

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 結構光條紋視覺系統之校正與表面量測研究 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型  
計畫編號：NSC 98-2221-E-216-020-  
執行期間：98年08月01日至99年07月31日  
執行單位：中華大學機械工程學系

計畫主持人：羅鵬飛

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：廖經皓  
碩士班研究生-兼任助理人員：白紹翊

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 99 年 12 月 06 日

## 結構光 3D 視覺系統之校正

羅鵬飛 蕭世昌 魏豪彥

中華大學機械工程學系

luo@chu.edu.tw

### 摘要

本文以 CCD 相機、雷射投影機以及三軸移動平台形成結構光條紋量測系統，以擷取物體表面的 3D 資訊。本文利用 CCD 相機、格點校正試件以及三軸平台，求取校正試件上各格點的座標位置，以建立世界座標系統並得到一組校正點，即可藉此校正相機並求得相機的 15 個參數。由於本文提出一特殊的格點排列方法，因此可在相機校正完成後，進行投影機的校正，以求取雷射光條紋平面相對於世界座標系統的平面方程式。在完成相機及雷射投影機的校正後，即可由光條上的 2D 影像點重建物體相對於世界座標系統的 3D 表面。本文以移動平台將格點校正試件沿相機主光軸方向移動某些距離，並分析結構光條紋量測系統的基本誤差，實驗結果顯示相機主光軸方向的量測誤差約為 2~3  $\mu\text{m}$ 。

關鍵詞：CCD 相機、雷射投影機、結構光條紋系統、相機校正、投影機校正、誤差評估

### 壹、前言

本研究所發展的結構光條紋視覺系統為一主動式立體視覺系統[1]，係由 CCD 相機以及結構光投影機(Structured Light Projector) 所形成。使用結構光的好處是，只需使用一台 CCD 相機，即可利用被照明物體的 2D 影像資訊求取其 3D 的特徵。

為得到精確與可靠的 3D 量測，需對主動式立體視覺系統的相機及投影機分別進行校正，以求得各自的內部及外部參數(Intrinsic and Extrinsic parameters)。就相機校正(Camera calibration)而言，常用的相機模型為針孔模型(Pinhole model)，係為一用來說明成像過程的數學表示式[2]。為校正此理想針孔相機模型與實際成像之間的誤差，以改善相機校正之精確度，需將徑向扭曲參數(Radial distortion) [3-5]及切線向扭曲(Radial and Decentering distortion)[6,7]列入考慮。Zhang[8]對於相機校正問題上作出了完整的回顧與分類，Clarke與Fryer[9]則整理出相機校正之發展史，並對相機校正技巧作徹底的審視。

一般而言，在完成相機校正之後，即已建立一組 3D 世界座標系統，此時將可進行投影機校正(Projector calibration)，以求取由投影機投射出來的光條紋平面(Light Stripe Plane)相對於 3D 世界座標系統的方程式[10,11]。Zhou 與 Zhang[11]使用正方形格點陣列來校正相機並求取光條紋平面方程式。實驗結果顯示，其在 X-、Y- 以及 Z- 方向之 RMS 量測誤差分別為 0.059 mm、0.103 mm 以及 0.255 mm。

Marzani 等人[12]使用 CCD 相機以及可投射 361 個光點(19 × 19 陣列圖形)的雷射投影機形成主動式立體視覺系統，並對其進行校正。Dipanda 與 Woo[13]改良 Marzani 等人的校正方法，實驗結果顯示，在 100 mm 的工作深度下，幾個被重建的平面的 Z 方向的誤差約為 0.1 mm，標準差則為 0.075 mm。

本文利用並改良作者已發展之相機校正技術[14-17]，並提出一新穎而簡單的方法來校正雷射投影機，以建立一套3D量測系統。

## 貳、研究方法

### 一、理論背景

本文所發展的結構光條紋視覺系統 (Structured light stripe system) 係由CCD相機、雷射投影機以及三軸精密移動平台所形成，圖1即為此系統的示意圖，圖中亦顯示與相機主光軸垂直且裝置於三軸移動平台之校正試件。本文即以此格點試件校正相機及雷射投影機。

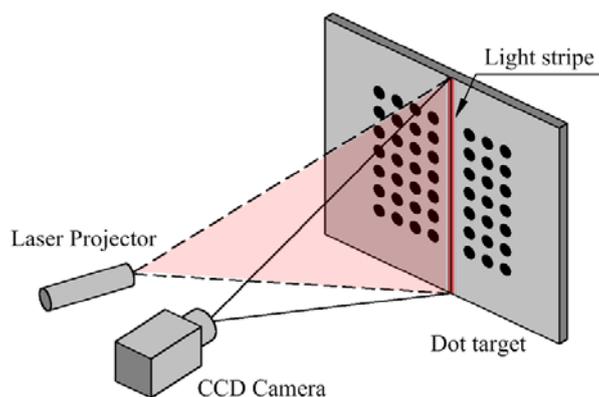


圖1 結構光條紋視覺系統及校正試件示意圖

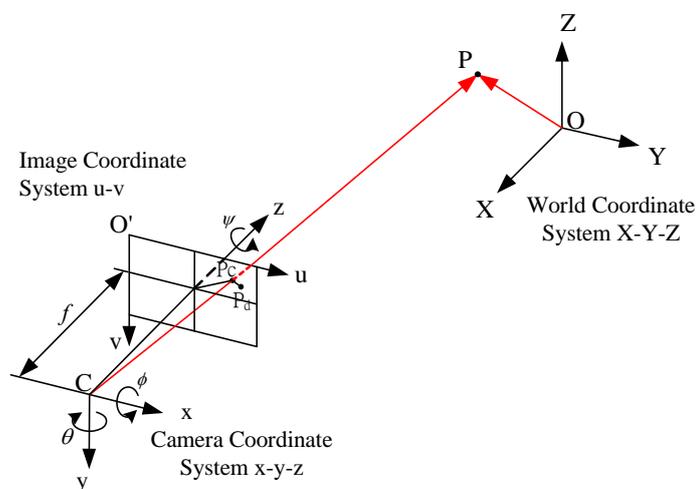


圖 2 相機模型與投影原理

#### (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2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C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則為相機座標系統 (camera coordinate system) x-y-z 的座標原點。

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

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

上式， $\mathbf{F}$ 為一透視轉換矩陣，係由下列各項參數所定義：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 $\mathbf{t} = [t_x, t_y, t_z]^T$ 、旋轉矩陣 $\mathbf{R} = \mathbf{R}(\theta, \phi, \varphi)$ 。 $\theta, \phi$ 與 $\varphi$ 分別為繞 $y$ 、 $x$ 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[7]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，係由徑向扭曲係數 $(k_1, k_2, k_3)$ 及切線方向扭曲係數 $(p_1, p_2, p_3)$ 所定義。方程式(2)可寫成

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u_d \\ v_d \end{bmatrix} &\approx \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \end{bmatrix} - \frac{1}{4k_1 r_c^2 + 6k_2 r_c^4 + 8p_1(v_c - v_0) + 8p_2(u_c - u_0) + 1} \begin{bmatrix} \Delta u(u_c, v_c) \\ \Delta v(u_c, v_c) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta u \\ \delta v \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

利用方程式(1)與(3)，可將在三維世界座標系統下的點 $\mathbf{P}(X, Y, Z)$ ，對映到扭曲的影像座標 $\mathbf{P}_d(u_d, v_d)$ 。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

圖3顯示一個位於 $\Pi'$ 平面上的圓點 $\mathbf{R}$ ，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 $\mathbf{x}_h$ - $\mathbf{y}_h$ 的座標原點，而座標軸 $\mathbf{x}_h$ 及 $\mathbf{y}_h$ 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 $\mathbf{x}_h$ - $\mathbf{y}_h$ 座標系統下，此圓點之圓方程式可表示為

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

使用式(1)，圓點 $\mathbf{R}$ 投影於影像平面的曲線方程式可表示為

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

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

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[18]。

$$\lambda \begin{bmatrix} u_e \\ v_e \\ 1 \end{bmatrix} = F(HQ^{-1}H^T)F^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

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 $(u_d, v_d)$ 。

$$\begin{bmatrix} u_d \\ v_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_e \\ v_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta u \\ \delta v \end{bmatrix} \quad (7)$$

最後，可使用下式將此控制圓點於影像平面上的投影點座標單位由 $mm$ 轉換成 $pixel$ 。

$$\begin{aligned} u &= M_x u_d \\ v &= M_y v_d \end{aligned} \quad (8)$$

上式， $M_x$ 與 $M_y$ 分別為在 $u$ 與 $v$ 軸方向的尺度係數，其單位為  $pixel/mm$ ，可將實際物理單位  $mm$  轉換為影像單位  $pixel$ 。藉由15個相機參數 $M_x, M_y, f, k_1, k_2, p_1, p_2, (u_0, v_0), (t_x, t_y, t_z), (\theta, \phi, \varphi)$ 以及方程式(6) ~ (8)，可將一個在三維世界座標下的控制圓點中心，對映到二維影像平面上。

若已知空間中 $S$ 個控制圓點中心的世界座標位置，以及此 $S$ 個世界座標點在相機之影像平面上相關的影像座標 $(U_j, V_j), j = 1, \dots, S$ ，即可以非線性最小平方法[19]，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 $(u_j, v_j)$ 與實驗求得的 $(U_j, V_j)$ 之間的誤差為最小，亦即使下式之值為最小值。

$$E = \sum_{j=1}^S \{(U_j - u_j)^2 + (V_j - v_j)^2\} \quad (9)$$

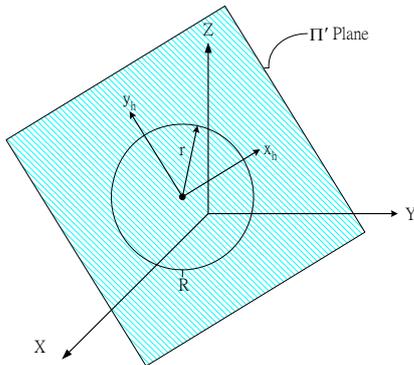


圖3 位於  $\Pi'$  平面上的圓點

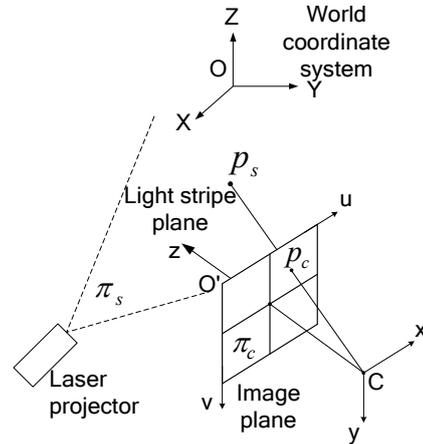


圖4 結構光條紋視覺系統之投影機模型

### (三) 投影機模型(Projector Model)

圖4顯示結構光條紋量測系統之投影機模型，光條紋平面 $\pi_s$ 上的任意點 $P_s$ 於影像平面 $\pi_c$ 上的理想投影點為 $P_c$ ，也就是 $P_s$ 為 $\overrightarrow{CP_c}$ 射線與光條平面 $\pi_s$ 的交界點。因此，如果已知 $\pi_s$ 與 $\overrightarrow{CP_c}$ 相對於世界座標系統 $X-Y-Z$ 的平面方程式與線方程式，即可決定相對於世界座標系統 $X-Y-Z$ 的 $P_s$ 點的座標位置。

對於投射於某一物體表面上的光條紋內的任意點 $P_n$ ，若其相對於世界座標系統  $X-Y-Z$  的座標為

$P_n(X, Y, Z)$ ，則投影機所投射出來的光條紋平面方程式可表示為

$$aX + bY + cZ + d = 0 \quad (10)$$

方程式(1)、(2)、(8) 以及(10)即組成投影機的數學模型，基於此投影機模型，可進行投影機校正，亦即是由投影機所投射出來的光條紋平面的校正。為執行此校正工作，至少需要三個非共線的控制點。一般而言，較多的控制點，可改善系統的量測精度。

#### (四) 投影機校正(Projector Calibration)

如圖5所示， $\pi_c$ 為視覺系統的影像平面， $\pi_s$ 為雷射投影機所投射出來的光條紋平面， $\pi_0$ 則為世界座標系統之YZ平面，且與相機之主光軸垂直。若試件沿著相機主光軸方向移動至*i*位置， $\pi_i$ 即為位於第*i*個位置的校正試件平面。 $L_s$ 為光條紋中心線，其於影像平面 $\pi_c$ 上的透視投影為 $\ell_s$ 。圖5亦顯示 $L_s$ 線上的世界座標點 $Q_j$ 以及其於影像平面上的相關影像點 $q_j$ 。

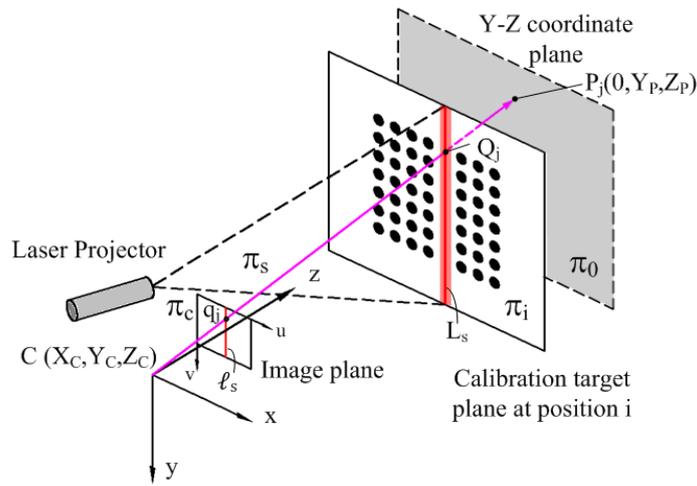


圖5 將光條紋影像之二維座標轉換成在世界座標系統下之三维座標

本文以 Luo 與 Chu[20]所提的方法求取中線 $\ell_s$ 在影像座標系統  $u-v$  下的直線方程式

$$u = mv + b \quad (11)$$

圖6即顯示所求得的光條紋中線。對於一張  $M \times N$  的數位影像，若以  $v = 0, \dots, N-1$  代入上式即可求得 $\ell_s$ 線上的N個影像點 $q_j(u, v)$ ， $j = 0, \dots, N-1$ 。

對於 $\ell_s$ 線上的任意點 $q_j(u, v)$ ，可由方程式(10)與(2)得到未扭曲的影像座標點 $(u_c, v_c)$ 。若將 $(u_c, v_c)$ 代入方程式(1)並讓  $X = 0$ ，即可以下式求得 $\overline{Cq_j}$ 射線與Y-Z平面( $X = 0$ )的交界點 $P_j(0, Y_p, Z_p)$ 。

$$\begin{bmatrix} Y_p/z \\ Z_p/z \\ 1/z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{12} & F_{13} & F_{14} \\ F_{22} & F_{23} & F_{24} \\ F_{32} & F_{33} & F_{34} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

因此，可在世界座標系統下將 $\overline{CP}$ 射線之方程式表示為

$$\frac{X - X_c}{-X_c} = \frac{Y - Y_c}{Y_p - Y_c} = \frac{Z - Z_c}{Z_p - Z_c} = t \quad (13)$$

由於 $q_j$ 影像點所對應的世界座標點 $Q_j$ 係位於  $X = X_i$  的平面上，因此 $\overline{CP}$ 射線與此平面的交界點即為點

$Q_j$ 。上述方法雖可求得位於 $L_s$ 線上的 $N$ 個控制點 $Q_j, j = 0, \dots, N-1$ ，但仍無法由此 $N$ 個共線的控制點求取光條平面的方程式。

為取得位於光條紋平面上的三組以上的非共線點，本文沿著相機主光軸方向移動校正試件至 $m$ 個不同位置處，如圖7所示，並以CCD相機攝取各校正平面之影像，以決定位於各校正平面上的光條紋中心線上的各個校正控制點  $Q_j^i(X_j^i, Y_j^i, Z_j^i), i = 1, \dots, m, j = 0, \dots, N-1$ 。理論上來說，由於計算誤差的關係，所得到的校正控制點位置並非剛好都在光條紋平面上，所以一個距離所有控制點最近的平面，即為所要求取的光條平面。所有校正控制點至光條平面的距離平方和為

$$f(a, b, c, d) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^{N-1} \left( \frac{aX_j^i + bY_j^i + cZ_j^i + d}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \right)^2 \quad (14)$$

使用非線性最小平方方法使  $f$  之值為最小，即可得到光條紋平面的方程式。

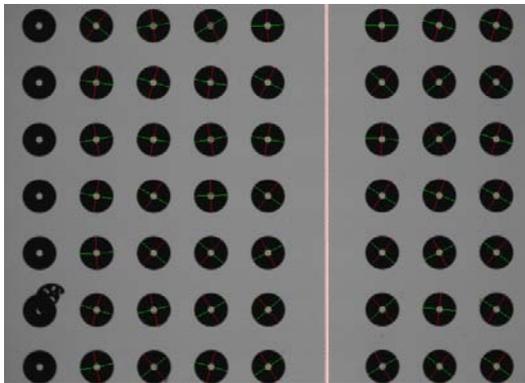


圖6 校正格點及雷射光條紋影像

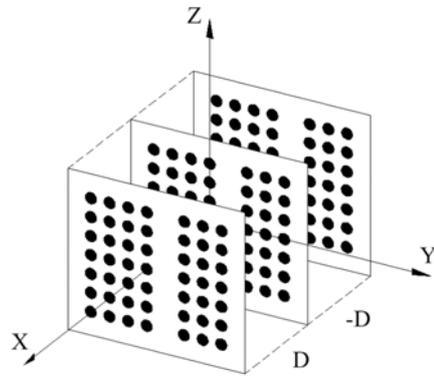


圖7  $N \times N$  格點陣列所建立之世界座標系統

### (五) 基本量測誤差評估

在完成相機與雷射投影機之校正後，利用 X-Y-Z 平移台使校正試件沿著X軸向移動某一距離 $d$ ，並投射雷射光在 $X = d$ 位置處的試件平面上，接著利用2-4節所述之方法求取 $\overline{CP_j}$  射線與光條紋平面的交點，即可求得在 $X = d$ 位置上的光條中心線各點世界座標位置。比較量測的X座標值以及已知的X軸向移動距離 $d$ ，即可評估本系統的基本量測誤差。

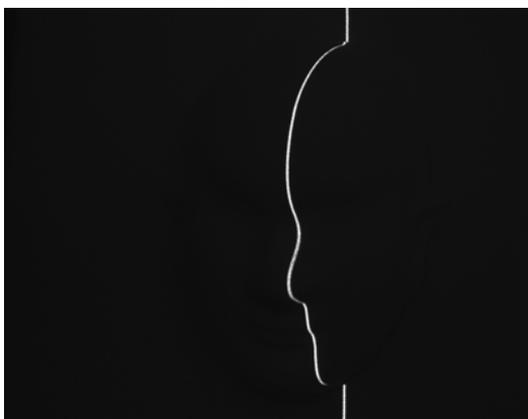


圖8 光條紋曲線灰階影像

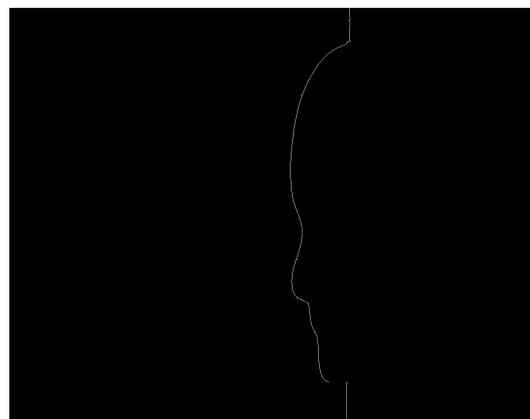


圖9 Thining 運算後所得之光條紋曲線之中心線

## (六) 以光條紋曲線求取物體輪廓線之3D資訊

本文以校正完成之結構光條紋視覺系統量測被掃描之物體表面，圖8及顯示雷射光投射在物體表面之光條紋影像，此光條紋曲線可被視為一個曲線結構。本文利用形態學的Hit-and-Miss方法[21]將此曲線結構進行細線化，以求取其中心線。圖9顯示所得到的曲線結構的中心線。

對於此中心線上的任意點 $q_i(u,v)$ ，可由上述方法求得 $\overline{CP}_j$ 射線，再由 $\overline{CP}_j$ 射線與雷射平面的交界點得到對應的物體表面上Q點的世界座標值。因此，本文所發展的雷射光條紋視覺系統可求取物體表面的3D資訊。

## 二、結構光條紋視覺系統之校正步驟

### (一) 格點中心之求取

本研究採用固定間距的圓形格點中心座標，以作為相機校正時所需的校正點 (calibration points)。若圓形格點與相機之影像平面互不平行時，其於影像平面之投影將成橢圓形狀[18]。本文以[16]所述的次像素邊緣搜尋法得到格點邊緣具次像素精度的座標點，再由這些邊界點求得圓形格點或橢圓形格點的中心座標位置[22]。

### (二) Scale Factor之求取

如圖13所示，將圓形格點試件水平移動一距離 $S_Y$  mm，並以相機擷取其移動前後之影像。接著計算 $N \times N$ 陣列中某一行格點的平均移動距離 $\bar{S}_Y$  pixels 即可求得水平方向之Scale Factor  $SF_Y$

$$SF_Y = \frac{S_Y}{\bar{S}_Y} (mm/pixel) \quad (15)$$

本實驗亦以類似的方法求取垂直方向的 Scale factor  $SF_Z$ ，實驗結果顯示，垂直方向的 $SF_Z$ 與水平方向的 $SF_Y$ 非常接近。

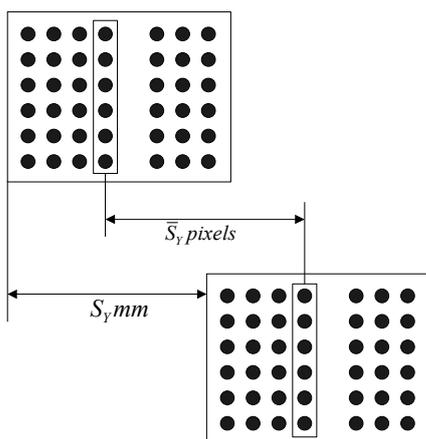


圖10 求取 Scale Factor 之示意圖

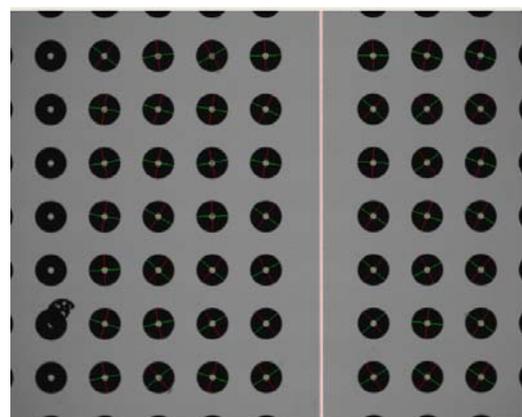


圖11 於  $X = 0$  位置時擷取之校正試件影像

### (三) 結構光條紋視覺系統之校正步驟

本文以下列步驟進行結構光條紋視覺系統之校正：

(1) 將格點試件固定於高精度的三軸平移台上，並調校格點試件使其與相機之主光軸垂直。以相機擷

取 $P \times Q$ 陣列的格點及雷射光條紋影像，其解析度為 $M \times N$ ，求取各校正點在影像座標系統下的座標位置 $(U_n, V_n)$ ,  $n = 1, \dots, P \times Q$ ，本文採用列數 $Q$ 為奇數的格點陣列。圖11即為所擷取的格點陣列及光條紋影像。

- (2) 將位於第 $(Q+1)/2$ 列上的各格點中心座標位置，代入最小平方直線逼近法，求取一水平單位向量 $\hat{e}_y$ ，再求取垂直於此水平分量之單位垂直分量 $\hat{e}_z$ 。圖7顯示之平面試件座標系統Y-Z的Y軸與Z軸即分別平行於 $\hat{e}_y$ 與 $\hat{e}_z$ 。經由座標轉換，即可求得此 $P \times Q$ 陣列格點相對於Y-Z座標系統的座標位置，將此座標位置乘以比例係數(scale factor)，以便將pixel單位轉換為mm的空間物理單位，即得世界座標系統下 $P \times Q$ 個校正點的座標位置 $(0, Y_n, Z_n)$ ,  $n = 1, \dots, P \times Q$ 。同時以Luo等人[20]所提出之方法，求取雷射光條紋中心線 $\ell_s^0$ 的直線方程式。
- (3) 如圖7所示，將格點試件沿著X軸之正負方向各移動D mm之距離，並以CCD相機擷取影像，即可得 $(D, Y_n, Z_n)$ 與 $(-D, Y_n, Z_n)$ ,  $n = 1, \dots, P \times Q$ 之世界座標點，以及上述各點於影像平面上的位置。同時以Luo等人[20]所提出之方法，求取位於 $X = D$ 與 $X = -D$  mm位置的雷射光條紋中心線 $\ell_s^{+D}$ 與 $\ell_s^{-D}$ 的直線方程式。
- (4) 以上所得之 $(D, Y_n, Z_n)$ 、 $(0, Y_n, Z_n)$ 以及 $(-D, Y_n, Z_n)$ ,  $n = 1, \dots, P \times Q$ ，即為X-Y-Z世界座標系統下的 $S$  ( $S = P \times Q \times 3$ )個校正點，而其於相機影像平面上的位置即為 $(U_n, V_n)$ ,  $n = 1, \dots, S$ 。
- (5) 若已知相機參數值，則利用空間已知 $S$ 個校正點 $(D, Y_n, Z_n)$ 、 $(0, Y_n, Z_n)$ 、 $(-D, Y_n, Z_n)$ 以及方程式(6)至(8)，即可計算此 $S$ 個校正點於影像平面上的位置 $(u_n, v_n)$ ,  $n = 1, \dots, S$ 。
- (6) 將以上數據帶入方程式(9)，並使用Levenberg-Marquardt方法[19]，則可得到相機的15個參數，使 $E$ 值為最小。
- (7) 由在 $X = D$ 、 $X = 0$ 以及 $X = -D$ 各位置時所求得的雷射光條紋中心線 $\ell_s^{+D}$ 、 $\ell_s^0$ 以及 $\ell_s^{-D}$ 的直線方程式，即可得到各光條中心線上的 $T$ 個影像點( $T = 3 \times N$ )。
- (8) 以方程式(8)、(2)、(12)、(13)以及已知相機參數求取此 $T$ 個影像點於試件表面光條紋中心線上所對應的世界座標點。
- (9) 以此位於非共平面的三組世界座標點決定相對於世界座標系統的光條紋平面方程式。

## 參、研究結果

如圖12所示，本文以JAI RM-1402CL CCD相機、Matrox SOL 6M CLB影像擷取卡、StockerYale SLH-505L-635-35雷射投影機、高精度三軸移動平台、可調式面光源以及PC等設備以形成結構光條紋視覺系統。本文係以UTRON FV2020鏡頭搭配CCD相機係，所使用的雷射投影機則搭配單線投影鏡頭且大約平掃(pan)25°，以產生單光條紋平面。

本文採用上述步驟進行相機及雷射投影機之校正，表1顯示所獲得的相機校正參數，表2則為結構光條紋視覺系統在X軸向的基本量測誤差數據，由剛體平移的實驗結果發現平均深度量測誤差約在4  $\mu\text{m}$ 以內。圖13為格點試件在 $X = 8$  mm時所量測而得的光條紋中心線上各點在三維世界座標系統下的

位置，觀察此圖可發現這些點形成一直線，而圖14則顯示X軸向的量測誤差分布圖。圖15顯示在X = 5 mm時的量測結果。

在完成結構光條紋視覺系統之校正及誤差評估後，本研究進行物體表面之量測。本文將圖16所示之臉譜模型架設於三軸平移台上，在平台於Y軸向每移動0.25 mm時即以相機擷取投射至物體表面的雷射光條紋影像，將各雷射光條紋分別細線化後，即可求取臉譜模型表面各特徵點之世界座標點位置，圖17顯示量測而得之臉譜模型高度彩現圖。本文亦對圖18所示之字體模型進行掃描並求取其表面輪廓，圖19即為高度彩視圖與字體模型平面正視圖。

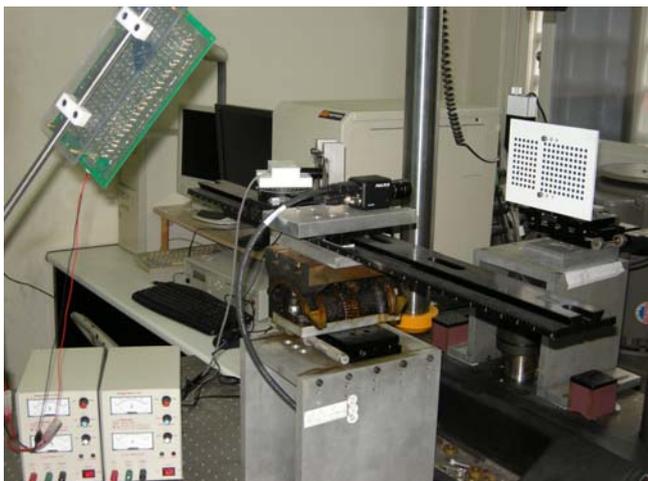


圖12 實驗設備

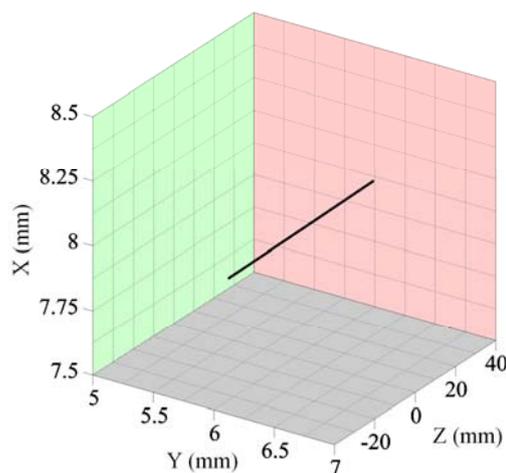


圖13 格點試件於X = 8 mm時量測而得的光條紋中心線上各點之世界座標值

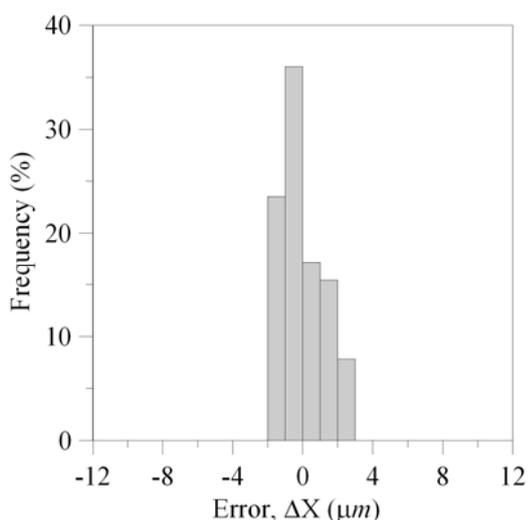


圖14 格點試件於X = 8 mm時，在X方向的量測誤差分布圖

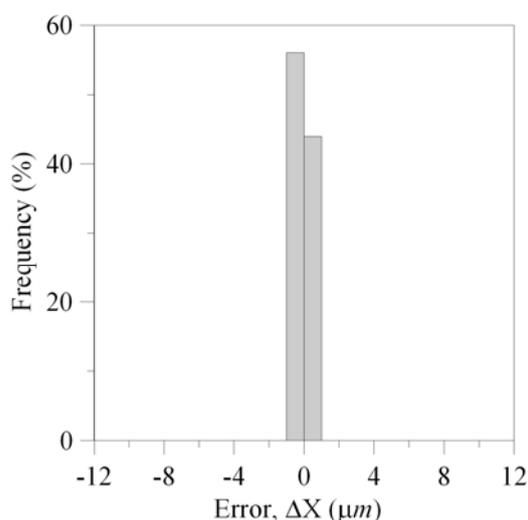


圖15 格點試件於X = 5 mm時在X方向的量測誤差分布圖

#### 肆、結論與建議

本文係亦利用一特殊排列的格點陣列，使得相機校正與雷射投影機校正得以同步執行。本文所擷取影像之解析度為1280 × 1024 pixels，因此可得到3000 個左右的位於雷射光條紋平面上的非共線的

校正控制點，以校正雷射投影平面。實驗結果發顯示平均深度量測誤差約在 $4\ \mu\text{m}$ 以內。本文亦利用結構光條紋視覺系統量測臉譜模型及中文浮刻字體的3D資訊，以重建其3D形貌，並得到令人滿意的實驗結果。本文目前所使用的細線化所求得之雷射光條紋曲線中心線座標值只具有1 pixel的精度，未來如能求得具次像素精度的雷射光條紋中心，將可使本系統於量測待測物表面時更加準確。

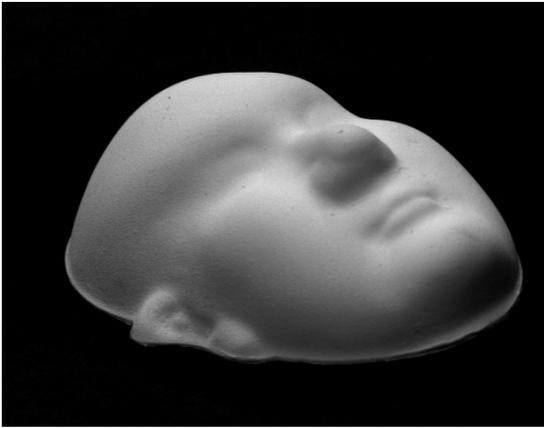


圖16 臉譜模型

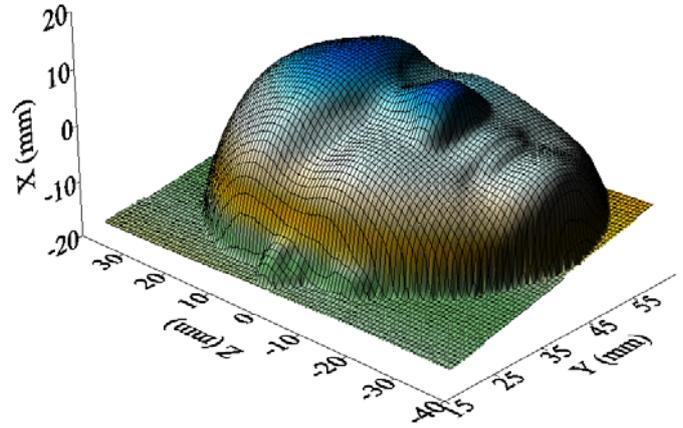


圖17 臉譜模型3D重建

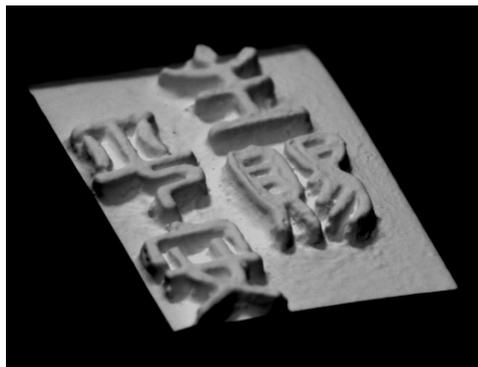
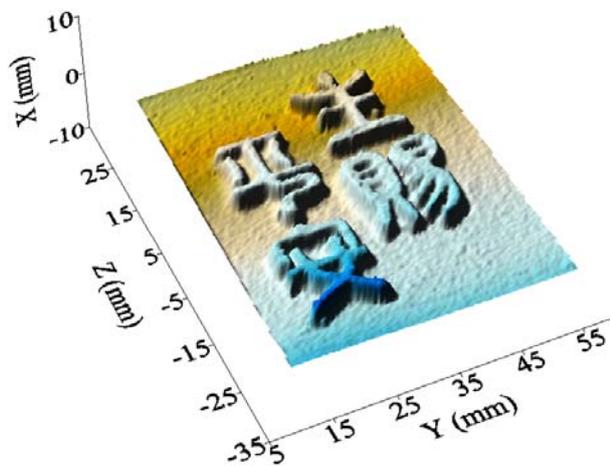
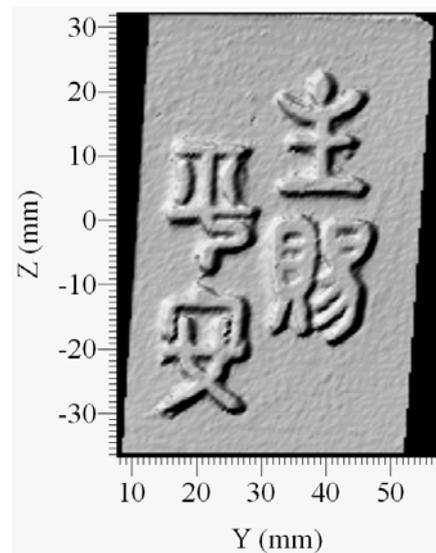


圖18 浮雕中文字體模型



(a) 3D重建



(b) 平面正視圖

圖19 字體模型3D重建與平面正視圖

## 伍、致謝

本文承蒙行政院國家科學委員會專題研究計畫（學門：精密量測；計畫名稱：結構光條紋視覺系之校正與表面量測；計畫編號：NSC 98-2221-E-216-020；執行期限：98/08/01 ~ 99/07/31；主持人：羅鵬飛）以及中華大學配合款（計畫編號：CHU 98-2221-E-216-020；執行期限：98/08/01 ~ 99/07/31；主持人：羅鵬飛）補助始得以完成，特此致謝。

## 參考文獻

- [1] Brandner, M., and Thurner, T., "Uncertainty in Optical Measurement Applications: A Case Study," Proc. IEEE AMUEM 2005, Niagra Falls, (May 2005).
- [2] Faugeras, O., Three-dimensional Computer Vision: A Geometric View Point, MIT Press, Cambridge, MA (1993).
- [3] Beyer, N. A., "Accurate Calibration of CCD Cameras," in *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (1992).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] Manual of Photogrammetry, Fourth ed., Slama, C.C., ed., American Society for Photogrammetry, Falls Church, Va, (1980).
- [7] Heikkila, J., "Geometric Camera Calibration Using Circular Control Points," *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(10), October (2000).
- [8] Zhang, Z., "Camera calibration," in *Emerging Topics in Computer Vision*, G. Medioni and S. Kang, Eds. Prentice Hall Professional Technical Reference, ch. 2, (2004).
- [9] Clarke, T. and Fryer, J., "The Development of Camera Calibration Methods and Models," *Photogrammetric Record*, 16(91), 51-66, (April 1998).
- [10] Huynh, D., Owens, R., and Hartmann, P., "Calibrating a Structured Light Stripe System: A Novel Approach," *International Journal of Computer Vision*, vol. 33, no. 1, pp. 73-86, (September 1999).
- [11] Zhou, F. and Zhang, G., "Complete Calibration of a Structured Light Stripe Vision Sensor through Planar Target of Unknown Orientations," *Image and Vision Computing*, 33(1), 59-67, (January 2005).
- [12] Marzani, F., Voisin, Y., Voon, L. L. Y., and Diou, A., "Calibration of a Three-Dimensional Reconstruction System Using a Structured Light Source," *Optical Engineering*, 41(2), 484-492, (February 2002).
- [13] Dipanda, A. and Woo, S., "Towards a Real-time 3D Shape Reconstruction Using a Structured Light System," *Pattern Recognition*, 38(10), 1632-1650, (October 2005).
- [14] 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).
- [15] 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).
- [16] Luo, P. F. amd Wu J., "An Easy Calibration Technique for Stereo Vision Using a Circle Grid," *Optical Engineering*, 47(3), 033607, (2008).
- [17] Luo, P. F. and Hsu, C. Y., 2006, "Camera Calibration and Deformation Measurement Using a

Grid of Circular Dots,” Abstract Proceedings of the Photomechanics 2006 International Conference on full-field measurement techniques and their applications in experimental mechanics, Clermont Ferrand, France.

- [18] Kanatani, K., *Geometric Computation for Machine Vision*. Oxford: Clarendon Press, 1993.
- [19] Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., and Flannery, B. P., *Numerical Recipes in C—The Art of Scientific Computing*, second ed., Cambridge University Press, 1992.
- [20] Luo, P. F., Pan, S. P., and Chu, T. C., 2004, “Application of computer vision and laser interferometer to the inspection of line scale” *Optics and Lasers in Engineering*, 42, 563-584 (2004).
- [21] Gonzalez, R. C. and Woods, R. E., *Digital Image Processing*, Prentice Hall, Second Edition, (2002).
- [22] Bookstein, F. L., “Fitting Conic Sections to Scattered Data,” *Computer Graphics and Image Processing*, 9, 56-71 (1979).

Camera Parameters	Unit	Gussed Initial Values	Camera Predicted Values
F	mm	35	32.2664
K <sub>1</sub>	mm <sup>-2</sup>	0.00001	-0.00317
K <sub>2</sub>	mm <sup>-2</sup>	0.00001	0.00011
P <sub>1</sub>	mm <sup>-2</sup>	0.00001	0.00283
P <sub>2</sub>	mm <sup>-2</sup>	0.00001	-0.00158
M <sub>x</sub>	pixel/mm	120	140.4792
M <sub>y</sub>	pixel/mm	120	142.1186
H <sub>0</sub>	mm	3.235	4.4194
V <sub>0</sub>	mm	2.42	3.5712
Image Center	Pixels	[640]	620.836
	pixels	[512]	507.534
PAN	degree	0	0.0076
TILT	degree	0	0.0224
SWING	degree	0	-0.0640
X <sub>c</sub>	mm	355	337.8915
Y <sub>c</sub>	mm	0	-1.3631
Z <sub>c</sub>	mm	0	0.2182
Scale Factor, SF <sub>y</sub>	mm/pixel		0.074541
Scale Factor, SF <sub>z</sub>	mm/pixel		0.073681

表1 相機校正之15參數

X (mm)	MEAN ( $\mu$ m)	VARIANCE ( $\mu$ m)	STANDARD DEVIATION ( $\mu$ m)
-8	2.023	0.000	0.434
-5	1.078	0.001	1.126
5	1.02	0.001	0.934
8	3.042	0.000	0.263

表2 結構光條紋視覺系統X方向的量測誤差

# 國科會補助計畫衍生研發成果推廣資料表

日期 2010年11月01日

<p>國科會補助計畫</p>	<p>計畫名稱: 結構光條紋視覺系統之校正與表面量測研究</p> <p>計畫主持人: 羅鵬飛</p> <p>計畫編號: 98 -2221-E -216 -020 - 學門領域: 精密量測</p>		
<p>研發成果名稱</p>	<p>(中文) 結構光3D視覺系統之校正</p> <p>(英文) A Novel Calibration Method for a Structured light based 3D Vision</p>		
<p>成果歸屬機構</p>	<p>中華大學</p>	<p>發明人 (創作人)</p>	<p>羅鵬飛</p>
<p>技術說明</p>	<p>(中文) 本研究以CCD相機、雷射投影機以及三軸移動平台形成結構光條紋量測系統，以擷取物體表面的3D資訊。本研究利用CCD相機、格點校正試件以及三軸平台，求取校正試件上各格點的座標位置，以建立世界座標系統並得到一組校正點，即可藉此校正相機並求得相機的15個參數。由於本文提出一特殊的格點排列方法，因此可在相機校正完成後，進行投影機的校正，以求取雷射光條紋平面相對於世界座標系統的平面方程式。在完成相機及雷射投影機的校正後，即可由光條上的2D影像點重建物體相對於世界座標系統的3D表面。</p> <p>(英文) In the study the CCD camera, laser projector and high precision X-Y-Z translation stage were used to form a Structured light based vision system to obtain the 3D data of an object surface. The CCD camera, dot target and X-Y-Z translation stage were used to accurately determine the position of the circle dots on the dot target so that a world coordinate system was erected and a set of calibration points were obtained. The camera was then calibrated to extract 15 camera parameters. Due to the use of a specially arranged dot array, the laser projector calibration may be conducted once the camera calibration is completed to get the equation of the structured light stripe plane relative to the world coordinate system. After the calibration of camera and laser projector, the 3D surface of an</p>		
<p>產業別</p>	<p>機械製造業; 光學及精密器械製造業; 製鞋業; 模具製造業  <small>mechanical manufacturing; optical and precision instrument manufacturing; shoe making; mold manufacturing</small></p> <p>object may be reconstructed relative to the world coordinate system by using the 2D image points on the structured light stripe.</p>		
<p>技術/產品應用範圍</p>	<p>1. 在逆向工程製程上，逆向重建實體模型的3D虛擬模型形貌。                  2. 在一般工業製程上，例如陶瓷、塑膠、鑄造以及製鞋等工業，其產品常具有複雜的幾何形狀，因此需有精確的3D量測。</p>		
<p>技術移轉可行性及預期效益</p>	<p>本研究提出一新穎而簡單的方法來校正雷射投影機，可提供業界參考以建立一套可靠的3D量測系統。</p>		

註：本項研發成果若尚未申請專利，請勿揭露可申請專利之主要內容。



98 年度專題研究計畫研究成果彙整表

計畫主持人：羅鵬飛		計畫編號：98-2221-E-216-020-				計畫名稱：結構光條紋視覺系統之校正與表面量測研究	
成果項目		量化			單位	備註（質化說明：如數個計畫共同成果、成果列為該期刊之封面故事...等）	
		實際已達成數（被接受或已發表）	預期總達成數（含實際已達成數）	本計畫實際貢獻百分比			
國內	論文著作	期刊論文	0	1	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	1	1	100%		
		專書	0	0	100%		
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（本國籍）	碩士生	2	2	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		
國外	論文著作	期刊論文	0	1	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	0	1	100%		
		專書	0	0	100%		章/本
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（外國籍）	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		

<p>其他成果 (無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)</p>	無。
--	----

	成果項目	量化	名稱或內容性質簡述
科 教 處 計 畫 加 填 項 目	測驗工具(含質性與量性)	0	
	課程/模組	0	
	電腦及網路系統或工具	0	
	教材	0	
	舉辦之活動/競賽	0	
	研討會/工作坊	0	
	電子報、網站	0	
	計畫成果推廣之參與(閱聽)人數	0	



# 國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

## 1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

## 2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文： 已發表  未發表之文稿  撰寫中  無

專利： 已獲得  申請中  無

技轉： 已技轉  洽談中  無

其他：（以 100 字為限）

本研究成果將於 2010 年 11 月 11 日發表於「第十屆全國 AOI 論壇與展覽」(2010 Taiwan AOI Forum & Show)，同時也將投稿至 SCI 的國際學術期刊。

## 3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

### 1. 學術成就及技術創新

本研究利用被動式立體視覺系統中的相機校正方法，校正結構光條紋視覺系統的正向相機，以求得正向相機的 15 個參數。因本實驗之影像大小為  $1280 \times 1024$  pixels，因此可得到 3000 個左右的位於雷射光條平面上的非共面的校正控制點，以校正雷射投影平面，因此所得之雷射平面相較於利用 cross ratio 所求之雷射平面較為精確。實驗結果發現在穩定的系統架構下，本研究所建立之結構光條紋視覺系統之平均深度基本量測誤差約在 4 micrometer 以內。

### 2. 於產業實務之應用

(1) 在逆向工程製程上，逆向重建實體模型的 3D 虛擬模型形貌。

(2) 在一般工業製程上，例如陶瓷、塑膠、鑄造以及製鞋等工業，其產品常具有複雜的幾何形狀，因此需有精確的 3D 量測。