

# 3D 視覺校正軟體之研製

羅鵬飛 呂傑棋  
中華大學機械暨航太工程學系  
luo@chu.edu.tw

## 摘要

本文以平台系統、格點校正試件以及一台主光軸垂直於校正試件的相機，求取校正試件上各格點的座標位置，以建立世界座標系統以及一組校正點的座標位置。再使用此組校正點，校正立體視覺系統。本文係以格點中心為校正點，由於圓形格點投射於影像平面上將成橢圓形狀，因此本文使用試件圓形格點中心與影像平面橢圓中心的數學關係式，以減少相機模型與實際觀察的偏差。此外亦將於相機模型方程式中同時考慮相機之徑向與切向鏡頭扭曲係數，以增進相機模型方程式的精確度。本文亦研製一友善而方便的程式介面，希望經由此程式介面之引導，使操作者可方便的執行立體視覺系統的校正，也可使用此軟體進行剛體平移測試，以評估立體視覺系統的基本量測誤差。

關鍵詞：3D 電腦視覺、相機校正、格點試件、軟體開發

## 壹、前言

近來，3D 視覺已被廣泛地應用於機器人視覺[1,2]，工業量測以及材料變形等各種不同領域上[3-5]。因而由此發展出許多相機校正的技巧，以取得3D物件座標與2D影像座標地關係式。其中的針孔相機模型(Pinhole camera calibration)係用來說明成像過程的數學表示式[6]。為校正此理想針孔相機模型與實際成像之間的誤差，早期研究係加入徑向扭曲項[7,8](radial distortion)以使相機校正更加精準。然而相機鏡頭的扭曲，包含有徑向與切線向扭曲 (radial and decentering distortion)[9]，因此於相機校正時，同時加入此兩種扭曲係數實有其必要性[10]。

Luo[4,5]等人以數位相關性法為基礎[11,12]，發展3D視覺系統，並成功應用於曲面量測[13,14]以及破壞力學上的研究[15-17]，此3D視覺系統僅考慮徑向鏡頭扭曲係數，雖然可精確量測物體的二維變形場，但校正過程却是頗為繁複耗時，Luo與Wu [18]則利用裝置於三軸平台上的格點試件，以加速相機校正工作的速度，但此篇論文並未建立圓形格點中心與其在影像平面上座標位置的數學關係式，且僅祇考慮徑向鏡頭扭曲係數。因此，Luo與Hsu[19]利用圓形格點投射於影像平面行將成橢圓狀的觀念[20]，使用試件圓形格點中心與影像平面中心的數學關係式，以減少相機模型方程式的誤差，同時亦考慮徑向與切線向的鏡頭扭曲係數，以增進相機模型方程式的精確度。

Luo與Hsu所發展的3D校正與量測系統，雖有頗佳的量測精度，但在校正過程中校正試件之移動係以手動操作，易影響相機校正的精度，且其程式介面之設計頗為簡單，若非經深入了解，將無法利用此介面進行相機校正之工作。因此本文以Luo與Hsu所發展的3D視覺為基礎，研製一友善而方便的程式介面，希望經由此介面之引導，使操作者可方便的執行3D視覺的校正與量測分析。

## 貳、研究方法

### 一、理論基礎

#### (一) 針孔相機模型(Pinhole Camera Model)

一般相機可視為由鏡頭(lens)與影像平面所組成，如圖 1 所示，影像平面在鏡頭中心  $C$  之前，而焦距  $f$  則為影像平面至鏡頭中心的距離。 $O$  及  $O'$  分別為世界座標系統 (world coordinate system)  $X$ - $Y$ - $Z$

以及影像平面座標系統(image coordinate system)  $u-v$  的座標原點， $C$  則為相機的鏡頭中心，同時也是相機座標系統(camera coordinate system)  $x-y-z$  的座標原點。影像座標系統的  $u$  軸與  $v$  軸分別平行於相機座標系統的  $x$  軸與  $y$  軸，其原點則位於影像平面的左上角。

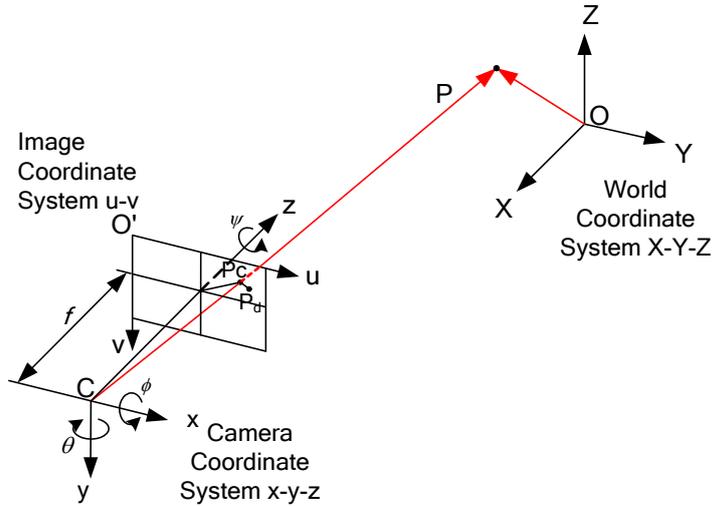


圖 1 相機模型與投影原理

對空間中任一世界座標點  $P(X, Y, Z)$ ，可由下式求得其投射於影像平面的座標位置  $P_c(u_c, v_c)$ 。

$$\begin{bmatrix} zu_c \\ zv_c \\ z \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

上式， $F$  為一透視轉換矩陣，係由焦距  $f$ 、影像平面中心  $(u_0, v_0)$ 、描述世界座標與相機座標間平移關係的平移矩陣  $\mathbf{t} = [t_x, t_y, t_z]^T$ 、以及旋轉矩陣  $\mathbf{R} = \mathbf{R}(\theta, \phi, \varphi)$  所定義。 $\theta, \phi$  與  $\varphi$  分別為繞  $y$  軸、 $x$  軸以及  $z$  軸的 pan、tilt 以及 swing 的角度。然而在實際取像時，由於鏡頭扭曲(lens distortion)的影響，投射點將沿著徑向與切線方向偏移。由[15]得知，校正的影像座標  $(u_c, v_c)$  與扭曲的影像座標  $(u_d, v_d)$  之間的關係，可以下式表示。

$$\begin{bmatrix} u_c \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d \\ v_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta u(u_d, v_d) \\ \Delta v(u_d, v_d) \end{bmatrix} \quad (2)$$

上式  $\Delta u$  與  $\Delta v$  為鏡頭扭曲校正值，可表示為

$$\begin{aligned} \Delta u(u_d, v_d) &= (u_d - u_0) (k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + k_3 r_d^6) \\ &\quad + \left[ 2p_1 (u_d - u_0) (v_d - v_0) + p_2 (r_d^2 + 2(u_d - u_0)^2) \right] (1 + p_3 r_d^2) \\ \Delta v(u_d, v_d) &= (v_d - v_0) (k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + k_3 r_d^6) \\ &\quad + \left[ p_1 (r_d^2 + 2(v_d - v_0)^2) + 2p_2 (u_d - u_0) (v_d - v_0) \right] (1 + p_3 r_d^2) \end{aligned}$$

式中， $r_d = \left[ (u_d - u_0)^2 + (v_d - v_0)^2 \right]^{1/2}$ ， $(k_1, k_2, k_3)$  為徑向扭曲係數，而  $(p_1, p_2, p_3)$  則為切線方向扭曲係數。

方程式(2)可寫成

$$\begin{bmatrix} u_d \\ v_d \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \end{bmatrix} - \frac{1}{4k_1r_c^2 + 6k_2r_c^4 + 8p_1(v_c - v_0) + 8p_2(u_c - u_0) + 1} \begin{bmatrix} \Delta u(u_c, v_c) \\ \Delta v(u_c, v_c) \end{bmatrix} \quad (3)$$

利用方程式(1)與(3)，可將在三維世界座標系統下的點  $P(X, Y, Z)$ ，對映到扭曲的影像座標  $P_d(u_d, v_d)$ 。然而，使用方程式(2)與(1)，則可將影像平面上扭曲影像座標點  $(u_d, v_d)$ ，轉換到三維空間的投射線上的點，或者是此投射線與已知二維平面的交界點。

## (二) 圓形格點中心量測

圖 2 顯示一個位於  $\Pi'$  平面上的圓點  $R$ ，此圓點之半徑為  $r$ ，且其圓心  $\mathbf{h}_0 = (X_0, Y_0, Z_0)^T$  係位於平面座標系統  $x_h-y_h$  的座標原點。在世界座標系統  $X-Y-Z$  下，平面座標系統  $x_h-y_h$  的原點座標為  $\mathbf{h}_0 = (X_0, Y_0, Z_0)^T$ ，而座標軸  $x_h$  及  $y_h$  的方向餘弦分別為  $\mathbf{h}_1 = (X_1, Y_1, Z_1)^T$  與  $\mathbf{h}_2 = (X_2, Y_2, Z_2)^T$ 。在  $x_h-y_h$  座標系統下，此圓點之圓方程式可表示為

$$\begin{bmatrix} x_h \\ y_h \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -1/r^2 & 0 & 0 \\ 0 & -1/r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_h \\ y_h \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_h \\ y_h \\ 1 \end{bmatrix}^T \mathbf{Q} \begin{bmatrix} x_h \\ y_h \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

使用方程式(1)可將圓點投射到影像平面上。實際上，圓點投射到影像平面上會成為橢圓，或者仍為一個圓。使用式(2-3)與(2-6)，在平面座標系統  $x_h-y_h$  下，橢圓  $(u_e, v_e)$  中心可以下式求得。[20]

$$\begin{bmatrix} zu_c \\ zv_c \\ z \end{bmatrix}^T \left( (FH)^{-1} \right)^T \mathbf{Q} (FH)^{-1} \begin{bmatrix} zu_c \\ zv_c \\ z \end{bmatrix} = 0 \quad (5)$$

式中， $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1 & \mathbf{h}_2 & \mathbf{h}_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。

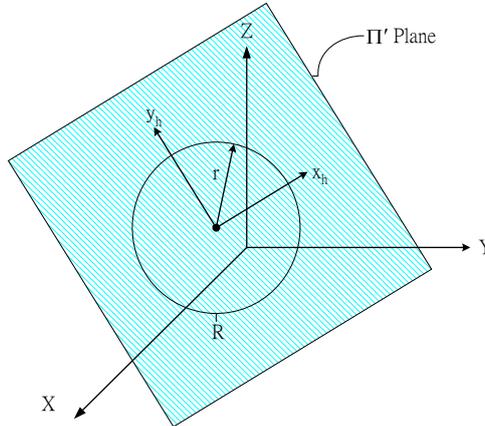


圖 2 位於  $\Pi'$  平面上的圓點

使用式(3)，可將所得的橢圓中心  $(u_e, v_e)$  轉換成扭曲的影像座標  $(u_d, v_d)$ 。

$$\begin{aligned} u &= M_x(u_e + \Delta u) \\ v &= M_y(v_e + \Delta v) \end{aligned} \quad (6)$$

上式， $M_x$  與  $M_y$  分別為在  $u$  與  $v$  軸方向的比例係數，其單位為 pixel/mm，可將實際物理單位元 mm 轉換為影像單位元 pixel。透過以上的轉換，可得到在世界座標中任意控制圓點中心，在影像平面上的座標位置。在上述轉換中包含有 15 個相機參數，其中  $M_x, M_y, f, k_1, k_2, p_1, p_2$  以及  $(u_0, v_0)$  為相機的內部參數 (intrinsic parameter)。而  $(t_x, t_y, t_z)$ , and  $(\theta, \phi, \varphi)$  則為相機的外部參數 (extrinsic parameter)。

### (三) 相機校正(Camera Calibration)

若已知空間中  $M$  個控制圓點中心的世界座標位置，以及此  $M$  個點在相機之影像平面上相關的影像座標  $(U_j, V_j)$ ,  $j = 1, \dots, M$ ，即可以非線性最小平方法，求得相機的最佳 15 個相機參數，使得經由相機模型方程式求得的影像對座標  $(u_j, v_j)$  與實驗值  $(U_j, V_j)$  之間的誤差為最小，亦即使下式之值為最小值。

$$E = \sum_{j=1}^{j=M} \{(U_j - u_j)^2 + (V_j - v_j)^2\} \quad (7)$$

## 二、系統架構與校正步驟

### (一) 系統架構

本文使用主光軸垂直於格點試件的相機以及三軸控制平台，求取校正試件上各格點的座標位置，以產生一世界座標系統，以及在此座標系統下的  $M$  個校正點的座標位置，接著再藉  $M$  個校正點，校正兩平台各平掃若干角度的相機所形成的立體視覺。圖 3 即為視覺系統，三軸平台以及格點試件等設備的裝置示意圖。本文採用 Borland C++ Builder 6.0 為基礎開發工具，並以 Matrox Image Library 為輔，開發擁有友善介面且操作容易的 3D 視覺校正軟體，以便利立體視覺系統之校正，同時也可使用此軟體進行剛體平移測試，以評估立體視覺系統的基本量測誤差。

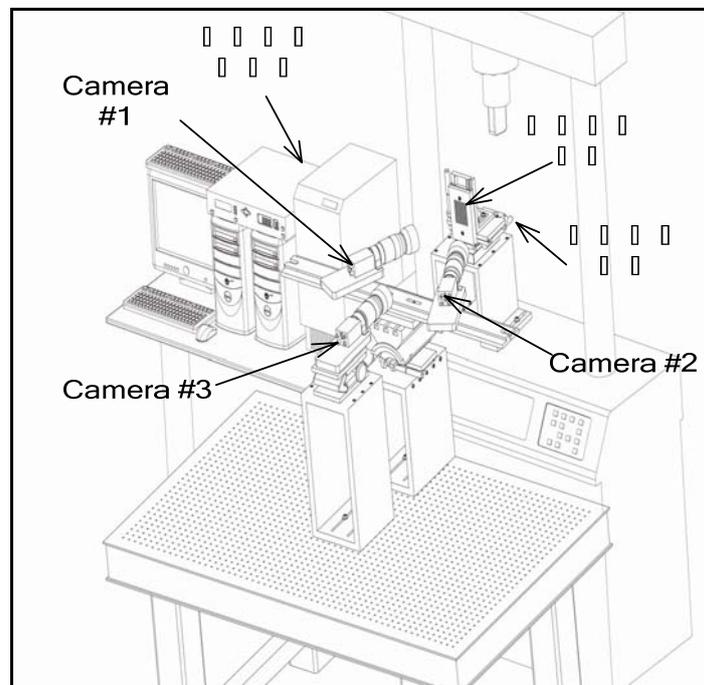


圖 3 實驗架構示意圖

### (二) Scale Factor

由於影像的最小單位為像素(Pixels)，而實際在空間中的物理單位則為 mm 或  $\mu\text{m}$  等，因此需求取 Scale Factor 以利兩單位間的轉換。本實驗以三軸平台，將圓形格點試件沿水平方向移動某一距離，並以相機#3 擷取其移動前後之影像，接著再分別求取  $N \times N$  格點陣列中某一行的格點在平移前後的中心位置，以求得其於影像平面上的移動距離，即可得水平方向之 Scale Factor  $SF_y$ 。至於垂直方向的 Scale Factor  $SF_z$  亦可以此類似的方法求取。

### (三) 世界座標之建立以及相機校正之執行

本文採用有固定間隔距離的圓形格點中心座標，作為相機校正時所需的校正點(calibration points)。若相機之影像平面與圓形格點試件不平行時，所擷取影像之格點將成橢圓形[24]。本文以 Bookstein [29]的方法，求取橢圓狀格點中心，以得到空間各校正點於影像平面上的座標位置。本文係以下列之程序與步驟執行相機校正：

(1) 將含有圓形格點的試件固定於高精度的平移台，調校相機#3，使其影像平面平行於試件平面。於

正向擷取  $N \times N$  陣列的格點影像後，求取格點陣列上各校正點在影像座標系統下的座標位置， $n = 1, \dots, N \times N$ ，為方便校正工作進行，本實驗採用奇數的  $N \times N$  陣列。

- (2) 將位於第  $(N+1)/2$  列上的各格點座標位置，代入最小平方直線逼近法，可以求得一水平單位向量，以此向量為試件座標系統之 Y 軸，再求取垂直於此水平分量之垂直分量，即可得到垂直於 Y 軸之 Z 軸，即形成世界座標系統的 Y-Z 軸，並以  $N \times N$  陣列中心的格點位置為其座標原點。經由座標轉換，即可求得此  $N \times N$  陣列格點相對於 Y-Z 座標系統的座標位置，將此座標位置乘以一定的影像轉換參數(scale factor)，以便將 *pixel* 單位轉換為空間物理單位(mm)，即得世界座標系統下  $N \times N$  個校正點的座標位置  $(0, Y_n, Z_n)$ ， $n = 1, \dots, N \times N$ 。
- (3) 以立體視覺擷取影像，求取此  $N \times N$  校正點於各相機影像平面上的位置。
- (4) 如圖 4 所示，以移動平台將試件前後各移動  $D$  mm 之距離，同時以立體視覺各擷取一張影像即可得  $(D, Y_n, Z_n)$  與  $(-D, Y_n, Z_n)$  之世界座標點， $n = 1, \dots, N \times N$ ，以及其於相機#1 與#2 影像平面上的位置。
- (5) 以上所得之  $(D, Y_n, Z_n)$ ， $(0, Y_n, Z_n)$ ，以及  $(-D, Y_n, Z_n)$ ， $n = 1, \dots, N \times N$ ，即為 X-Y-Z 世界座標系統下的  $M$  ( $M = N \times N \times 3$ ) 個校正點，而其於各相機影像平面上的位置即為  $(U_{in}, V_{in})$ ， $i = 1, 2, n = 1, \dots, M$ 。
- (6) 若已知相機參數值，則利用空間已知  $M$  個校正點  $(D, Y_n, Z_n)$ 、 $(0, Y_n, Z_n)$ 、 $(-D, Y_n, Z_n)$ ，以及相機校正方程式，即可計算此  $M$  個校正點於影像平面上的位置  $(u_{in}, v_{in})$ ， $i = 1, 2, n = 1, \dots, M$ 。
- (7) 將以上數據帶入方程式(7)，並使用非線性最小平方法，則可得到個別相機的 15 個參數，使方程式 E 之值為最小。

在得到立體視覺各台相機的 15 個參數後，可利用兩台相機影像平面上各格點中心的影像座標，求取各格點於空間的世界座標，並與已知的格點世界座標位置比較，以評估立體視覺系統的基本量測誤差。

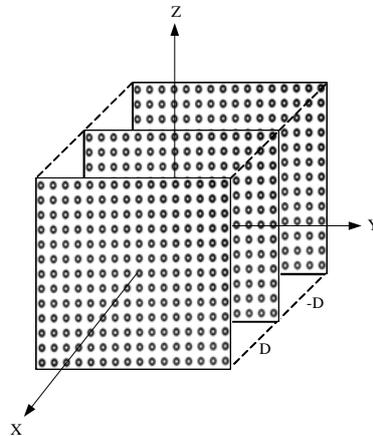


圖 4  $N \times N$  格點陣列所建立之世界座標系統

#### (四) 剛體平移

完成相機校正誤差評估後，本文亦執行剛體平移實驗，以驗證系統之基本量測精度。首先，以平台將格點校正試件平移某一距離，並以立體視覺擷取此試件移動前後之影像。接著求取試件上  $N \times N$  格點於各不同位置時，在影像平面上相對映的影像對，即可由相機參數以及相機模型方程式，得到此  $N \times N$  格點於剛體平移前後的世界座標位置。計算各格點的位移量，並與已知的剛體平移量比較，以分析量測誤差。本文在完成上述一組校正實驗後，即分別執行  $(1, 0, 0)$  mm 以及  $(1, 1, 1)$  mm 的剛體平移測試。

#### 叁、研究成果

## 一、程式開發

### (一) 平台控制介面

於使用程式控制平台之前必須先開啟COM，使RS-232能夠連接電腦與三軸平台控制器。在順利開啟COM之後，介面將顯示出「軸移動區」與「手動輸入指令區」，此時可由使用者自行設定移動速度與單位移動量，如圖4所示。如果使用者想要使平台直接移動到某一座標位置，可由「移動區」輸入各軸向的座標位置，再按下移動。圖中亦顯示使用者可自行設定各軸之移動速度與單位移動量。手動輸入區則需要參考Newport ESP300 三軸平台控制器所提供的指令輸入代碼。



圖5 COM連接成功後的三軸平台控制介面

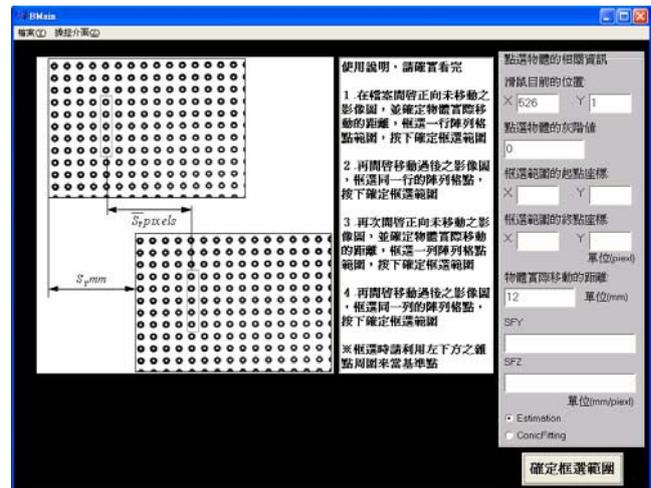


圖6 Scale Factor 介面

### (二) Scale Factor 介面

圖 6 為求取 Scale Factor 的介面，在介面右上方分別顯示滑鼠目前在影像座標系統下的位置、灰階值、以及框選範圍的起點和終點。而介面右下方的空格則是用來求取 Scale Factor 所需的資料輸入與試驗結果的輸出。對於格點中心的求法可選擇圓形逼近法 (Estimation) 或是圓錐曲線逼近法 (Conic Fitting)。在執行程式求取 Scale Factor 時，需先以相機 3 擷取校正試件影像並存檔，再返回三軸平台操控介面中，輸入水平向與垂直向的移動量，並以相機 3 分別擷取試件在水平移動與垂直移動後的影像。此時再重新回到 Scale Factor 介面中，開啟試件移動前之影像，並框選某一行陣列的格點，如圖 7 所示。接著在開啟試件水平移動後之影像，並框選同一行陣列格點，以求取  $SF_Y$ ，如圖 8 所示。以相似的方法，即可求取  $SF_Z$ ，但要注意的是，需框選一列陣列格點。此外程式會自動繪出前次格點框選範圍，以利使用者在框選移動後校正試件的格點範圍時更為明確，如圖 8 所示。

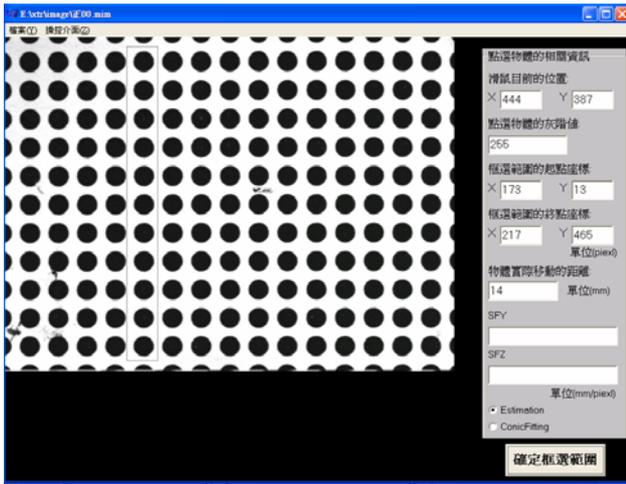


圖 7 框選未移動校正試件之行陣列格點

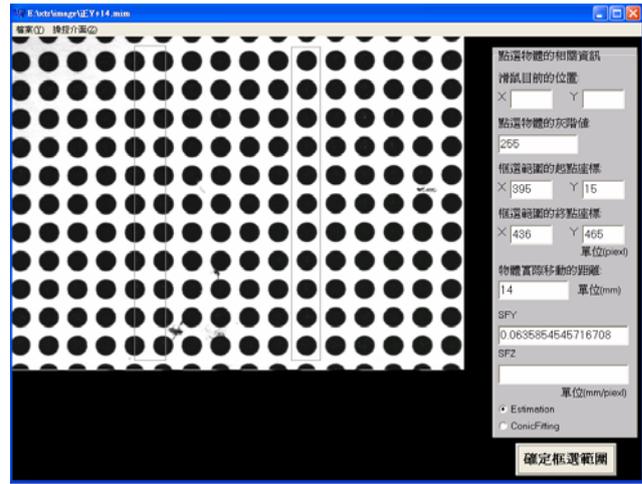


圖 8 框選水平移動後校正試件之行格點陣列並求取 SF<sub>Y</sub>

### (三) 相機校正

當關閉 Scale Factor 介面後，程式即自動開啟相機校正的介面，如圖 9 所示，在此畫面右上方係提供相機校正的基本操作步驟讓使用者觀看，當使用者按下右下方按鈕則會出現圖 10 的介面，可讓使用者自行輸入相機 1 和相機 2 的相關參數，並且同時讀取之前 Scale Factor 介面所求出的 SF<sub>Y</sub> 與 SF<sub>Z</sub> 值。若是使用者已知兩者之值，也可在 SF<sub>Y</sub> 與 SF<sub>Z</sub> 空格中直接填入，同時使用者也需要在此介面中輸入校正試件沿 X 軸向前後移動的距離。此外，在畫面最下方也提供能讓使用者重新觀看基本操作的按鈕，以免使用者操作錯誤。



圖 9 相機校正起始介面

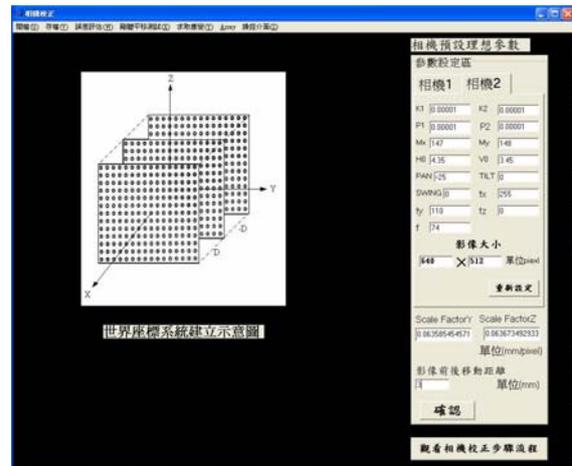


圖 10 相機參數設定區

在執行相機校正時，先使用操控介面的功能以返回三軸控制平台介面，並以相機 1 與相機 2 擷取校正試件移動之影像，接著在三軸控制平台介面中在移動區 X 軸的位置輸入欲移動距離，使校正試件沿+X 軸向運動到新的座標位置，再利用相機 1 與相機 2 擷取試件向前移動一段距離後的影像。接下來則是於介面中更改 X 軸欲移動的位置，使校正試件沿-X 軸向運動到新的座標位置，再以相機 1 與 2 擷取試件移動後之影像。

擷取完試件影像後，返回相機校正介面，開始讀取影像並進行相機校正。首先，在參數設定區分別輸入相機 1 與相機 2 的預設參數，並確定 SF<sub>Y</sub> 與 SF<sub>Z</sub> 以及試件前後移動距離。圖 11 所示介面的右下方為為求取相機 15 個參數的功能區，此功能區內之按鈕將由程式自行判斷是否達到所需要的格點資料數據，若是滿足條件則按鈕在使用後會自動隱藏，如圖 12 所示，讓使用者自然的執行下個步驟，同時，使用者也可改變或修正參數設定。



圖 11 相機校正介面之功能選擇區

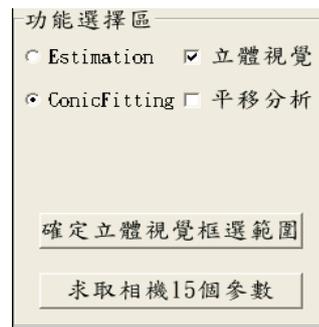


圖 12 功能選項自動判斷

在確定完相關參數後，開起正向相機所擷取的試件移動前的影像圖，如圖 13 所示，框選一奇數陣列格點數目，按下「確定正向相機框選範圍」，所框選的格點中心座標將為校正點的世界座標值。接下來分別開起相機 1 所擷取的試件移動前以及沿+X 與-X 軸方向移動一段距離後的影像，並於每次開啟的影像上框選相同的格點陣列數目，並按下「確定立體視覺框選範圍」，如圖 14 所示，然後再對相機 2 執行相同動作。對於每次框選的範圍，程式都會在框選完畢給予格點數目的訊息視窗，以使用者更方便框選相同格點範圍。當使用者框選所需的各影像格點範圍後，即可求出相機校正實驗參數，並顯示在畫面右上方，如圖 15 所示。

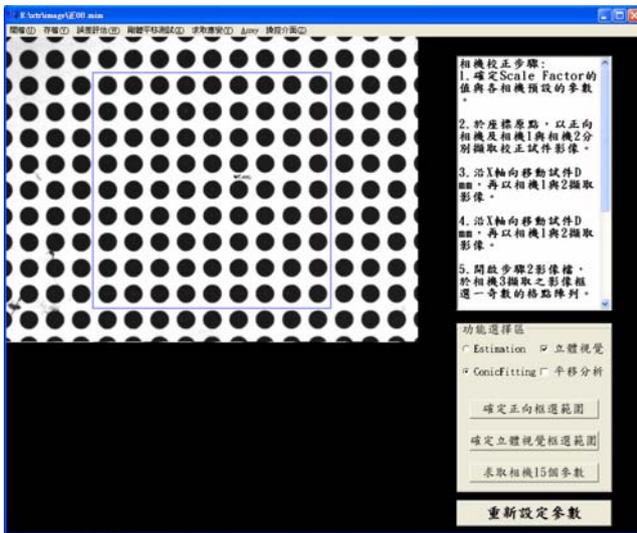


圖 13 框選正向影像圓形格點陣列

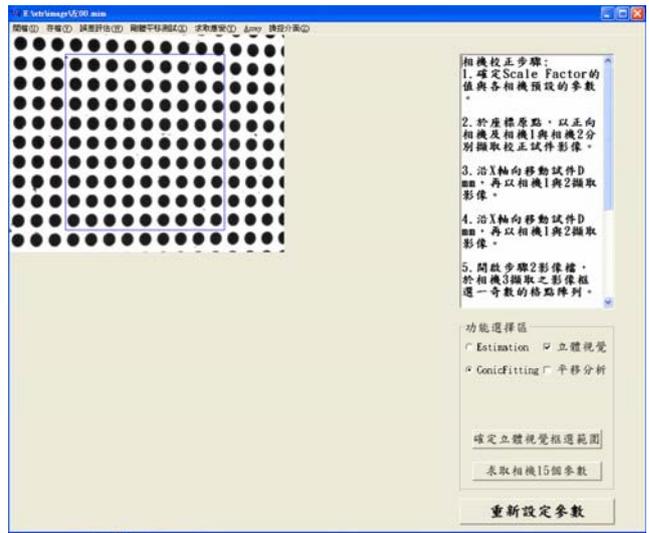


圖 14 框選相機 1 圓形格點陣列

#### (四) 誤差評估

當使用者以相機校正求取各相機的 15 個參數後，可點選相機校正介面最上方「誤差評估」功能選項，以便利用相機 1 與相機 2 影像平面上各格點的中心座標，求取各格點在空間中的世界座標。由相機 1 與相機 2 對所得到的兩條投射線  $C_1P_1$  與  $C_2P_2$ ，由於計算誤差的關係，可能無法相交於一點，所以利用它們共通法線的中心點為最佳交點，亦即是校正點的世界座標點。本文將此求得的校正點世界座標值與已知的校正點世界座標比較，以評估取相機校正的誤差，如圖 16 所示。

	相機1	相機2
Mx	131.402982031205	133.571329897873
My	131.510133162584	134.022142561045
f	74.9970872046169	75.0677768360489
K1	4.31901022531593E-5	3.33422969440107E-5
K2	-1.09737401202104E-6	-6.38972513026762E-7
P1	8.55470812993853E-5	4.29732225505248E-5
P2	-9.63334533612688E-5	-5.36096297039198E-5
H0	4.86955662463779	4.79049460191972
V0	3.89146995481964	3.82137436958372
tx	261.432982608206	256.747675651256
ty	-111.730337919573	129.778640704869
tz	0.651486868334968	2.10745345725647
PAN	25.2208617546938	-25.7718731434018
TILT	1.31751902539866	0.837954023398722
SWING	-0.663248409002928	1.33129809862987

圖 15 相機校正參數

	X	Y	Z
1	-0.00245097399795213	-0.0020183779848395	-0.00058181548073577
2	-0.00465554264957291	-0.000397439199706362	0.000380158275201659
3	-0.00153273934731146	0.000550864940495721	2.65253330349324E-5
4	0.000470233751173055	0.00107663506386674	0.000799998492940546
5	-0.0050608656561662	0.000928675539909385	0.00196379420482717
6	-0.00431591163192024	0.00112230169930694	-7.50521907963986E-5
7	-0.00126191948064047	0.00038334583366153	0.0031806934129035
8	-0.00199292988691013	0.000511590961187025	-0.00106809850722023
9	-0.00256857962740753	0.000602196918764619	0.000487302679899493
10	-0.00142159773565709	0.000421535096997605	-0.000617164243709389
11	-0.00140944052553493	0.000904898329696056	0.000821842454972632
12	-0.00276009165872892	0.000526647722834294	0.00026344497390821
13	-0.00451834138078766	0.000524482188163589	0.000870242923144637
14	-0.000930242092437084	-0.000485458909280645	-9.10192795240405E-5
15	-0.00301667538910522	-0.000380454913474715	0.000587054553165878
16	-0.00365367300582875	0.0010095099752836	-0.000812878452687737
17	-0.00267849953868904	0.000316706418265422	-0.000422433925035381
18	-0.00306066072761269	0.000802534274377482	0.00221318790195069

**相機各點與世界座標的差距**

圖 16 相機校正誤差評估結果

### (五) 剛體平移

在執行剛體平移實驗時，使用者需先返回三軸平台操控介面，此時使用者可使試件沿著 X 軸(面外)移動一段距離後再擷取影像，也可使試件於三軸各移動一段距離再擷取影像，之後再返回相機校正介面執行「剛體平移測試」，進行剛體平移實驗，圖 17 即為剛體平移量測之介面，此介面的右方有剛體實驗步驟的說明，而介面的右上方可輸入平台上試件的位移量。本實驗先將三軸平台上的試件先平移至(-0.5, 0, 0) mm 後，再平移至(0.5, 0, 0) mm，並以立體視覺於此兩位置擷取影像。同時，也將試件分別平移至(-0.5, -0.5, -0.5) mm 及(0.5, 0.5, 0.5) mm，並以立體視覺分別擷取其影像。接著回到剛體平移測試介面，開啟在(-0.5,0,0) 位置的影像，並框選一格點陣列，再開啟在(0.5,0,0)位置的影像，也框選同一組格點陣列，以後按下「求取誤差量」，即可計算量測位移與平台位移的差距，圖 18 即顯示各格點的誤差分量以及平均誤差與標準差。對於(-0.5,-0.5,-0.5) mm 到(0.5,0.5,0.5) mm 的紅體平移實驗，其執行方法亦與前述方法類似，其執行結果，則顯示於圖 19 的介面中。由於本實驗所訂的世界座標系統的 Y 軸與 Z 軸，不一定與平移台之 Y 軸與 Z 軸平行，因此本程式對於(1, 1, 1) mm 平移的量測誤差，將只顯示總誤差量。



圖 17 剛體平移測試介面

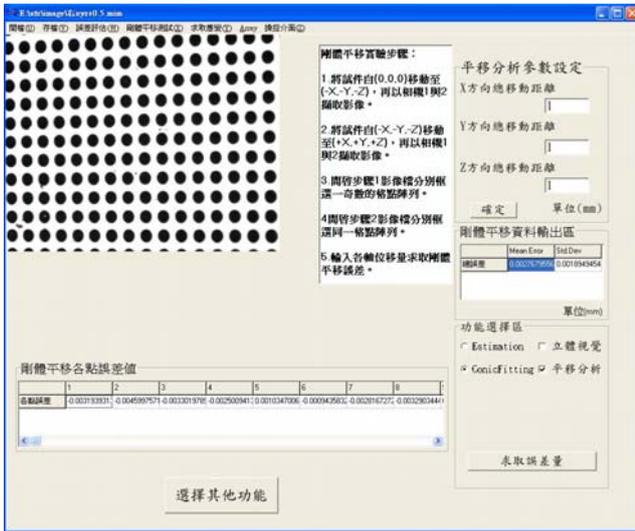


圖 18 (1, 0, 0) mm 剛體平移量測誤差分析

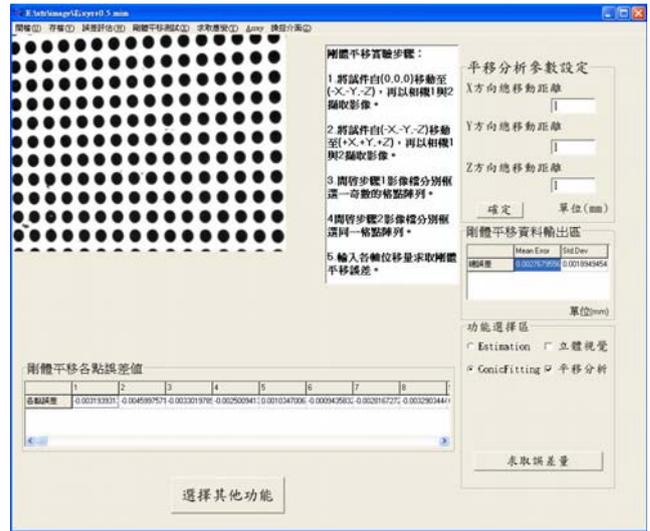


圖 19 (1, 1, 1) mm 剛體平移量測誤差分析

## 二、相機校正結果與討論

表 1 為本實驗所求得的相機 1 與相機 2 的 15 個參數，利用此相機參數以及校正點的立體影像均可求取實驗世界座標值並與已知的世界座標值比較，以分析各軸誤差分布情形。本文亦分別執行(1, 0, 0) mm 及(1, 1, 1) mm 的剛體平移測試，以驗證立體視覺系統的基本量測精度。上述實驗的校正誤差以及剛體平移量測誤差的平均值與標準差，顯示於表 2。觀察(1, 0, 0) mm 剛體平移的誤差分析結果，可之 Y 軸與 Z 軸向之誤差皆在 1.4  $\mu\text{m}$  以下，而 X 軸向之量測誤差則在 2.7  $\mu\text{m}$  之內。對於(1, 1, 1) mm 三維剛體平移誤差的分析結果而言，總誤差量約在 2.7  $\mu\text{m}$  左右。

## 肆、結論與建議

本研究主要在設計一個方便且簡易的操作介面，讓使用者能夠經由介面的引導單獨完成立體視覺系統的相機校正以及量測誤差評估。本相機校正軟體程式具有下列的優點：

1. 本程式在操作流程內訂定一些規範，因此能自動對於各項執行動作給予提示、確認、或警告，讓使用者能夠確實的完成各項功能，以確保結果的正確性。
2. 對於 Scale Factor 或相機參數，可在執行下依功能時自動取得，也可經由手動輸入，以便簡化求取過程中已知的參數，同時也使得本程式在操作上更具彈性。
3. 執行本程式得到數據時，程式會將數據作調理式的整理，讓使用者在觀看結果時更為明確，以適時的了解各資料點的實際情形。
4. 在框選格點範圍後，會依格點範圍的數目去進行運算，不局限於某一特定的格點陣列範圍。此外本程式在對於物體的判別上，會自動將不完整的圓形，或是影像中的雜點予以去除，讓使用者在框選格點範圍的同時可以更加的方便。
5. 本程式所開發出的三軸平台操控介面，可經由步進馬達操控三軸平台的運動以避免手控操作對實驗的影響，並降低相機校正所需時間，以改進實驗過程冗長的缺點。

綜合以上各點，可知本程式在操作分析上的方便性與準確性，將來若能在各功能加入更多自動化的操控，將使本程式更加簡易，更加迅速，且未來如能夠再進一步對於其它相關功能做結合，將使本程式能夠更完備。

表 1 相機校正參數

Camera Parameters	Unit	Guessed Initial Values	Camera #1 Predicted Values	Guessed Initial Values	Camera #2 Predicted Values
f	mm	74.	74.997	74.0	75.068
K1	$10^{-3}\text{mm}^{-2}$	0.00001	4.32E-05	0.00001	3.33E-05
K2	$10^{-3}\text{mm}^{-2}$	1.00E-05	1.10E-06	1.00E-05	-6.39E-07
P1	$10^{-3}\text{mm}^{-2}$	1.00E-05	8.55E-05	1.00E-05	4.3E-05
P2	$10^{-3}\text{mm}^{-2}$	1.00E-05	9.63E-05	1.00E-05	-5.36E-05
$M_x$	Pixel/mm	147.0	131.402	147.0	133.571
$M_y$	Pixel/mm	148.0	131.51	148.0	134.022
$H_0$	mm	4.35	4.87	4.35	4.790
$V_0$	mm	3.45	3.891	3.45	3.821
Image center	pixel	640[ $H_0 \times M_x$ ]	639.874	640	639.873
	pixel	512[ $V_0 \times M_y$ ]	511.777	512	512.149
PAN	degree	25.0	25.221	-25.0	-25.772
TILT	degree	0.0	1.318	0.0	0.838
SWING	degree	0.0	-0.663	0.0	1.331
$C_x$	mm	245.0	261.433	245.0	256.748
$C_y$	mm	-110.0	-111.73	110.0	129.779
$C_z$	mm	0.0	0.651	0.0	2.107

表 2 相機校正誤差分析

	Calibration Points		(1,0,0) mm Rigid Body Translation Test		(1,1,1) mm Rigid Body Translation Test	
	Mean error ( $\mu\text{m}$ )	Std. Dev. ( $\mu\text{m}$ )	Mean error ( $\mu\text{m}$ )	Std. Dev. ( $\mu\text{m}$ )	Mean error( $\mu\text{m}$ )	Std. Dev. ( $\mu\text{m}$ )
$\Delta x$	3.560	2.558	2.613	2.762	—	—
$\Delta y$	1.616	1.408	1.355	1.263	—	—
$\Delta z$	1.458	1.926	0.795	0.835	—	—
$\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$	—	—	—	—	2.718	1.884

### 參考文獻

1. Kanglin Xu, George F. Luger, "The Model for Optimal Design of Robot Vision Systems Based on Kinematic Error Correction," *Image and Vision Computing*, 25, 1185–1193 (2007).
2. Tsai, R. "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV camera and lenses", *IEEE Trans, Robotics and Automation*, V. 3(4) (1987).
3. Carbon, V., Carocci, M., Savio, E., Sansoni, G., and Chiffre, L. D., "Combination of Vision System and a Coordinate Measuring Machine for the Reverse Engineering of Freeform Surfaces," *Advanced Manufacturing*

- Technology*, 17, 263-271 (2001).
4. Luo, P. F., Chao, Y. J., Sutton, M. A., and Peters, W. H., "Accurate Measurement of three-dimensional Deformations in Deformable and Rigid Bodies Using Computer Vision," *Experimental Mechanics*, 33(2), 123-132 (1993).
  5. Luo, P. F., Chao, Y.J., and Sutton, M. A., "Application of Stereo Vision to Three-dimensional Deformation Analyses in Fracture Experiments," *Optical Engineering*, 33(3), 981-990 (1994).
  6. Faugeras, O., *Three-dimensional Computer Vision: A Geometric View Point*, MIT Press, Cambridge, MA (1993).
  7. Beyer, N. A., "Accurate Calibration of CCD Cameras," in *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (1992)
  8. Weng, J, Cohen, P., and Herniou, M., "Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation ," *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(10), 965-980 (1992).
  9. Manual of Photogrammetry, Fourth ed., Slama, C.C., ed., Falls Church, Va,,: *American Society for Photogrammetry*, 1980.
  10. Heikkila, J., "Geometric Camera Calibration Using Circular Control Points," *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(10), 1066-1077 (2000).
  11. Sutton, M. A., Wolters, W. J., Peters, W. H., Ranson, W. F., and McNeill, S. R., "Determination of Displacements Using an Improved Digital Correlation Method," *Image and Vision Computing*, 1(3), 133-139 (1983).
  12. Chu, T. C., Ranson, W. F., Sutton, M. A., and Peters, W. H., "Applications of Digital Image Correlation Techniques to Experimental Mechanics," *Experimental Mechanics*, 25(3),232-244 (1985).
  13. Luo, P. F. and Liou, S. S., "Measurement of Curved Surface by Stereo Vision and Error Analysis," *Optics and Lasers in Engineering*, 30(6), pp. 471-486 (1998).
  14. Luo, P. F. and Chen, J. N., "Measurement of Curved Surface Deformation in Cylindrical Coordinates," *Experimental Mechanics*, 40(4), pp. 345-350 (2000).
  15. Luo, P. F. and Huang, F. C., "Application of stereo Vision to the Study of Mixed-mode Crack-tip Deformations," *Optics and Lasers in Engineering*, 33(5), 349-368 (2000).
  16. Luo, P. F. and Huang, F. C., "An Experimental Study on the Mixed-mode Crack-tip Deformations in PMMA," *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 38(4), 313-318 (2003).
  17. Luo, P. F., Chuang, C. K., and Chao, Y. J., "Measurement of J Integral by Shadow Spot Generated from Out-of-plane Displacement," *Optical Engineering*, 42(12), 3433-3442 (2003).
  18. Luo, P. F. and Wu J., "Camera Calibration and Three-dimensional Deformation Measurements Using Circle Grid," Proceedings of the 2004 SEM X International Congress and Exposition on Experimental and Applied Mechanics, Costa Mesa, California, USA.
  19. Luo, P. F. and Hsu, C. Y., "Calibration of 3D Computer Vision Using Circular Dots," Proceedings of 2006 SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics, Saint Louis, Missouri, USA.
  20. Kanatani, K., *Geometric Computation for Machine Vision*. Oxford : Clarendon Press (1993).
  21. Bookstein, F. L., "Fitting Conic Sections to Scattered Data," *Computer Graphics and Image Processing*, 9, 56-71 (1979).