

測量車雙相機同步攝影測量

Synchronous Photography by Two CCD Cameras on a MMS

蔡展榮¹ 吳建億² 李明軒³
Jaun-Rong Tsay¹ Jieng-Yi Wu² Ming-Shiuan Lee³

摘要

本文應用物空間各種可用的已知條件、角邊觀測量、聯合影像坐標觀測值，進行聯合整體平差，並應用於測量車雙相機同步向前拍照的近景攝影測量作業。初步測試成果顯示，本系統已經足以提供 1/1000 地形圖調繪補測之應用。不使用檢定場，直接使用像點像坐標觀測值與各式物空間條件來聯立解算相機的內方位元素、像點的系統性偏移向量、測量車上任意兩部相機之間的相對方位。實驗結果顯示，使用物空間條件檢定測量車相機參數是可行的，可用的物空間條件包括已知線段長度、角度、物點共平面、垂直條件、水平條件、坐標差值、高程差、已知點位高程、已知點位坐標等，其中，部分的控制資料可以取自電子地圖資料庫和三維數碼城市資料庫。本文以物空間已知條件(距離、水平與垂直條件、坐標差值)求解的內外方位元素精度分別可達 $\pm 0.008 \sim 0.010\text{mm}$ ($\hat{\sigma}_{x_0}$, $\hat{\sigma}_{y_0}$, $\hat{\sigma}_f$)、 $\pm 1 \sim 13\text{cm}$ ($\hat{\sigma}_{X_0}$, $\hat{\sigma}_{Y_0}$, $\hat{\sigma}_{Z_0}$)、 $\pm 0.052^\circ \sim 0.211^\circ$ ($\hat{\sigma}_\omega$, $\hat{\sigma}_\varphi$, $\hat{\sigma}_\kappa$)。

關鍵字：聯合平差法、測量車、近景攝影測量、滅點、數位相機

一、測量車發展現況概述

測繪科技之發展日新月異，常見整合多種感測技術的應用系統，例如所謂的移動式測繪系統(mobile mapping systems，簡稱 MMS)就是其中一例，而移動式測繪系統又可分為空載(airborne)、船載(sea-based)、陸基(land-based)三種，陸基式移動測繪系統又以測量車最常見；測量車系統已

經研發多年，科學家、工程師、設計規劃師越來越需要人類生活環境的詳細資料(Mills, 2009)，使用電子平板(平面測量法)、多部數位相機(近景攝影測量法)、GPS 天線(全球衛星定位測量法)、IMU(慣性測量法)、或地面雷射掃瞄儀(地面光達測量法)來獲取詳細的三維資料，包括地籍圖、門牌資料、都市街道詳細資料等。

¹ 國立成功大學測量及空間資訊學系副教授 tsayir@mail.ncku.edu.tw

² 國立成功大學測量及空間資訊學系碩士

³ 國立成功大學測量及空間資訊學系碩士

國際上，已經有不少的測量車系統，例如 Tele Atlas 測量車用來產製電子地圖及三維 GIS 資料庫，配備雷射掃描儀、數位相機、直接地理定位系統，目前其資料覆蓋區域已遍及歐美地區 (Tele Atlas, 2009)。Digilog VX 測量車使用 CCD 相機和雷射掃描系統來施行各種道路測量，收集道路之空間資訊 (Mandli Communications, 2009)。IP-S2 測量車整合直接地理定位和測繪系統，

配備 GNSS 與區域增強系統 WAAS 之衛星訊號接收機、導航等級 IMU 與 DMI (Distance Measuring Instrument)，其定位誤差可達平面 1.5 公分及高程 2.5 公分 (IMU: Gyro Bias: 1 度/每小時)，測繪系統部分則包含雷射掃描儀與全景數位相機，雷射掃描儀精度在 30 公尺內可達到 0.045 公尺；其用途為道路測量、3D 街景建模、災害評估與救災規畫 (TOPCON, 2009)。



圖 1. Kim et al. (2006) 使用的地籍測量車系統之組成和其外觀(上)、移動站點位測量(下)

其中，也有使用測量車來施行地籍測量作業，例如 Kim et al. (2006) 整合了 RTK GPS 測量法、電子平板 (electric plane table) 測量法、無線傳輸設備 RF modem (PDL)、控制點資料庫、地籍圖資料庫、WHIP 無向天線 (non-directional antenna)、YAGI 有向天線 (directional antenna)、直流電與交流電源供應器、液晶螢幕、筆記型電腦等相關的硬體、軟體、資料於一輛

四輪傳動車上(圖 1)來建立一個地籍測量車系統，一方面即使在無控制點的情況下，可以將新點和其周圍界址點之間的相對位置圖測繪成果套合於原有的地籍圖上，另一方面也可以提供其它用途，例如地籍圖重測和 Location Based Service (LBS)，在供應充足電源、牢固接線接頭、硬體功能暨資料傳輸的穩定性等相關問題陸續克服之後，就可以提高地籍測量自動化處理與系統靈活移動

(mobility)能力，也提高地籍測量和地籍圖重測作業效率。簡言之，這一套地籍測量車系統是整合了 RTK GPS 測量法和移動式測繪技術來進行地籍測量和地籍圖重測作業。

本校王蜀嘉教授帶領研發團隊，開發測量車系統，已逾十餘年，在這當中，研發測量車系統的主要動機和原因是因為台灣地區的外業調繪補測工作常因天雨而停頓、無法進行，導致工時延長、增加人事成本。有了測量車系統之後，即使在下雨天，仍然可以進行外業測量和調查工作，例如遮蔽區的調繪補測作業，大幅縮短工時，節省人事成本，這是測量車系統的一項優點。本文扼要敘述其中的雙相機同步水平前拍攝影系統和初步的測試成果，並整合了各種物空間條件，應用角、邊等各種物空間觀測

值和影像上的像點坐標觀測值，施行聯合平差法，來進行近景攝影測量計算，分析成果品質，提供產製各種測量產品。

二、雙相機同步水平向前拍照的測量車系統與初步測試

考量實用性、系統穩定性、成本，本文的測量車系統只使用了數位相機、GPS 天線、以及電腦等相關硬體，不使用慣性導航設備；另一方面，考量從影像裡也能匹配出高密度點雲，所以也不使用雷射掃描儀。如圖 2 所示，在車頭上方安裝兩部數位相機 Basler A102kc，兩相機間距約 1.63m，視場角 FOV 約 56° ，朝測量車行駛方向（圖 2 由下往上）以近似水平姿態向前方同步拍照，兩相機離地高度約 2.2m。

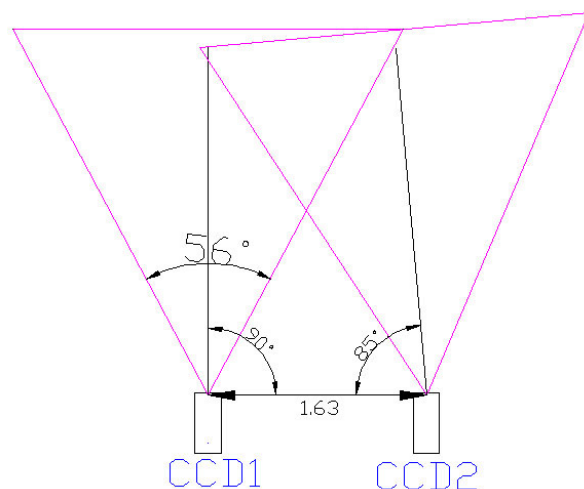


圖 2. 雙相機同步水平前拍測量車系統的兩相機幾何配置圖

本文選擇成功大學校園附近的街道做為測試區，圖 3 顯示兩相機同步向前拍攝的立體對影像例，測試影像是使用測量車沿路拍攝共 $11 \times 2 = 22$ 張的數位影像，像元大小是 $6.45 \mu\text{m}$ ，影像大小為 1392×1040 個像元，圖 4 顯示測試區點位分布平面圖，共 52 個物點，包含 6

個全控點和 10 個全檢核點，圖 5 顯示兩相機各自拍攝的 11 張影像上的像點位置疊合圖，清楚顯示了像點在連續前拍影像上的移動軌跡和方向。在此測試例中，6 個全控點和 10 個全檢核點是使用 Sokkia 530R 全站儀架設於 GPS 控制點上，後視另一個 GPS 控制點，並測量地

面角、邊觀測值，來求得這 16 個點的地面三維坐標(X, Y, Z)，給定全控點 X、Y、Z 坐標的先驗精度分別是 4cm、2cm、2cm，給定像坐標 x 、 y 的先驗精度均是 4.2 μ m。在像片三角測量(photo triangulation)計算中，共有 288 個未知數、812 個觀測方程式，2 次迭代計算即收斂，後驗單位權中誤差為 4.17 μ m，控制點 X、Y、Z 坐標改正數的均方根值分

別為 3cm、1cm、2cm，檢核點 X、Y、Z 坐標的平差計算值和已知值的差值之均方根值分別為 6cm、13cm、3cm，平差估算的物點 X、Y、Z 坐標的後驗精度估值的均方根值分別為 4cm、10cm、3cm。由這些初步測試的數據成果可知，這一個雙相機同步水平前拍測量車系統已經足以提供 1/1000 地形圖調繪補測應用之精度需求。



圖 3. 相機 CCD1(左)和相機 CCD2(右)同步拍攝的立體對影像例

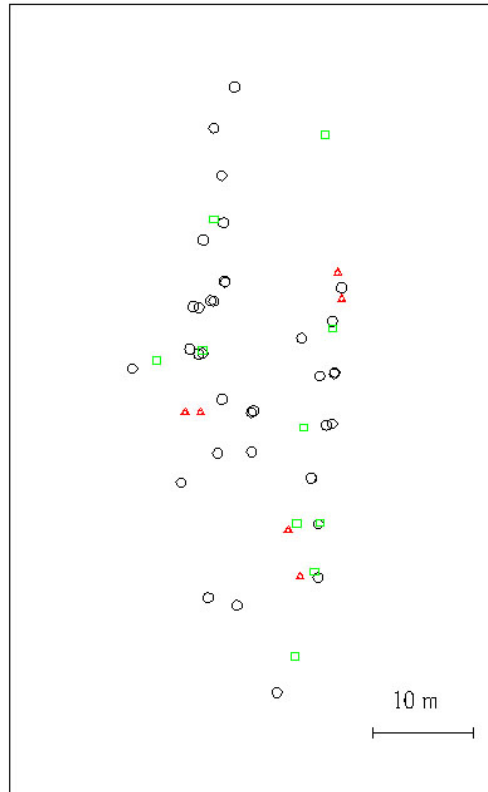


圖 4. 測試區點位分布平面圖(Δ = 地控點、 \square = 檢核點、 \circ = 連結點)

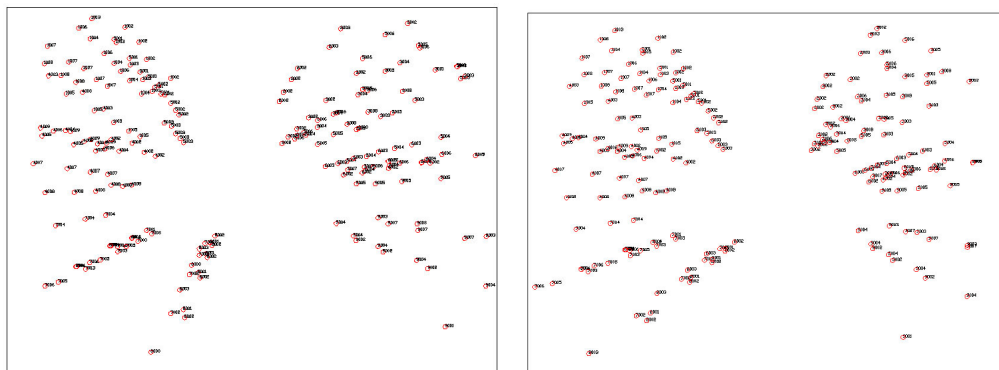


圖5. 相機CCD1(左)和相機CCD2(右)各自拍攝的11張影像上的像點位置疊合圖

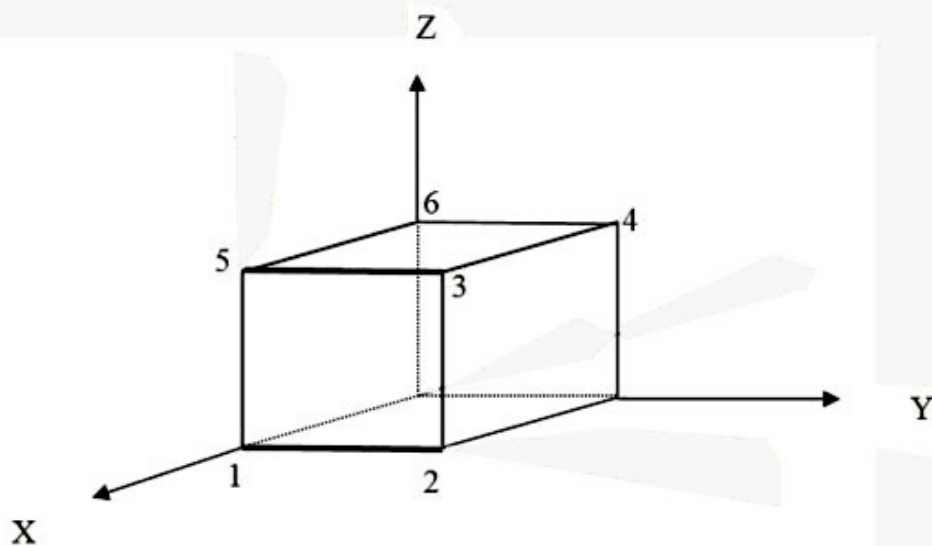


圖6. 物空間存在三組互相平行或垂直的直線

近景攝影之相機方位參數求解，對於方位參數之起始值要求甚高，否則不易收斂。本文使用輸入的像坐標觀測值、控制資料、約制條件、以及它們的先驗精度值，配合運用影像之間之共同點來進行影像連結，應用相對方位法求算立體模型，使用三維坐標轉換法來進行這些立體模型之間的快速套合，然後就可計算影像方位元素之起始近似值，再使用空間前方交會法 (space intersection) 可以計算物點坐標之起始近似值，其中，也使用資料蒐評法 (data snooping) 來進行觀測值、以及其

它輸入資料 (例如點號、片號、相機編號) 的別錯處理。因為這樣的處理程序可以提供合宜的近似值，所以本文的各種測試計算皆能快速收斂，譬如說，前述的計算例，僅 2 次迭代計算即收斂。

全控點 X、Y、Z 坐標之先驗精度分別是 4cm、2cm、2cm，此處之精度值為標準偏差。此處之物空間坐標系是由 GPS 控制點來決定，圖 6 的 XYZ 軸是以長方體房屋為例，來說明物空間三軸條件，與本例 22 張街景影像採用的坐標系是不同的。在此計算例中，Y 方向之精度遠比其他兩個方向者差，乃肇因於 Y

方向的交會幾何較差所致，如圖 4 所示的點位平面圖，測量車行進方向近似平行於 Y 軸，使用雙相機同步水平前拍的影像，其同名像點的攝影光線交會定點，在近似平行於攝影方向上的位置坐標 Y 之精度較差，但是，近似垂直於攝影方向的 XZ 平面上的點位精度則較佳。

三、聯合平差法求定雙相機方位元素

除了同步水平向前拍照的兩台相機外，測量車上方還裝設其它相機，包括側拍和仰拍相機，這些多台的相機架設於固定支架上；在前述的雙相機同步水平向前拍照的測量車系統使用過程中，日晒雨淋、氣溫變化、濕度變化都將導致這一個支架的熱漲冷縮，也造成相機之間彼此的相對位置和相對的攝影軸向的改變，同時，路面不平坦造成測量車的跳動與振動，均可能造成測量車上的多部相機之方位元素值的改變，因此，考量實際環境對測量車系統之影響、且兼顧實用性，本文不使用檢定場法(field methods) (Wolf and Dewitt, 2000)，不必將測量車開回檢定場，直接在外業現場進行檢定參數之求定計算，直接使用多張影像上的全部像點像坐標觀測值、從電子地圖資料庫和三維數碼城市資料庫取得的各種物空間資料、已知的各式物空間條件、以及角、邊等各種物空間觀測值，聯立解算每一部相機的內方位元素、像點的系統性偏移向量、測量車上任意兩部相機之間的相對方位，立即求定每一群連續攝影影像在攝影當時的方位元素值。

其中，影像三角測量待求定的未知數包括每一部相機的像主點像坐標 (x_0, y_0) 、焦距 (f) 、相機拍攝的像點系統性偏移向量、與任意兩相機的相對攝影位

置與相對的攝影姿態角。此方法求定的成果之品質取決於物空間控制條件的分佈、精度、數量、以及對應影像的像點坐標量測精度，當前述的分佈良好、精度高、數量多、以及影像像坐標量測精度高，則相機檢定成果精度佳，反之，則精度差。

前述的各式物空間條件、角邊等各種物空間觀測值之來源，可以取自於外業現場週遭環境裡一般常見的景物以及容易獲取的資訊，例如大樓外牆面的許多垂直線與水平線、物空間三軸條件(陳連晃, 1986)、一些特定規格尺寸已知的物體(如已知的長度、角度的交通標誌)、或是使用電子地圖提供的點位已知坐標來做為影像三角測量計算的控制資料來源，例如已知坐標點、已知線段長、已知角度，另一方面，也可以從影像空間獲取影像三角測量計算的控制資料來源，例如滅點幾何(Wang and Tsai, 1990)、兩滅點求解內方位元素(Grammatikopoulou et al., 2004)，對測量車系統實務作業而言，更加方便。

3.1 滅點幾何

在中心透視投影幾何裡，物空間的一群平行線條會在成像平面上形成影像線，這些影像線會在像面上相交於一點，其交點稱為滅點(vanishing points)。平行物空間坐標系三軸 X、Y、Z 的平行線分別定義了三個主滅點(principal vanishing points)。因為物空間的平行線交會於無限遠處，因此，可以據此推導出影像平面上的滅點的像坐標與相機方位元素之間的關係式，俾以依序計算出像主點的像坐標 (x_0, y_0) 、影像姿態角 $(\omega, \varphi, \kappa)$ 、焦距 f (Wang and Tsai, 1990；王囂彰, 2004)。

當攝影軸與物空間某一個坐標軸平

行或是近似平行時，將造成此方向的主滅點交會於像平面外的無窮遠處，只能得到剩餘的兩個方向上的主滅點，此時可改用兩滅點法。

3.2 兩滅點法

在相機具有穩定的內方位元素的前題假設之下，兩滅點法採用影像上的滅點與攝影中心會通過所謂的「檢定球 (calibration sphere)」的原理 (Grammatikopoulosa et al., 2004)，運用不同攝影位置取得的三張以上的影像來求解像主點的像坐標 (x_0, y_0) 和焦距 f 。

3.3 物空間三軸條件

如圖 6 所示，假定物空間坐標系統的 X 、 Y 、 Z 三軸分別平行於 34 、 12 、 23 線段，則以平行於 X 軸的直線段為例，此直線上的任意一點均有相同的 Y 、 Z 坐標，運用這樣的條件並配合共線式，就可以求解得到像主點的像坐標 (x_0, y_0) 、焦距 f (陳連晃, 1986)。3.4 已知物空間條件

在物空間中，存在許多規格尺寸固定且已知的目標物，例如一百公尺跑道、或是棒球場的影像，其中的跑道長度、本壘至一壘的距離均為已知常數，除了已知長度或距離外，仍有其它來源的已知資料，例如已知角度 (或水平與垂直條件)、已知高程差或高度、已知控制點坐標，除了各式物空間條件和角、邊等各種物空間觀測值之外，同時使用多張影像上的全部像點像坐標觀測值、以及成像幾何條件，來聯立解算每一部相機的內方位元素、像點的系統性偏移向量、測量車上任意兩部相機之間的相對方位。

本文前述的滅點幾何法、兩滅點法、物空間三軸條件法、已知物空間條件法，它們都是採用間接觀測平差法來求解相機參數，相關的數學模式及平差模式請參閱 (吳建憶, 2009; Kruck, 2006)。



圖 7. 滅點幾何、兩滅點法、物空間三軸條件求解的實驗影像

四、測試成果與分析

圖 7 顯示滅點幾何、兩滅點法、物空間三軸條件三法使用的實驗影像，實驗區是本校自強校區的大樓，因為測量車是沿著一條平坦路面前進，所以連續拍攝 7 張

影像的時間間隔短，拍攝的環境條件無顯著變化，可以假設拍攝得到的 7 張影像具有相同的內方位元素，這時候，使用減點幾何求定每一張影像的內方位，等同於對同一部相機的方位元素重複觀測 7 次，這 7 張影像求解得到的內方位元素值之間的標準偏差顯示其精密度，如表 1 所示， x_0 、 y_0 、 f 的標準偏差依序為 $\pm 0.1837\text{mm}$ (28 個像元)、 $\pm 0.0899\text{mm}$ (14 個像元)、 $\pm 0.1459\text{mm}$ (23 個像元)。

圖 8 顯示 7 張實驗影像平面上的 21 個檢定球的位置分佈圖，將 21 個檢定球方程式一起聯立平差，可求解內方位元素，如表 2 所示， x_0 、 y_0 、 f 的標準偏差分別為 $\pm 0.3145 \text{ mm}$ (49 個像元)、 $\pm 0.2526\text{mm}$ (39 個像元)、 $\pm 0.1963\text{mm}$ (30 個像元)。

表 1. 減點幾何使用 7 張影像求解內方位元素的成果

編號	x_0 (mm)	y_0 (mm)	f (mm)	ω (°)	φ (°)	κ (°)
630	-0.2642	-0.0200	7.8564	-62.7070	-26.4735	17.0153
633	0.0158	0.1511	8.1719	-59.2130	-27.3571	18.1516
634	-0.2471	-0.0200	7.9510	-60.6476	-26.6318	17.5142
1083	0.2730	0.2230	8.1295	-59.7689	-27.9218	16.4053
1085	-0.1225	0.1299	8.0525	-60.5725	-26.1146	14.8107
1086	-0.1232	0.0535	8.2805	-60.5156	-26.0238	15.2455
1087	-0.0170	0.0902	8.1783	-59.6798	-26.7948	15.8083
平均值	-0.0693	0.0868	8.0886			
標準偏差	0.1837	0.0899	0.1459			

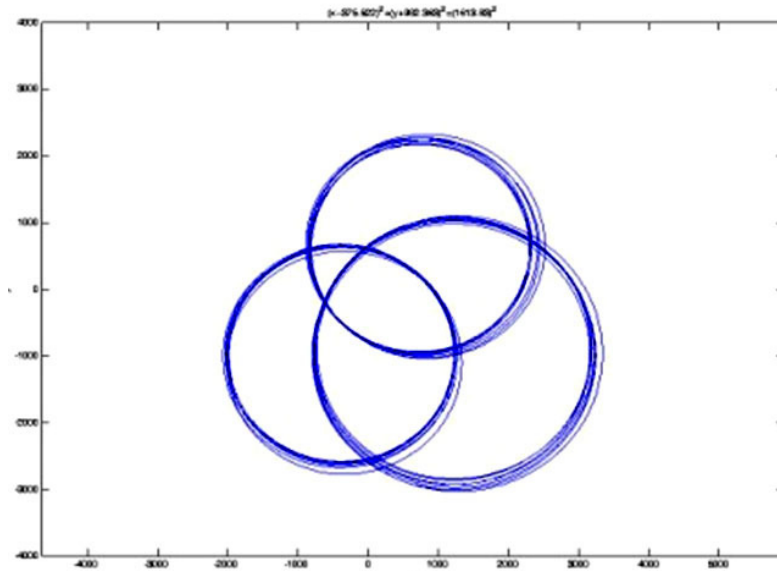


圖 8. 7 張實驗影像平面上的 21 個檢定球的位置分佈圖

表 2. 兩減點法的求解成果

	x_0 (mm)	y_0 (mm)	f (mm)
內方位元素	-0.0716	0.0891	8.0926
標準偏差	± 0.3145	± 0.2526	± 0.1963

表 3 為物空間三軸條件的求解成果，以 7 張影像求解內方位元素，得到的 x_0 、 y_0 、 f 的標準偏差依序為 $\pm 0.1551\text{mm}$ (24 個像元)、 $\pm 0.0837\text{mm}$ (13 個像元)、 $\pm 0.1387\text{mm}$ (22 個像元)。

圖 9 為使用已知物空間條件來求解相機方位元素的兩張實驗影像，令局部物空間 X、Y、Z 三軸分別為此棟建物的三個正交軸，如圖 10 所示，本文使用此建物的水平與垂直線，推導出坐標差值，此計算例共使用了 238 個物空間坐標差值，即所有平行物空間 X 軸上的全部點群有相同的 Y、Z 坐標，其 Y、Z 坐

標差值 $\Delta Y=0$ 、 $\Delta Z=0$ ；同理可得，平行 Y 軸與 Z 軸上所有點有相同的 X、Z 與 X、Y 坐標，其對應的坐標差值皆為 0。

本實驗所用到此建物的距離條件，如圖 10 的框選區域所示。圖 9 的建物表面有許多規則分布的窗戶，假設物空間正交的 X、Y、Z 軸分別為實驗影像中正交的建物結構線，經間接距離量測後，框選區域中 53 個窗戶與窗戶之間的水平距離平均值為 $4.00\text{m} \pm 0.01\text{m}$ ，另外 22 個選取區內的窗戶與窗戶間水平距離平均值為 $3.75\text{m} \pm 0.01\text{m}$ ，而這些窗戶的高度(Z 差值)平均值為 $2.15\text{m} \pm 0.00\text{m}$ 。

表 3. 物空間三軸條件的求解成果

編號	x_0 (mm)	y_0 (mm)	f (mm)	ω ($^\circ$)	ϕ ($^\circ$)	κ ($^\circ$)
630	-0.2283	0.0149	7.8640	-62.4649	-26.5216	17.1505
633	0.0415	0.1729	8.1917	-59.0842	-27.3727	18.2388
634	-0.2602	-0.0322	7.9555	-60.7954	-26.5200	17.4338
1083	0.1929	0.1101	8.1551	-60.6109	-27.8235	15.8821
1085	-0.0879	0.1855	8.0059	-59.9982	-26.2207	15.1236
1086	-0.0758	0.1205	8.2227	-59.9065	-26.1787	15.5314
1087	-0.0310	0.1663	8.1761	-59.1148	-26.7661	16.0408
平均值	-0.0641	0.1054	8.0816			
標準偏差	0.1551	0.0837	0.1387			

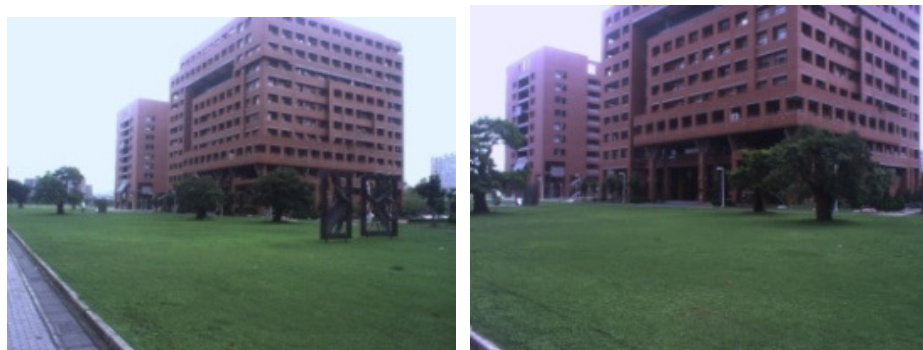


圖 9. 已知物空間條件的實驗影像



圖 10. 已知物空間條件的實驗影像所選取的距離條件區與坐標軸

從這棟建物可以得到已知的物空間條件，包含了水平、垂直條件以及測量所得的距離差值，在 2 張實驗影像的共同攝影區中，選取區域內 35 個 X 方向、54 個 Y 方向與 30 個 Z 方向上的距離量，加上現場實地測量得到的距離量，可以得到在假設的局部三維卡氏物空間坐標系之下的物點三維物空間坐標。

本計算例使用物空間中 5 個控制點坐標，以及利用水平、垂直線與假設物空間坐標系得到的角點與角點間 89 個 X 方向、81 個 Y 方向、與 68 個 Z 方向上的坐標差值，所使用的距離與坐標差條件無重複，使用像坐標觀測值共 348 個，平差求解這兩張影像拍攝時相機的內、外方位元素，結果如表 4 與表 5。

表 4. 已知物空間條件求解內方位元素

x_0 (mm)	y_0 (mm)	f (mm)
-0.126±0.031	-0.065±0.021	8.287±0.024

表 5. 已知物空間條件求解外方位元素

	X_0 (m)	Y_0 (m)	Z_0 (m)	φ (°)	ω (°)	κ (°)
左片	-52.014	-74.402	1.973	-30.344	2.598	-1.174
$\hat{\sigma}$	0.232	0.279	0.089	0.183	0.144	0.032
右片	-52.127	-34.480	2.037	-43.143	1.468	-0.498
$\hat{\sigma}$	0.224	0.149	0.069	0.155	0.144	0.031

求解時，經過 4 次迭代計算並且對觀測量進行剔錯 (Baarda, 1968)，若標準化改正數 (normalized residual) W_i 的絕對值 $|W_i| > 3$ ，則剔除此觀測量。此計算例觀測值數目 717，未知數個數 276，多餘觀測數為 441，平差計算得到的後驗單位權中誤差為 $\pm 0.004\text{mm}$ ，而觀測量變方元素估計的測試值為後驗單位權中誤差/先驗單位權中誤差，整體測試值為 0.99，與理想值 1 接近。已知物空間條件解得 x_0 、 y_0 、 f 標準偏差為 $\pm 0.021\text{mm} \sim \pm 0.031\text{mm}$ (約 4~5 個像元)，攝影中心位置精度約為 $\pm 7 \sim 28$ 公分，姿態角精度為 $\pm 0.031^\circ \sim \pm 0.183^\circ$ 。

由平差計算得到的物點物空間坐標反算任兩點間的距離，並與對應的高精度實測距離觀測值做一比較，俾檢視本法求定的物點之點位精度；例如，由平差後的點位坐標反算出 X、Y、Z 方向上的線段端點之距離與實測距離的差值皆小於 1cm，X、Y、Z 方向上的點群對應的坐標差值應為零，而本法求定的結果顯示，它們的坐標差值的絕對值之平均皆小於或等於 1cm。

另外，圖 9 的兩張實驗影像是測量車沿著近似平行物空間 Y 軸且近似於垂

直 X 軸方向前進，兩影像攝影站 Y 差值為 39.922m，其餘 X 與 Z 差值皆小於 12 公分，表示車子行駛的方向接近平行 Y 軸，與設定的情況相符。

5. 結論與建議

由雙相機同步水平向前拍照的測量車系統的初步測試成果可知，這一個雙相機同步水平前拍的測量車系統已經足以提供 1/1000 地形圖調繪補測之用。

本文使用成功大學自強校區拍攝的 7 張大樓影像與 2 張台南市街道影像檢定測量車上的相機，求解內方位元素 x_0 、 y_0 、 f 的標準偏差，如表 6 所示。由這些測試成果顯示，使用物空間已知條件檢定測量車相機參數是可行的，此法可以使用的條件數多，本文使用的三個例子之多餘觀測數分別為 441、326、629，可供檢核的條件數遠多於其他三個方法，所以偵錯能力最佳、精度最高，約為 4~5 個像元，而表 6 也顯示了每個方法求定的內方位元素的精度量級，其中，以兩滅點法求解的精度最差，約為 30~49 個像元大小。滅點幾何法求解精度約為 14~29 個像元，物空間三軸條件法求解精度則達 13~24 個像元。

表 6. 四種方法求定的內方位元素之精密度

方法	$\hat{\sigma}_{x_0}$ (mm)	$\hat{\sigma}_{y_0}$ (mm)	$\hat{\sigma}_f$ (mm)
滅點幾何	0.184	0.090	0.146
兩滅點法	0.315	0.253	0.196
物空間三軸條件	0.155	0.084	0.146
已知物空間條件	0.031	0.024	0.024

本文使用物空間已知條件求解相機方位元素，除了可求解相機的內方位元素外，還可以在選定的局部物空間三維卡氏坐標系 XYZ 之下，求解相機的攝影中心位置與攝影的姿態角。與本文使用的其他三個方法比較，物空間已知條件的方法精度最高，而且針對安裝於測量車上的相機之應用而言，此法可以解算出測量車上不同相機之間的相對位置與相對的攝影方向(角度)。

建議在安裝相機於測量車上時，可以設計相機有一個約 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 的仰角，藉以避免因攝影軸垂直於某一個物空間坐標軸而導致不良的幾何條件，產生解算結果出現大錯(吳建億，2009)；另外，如果相機有一個 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 的仰角時，拍攝的景物能更均勻地分布在影像上，可避免影像中的景物過度集中分布在影像的上半部、而影像的下半部大多為紋理不佳的草地或是地面的情況，同時，影像中可用的特徵點將更均勻分布在影像上，避免因為影像上像點分布不均勻而造成不良的求解幾何條件。

本文測試的四種測量車相機檢定方法，在實務上考量的因素包含：

1. 檢定項目
2. 是否具有偵錯能力
3. 精度是否最佳

由於滅點幾何、物空間三軸條件無法得到像點系統性偏移向量、攝影中心位置，兩滅點法無法求解攝影中心位置以及三個姿態角，加上物空間已知條件的求解精度最佳，本文建議使用物空間已知條件檢定測量車上的相機，然而，滅點幾何、兩滅點法、物空間三軸條件三個方法解算出的方位元素，可以作為近似值，代入物空間已知條件，聯合平差求解，加快計算的收斂速度。

致謝

感謝 王蜀嘉教授提供本研究使用的實驗影像，游勳喬先生協助拍攝，兩位匿名審稿委員提供寶貴的修正意見，特此一併表達由衷謝意。

參考文獻

1. 王憶彰，2004。滅點偵測之研究－基於 θ -直方圖統計分析法，國立成功大學測量及空間資訊學系，碩士論文。
2. 吳建億，2009。使用物空間條件進行測量車相機檢定，國立成功大學測量及空間資訊學系，碩士論文。
3. 陳連晃，1986。近景攝影測量中以物空間三軸條件取代控制測量之研究，國立成功大學航空測量研究所，碩士論文。
4. Baarda W, 1968. A Testing Procedure for Use in Geodetic Networks, Netherlands Geodetic Commission, 2(5).
5. Grammatikopoulou, L., Karrasa, G., Petsab, E., 2004, Camera Calibration Combining Images with Two Vanishing Points, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, Vol. 35, No. 5, pp. 99-104.
6. Kim, Joon-Sik, Kang, Sang-Gu and Choi, Yun-Soo, 2006. Development of Mobile Cadastral Surveying System for Korean Cadastral Resurvey Project. Shaping the Change, XXIII FIG Congress, Munich, Germany, October 8-13, 2006.
7. Kruck, E.J., 2006. BINGO 5.3 User's Manual, Bundle Adjustment for Engineering Applications, version 5.3, A

- Program System for Close Range Photogrammetry and Aerial Triangulation Including Three-Dimensional Geodetic Network Adjustment, Geoinformatics & Photogrammetric Engineering (GIP), Aalen, Germany.
- 8.Mandli Communications, Inc., 2009. High definition LIDAR application at highway speeds, URL: <http://www.linkedin.com/companies/mandli-communications>, (last date accessed: 15 January 2010).
- 9.Mills, Jon, 2009. Mobile Mapping Systems Research, Newcastle University, UK, URL: <http://www.ceg.ncl.ac.uk/pls/mobilemap.html>, (last date accessed: 15 January 2010).
- 10.Tele Atlas. 2009. The Navigation Destination, URL: <http://www.teleatlas.com/>, (last date accessed: 15 January 2010).
- 11.TOPCON, 2009. IP-S2 Integrated Positioning System for 3D Mobile Mapping, URL: <http://www.topconpositioning.com/products/mapping-and-gis/mobile-mapping/ip-s2.html>, (last date accessed: 15 January 2010).
- 12.Wang, L. L. and Tsai, W. H., 1990. Computing Camera Parameters Using Vanishing-Line Information from a Rectangular Parallelepiped, Machine Vision and Applications, No. 3, pp. 129-141.
- 13.Wolf, P. R. and Dewitt, B. A., 2000. Elements of Photogrammetry with Applications in GIS, 3rd ed., McGraw-Hill.