

數位相機檢定之自動化

劉虹妤¹ 曾義星² 王聖鐸³

摘要

應用於近景攝影測量之相機依其量測之穩定性，可分為量測性及非量測性相機。由於數位相機的發展逐漸取代底片式相機，配合電腦視覺使近景攝影測量朝向自動化發展。目前市面上之數位相機屬於非量測性相機，此種相機要應用在近景攝影測量上必須進行相機率定的工作，其率定方式以自率光束法較為合適。此率定方法利用三維空間均勻分佈的未知座標標點，以多張相片的方式進行率定同時解算內外方位。其主要缺點是影像坐標之量測工作繁重，為解決這項問題，本文設計一種可供自動辨識及定位的人工標點及自動量測之程序，以達到相機率定之自動化，即整合自動辨識及量測功能於相機率定系統中。實驗結果顯示標點辨識及定位之成功率達 70% 以上，加上少量人力輔助的修正可輕易達 90% 以上的成功率，將此辨識量測成果應用於數位相機率定及定位，其定位結果之標準偏差可輕易達到公分以下之精度。

關鍵詞：近景攝影測量、相機率定、數位相機、自動化。

1. 前 言

近景攝影測量是以近距離（約 300 公尺以內）攝影並量測影像以決定物體之幾何或其他性質。相機依其量測性質是否穩定已知，分為量測性相機及非量測性相機。自 1960 年代初期，電荷耦合器（CCD）原理被提出而發展出數位相機，因其穩定度及幾何解像力愈來愈好，使得數位相機有取代底片式相機的驅勢[何維信，1995]。近景攝影測量因此進入數位時代，與電腦視覺（Computer Vision）結合後，其理論及方法則朝向自動化的量測及影像辨識發展。

有穩定內方位的相機，可長期使用一套嚴謹求得的內方位參數達到量測的效果。然而以數位相機而言，其鏡頭多為自動對焦，甚至有縮放影像的裝置，因此無固定的內方位可言，所以率定時相機率定及目標物量測的影像必須為同一組，本文以率定場法及自率光束法的方式進行數位相機率定。透過

¹ 國立成功大學測量工程學系研究助理

² 國立成功大學測量工程學系副教授

³ 國立成功大學測量工程學系博士班研究生

影像處理的技術，自動辨識（identification）並量測影像中的標點。利用圓形標搜尋標點定位的技術獲得標點的影像坐標，以標點辨識技術獲得重疊影像中之共軛點，如此即可應用自率光束法來同時進行相機率定及物空間點位解算的工作。整個流程從量測處理到解算是自動化的，人工的監督修正雖難免，但人力的需求應可被降到最低。

2. 數位相機之率定

2.1 相機率定原理及參數

本實驗所使用的數位相機為柯達公司所出產的 DCS460 相機，DCS460 是由 Nikon N90S 傳統相機附加 CCD 機背及記錄器組合而成。其 CCD 大小為 $18.4\text{mm} \times 27.6\text{mm}$ ，成像大小為 $2036 \times 3060\text{pixels}$ ，像元尺寸為 $9 \times 9 \mu\text{m}$ 。由於目前的數位相機並非專為攝影測量所設計，因此相機內方位之穩定性以及鏡頭之畸變情形值得進一步研究。數位相機的量測性質，如 CCD 的像元尺寸及排列結構，以及光學成像距離、像主點及透鏡畸變等多屬未知或只有概略數據，甚至其內方位是無法固定或不穩定的，因此應歸類於非量測性相機之列。

一般數位相機並非針對攝影測量使用而設計製造的，所以並無精確之幾何率定參數，無法進行影像坐標與空間坐標間之轉換。因此率定數位相機是推展數位式近景攝影測量之必要工作，一般需要考慮的相機率定參數如下：

- (1) 相機主距 (Principal Distance, PD)：主距是從透鏡系統之投影中心到成像面的垂直距離，通常以符號 c 代表其參數。
- (2) 像主點 (Principal Point, PP)：相機主軸於成像平面的垂足，或是光線交會中心 (Principal Point of Autocollimation, PPA)，此點應是像平面坐標的真正原點。而相機透鏡輻射畸變之對稱中心點，稱為對稱像主點 (Principal Point of Symmetric, PPS)。理想相機之 PPA、PPS 應重疊，但實際上存在些許的差異。本文所使用之相機率定程式是將 PPS 當作像平面座標的原點，而 PPA 相對於 PPS 之位置為率定像主點 (x_0, y_0) 。由於 DCS460 數位相機內方位為未知，但其 CCD 通常是固定的，因此可將 CCD 之中心位置指定為 PPS。雖然 CCD 像元的尺寸及排列結構亦會影響內方位，但經檢測結果，DCS460 相機之像元排列不規則性小於 $5 \mu\text{m}$ [劉虹妤，1996]，應可忽略之。
- (3) 輻射變形 (Radial Distortion)：因鏡頭的曲面使得光線在透過鏡頭時產生折射而不滿足共線條件，通常假設這種變形與輻射方向的距離成某種比例且對稱，對相片坐標之改正可以寫成如下式：

$$\begin{aligned}\delta_x &= x \cdot K_1 \cdot r^2 + x \cdot K_2 \cdot r^4 + x \cdot K_3 \cdot r^6 + \dots \\ \delta_y &= y \cdot K_1 \cdot r^2 + y \cdot K_2 \cdot r^4 + y \cdot K_3 \cdot r^6 + \dots\end{aligned}\quad (1)$$

其中 $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$

(4)離心變形 (Decentering Distortion)：其產生原因為鏡片的排列中心未對準像主點而造成，是一種非對稱性的變形，其變形為輻射方向 (Radial, δ_r) 及正切方向 (Tangential, δ_t) 的組合。應用Brown [1972] 所建議的參數式來描述離心變形在 x 及 y 方向的影響量，其影響量可分別表示成：

$$\begin{cases} \Delta x = \left(1 - \frac{f}{S}\right) \cdot [P_1(r^2 + 2(x - x_0)^2) + 2P_2(x - x_0)(y - y_0)] \\ \Delta y = \left(1 - \frac{f}{S}\right) \cdot [P_2(r^2 + 2(y - y_0)^2) + 2P_1(x - x_0)(y - y_0)] \end{cases} \quad (2)$$

其中 P_1 及 P_2 為距焦點無窮遠時之離心變形參數， f 為焦距，而 S 為物距。

2.2 近景相機率定方法

自率光束法是以多張重疊影像量測分佈均勻的多重點，利用共線式同時求解內外方位參數及物空間坐標。自率光束法並不要求物空間量測標點之坐標為精確已知，因此適合非量測相機的率定工作。取像時必須使用同樣的光學設定，計算時所有未知參數包括相機的內外方位元素及待求之物空間坐標都必須給起始值。缺點是必須取許多張不同方位的影像，每一張都必須量測，增加許多影像量測的工作。本文因此採用自動辨識標點的方法解決影像量測的問題，提升數位相機的自動化及應用方便性。

攝影測量計算的數學模式是所有物空間的點位、投影中心及像點必須滿足共線方程式。但是相機的製作不可能達到如此理想的情況，諸如鏡頭畸變差，成像面的不平坦，成像面與主軸不垂直等系統誤差會使得像平面上的點位坐標產生偏移，影響最後所要解算的點位物空間坐標的精度。因此所用的自率光束法之主要數學公式是共線式加上附加參數而得。其基本公式可以表示為：

$$\begin{aligned} x_j - x_0 + \delta_x + \Delta x &= c \frac{(X_j - X_{0i})m_{11} + (Y_j - Y_{0i})m_{12} + (Z_j - Z_{0i})m_{13}}{(X_j - X_{0i})m_{31} + (Y_j - Y_{0i})m_{32} + (Z_j - Z_{0i})m_{33}} \\ y_j - y_0 + \delta_y + \Delta y &= c \frac{(X_j - X_{0i})m_{21} + (Y_j - Y_{0i})m_{22} + (Z_j - Z_{0i})m_{23}}{(X_j - X_{0i})m_{31} + (Y_j - Y_{0i})m_{32} + (Z_j - Z_{0i})m_{33}} \end{aligned} \quad (3)$$

其中

i 表示第 i 張相片， j 表示第 j 點；

c 為主距；

δ_x 、 δ_y 為輻射變形改正量；

Δ_x 、 Δ_y 為離心變形改正量；

m_{11} ... m_{33} 為旋轉矩陣之元素；

X_{0i} 、 Y_{0i} 、 Z_{0i} 相片 i 之透視中心物空間坐標；

X_j 、 Y_j 、 Z_j 為物點 j 之坐標。

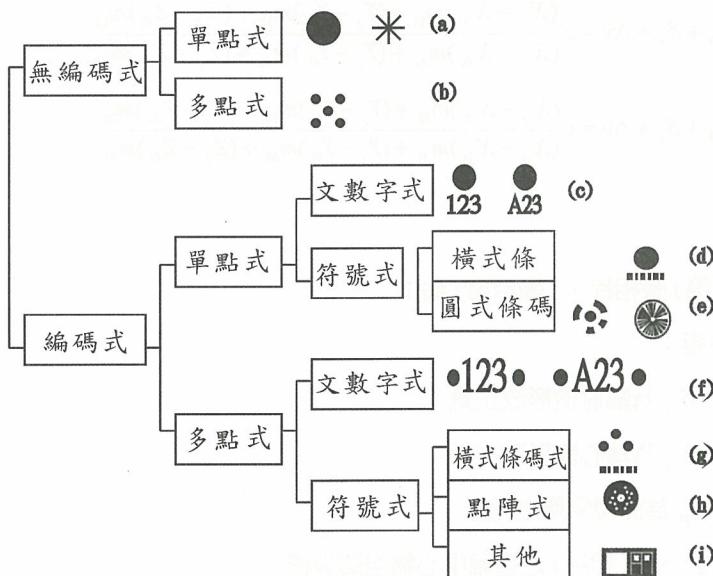
3. 人工標點的設計與辨識

3.1 人工標點的類型

本文將目前近景攝影測量自動化而設計的人工標點[Ahn & Schultes, 1997]以階層式的方式加以分類。

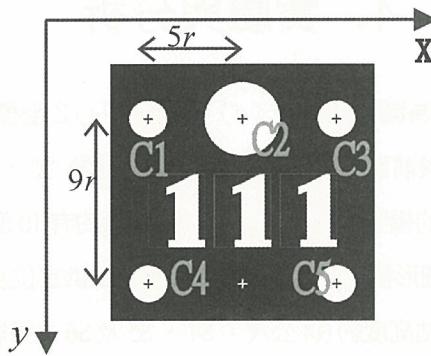
首先依人工標點是否可供辨識之能力分為兩類：無編碼式及編碼式。無編碼式的人工標點設計圖樣簡單如圖一(a)、(b)，配合適當的演算法即可搜尋得到所有的標點，缺點是無法辨識標點。編碼式則賦予每個人工標點特殊的編號或符號，使我們能應用影像處理的技術定出標點位置並辨識標點編號。這兩大類依圖樣設計的方式又可分為單點式及多點式，單點式在應用上較為簡單，但容易與背景影像混淆而誤判標點，而且無法修正因傾斜攝影造成的標點變形，導致辨識錯誤；多點式可以從分佈點的相對位置得到比例尺及變形之改正參數等資訊，以修正標號的變形，較能保障標點辨識的正確性。

編碼的形式依人的辨識能力可分為文數字式及符號式。文數字式是以文字或數字或兩者混合來代表每個人工標點的編號，如圖一(c)、(f)。一般來說文數字是最為廣泛使用的，因為人眼可以立即辨識出標號，可減少在佈標時錯誤的機率，檢核自動辨識的成果時也比較方便。符號是以條碼形式居多，有橫式條碼及圓形條碼，其他亦有以點陣或某種特殊符號代表編碼，如圖一(h)、(i)。橫式條碼是以粗細或長短不同的線條加以組合來表示人工標點的編號，如圖一(d)、(g)。由於條碼有方向性且人眼不易辨識，若有錯誤不易被發現，而當影像解析度較低時，條碼容易失去作用。圓形條碼是以黑白相間的環狀圖形來代表每個人工標點的編號，如圖一(e)。圓形條碼是直式條碼的改良，已避開方向性的問題，使辨識的演算更簡便但同樣有人眼不易辨識的問題，但一般只適用於單點式標點。



3.2 人工標點的設計

為了能提供修正偵測誤差的可能性，並能定得標的位置、旋轉角及比例尺，本文選用多點式標點，而為了人眼亦可辨識標號且使自動辨識有高的成功率，採用純數字標，而3個數字的編碼可提供足夠的編碼數量。由於不同顏色的標對光的反應不同，白色具有反射光的特性經由相機透鏡至成像面時會有暈開的效果。在光線較弱的地方白色圓搜尋成功率會比黑色圓來得高，故本文採用黑色底、白色圓形標點和白色數字之人工標點，如圖二。



圖二 本文所設計之人工標點

C1-C5 分別為五個圓形標的編號，並設小圓之半徑為 r ，大圓半徑為 $2r$ ， C_{ix} 及 C_{iy} ($i=1,2,3,4,5$) 分別表示圓形標中心之影像坐標，則五個圓位置之間的關係為： C_1 、 C_2 的距離為 $5r$ ， $C_{1x} < C_{2x}$ ； C_1 、 C_3 的距離為 $10r$ ， $C_{1x} < C_{3x}$ ； C_1 、 C_4 的距離為 $9r$ ， $C_{1y} < C_{4y}$ ； C_1 、 C_5 的距離為 $\sqrt{(10r)^2 + (9r)^2}$ ， $C_{1x} < C_{5x}$ 、 $C_{1y} < C_{5y}$ ； C_3 、 C_4 的距離為 $\sqrt{(10r)^2 + (9r)^2}$ ；在人工標點之圓形標偵測與標號辨識將依上述人工標點之組成結構進行辨識。

3.3 人工標點的自動辨識

應用影像處理的技術來自動辨識上述的人工標點有其特定的程序，首先得先搜尋影像上所有的圓形標，然後匹配人工標點結構以確認標點，進而精確定位並糾正其姿態，最後辨別數字編碼[王聖鐸，1997]，其內容分述如下：

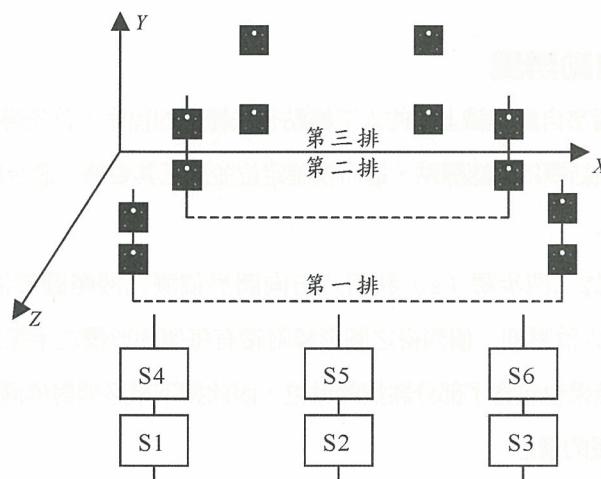
- (1) 圓形標偵測：分為三個步驟 (a) 利用八方向圓形偵測元搜尋圓形標，(b) 偵測值之計算，(c) 非最大值壓抑。偵測得之圓形標附帶有每個圓形標之半徑及圓心之影像坐標等屬性。由於搜尋的結果也包含了部分誤授的點位，因此接下來必須對偵測到的圓形標進一步精密定位，並消除誤授的情形。
- (2) 精確定位：首先建立一個目標視窗也就是圓形標的模版，然後將含有圓形標的搜尋視窗與模版進行匹配，計算其相似性。若匹配成功，則可測定圓形標的圓心至次像元的精度；反之若匹配

失敗，則表示該搜尋視窗並不含圓形標，而是前一程序誤授的結果。

(3) 標號辨識：分為三個部分：(a) 標形組合，(b) 影像糾正，(c) 數字裁切與數字辨識。標形組合是將每個人工標點的五個圓形標依照人工標點之結構加以組合，再利用八參數轉換進行影像糾正的動作，將影像上每一個人工標點分別糾正成與模版相同大小之正射影像。最後依照模版上數字之正確位置將糾正後的人工標點之數字進行裁切與數字辨識。

4. 實驗與分析

實驗場之人工標點的佈設，為減低像主距(c) 及投影中心Z坐標之高度相關性，因此將標點佈設於三個不同深度的立面層，最前面一層編號為 "1"，第二層為 "2"，第三層為 "3"，標點編號之第一個數字代表標點所在之立面層的編號（圖三）。每一立面層約有 10 個標（第二層只有九個），共 29 個標點。每個人工標點有 5 個圓形標，因此有 145 個獨立點以供定位及反算率定參數。攝影站的配置如圖三。S1、S2 及 S3 之攝影站高度約 0.4 公尺，S4、S5 及 S6 之攝影站高度約為 2.0 公尺，S2 及 S5 採正向攝影，S1 及 S4 與 S3 及 S6 則採約 15 度的交向攝影，影像重疊區域以涵蓋所有標點為準。標點之空間坐標是 P32 正片在解析立體測圖儀以人工量測所有標點，經 P32 出廠之率定參數進行內方位轉換後，進行光束法平差計算得外方位元素及所有圓形標的物空間坐標，空間坐標標準偏差之平均值分別為 0.0021m、0.0029m、0.0024m，本文將該組資料稱為 " 對照組 "。結果發現空間坐標之 Y 坐標精度比較差，推測是由於實驗場中每一個立面層中均有 4 排人工標點，每一排有 2 到 3 個人工標點，因此人工標點的分佈在 Y 方向比 X 方向為弱所造成的。



圖三 攝影站配置圖

另外我們將“對照組”求得的人工標點空間坐標做為空間控制，以人工在解析製圖儀所量之相片坐標反求 P32 相機內、外方位參數與“對照組”之內、外方位參數比較結果如表一。數據顯示 Y 方向受到較大的影響，其原因應該是攝影站的佈設因受空間的限制，在 Y 方向的交會幾何條件較弱，因此造成內方位 y_0 及外方位 Y_0 相依性較高。

表一 外方位差值

攝影站編號	$dX_0(\text{m})$	$DY_0(\text{m})$	$dZ_0(\text{m})$	$d\omega(\text{gon})$	$d\varphi(\text{gon})$	$d\kappa(\text{gon})$
1	0.004	0.014	0.002	0.0106	-0.0185	0.0217
2	0.004	0.013	0.002	0.0109	-0.0216	-0.0033
3	0.004	0.013	0.001	0.0120	-0.0190	-0.0279
4	0.004	0.013	-0.001	0.0544	-0.2004	0.0266
5	0.003	0.013	-0.001	0.0507	-0.2037	-0.0012
6	0.003	0.013	-0.002	0.0457	-0.2012	-0.0278
相機參數	$df(\text{mm})$	$dx_0(\text{mm})$	$dy_0(\text{mm})$			
中誤差	0.0178	0.0211	-0.0920			

4.1 P32 相機自動率定實驗

將第一個實驗之 P32 正片以 Leica DSW-200 掃描器掃瞄成數位影像，以進行自動化率定之程序進行 P32 相機率定，掃瞄解析度為 $25 \mu \text{m}/\text{pixel}$ 。人工標點自動辨識之結果如表二。

表二 P32 相機之人工標點辨識結果

	圓形標偵測					標形組合					數字辨識				
	全部	正確	誤授	漏授	成功率	全部	正確	誤授	漏授	成功率	全部	正確	錯1字	錯2字	成功率
S1	128	126	22	2	98%	24	22	0	2	91%	22	18	4	0	81%
S2	135	134	42	1	99%	27	26	0	1	96%	26	22	4	0	84%
S3	130	130	38	0	100%	23	23	1	0	100%	23	21	2	0	91%
S4	141	138	29	3	97%	27	26	0	1	96%	24	22	2	0	91%
S5	141	140	19	1	99%	27	26	0	1	96%	26	23	3	0	88%
S6	136	134	40	2	98%	25	23	1	2	92%	23	18	4	1	78%

由於拍攝時前後的人工標點有遮蔽的情形，所以每張影像上人工標點的個數不盡相同，我們將以影像上所拍攝之人工標點個數位分母，圓形標偵測之結果為分子，計算搜尋結果之成功率。在圓形標偵測的部分，成功率可達 90% 以上，而圓形標漏授的主要原因為圓形標傾斜所造成，若要提升圓形標之搜尋能力，本文建議加入橢圓偵測元應可改善。標形組合之成功率達 90% 以上，標形組合會受到圓形標偵測的影響，當人工標點有一個以上之圓形標漏授會造成標形組合失敗，另外當第一排及第二排太接近或部分重疊時，也會造成組合錯誤的情形發生，目前尚無改善方式，只能以人工的方式刪除標形組合錯誤的情形。

表三 P32 數字辨識結果

	No.0	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9
全部	10	101	100	94	44	33	16	14	16	7
正確	2	101	100	94	44	32	6	14	16	7
錯誤	8	0	0	0	0	1	10	0	0	0
成功率	20%	100%	100%	100%	100%	97%	37%	100%	100%	100%

數字辨識方面，每個人工標點的三個數字均正確之比率為 75 %以上，然而我們發現數字辨識錯誤以數字“0”和“6”佔大多數。這是因為數字“0”和“9”以及數字“6”和“8”這兩組相關係數都相當高，因此即使在近距離的時候也很容易辨識錯誤。本文建議將數字“0”和“6”改用其他字型或捨棄不用，其數字辨識結果應該會大幅提高。在自動量測部分，P32 之六張相片以人工在解析製圖儀之量測結果與相片掃瞄後自動辨識結果之差異如表四，結果發現兩者之坐標差並沒有偏向 x 或 y 的情形，人工與自動量測相片坐標差之標準偏差值在 x 、 y 之平均值分別為 0.0175mm、0.0174mm，也沒有太大的差異，因此人工標點之自動辨識與定位方面都有相當不錯的成果。

表四 P32 人工與自動量測相片之坐標差（單位：mm）

攝影站編號	x坐標差值的平均值	y坐標差值的平均值	x坐標差值平均值的標準偏差	y坐標差值平均值的標準偏差
1	-0.0007	0.0051	0.0142	0.0153
2	0.0026	-0.042	0.0125	0.0142
3	0.0002	-0.0111	0.0189	0.0233
4	-0.0129	0.0042	0.0210	0.0163
5	-0.0084	-0.0017	0.0187	0.0182
6	0.0015	0.0021	0.0200	0.0170
平均值			0.0175	0.0174

最後利用人工標點自動辨識與定位之成果，失敗的部分以人工量測的方式補齊後，再以BINGO程式計算結果。本文分別以率定場法及自率光束法率定 P32 之內方位，並比較兩種率定結果與實際率定資料之差異如下：

- (1)空間坐標標準偏差之平均值計算結果，率定場法空間坐標精度為 0.0006m、0.0003m、0.0013m，自率光束法空間坐標精度為 0.0015m、0.0014m、0.0026m。因為率定場法之控制點是利用“對照組”以光束法計算後所得之空間坐標為控制，因此率定場法之空間坐標精度比較好，而自率光束法是以八個控制點計算，因此空間坐標精度比較差。
- (2)比較 P32 兩種率定方式所得之相機內方位參數與相機出廠率定值之差異以 dy_0 差異最大，其值為 0.1245mm（表五）。而外方位參數與“對照組”之差異以 dY 和 $d\varphi$ 差異最大，其值分別為 0.015mm 和 -0.2493gon（表六），應該是因為攝影站的佈設受到空間的限制，在 Y 方向的交會幾

何條件較弱，因內方位 y_0 及外方位 Y_0 相依性高所產生的現象。因此當相機之內、外方位同時為待求解之未知數時，彼此會互相影響，造成率定結果所求得之相機內外方位與“對照組”之內外方位不符。

(3)最後計算兩種率定方法與“對照組”之空間坐標差之結果如表七。因為於率定場法所使用之控制點是“對照組”以光束法計算後所得之空間坐標，因此率定場法與“對照組”空間坐標差平均值的標準偏差小，最大只有0.0010公尺也就是1mm。而自率光束法只採用八個控制點，因此與“對照組”之空間坐標差異比較大，兩者的空間坐標差之標準偏差最大為0.0039公尺相當於3.9mm。

表五 P32 兩種率定方法與出廠率定值之差異（單位：mm）

	f	x_0	y_0	df	dx_0	dy_0
出廠率定值	64.2900	0.0090	-0.0120			
率定場	64.2580	-0.0123	-0.1283	0.0320	0.0213	0.1063
自率光束法	64.1932	0.0104	-0.1365	0.0968	-0.0006	0.1245

表六 P32 兩種率定方法與“對照組”外方位元素之差異

攝影站編號	$dX_0(m)$	$dY_0(m)$	$dZ_0(m)$	$d\omega(\text{gon})$	$d\varphi(\text{gon})$	$d\kappa(\text{gon})$
率定場法	1	0.002	0.014	0.001	0.0130	0.0013
	2	0.002	0.013	0.001	0.0214	0.0127
	3	0.003	0.011	-0.001	0.0285	0.0481
	4	0.004	0.013	-0.001	0.0414	-0.2228
	5	0.001	0.014	-0.003	0.0131	-0.2493
	6	0.003	0.012	-0.002	0.0165	-0.2093
自率光束法	1	0.004	0.015	0.003	0.0356	0.0113
	2	0.003	0.013	0.006	0.0229	0.0269
	3	0.002	0.011	0.005	0.0116	0.0669
	4	0.006	0.012	0.004	0.0704	-0.2204
	5	0.001	0.014	0.002	0.0164	-0.2459
	6	0.003	0.011	0.003	0.0019	-0.2064

表七 P32 兩種率定方法與“對照組”空間坐標差值（單位：公尺）

率定方法	有無附加參數	X坐標差值的平均值	Y坐標差值的平均值	Z坐標差值的平均值	X坐標差值平均值的標準偏差	Y坐標差值平均值的標準偏差	Z坐標差值平均值的標準偏差
率定場法	無	-0.0000	0.0000	-0.0000	0.0007	0.0007	0.0010
	有	-0.0001	0.0001	-0.0001	0.0007	0.0007	0.0010
自率光束法	無	0.0004	0.0004	0.0002	0.0013	0.0011	0.0039
	有	0.0004	0.0003	0.0003	0.0013	0.0010	0.0039

4.2 數位相機率定實驗

以 Kodak DCS460 數位相機進行自動化的率定實驗，同樣採圖三所述之攝影站配置，相機鏡頭是 28mm 的單眼相機。對六張重疊影像進行人工標點的自動辨識，其辨識之結果如表八：

表八 DCS460 之人工標點辨識結果

	圓形標偵測					標形組合					數字辨識				
	全部	正確	誤授	漏授	成功率	全部	正確	誤授	漏授	成功率	全部	正確	錯1字	錯2字	成功率
S1	137	135	123	2	98%	27	25	0	2	92%	25	23	2	0	92%
S2	130	129	134	1	99%	26	24	0	1	92%	24	19	5	0	79%
S3	119	119	138	0	100%	21	20	1	1	95%	20	15	5	0	75%
S4	138	134	150	4	97%	26	22	0	4	84%	22	19	3	0	86%
S5	130	130	140	0	100%	26	26	2	0	100%	26	23	3	0	88%
S6	114	110	195	4	96%	20	18	2	2	90%	18	16	2	0	88%

六個攝影站之圓形標偵測之成功率均達 90% 以上，標形組合成功率也有 80% 以上，每個人工標點的三個數字均辨識正確成功率達 70% 以上，數字辨識除了 0 和 6 外，成功率高達 100%，如表九所示，該結果與 P32 之結果相似。

表九 DCS460 數字辨識結果

	No.0	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9
全部	13	89	94	101	40	35	17	8	14	5
正確	4	89	94	101	40	35	6	8	14	5
錯誤	9	0	0	0	0	0	11	0	0	0
成功率	30%	100%	100%	100%	100%	100%	35%	100%	100%	100%

由於上述六個測站之辨識結果為影像坐標，仍須轉為公制單位之相片坐標。已知 Kodak DCS460 之影像大小為 2060*3060 pixels，CCD 大小為 18.4*27.6mm，利用兩者間的比例關係進行平面坐標轉換，比較兩種率定方法之差異如下：

(1) 積空間坐標標準偏差之平均值計算結果，率定場法空間坐標精度為 0.0017m、0.0017m、0.

0031m，自率光束法空間坐標精度為 0.0030m、0.0027、0.0076m。由於率定場法之控制點是利用 " 對照組 " 以光束法計算後所得之空間坐標為控制，因此率定場法之空間坐標精度比較好。

而自率光束法是以八個控制點計算，因此空間坐標精度比較差，該結果與 P32 相機率定實驗結果相同。

(2) 比較 DCS460 兩種率定方式之差異，外方位參數空間坐標之差異量最大為 -0.008mm，方位角之

最大差異量為 -0.1555gon，如表十所示。內方位之差異量最大為 -0.066mm，如表十一所示。雖然沒有出現 P32 相機率定時內方位 y_0 與外方位 Y_0 具有高度相依性的現象，但理論上當數位相機之內、外方位同為未知參數時彼此應會互相影響，因此此處所求得相機內、外方位參數之可

靠度仍有待進一步研究。

表十 DCS460 兩種率定結果外方位元素差異量

攝影站編號	$dX_0(\text{m})$	$dY_0(\text{m})$	$dZ_0(\text{m})$	$d\omega(\text{gon})$	$d\varphi(\text{gon})$	$d\kappa(\text{gon})$
1	0.000	0.000	-0.004	-0.0241	-0.1462	-0.0349
2	0.000	-0.001	-0.005	-0.1277	-0.1420	-0.0201
3	0.001	0.000	-0.004	-0.1208	-0.1555	0.0109
4	0.001	0.000	-0.001	-0.1186	-0.1319	0.0019
5	0.000	0.001	-0.005	-0.1380	-0.1431	0.0356
6	0.001	0.001	-0.008	-0.1043	-0.1497	0.0341

表十一 DCS460 兩種率定結果之相機率定差值（單位：mm）

	f	x_0	y_0
率定場	28.5261	0.3721	-0.5439
自率光束法	28.4660	0.3104	-0.4778
差值	0.0601	0.0617	-0.0661

(3)最後計算兩種率定方法與"對照組"空間坐標差一之結果如表十二。由於率定場法使用之控制點是利用"對照組"以光束法計算後所得之空間坐標為控制，因此率定場法與"對照組"空間坐標差很小。自率光束法與"對照組"空間坐標差異比較大，兩者空間坐標差異的標準偏差最大為0.0106m、0.0080m、0.0240m。

表十二 DCS460 兩種方法之空間坐標差（單位：m）

率定方法	有無附加參數	X坐標差值的平均值	Y坐標差值的平均值	Z坐標差值的平均值	X坐標差值平均值的標準偏差	Y坐標差值平均值的標準偏差	Z坐標差值平均值的標準偏差
率定場法	無	0.0002	-0.0001	0.0002	0.0036	0.0047	0.0027
	有	0.0002	-0.0001	0.0001	0.0016	0.0020	0.0013
自率光束法	無	0.0010	0.0008	-0.0022	0.0106	0.0081	0.0240
	有	0.0001	0.0002	-0.0023	0.0064	0.0047	0.0150

雖然自率光束法平差不需要物空間坐標，或只要提供幾個控制點即可，然而自率光束法平差的未知數會互相影響，因此若要以自率光束法平差的方式進行相機率定，必須拍攝多張相片以提高相機率定結果和空間坐標之精度與可靠度，如Beyer[1992]進行CCD相機率定時，攝影站的配置分八個欄位，每一個欄位有三種高度，共24個攝影站，每一站採用旋轉角0和90度的方式拍攝，其多餘觀測數達8880以上，附加參數後之計算結果其空間坐標精度可達0.03mm，相片坐標精度可達0.14 μ m。本文所提出數位相機率定之自動化程序確實可行，如何提升相機率定之精度和空間坐標之精度與可靠度將是今後研究方向的重點。

5. 結論與建議

透過影像處理的技術自動辨識並量測影像中的標點，應用圓形標搜尋標點定位的技術獲得標點的影像坐標，及標點辨識技術獲得重疊影像中的共軛點，以自率光束法來同時進行相機率定及物空間點位解算的工作。整個流程從量測處理到解算均以自動化方式進行，實驗證明從人工標點偵測、定位到辨識之成功率可達 70% 以上。利用影像處理的方式進行人工標點偵測及辨識，其成果容易受到影像之光線、雜訊等因素影響，因此後續的人工監督、修正仍是需要的。此外，若能加入橢圓偵測、加強標形之幾何條件、以及增強數字 "0" 及 "6" 之間的辨識力，將可提升相機率定自動化之成功率。

在相機率定部分，量測性相機 P32 兩種率定方式之結果與 " 對照組 " 比較，可發現攝影站的佈設受空間的限制，在 Y 方向的交會幾何條件較弱，造成內方位 y_0 及外方位 Y_0 產生相依性高的現象；空間坐標差之標準偏差以率定場率定法與 " 對照組 " 之間差異最小，其附加參數後之計算結果並沒有太大改變。數位相機 DCS460 兩種率定方法之率定結果，內方位差異量分別為 0.0601mm、0.0617mm、-0.0661mm，外方位以方位角 $d\omega$ 、 $d\varphi$ 差異較大；空間坐標與 " 對照組 " 之比較結果，以率定場率定法與 " 對照組 " 之間差異較小，其附加參數後之計算結果有明顯的改善。自率光束法是利用重疊影像間互相約制，以多張重疊影像量測分佈均勻的多重點，利用共線式理論同時求解內外方位參數及物空間坐標。由於自率光束法平差的未知數會互相影響，因此若要以自率光束法平差的方式進行相機率定，必須拍攝多張相片以提高相機率定結果和空間坐標之精度及可靠度。

參考文獻

- 王聖鐸，1997。近景攝影測量中人工標點的自動辨識與定位人工標點。國立成功大學航空測量研究所碩士論文。
- 何維信，1995。航空攝影測量學。國立編譯館主編，大中國圖書公司印行，pp.524~534。
- 劉虹妤，1996。數位相機之幾何檢定及其在近景攝影測量之應用。國科會大專生參與研究計畫成果報告。
- Ahn, S. J. and M. Schultes, 1997, A New Circular Coded Target for the Automation of Photogrammetric 3D-Surface Measurements, Optical 3-D Measurement Techniques, Zurich, Vol. IV, pp. 225-234.
- Beyer, H. A., 1992, "Accurate Calibration of CCD-Cameras", IEEE, pp.96-101.
- Brown, D. C., 1972, "Calibration of Close Range Cameras", Presented at the XII Congress of the International Society of Photogrammetry, Ottawa, Canada.

Automation of Digital Camera Calibration

Hong-Yu Liu¹ Yi-Hsing Tseng² Sendo Wang³

ABSTRACT

Digital cameras are getting widely used due to their operation conveniences and real-time processing capabilities. Although digital cameras have been considered suitable to photogrammetric tasks, their metric characteristics are not clear and stable as traditional metric cameras. A real-time on-the-job calibration is, therefore, required before a digital camera can be applied for a photogrammetric task. The technique of self-calibration is considered an effective means for digital camera calibration, but a large amount of image measurements are required. To solve this problem, we designed a new text-coded target and proposed an automatic process to detect, position, and identify the targets. Automatic camera calibration can be achieved by integrating this automatic measuring process and bundle adjustment computation. The experimental results are encouraging and optimally show the feasibility of the proposed method.

KEYWORDS: Close-range Photogrammetry, Camera Calibration, Digital Camera, Automation.

¹ Research Assistant, Department of Surveying Engineering, National Cheng Kung University

² Associate Professor, Department of Surveying Engineering, National Cheng Kung University

³ Graduate Student, Department of Surveying Engineering, National Cheng Kung University