

臺灣無人飛行載具小像幅攝影系統幾何校正之研究-以南崗校正場為例

李瓊武¹ 李明軒² 徐百輝³ 彭森祥¹ 許展祥⁴ 黃英婷⁴ 林昌鑑⁴

¹工研院 量測技術發展中心

²自強工程顧問有限公司

³臺灣大學 土木工程學系

⁴內政部 國土測繪中心

E-mail: JohnLEE@itri.org.tw

摘要

無人飛行載具 (UAV) 已在全球航遙測界快速蓬勃發展, 搭配小像幅攝影系統, 以較低的航高進行空拍 (小於 500 m), 應用製圖技術能夠滿足大比例尺成圖的精度要求, 同時降低作業成本。然而, 為確保測繪品質, 建置地面南崗校正場, 設置幾何校正標, 以全球導航衛星系統 (GNSS) 定位儀觀測, 經嚴密平差解算三維坐標 (N_r, E_r, h_r) 做為校正參考值; 然後, 實施無人飛行載具小像幅攝影系統, 依既定幾何校正作業程序, 空拍校正場, 經軟體處理量測校正標, 三維坐標 (N_m, E_m, h_m) 做為校正量測值。

本文以經典數位航空攝影測量方法輔以近年來在計算機視覺領域興起的影像密匹配軟體處理, 進行嚴密空中三角測量, 分析校正標三維方向器差值 (=校正量測值 - 校正參考值) 及均方根誤差 (RMSE), 有關其擴充不確定度 (95%信賴水準) 亦一併探討。

關鍵詞: 影像密匹配、空中三角測量、全球導航衛星系統、無人飛行載具

1. 前言

UAV 進行空拍調查及製圖, 已在全球航遙測界快速蓬勃發展, 相較於傳統航空攝影測量作業, 利用 UAV 小像幅攝影系統 (UAS) 之航拍作業, 具有高機動性、高安全性、高效率、低成本及天候限制小等特性, 由於其作業時間短、且因較低空飛行, 故易取得高解析度影像, 在國內外已多廣泛應用。

關於 UAS 處理軟體, 多利用高重疊率的影像 (基本要求為航帶內前後重疊 80%、航帶間側向重疊 60%), 透過其關鍵的影像匹配技術 (Scale-Invariant Feature Transform; SIFT) 取得大量特徵匹配點, 建立影像連結關係, 進行方位解算, 繼而進行後端的密點雲匹配 (dense matching), 提供三維建模 (3D model reconstruction) 的參考資訊來源, 這方面軟體多歸屬採用 Structure from Motion (SfM) 技術為基礎的軟體工具 [1]。這類針對 UAS 影像解算處理特色, 在於對於內方位 (焦距、鏡頭畸變) 的精確性並不敏感, 對於拍攝旋角、亮度變化以及像比例尺變化也較不敏感, 並且大量重疊的攝影像片可自動化匹配影像, 取所有像片中的同名點, 製圖程序有別於以往航測製程。

使得以 UAS 影像製圖為目的果, 更需要藉由校正場, 評估 UAS 影像製圖正確性。為此, 乃建置校正場,

除具備校正能量, 也成立符合國際認證規範 ISO/IEC 17025 要求之校正實驗室 [2], 藉以提升測繪成果品質, 落實國土測繪法規。

2. 南崗校正場

南崗校正場 (以下稱校正場) 劃分一小範圍邊長分別為 750 m 及 650 m, 設置對空通視之幾何校正標 (Signalized Targets), 樣式如圖 1, 邊長 1 m 的黑白相間正方形, 中央直徑設置 8 cm 圓鋼標, 黑白二色之設計, 係考量校正標於淺色水泥地面或深色柏油路面皆可清楚辨識 [2], 共計 46 點, 位置分布如圖 2。執行現場校正 (In-Situ Calibration) 前, 各幾何校正標 (以下稱校正標) 三維坐標參考值, 係利用衛星定位測量技術求得。

使用多組 GNSS 定位儀, 連續且同步觀測校正標, 每個時段連續觀測應達 60 分鐘, 衛星訊號資料記錄間格為 5 秒, 觀測衛星顆數應大於 4, PDOP 值需在 6 以下。測量規劃使基線向量形成閉合的幾何圖形, 以增加成果的可靠度和精度, 引測的內政部公告衛星控制點及基線向量如圖 3。

採用衛星定位測量資料處理軟體 (Topcon Tools) 計算各時段基線 (Baseline) 成果, 以最小約制平差技術進行網形初步平差, 並辦理基線成果品質分析, 包括基線重複性分析、觀測數據偵錯、離群值數據剔除及觀測網形閉合差分析等處理。以強制拟合平差技術計算校正標的投影坐標, 當作校正參考值 (N_r, E_r, h_r)。

評估校正參考值 (N_r, E_r, h_r) 不確定度 [3] [4], 其平面組合標準不確定度 $u_{cr1} = 17$ mm, 垂直組合標準不確定度 $u_{cr2} = 29$ mm。

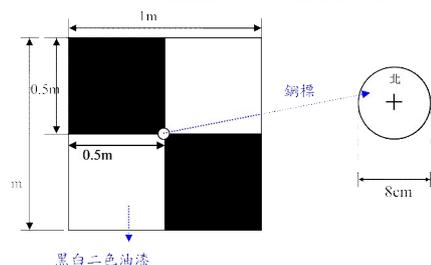


圖 1 南崗校正場幾何校正標樣式

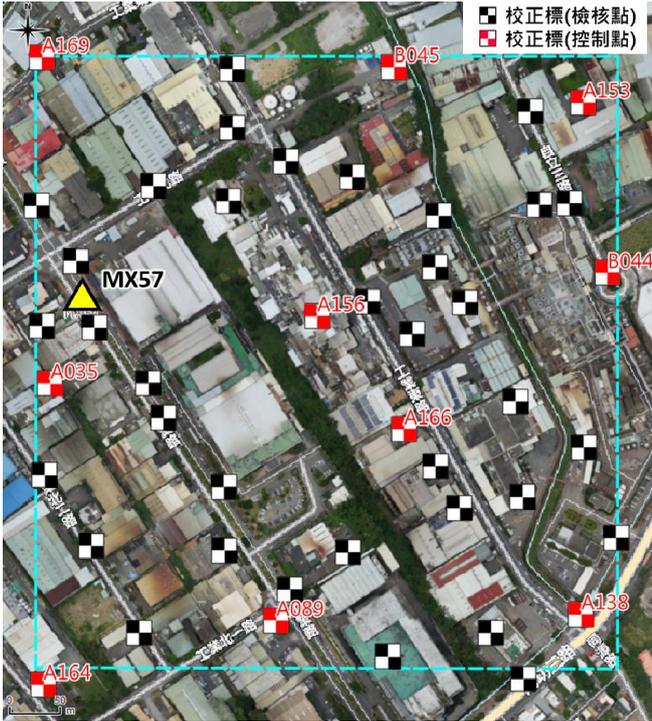


圖 2 矩形校正場幾何校正標分布

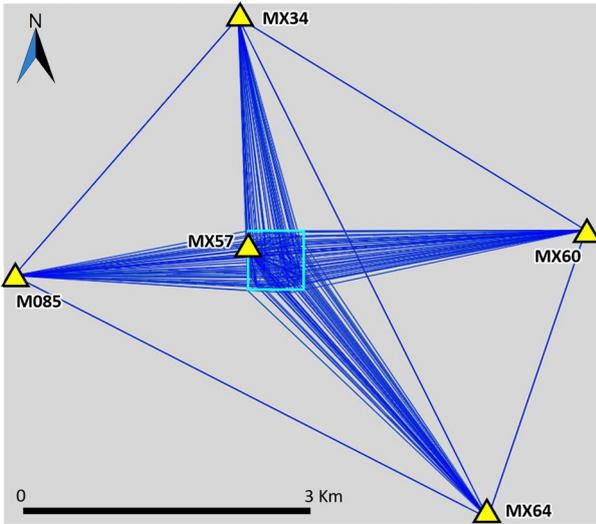


圖 3 幾何校正標衛星靜態測量基線圖

3. 無人飛行載具小像幅攝影系統

3.1 無人飛行載具現況

無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle; UAV)或無人機的定義為無須人員在載具上操作的飛行器，一般可由人員透過遠端遙控方式操控，或是事先設定飛行軌跡後，由 UAV 自動導航飛行。現今的 UAV 應用除航空器 (aircraft) 本身之外，尚包含地面控制站 (Ground Control Station, GCS) 及通訊 (Data link) 設備等其他子系統，其所組成通稱為無人駕駛航空器系統 (Unmanned Aircraft System; UAS)。

為能達到測繪應用的目的，一般 UAV 需在相關的軟、硬體上進行整合及改善，才能滿足攝影測量的需求。在硬體上，為能自動導航、定位及定向系統的整合扮演重要的角色，其中定位有賴於衛星定位感測器(如採用 GPS、GLONASS 等系統進行即時定位)，定向則依賴慣性測量單元 (Inertial Measurement Unit; IMU) 之整合。

在軟體方面，UAV 攝影測量資料處理程序與傳統航測影像處理程序大同小異，但大部分的 UAV 系統所搭載的相機為非量測型數位相機 (Non-metric digital camera)，即感測器面積小於 24 mm x 36 mm，歸類為「小像幅」[5]，其內方位 (Inner Orientation; IO) 參數不穩定，傳統航測影像解算方法有時不適用於 UAV 航拍影像上。為解決這些問題，許多以電腦視覺 (Computer Vision) 技術為基礎的演算法，紛紛應用到 UAV 影像之匹配及方位求解，最常見的影像匹配方法以 SIFT 演算法為主，而影像方位求解則以 SfM 技術居多，能有效地解決 UAV 影像處理的問題。

3.2 UAS 攝影測量方位解算

攝影測量 (Photogrammetry) 工作內容主要係利用相機 (或攝影機) 對地面物體進行拍攝，再以立體觀測設備 (如立體測圖儀或數位航測工作站) 對所拍攝的影像進行量測，以從事各種地形測繪或地物判釋之工作。在整個攝影測量的作業程序中，空中三角測量 (Aerotriangulation) 為主要工作項目之一，其主要目的為求解影像的外方位 (Exterior Orientation; EO) 參數，也就是每一張影像於拍攝瞬間之位置及方位，有精確外方位參數求解，後續才能正確地交會出地面點的物空間坐標。

若以製圖 (Mapping) 為目的，直接應用傳統航測影像處理方式進行 UAS 航拍影像處理，可能會面臨兩個問題，一是若採用一般的消費型像機，其內方位不似精密的量測型像機穩定，且因透鏡畸變差 (Lens distortion) 所造成的影像扭曲變形較為嚴重；二是所搭載的 GPS/IMU 精度等級較低，且因其較低空飛行，易受氣流風力或其他外在環境的干擾，產生較大的姿態傾角變化，導致影像匹配連結點上的作業困難，而所取得的 GPS 飛航軌跡成果多半定位精度不高，進而影響 GPS 空中三角之解算精度。

目前市面上已有許多特別針對 UAS 影像進行後續解算處理並產製相關應用產品 (正射影像、DEM/DSM、等高線、密點雲) 之商業軟體，其方位解算成果的精度將影響後端產品的精度。以下簡要說明傳統航測及現行 UAS 航測對於影像方位之求解方式。

(一) 傳統數位航測之解算方式

在航測的經典解算模式中，均假設光線為直線行進，因而在取像過程中，投影中心、像點、物點三者呈現共線關係，藉由共線式 (Collinearity equation) 的幾何關係，得以進行空中三角測量解算、恢復影像方位，乃至於進行後續的立體量測。

對於大區域多條航帶或多張影像的方位求解，航測

通常採光束法平差 (Bundle adjustment) 解算模式，其方法係藉由連結點 (Tie points) 建立影像間的重疊關係，並利用共線條件恢復投影中心、像點、以及地面點的幾何關係，求解時須有已知的地面控制點以及影像上對應的像點坐標，並將共線條件方程式予以線性化後，利用最小二乘法 (Least squared method) 以迭代方式同時解算各影像之方位參數[6] [7]。

(二)電腦視覺領域之解算方式

SfM 技術是一種透過物體移動量、相機運動及物體在三維空間中運動的物理關係重建三維物件或空間場景的方法。得以兩張或多張影像進行重建，達到一種自我校正的技術。現今 UAS 影像處理軟體大都結合電腦視覺技術，以 SfM 的概念，透過相機運動或物體在三維空間中運動的幾何關係重建三維物件或空間場景[8]。

SfM 技術的發展，讓攝影測量不再侷限於傳統的量測型相機，即使是一般的消費型數位相機也可以快速、自動化和低成本的方式獲得三維資訊。類似傳統攝影測量，SfM 攝影測量需採用具不同視角的重疊影像來進行求解；不同的是，SfM 攝影測量並不需要事先取得相機的內、外方位參數的初始值、以及地面控制點資料，而僅需透過場景內完整且高重疊率的攝影影像，透過其關鍵技術包裝而成的工具，一般使用者不需過多的專業知識與操作設定即可產製大量的三維資料，重建三維場景。而在整個 SfM 的作業程序中，主要核心問題為像機的率定、高密度的影像特徵萃取 (Feature extraction) 及密匹配 (Dense matching)、光束法平差 (Bundle adjustment)、產生點雲資料、影像糾正後重新取樣 (Undistortion) 以及三維重建 (reconstruction) 等[9]。

$$L\Delta = \begin{bmatrix} \Delta E \\ \Delta N \\ \Delta h \end{bmatrix} \quad Lm = \begin{bmatrix} E_m \\ N_m \\ h_m \end{bmatrix} \quad Lr = \begin{bmatrix} E_r \\ N_r \\ h_r \end{bmatrix}$$

ΔE : 地籍平面橫軸方向器差

ΔN : 地籍平面縱軸方向器差

Δh : 高程方向器差

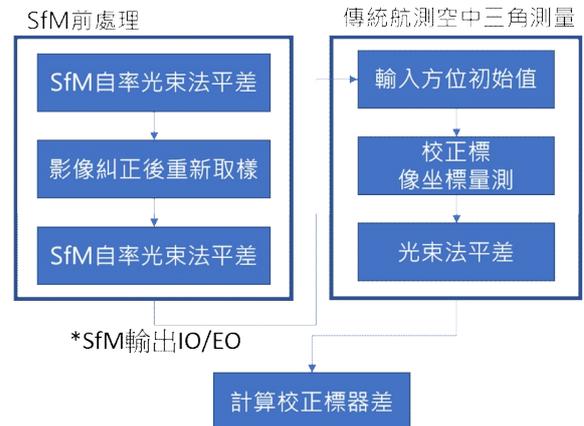


圖 4 結合 SfM 與傳統航測之校正程序

4. 無人飛行載具小像幅攝影系統校正程序及成果

4.1 校正程序

以傳統航測空中三角測量方法進行無人飛行載具搭載小像幅攝影系統之校正，在實務上會受到幾個在軟體先天設計上之條件限制，如影像片幅太小不支援處理、方位初始值要求較嚴謹、透鏡畸變差過大以至於附加參數描述無法導入等，故本文提出以結合 SfM 技術與傳統航測空中三角平差之流程如圖 4，先以 SfM 軟體進行自率光束法平差求定透鏡畸變差附加參數，將影像進行糾正後重新取樣，消除大部分影像變形之影響後如圖 5，再進行傳統航測之空中三角測量，一方面解決小像幅之畸變差過大，無法在傳統航測方法中穩定收斂空三結果的問題，另一方面亦可由 SfM 提供自率法解算後之影像內外方位 (IO/EO)，作為傳統航測空中三角測量方法較佳之初始值。

由空中三角測量平差成果，量得非控制用校正標 (檢核點) 之地面坐標量測值 (Lm)。計算校正標器差 (LΔ)，其式如下：



圖 5 影像糾正重新取樣前後畸變量示意 (pix 表示像元)

4.2 飛行航拍成果及 SfM 前處理

規劃航拍地面取樣距離 (GSD) 為 4 cm, 採用 Sony Alpha 7 像機(像元大小 6 μm 解析度 6000 x 4000 像元) 搭配 35 mm 焦距鏡頭, 飛航對地高度 200 m, 航拍攝影中心分布與影像重疊度如圖 6, 採交叉航帶且影像前後重疊度為 80% 側向重疊度為 60%, 共拍攝 630 張影像, 以 SfM 技術進行前處理, 求得像機內方位參數(Brown's model) 及相關係數[10], 如表 1 及表 2, 利用畸變量糾正後重新取樣之影像, 及 SfM 求得之內方位參數, 作為經典航測中嚴密空中三角測量之初始值, 進行校正作業, 對照表 1 及表 2, 顯示 SfM 求得 UAS 影像於自率法內方位參數之效益; 另一組航拍地面取樣距離 (GSD) 為 15 cm, 像機採用 eBee S.O.D.A (像元大小 2.4 μm, 解析度 5472 x 3648), 焦距 28 mm, 飛航對地高度為 650 m, 均依相同程序進行處理。

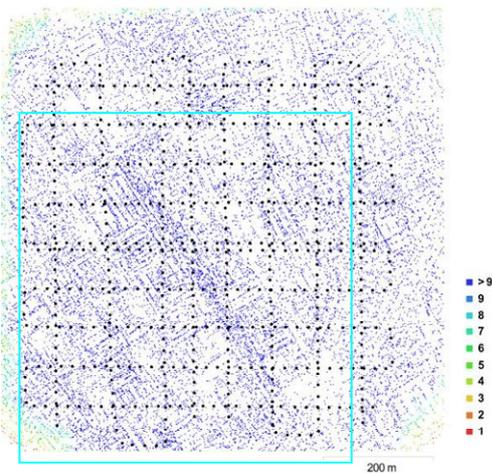


圖 6 航拍攝影中心分布與影像重疊度

表 1 像機內方位參數及相關係數(糾正前)

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
F	6073.06	0.293833	1.00	-0.12	0.58	0.22	0.11	-0.05	0.03	-0.08	0.07	-0.08
Cx	-14.7143	0.0848245		1.00	-0.08	-0.02	-0.28	-0.04	0.04	-0.03	0.68	0.01
Cy	-32.9587	0.0892804			1.00	0.38	0.11	0.02	-0.02	-0.01	0.02	0.43
B1	-0.836873	0.0124064				1.00	0.02	0.04	-0.08	0.07	-0.02	-0.02
B2	-0.771039	0.0123806					1.00	-0.00	-0.00	0.00	0.04	-0.00
K1	0.0491015	0.000114246						1.00	-0.97	0.92	-0.03	-0.01
K2	-0.226973	0.000764275							1.00	-0.98	0.03	0.02
K3	0.00377281	0.00151664								1.00	-0.04	-0.02
P1	0.00132586	4.09343e-06									1.00	-0.02
P2	-0.00111809	3.50361e-06										1.00

表 2 像機內方位參數及相關係數(糾正後)

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
F	6072.26	0.170334	1.00	-0.15	0.62	0.22	0.06	-0.06	0.07	-0.06	-0.02	0.08
Cx	-2.39733	0.0482544		1.00	-0.08	-0.07	-0.25	-0.01	0.01	-0.01	0.79	0.01
Cy	-2.22349	0.0493394			1.00	0.32	0.04	0.02	0.00	-0.00	-0.01	0.57
B1	0.0143624	0.00636975				1.00	0.01	0.02	-0.06	0.07	-0.06	-0.03
B2	-0.0361699	0.00617915					1.00	-0.01	-0.00	0.00	-0.01	-0.02
K1	0.000437017	5.66041e-05						1.00	-0.97	0.91	-0.02	0.03
K2	-0.00222502	0.000377317							1.00	-0.98	0.01	0.01
K3	0.00328741	0.000754619								1.00	-0.01	-0.00
P1	-0.00011837	2.55482e-06									1.00	0.01
P2	9.08507e-06	2.08273e-06										1.00

4.3 嚴密空中三角測量

在經典數位航測軟體中, 量測校正標之 UAS 影像坐標, 並進行空中三角測量平差, 其步驟包含:

- (1)量測像坐標。
- (2)連結點匹配, 辦理影像連結點自動匹配(可採用 SfM 軟體進行), 每張影像與同航帶及鄰航帶之影像, 均須有均勻分布之連結點, 匹配不足處須由人工進行像坐標量測。
- (3)校正標最小約制, 進行空中三角初步平差計算, 並偵測剔除粗差。
- (4)並依照「平差計算→粗差偵測→平差計算→再粗差偵測」的原則循環作業, 剔除經軟體平差計算後所判定為粗差的觀測量。
- (5)檢核連結點數量及分布, 皆有 9 重光束連結點位與鄰片相連結。

將 46 個校正標中的 10 點作為控制點, 其餘 36 點作為檢核點平差成果之坐標量測值 (E_m, N_m, h_m), 分析平面器差 $dE = E_m - E_r$, $dN = N_m - N_r$, 高程器差 $dh = h_m - h_r$, 分析結果如表 3, 其中 d2D 及 d3D 分別表示平面及三維方向之分量。

比較表 3 及表 4 之成果, 顯示 UAS 影像經過 SfM 軟體進行自率法透鏡畸變量之修正, 以經典傳統航測空中三角平差方法, 計算得到的器差值。

表 3 Sony Alpha 7 (4cm)器差值(dE, dN, dh)之統計量

統計量	dE (m)	dN (m)	dh (m)	d2D (m)	d3D (m)
最大值(Max)	0.03	0.04	0.11	0.06	0.15
最小值(Min)	-0.04	-0.04	-0.15	0.01	0.02
絕對平均誤差(MAE)	0.05	0.02	0.04	0.03	0.05
平均誤差(Mean Error)	0.01	0.01	-0.01	0.03	0.05
標準差(Std. Dev)	0.02	0.02	0.05	0.02	0.03
均方根誤差(RMSE)	0.02	0.02	0.06	0.03	0.06

表 4 eBee S.O.D.A (15cm)器差值(dE, dN, dh)之統計量

統計量	dE (m)	dN (m)	dh (m)	d2D (m)	d3D (m)
最大值(Max)	0.08	0.16	0.38	0.25	0.69
最小值(Min)	-0.10	-0.24	-0.67	0.01	0.02
絕對平均誤差(MAE)	0.03	0.05	0.10	0.06	0.13
平均誤差(Mean Error)	0.02	0.02	-0.06	0.06	0.13
標準差(Std. Dev)	0.04	0.07	0.15	0.05	0.12
均方根誤差(RMSE)	0.04	0.06	0.10	0.07	0.12

5 結論

近年 UAS 科技之迅速發展，搭配各種感測器之應用，對於測繪研究及空間資訊產業發展帶來一股研究及應用的熱潮，其應用領域也愈來愈廣，甚至已經超越測繪領域之製圖應用。本文說明 UAS 相關發展及與測繪領域之結合狀況，同時針對 UAS 攝影測量之軟體發展，及影像方位解算（及軟體），列舉一些實際校正範例。

UAS 相關軟、硬體設備仍不斷推陳出新中，預期將來 UAS 攝影測量勢必朝向更輕便、且更自動化的方向發展，對於測繪領域之應用將更多元化，傳統製圖結合 UAS 技術後將掀起另一波研究及應用之熱潮，建立相關校正能量，藉以提升測繪成果，滿足計量追溯鏈，以符國際品保要求。

6 參考文獻

- [1] 徐百輝,"UAS 攝影測量之發展與應用", 經濟部量測資訊, 175, pp 18-27, 2017.
- [2] 航空測量及遙感探測學會, 建立航遙測感應器系統校正作業(4年總報告), 內政部國土測繪中心; 2014.
- [3] 工研院, 104年度擴充航遙測感應器系統校正作業(工作總報告), 內政部國土測繪中心; 2015.
- [4] ISO/IEC Guide 98-3, Uncertainty of measurement-Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement, ISO; 2008.
- [5] Luccio, Matteo, Aerial Cameras, Focus Shifts to Productivity, Imaging Notes, 25(4), 2010.
- [6] Wolf, P. R. and Dewitt B. A., Elements of Photogrammetry: with Applications in GIS, 3rd edition, Taipei: The McGraw-Hill, 2000.
- [7] Mikhail, E. M., Bethl, J. S., and McGlone, J. C., "Introduction to Modern Photogrammetry", Wiley, pp 479, 2001.
- [8] Dellaert, F., Seitz, S., Thorpe, C., and Thrun, S., "Structure from Motion without Correspondence". The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'00), 2010.
- [9] Schonberger, J. L., and Frahm, J.-M., "Structure-From-Motion Revisited", The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'16), pp 4104-4113, 2016.
- [10] Brown, Duane C., "Decentering distortion of lenses". Photogrammetric Engineering. 32 (3), pp 444-462, 1966.