N \cdot l}{\tan \theta} \quad (4)$$

其中， f 為焦距， l 為 CCD 像元尺寸。

取 X 軸正負 1 度及 Y 軸正負 1 度 4 個量測值， N 分別為 70、70、69.5 及 70.5，CCD 像元尺寸為 $9 \mu\text{m}$ ，依 (4) 式取 4 個 1 度量測值的平均即得到 EFL 為 36.093 mm。若以 X 軸正負 2 度及 Y 軸正負 2 度 4 個量測值，則求得之 EFL 為 36.146 mm。由此可知 EFL 會因為不同角度的觀測量而有所不同。

以 1 度求得之 EFL 為準，不考慮畸變差，可利用已知 f 代入 (4) 式求得任意角度的 N 值，此理論值以符號 \hat{N} 表示，實際量測得之 N 值與 \hat{N} 的差距即為畸變差的大小。將所有角度量測得之 N 值，依上述程序可求得對應之畸變差，依 X 軸及 Y 軸繪於圖 3，本文所有畸變差的圖中於入射角為負值時將畸變差乘上 -1 ，以便於觀察其對稱性。由計算得之數據可知最大的畸變差發生於 Y 軸 2 度之 0.957 像元，最小之畸變差值發生於 Y 軸 14 度之 -3.380 像元。

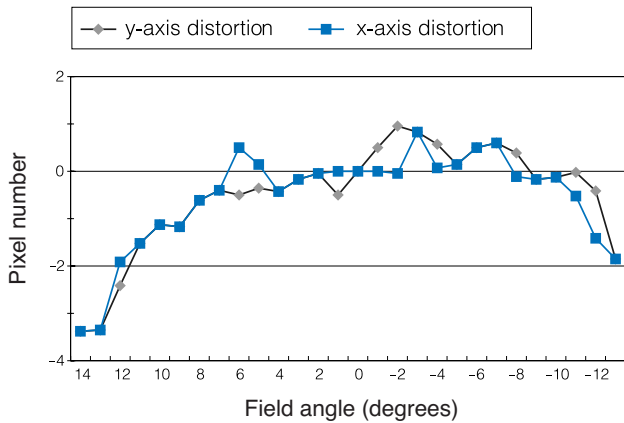


圖 3. 根據 EFL 求得之 X 軸及 Y 軸之畸變量。

EFL 及 CFL 可依下二式換算⁽³⁾：

$$\Delta f = \frac{D_1 + D_2}{\tan \theta_1 + \tan \theta_2} \quad (5)$$

$$\text{CFL} = \text{EFL} + \Delta f \quad (6)$$

其中， D_1 與 D_2 分別為根據 EFL 在角度 θ_1 與 θ_2 之最大值及最小值畸變差。經計算後 Δf 為 -0.077 mm，由 (6) 式可知 CFL 為 36.016 mm。由 CFL 重新計算之畸變差繪於圖 4 中。其中畸變差絕對值的最大值小於 1.7 像元，X 軸向的 RMS = 0.969 像元，Y 軸向的 RMS = 0.864 像元。由於當初進行鏡頭畸變差量測時是沿 X 軸及 Y 軸量測，量測得的角度大約僅達 ± 14 度，因此對角線上會有更大場角 (± 20 度) 的像元沒有考慮到。

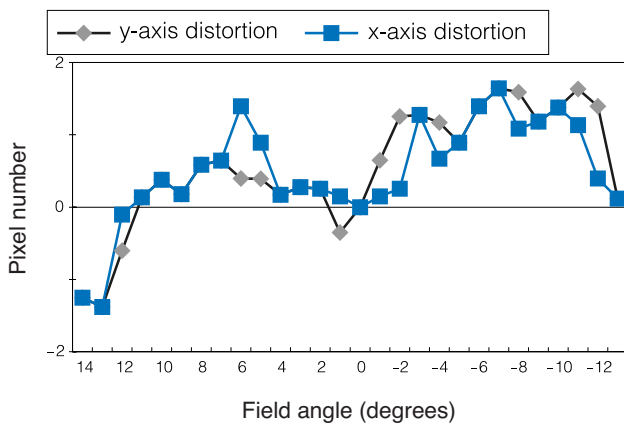


圖 4. 根據 CFL 求得之 X 軸及 Y 軸之畸變量。

2. 畸變差率定

由圖 4 中之畸變差可知僅考慮輻射畸變無法描述 VCDi B2 的幾何畸變差 (明顯的圖形並不很對稱)，因此本文採用式 (3) 來做為畸變差率定之函數，代入所有沿 X 軸及 Y 軸的量測資料，以最小平方方法求解係數 k_1 、 k_2 、 k_3 、 P_1 及 P_2 。圖 5 及圖 6 繪出估算得之 X 軸及 Y 軸畸變差曲線圖 (圖中之平滑曲線)，並同時繪出量測得之畸變量供比較。X 軸及 Y 軸殘差分別為 0.453 像元與 0.378 像元，較原本 X 軸向的 RMS = 0.969 像元，Y 軸向的 RMS = 0.864 像元，有相當程度的改善。

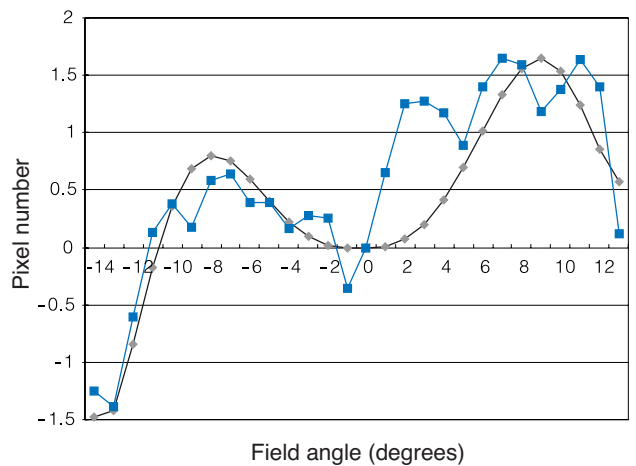


圖 5. 估計之畸變差曲線 (X 軸)。

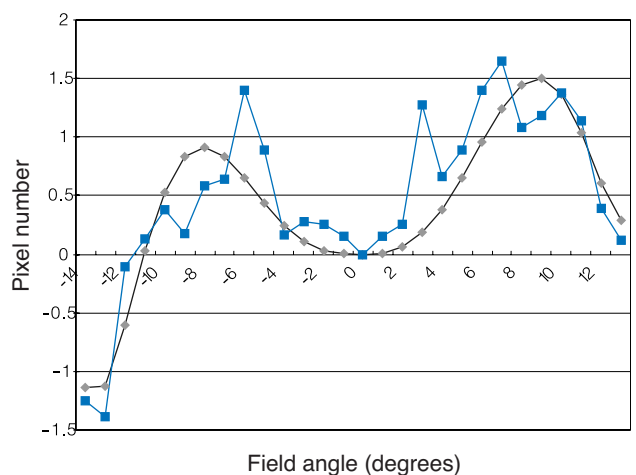


圖 6. 估計之畸變差曲線 (Y 軸)。

四、正射影像精度評估

為評估取得影像之精度，本文利用地面實驗區的方法進行，首先在飛行測試前於地面布下陣列式的點位，取像後即可比較點位間在地面及影像的相對關係。當地面上點位的相對位置極為精確時，比較影像上點位與地面點位相對關係之差值即為實驗區內的影像精度。

1. 地面布標

地面控制點必須具有影像上可清晰辨識且地面座標已知的特性，飛行測試前曾前往農林航測所購買測區附近 1/5000 相片基本圖，經與測區比較後發現，與測區的現況有相當大的差距，因此決定利用 GPS 來量測地面控制點的座標。原本預計利用自然的地物來當做標的物，但考慮到機載測試相當難得，經地面調查後，決定以十字標來當標的物，以確保點位分布的均勻性。十字標以黑色帆布為底，尺寸為 3 m × 3 m 於上面縫製 0.6 m × 0.6 m 的白色十字圖形，實際十字標如圖 7。

實驗區選定於台中軍功寮附近的重劃區，布標區約為 2 km × 2 km 的正方形區域，每隔 400 m 布下一個十字標，共計布下 25 個十字標。由於擔心太早布下的十字標會遺失，因此先以鋼釘為標記。實際機載前一週以 GPS 快速靜態定位量測所有點位 (鋼釘) 的座標，每個點位觀測十分鐘，最低觀測仰角定為 15 度，取樣間隔為 15 秒，每點觀測 10 分鐘，量測得之點位分布如圖 8，圖中綠色實心



圖 7. 地面標實體圖。

三角形為參考站，該點座標引測自內政部地政司設置之衛星控制點 M808，引測的觀測方式為靜態定位，觀測時間約 4 小時。求得之點位座標 X 軸向之中誤差列於表 1 中，其模稜求解均成功，由表中可知中誤差均在 3 mm 以內。實際將十字標布於點位上的動作於飛行測試前一天進行，布標時十字標中心與鋼釘中心的對準可能造成數公分的誤差，因此布下的十字標其相對精度約在公分等級。

2. 飛航測試

飛航測試的實驗區較布標的實驗區大上許多，這是希望多取些影像而地面布標無法有這麼大的規

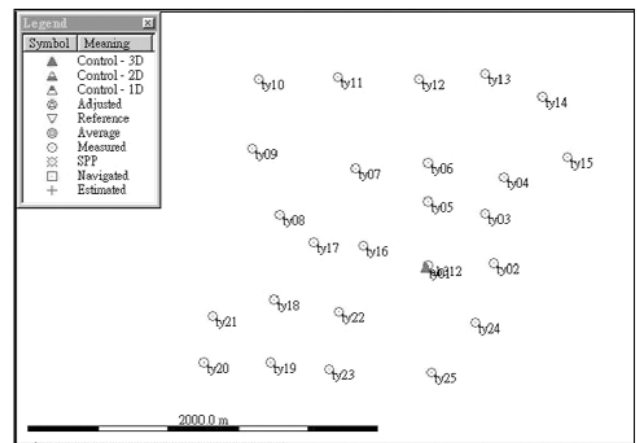


圖 8. 測區點位分布圖。

表 1. 點位座標 X 軸向之中誤差。

點名	Sd. X (m)	點名	Sd. X (m)
ty02	0.0021	ty03	0.0015
ty04	0.0018	ty05	0.0015
ty06	0.0012	ty07	0.0011
ty08	0.0015	ty09	0.0010
ty10	0.0013	ty11	0.0020
ty12	0.0019	ty13	0.0017
ty14	0.0017	ty15	0.0021
ty16	0.0024	ty17	0.0022
ty18	0.0018	ty19	0.0014
ty20	0.0015	ty21	0.0011
ty22	0.0022	ty23	0.0024
ty24	0.0021	ty25	0.0017

模，規劃的實驗區位於台中太平地區，於 91 年 4 月 22 日進行裝機及地面布標的動作，次日 (4 月 23 日) 進行實際的機載測試，當天早上 9 點 10 分起飛共飛行了 6 個航道，4 個航道位於實驗區，2 個航道位於台中港區，飛行高度為 4000—7000 英尺，總共取得了 400 張影像，第二次的飛行於 4 月 26 日進行，當天飛行了 28 個航道，飛行高度約為 6800 英尺，共取得了 420 張影像。兩次的飛行總共成功的取得了 820 影像，圖 9 為測區中央取得的影像，圖中紅色虛線區域放大後可以看到十字標之影像，如圖 10。利用 ty07、ty17 及 ty22 三個點位影像座標及地面座標的相對關係，估算得地面像元大小約為 50.35 公分。

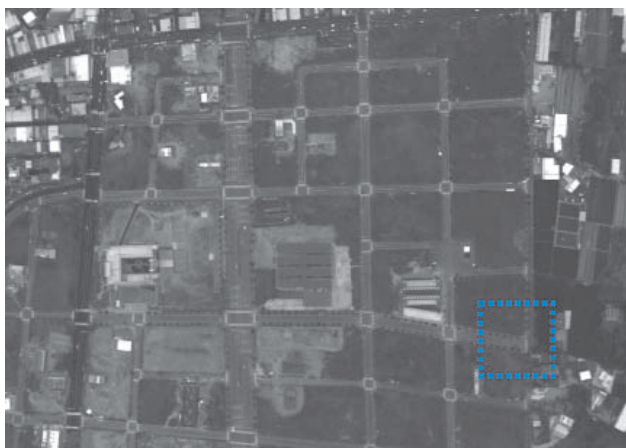


圖 9. 測區中央影像。



圖 10. 測區中央放大影像。

3. 影像正射化

由於飛機飛行時的姿態無法完全穩定而且地面並不完全平坦，會造成尺度比不同及高差、傾斜位移，使得影像上的幾何關係與實際上地表的幾何關係不同。針對這些問題，航空照片的後續處理經多年的發展，建立了一套標準的處理方法，可修正上述的誤差，稱之為影像正射化，正射化後之影像即可用於製圖。由於精儀中心並未建立此技術，因此機載影像的正射化委託中華民國航測及遙測學會進行。選取測區東西向三條航道及台中港區的影像進行正射化影像處理，另外選取了台中火力發電廠影像進行 3D 影像模型建立。由於正射影像製作時尚未估算出畸變差率定係數，因此正射影像所使用的原始影像並未進行畸變差率定。利用 ty06 與 ty23 的像座標及地面座標，計算得地面像元大小約為 31.77 公分。比較此時的像元大小較原始影像小了 1.585 倍，這是因為正射化過程中，進行了許多次的重新取樣。

4. 正射影像精度評估

以影像處理軟體 ENVI⁽⁵⁾ 量測正射影像中所有十字標中心的影像座標，經與地面以 GPS 量測之十字標座標進行比較後發現，共同的點位共有 14 個。原布標點位共計 25 個，由於布標後天候不佳，正式進行機載取像時與布標的時間相隔 4 天，其中有 6 個點位遺失 (分別為 ty04、ty08、ty16、ty18、ty20、ty21)，取像時僅餘下 19 個點位，另外 5 個點位 (分別為 ty10、ty11、ty12、ty13 及 ty14) 不在製造正射影像的 3 個航道內，因此共取得 14 個布標點位的影像座標，選取外圍 5 個點位及中央 1 個點位為控制點進行座標轉換參數的估算，估算之 RMS 為 0.81 像元 (轉換成原始影像尺寸為 0.51 像元)，控制點點名分別為 ty01、ty09、ty15、ty19、ty24 及 ty25。利用這組參數對其餘 8 個點位進行座標轉換，將地面座標轉換為影像座標，轉換得之影像座標列於表 2 之 X^p 及 Y^p 欄位，同時列出由影像中量取的座標 (列於表 2 之 X 及 Y 欄位)，表中之 ΔX 及 ΔY 為估算之座標減量取之座標。視地面座標為參考真值則求得 X 軸的 RMS 為 1.18 像元， Y 軸的 RMS 為 0.71 像元。若回歸至原

表 2.
正射影像檢核點座標精
度。

點名	X^p	Y^p	X	Y	ΔX	ΔY
ty02	6528.4	3384.04	6527.75	3383	0.65	1.04
ty03	6357.44	2502.42	6355	2501.25	2.44	1.17
ty05	5331.04	2274.84	5329.5	2275	1.54	-0.16
ty06	5342.71	1586.21	5342.5	1585.25	0.21	0.96
ty07	4038.99	1672.35	4038.5	1672.5	0.49	-0.15
ty17	3290.51	3000.67	3290	3000	0.51	0.67
ty22	3739.5	4239.26	3738.25	4239.5	1.25	-0.24
ty23	3556.31	5277.63	3556.75	5278	-0.44	-0.37
RMS					1.18	0.71
原始影像尺寸之 RMS					0.74	0.45

始影像的像元尺寸， X 軸的 RMS 為 0.74 像元， Y 軸的 RMS 為 0.45 像元。也就是說，VCDi B2 正射化後之影像精度在 1 個像元以內。此精度較實驗室未校正畸變差，求得之 X 軸向 RMS = 0.969 像元、 Y 軸向 RMS = 0.864 像元，還好上一些。這是一個單一案例，或是因為每個正射影像的點位都是由兩個影像點求得，所以精度較佳，或是其他原因所造成，有待更多的資料來確認。

5. 立體影像

利用飛行取像時，影像間 60% 的重疊可以製作出地表的地形模型，圖 11 為台中港區火力發電廠的立體模型，該圖即是由 4 月 23 日拍攝得之航照影像所製作。

五、結語

本文介紹了精儀中心研製的機載遙測儀器 VCDi 綠光波段 Band 2 幾何校正的過程。另外對於可用於製圖之正射影像亦利用地面的實驗區對影像進行精度評估，其精度在 1 像元以內。由於正射影像製作時尚未率定出畸變差參數，因此正射影像並未進行畸變差校正，若進行正射化前對每一單張影像進行校正，相信可將影像精度再提高。以文中量測之畸變量為例，若經校正可使影像幾何精度在校正的過程提升約 2 倍。本文亦建立起一套相機幾何校正的系統 (包含軟、硬體)，可提供將來發展系統儀器校正用，而精儀中心也樂意接受外界之委託進行儀校的工作。

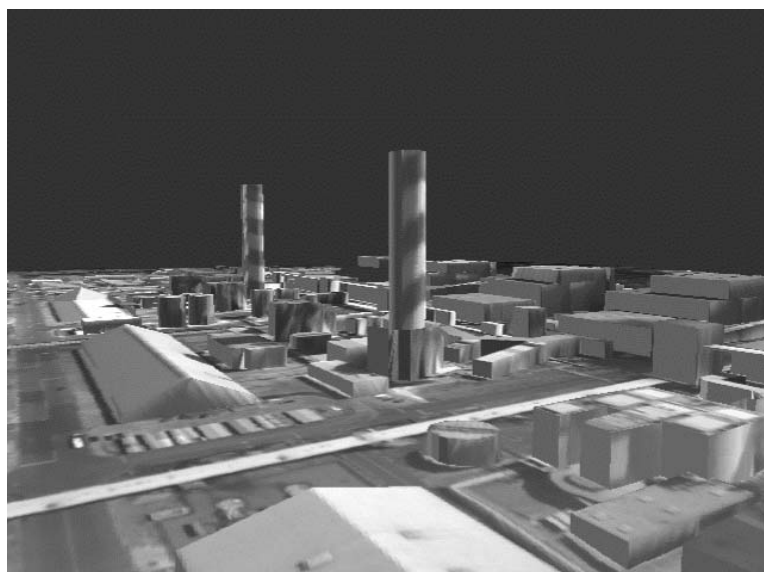


圖 11.
台中港區火力發電廠立體模型。

誌謝

感謝國科會精儀中心蔡和霖博士及蘇方旋先生慷慨地提供量測數據，使得本文得以順利完成，特此誌謝。

參考文獻

1. 蔡和霖, 蘇方旋, 科儀新知, **24** (2), 80 (2002)。
2. 何維信, 航空攝影測量學 (1995).
3. B. Hallert, *Photogrammetry*. Pergamon Press (1960).
4. *EROS Optical Testing-Photography User's Guide*, Earling Co. (1995).
5. *ENVI User's Guide*, Research Systems (1999).

林修國先生為中央大學大氣物理博士，原任國科會精儀中心副研究員，現任新埔技術學院資管系助理教授。

黃鼎名先生為國立成功大學航空太空博士，現任國科會精密儀器發展中心研究員。

Shiou-Gwo Lin received his Ph.D. in atmospheric physics at National Central University. He was an associate researcher in Precision Instrument Development Center, National Science Council. He is currently an assistant professor in the Department of Information Management at St. John's & St. Mary's Institute of Technology.

Ting-Ming Huang received his Ph.D. in aeronautical and astronautic engineering from National Cheng Kung University. He is currently a researcher in Precision Instrument Development Center, National Science Council.