

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表面量測與軟體開發之研究 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 99-2221-E-216-035-
執行期間：99年08月01日至100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：白紹翊

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 100 年 10 月 12 日

結構光條紋視覺系統表面量測與軟體開發之研究

A study on the Surface Measurement and Software Development of a Structured Light Stripe Vision

計畫編號：NSC 99-2221-E-216-035

執行期限：99年8月1日至100年7月31日

主持人：羅鵬飛 中華大學機械工程學系

計畫參與人員：白紹翊 中華大學機械工程學系碩士班

摘要

藉由 2D 的投影資料重建物體表面的 3D 形狀，已成為電腦視覺裡一個越來越重要的研究課題，且已被應用在各種不同的領域。例如在逆向工程的製程上，可藉由量測實體模型的面資料逆向重建 3D 虛擬模型形貌，以加速成品的開發。此外許多工業製程（例如陶瓷、塑膠、鑄造以及製鞋等工業）產品常具有複雜的幾何形狀，因此也需要對其產品進行精確的 3D 量測。本文係以一台 CCD 相機、兩台雷射投影機以及一組三軸移動平台形成結構光條紋視覺系統。由於在相機的兩側各裝置一台雷射投影機，可解決光條紋無法投射至物體某些部分的問題，以便取得完整的 3D 量測資訊。本系統被用於量測圓管尺寸，以評估量測曲面時的系統量測誤差。

關鍵詞：CCD 相機、雷射投影機、結構光條紋系統、誤差評估、圓管尺寸量測

Abstract

Reconstructing 3D shape from 2D projections is becoming an increasingly important topic in computer vision and has been applied in various domains. In reverse engineering, product development may be expedited by measuring the surface information of a solid model to reconstruct its 3D virtual model in the reverse sense. In addition, many industrial processes need an accurate 3D measurement of their products. This is particularly important for parts of complex geometry, which are present at several industries such as ceramics, plastics, castings, shoe making, etc. In this paper a CCD camera, two laser projectors, and an X-Y-Z translation stage is used to form a structured light stripe vision system. Two laser projectors are used to solve the problem that the stripes may not be projected onto some part of an object surface to ensure that complete 3D surface measurement information may be acquired. This system is used to measure the dimension of a pipe to evaluate the system measurement accuracy for the curved surface measurement.

Key words: CCD camera, laser projector, structured light stripe vision system, error evaluation, pipe measurement

壹、前言

本文作者於 2010 年[1]成功發展結構光條紋視覺系統之校正與表面量測，此技巧係使用特殊格點排列的校正試件同時校正相機及雷射投影機；由平面物體的剛體平移量測試驗，顯示此系統的深度量測基本誤差為 $\pm 4 \mu\text{m}$ 左右。本校正技巧可使用多達 3000 個左右的控制點來求取光條紋平面，因此量測精準度遠比 Zhou 與 Zhang [2]所使用的校正方法（僅使用 10 多個控制點求取光條紋平面，深度方向量測誤差約為 0.225 mm）來的高。其他如使用雷射光點的結構光條紋視覺量測系統[3-5]的深度方向量測精準度則約為 0.10 mm 與 0.20 mm 之間。

當以此校正過的系統量測曲面物體時，由於雷射投射角度之影響，當物體移動至某一位置時將引起雷射平面與物體表面相切，造成雷射光條紋無法投射至位於此切面下的物體表面，使得系統無法量測其表面輪廓，因此本文在相機的另一側多加裝一台雷射投影機（如圖 1 所示），並調整校正方法，以解決此問題。本文亦進行圓管量測實驗，以評估本系統量測曲面時的誤差。

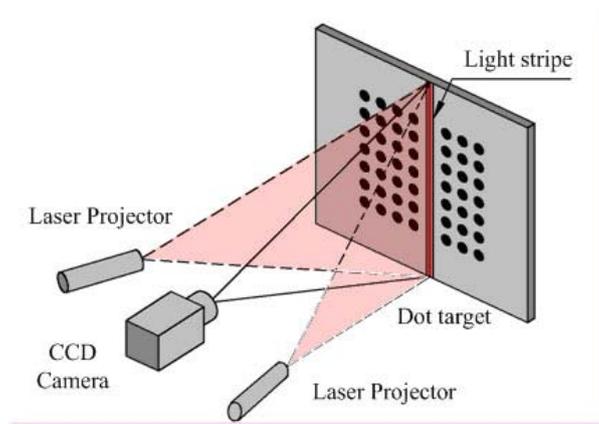


圖1 結構光條紋視覺系統示意圖

貳、研究方法

一、理論背景

(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 O'。空間中某一點 $P(X, Y, Z)$ 投影至影像平面上為 $P_c(u_c, v_c)$ ，此點即為 C 點與 P 點連線與影像平面之交點，由相似三角形的關係，可得 $P(X, Y, Z)$ 與 $P_c(u_c, v_c)$ 關係式：

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

其中 F 為一透視轉換矩陣，由焦距 f 、影像平面中心 (u_c, v_c) 、描述世界座標與相機座標間平移關係的平移矩陣 $t = [t_x, t_y, t_z]^T$ 以及旋轉矩陣 $R = R(\theta, \phi, \varphi)$ 所定義。其中 θ 、 ϕ 與 φ 分別為繞 y 軸、 x 軸以及 z 軸作左右搖動 (pan)、上下傾斜 (tilt) 與旋轉 (swing) 的角度。然而在實際取

像時，由於鏡頭扭曲的影響，投射點將沿著徑向與切線方向偏移。由參考文獻[6]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 Δu 與 Δv 為鏡頭扭曲校正值，係由徑向扭曲係數 (k_1, k_2) 以及切線向扭曲係數 (p_1, p_2) 所組成。將方程式(2)依據參考文獻[7]可加以該寫成下式：

$$\begin{bmatrix} u_d \\ v_d \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \end{bmatrix} - \frac{1}{d} \begin{bmatrix} \Delta u(u_c, v_c) \\ \Delta v(u_c, v_c) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 d 為

$$d = 4k_1 r_c^2 + 6k_2 r_c^4 + 8p_1(v_c - v_0) + 8p_2(u_c - u_0) + 1$$

利用方程式(1)與(3)，可將世界座標系統下的點 P ，對映到扭曲的影像座標 P_d ；而使用方程式(1)與(2)，則可將影像平面上扭曲影像座標點 (u_d, v_d) ，轉換到空間的投射線與已知二維平面的交界點。

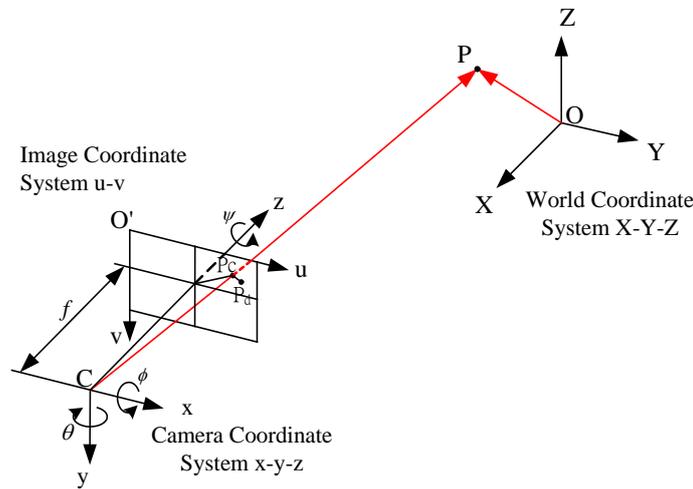


圖 2 相機模型與投影原理

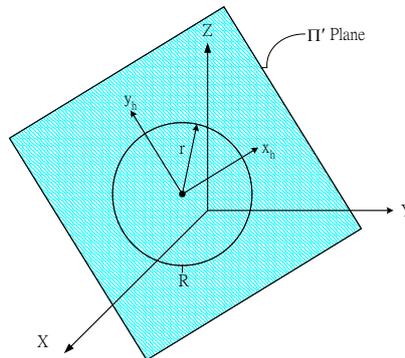


圖3 位於 Π' 平面上的圓點

(二) 圓形格點中心

圖3顯示一個位於 Π' 平面上的圓點 R ，此圓點之半徑為 r 且其圓心 $h_0 = (X_0, Y_0, Z_0)^T$ 係位於平面座標系統 x_h-y_h 的座標原點，而座標軸 x_h 及 y_h 的方向餘弦分別為 $h_1 = (X_1, Y_1, Z_1)^T$ 與 $h_2 = (X_2, Y_2, Z_2)^T$ 。在 x_h-y_h 座標系統下，此圓點之圓方程式可表示為

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

使用式(1)，圖可被投影至影像平面上，但會變成橢圓或者仍舊是圓。橢圓(u_e, v_e)中心可以下式求得[7]。

$$\lambda \begin{bmatrix} u_e \\ v_e \\ 1 \end{bmatrix} = F(HQ H^T F)^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

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

$$\begin{bmatrix} u_d \\ v_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_e \\ v_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta u \\ \delta v \end{bmatrix} \quad (6)$$

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 $pixel$ 。

$$\begin{aligned} u &= M_x u_d \\ v &= M_y v_d \end{aligned} \quad (7)$$

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 mm 轉換為影像單位 $pixel$ 。

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，由上述轉換，可知共有 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) 和 (θ, ϕ, φ) 則為相機的外參數 (extrinsic parameter)。

利用上述方程式(5)~(7)，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，因此可將三維的場景投影到二維影像平面上。然而此對映的轉換過程係屬於多對一的轉換，如果只使用一台相機時，即無法獲取深度的相關資訊。所以本計畫以雷射投影機投射一單線段光條紋於待測誤表面上，以便由2D的條紋影像求取待測物表面的深度資料。

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[8]，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。

$$E = \sum_{j=1}^{j=S} \left\{ (U_j - u_j)^2 + (V_j - v_j)^2 \right\} \quad (8)$$

(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，圖中顯示，光條紋平面 π_s 上的任意點 P_s 於影像平面 π_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 π_s 的交界點。因此，如果已知 π_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平面方程式可表示為

$$aX + bY + cZ + d = 0 \quad (9)$$

方程式(1)、(3)、(7) 以及(9)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。

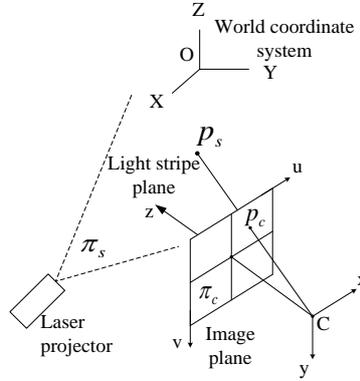


圖4 結構光條紋視覺系統之投影機模型

(四) 投影機校正(Projector Calibration)

如圖5所示， π_c 為視覺系統的影像平面， π_0 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， π_i 即為位於第*i*個位置的校正試件平面。 π_s 為雷射投影機所投射出來的光條平面，在實際上，雷射會在校正試件表面上產生具有一定寬度的線段(光條紋)。本文以此光條紋中心線的雷射光為光條平面，圖10所示之 L_s 即代表光條紋中心線，而此中心線 L_s 於影像平面 π_c 上的透視投影為 l_s 。圖10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 。

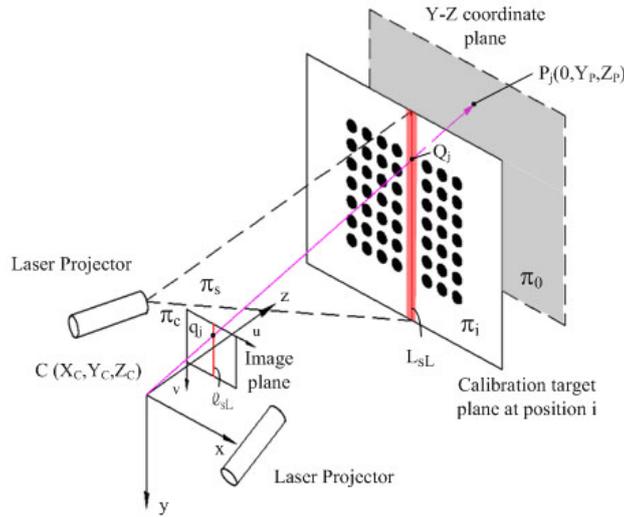


圖5 將右雷射投影機光條紋影像之二維座標轉換成在世界座標系統下之三维座標

由於在影像平面上的光條紋亦具有一定之寬度，因此本文以Luo與Chu[10]所提的缺陷排除法及角平分線方程式求取中線 l_s 在影像座標系統u-v下的平面方程式，並在 l_s 線抽取N個影像點 $q_j(u,v)$ 。對於 l_s 線上的任意點 $q_j(u,v)$ ，可由方程式(10)、(4)以及(3)求得 $\overline{Cq_j}$ 射線與Y-Z平面($X = 0$)的交界點 $P_j(0, Y_p, Z_p)$ 。在得到 P_j 點後，可求取在世界座標系統的 CP 射線。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 Q_j 的世界座標點。

上述方法雖可求得位於 L_0 線上的 N 個控制點 Q_j ，但仍無法由此 N 個共線的控制點求取光條平面的方程式。為取得三個以上的非共線點，以決定光條平面的方程式，本計畫將沿著相機主光軸方向移動校正試件至 m 個不同位置處，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中心線上的各個校正控制點。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。所有校正控制點至方程式(10)所表示的光條平面的距離平方和為

$$f(a,b,c,d) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^{N-1} \left(\frac{aX_j^i + bY_j^i + cZ_j^i + d}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \right)^2 \quad (10)$$

使用非線性最小平方法使 f 之值為最小，即可得到光條平面的方程式。

二、校正方法

(一) 格點中心之求取

本文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。若相機之影像平面與圓形格點校正試件表面兩者互不為平行時，所擷取影像之圓形格點將成橢圓形狀[7]。本文將原始影像做 Sobel Operator 的遮罩運算，以求得影像的灰階梯度，並凸顯出圓形或橢圓形物件的邊緣，接著以[9]所述的次像素邊緣搜尋法得到物體影像邊緣具次像素精度的座標點，即可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[9]。

(二) Scale Factor之求取

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 μm 等，因此需求取Scale Factor以利兩單位間的轉換。本實驗以精密三軸平移台，將圓形格點試件水平向移動一距離 S_Y mm ，並以相機擷取其移動前後之影像。接著再分別求取 $N \times N$ 陣列中某一行的格點在平移前後於影像平面上的平均移動距離 \bar{S}_Y pixels，即可求得水平方向之Scale Factor SF (mm/pixel)，本文亦將以類似的方法求取垂直方向的 Scale factor SF_Z ，初步的實驗結果顯示，垂直方向的 SF_Z 與水平方向的 SF_Y 非常接近。

(三) 結構光條紋視覺系統之校正步驟

在求取Y軸向與Z軸向的Scale factor之後，本文以下列步驟進行結構光條紋視覺系統之校正：

- (1) 將具有格點陣列之校正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。
- (2) 開啟左邊雷射投影機之電源，使光條紋投射於試件上，如圖5所示。
- (3) 以相機擷取 $P \times Q$ 陣列的格點及雷射光條紋影像，求取各校正點在影像座標系統下的座標位置 (U_n, V_n) 。
- (4) 以 $P \times Q$ 格點陣列中心之格點為試件平面座標系統Y-Z之座標原點，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 $(0, Y_n, Z_n)$ 以及其於影像平面上的相關影像點位置 (U_n, V_n) 。同時也以Luo [10]等人提出之缺陷排除最小平方法及角平線方程式，求取雷射光條紋中心線 ℓ_{SL}^0 方程式。
- (5) 關閉左邊雷射投影機並開啟右邊雷射投影機之電源，使光條紋投射於試件上，如圖6所示。以相機擷取格點及雷射光條紋影像，並求取雷射光條紋中心線 ℓ_{SR}^0 方程式。
- (6) 開啟左邊雷射投影機並關閉右邊雷射投影機之電源，使光條紋投射於試件上。
- (7) 移動平台將試件沿著X軸之正方向移動 D mm 之距離，並以CCD相機擷取影像，即可得 (D, Y_n, Z_n) 之世界座標點，以及上述各點於影像平面上的位置，同時也求取影像平面上的雷射光條紋中心線 ℓ_{SR}^{+D} 方程式。

- (8) 關閉左邊雷射投影機並開啟右邊雷射投影機之電源，使光條紋投射於試件上，以CCD相機擷取影像，並求取影像平面上的雷射光條紋中心線 ℓ_{sL}^{+D} 方程式。
- (9) 開啟左邊雷射投影機並關閉右邊雷射投影機之電源，使光條紋投射於試件上。
- (10) 以移動平台將試件沿著X軸之負方向移動 $-D$ mm之距離，並以CCD相機擷取影像，即可得 $(-D, Y_n, Z_n)$ 之世界座標點，以及上述各點於影像平面上的位置，同時也求取影像平面上的雷射光條紋中心線 ℓ_{sR}^{-D} 方程式。
- (11) 關閉左邊雷射投影機並開啟右邊雷射投影機之電源，使光條紋投射於試件上，以CCD相機擷取影像，並求取影像平面上的雷射光條紋中心線 ℓ_{sL}^{-D} 方程式。
- (12) 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) ， $n = 1, \dots, S$ 。
- (13) 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(5)至(7)，即可計算此 S 個校正點於影像平面上的位置 (u_n, v_n) ， $n = 1, \dots, S$ 。
- (14) 將以上數據帶入方程式(8)，並使用Levenberg-Marquardt方法[8]，則可得到相機的15個參數，使 E 值為最小。
- (15) 由在 $X = D$ 、 $X = 0$ 以及 $X = -D$ 各位置時所求得的左邊雷射投影機所投射的雷射光條紋中心線 (ℓ_{sR}^{+D} , ℓ_{sR}^0 , ℓ_{sR}^{-D}) 方程式，即可得到各光條中心線上的 T 個影像點 ($T = 3 \times P$)。
- (16) 以方程式(7)與(2)以及相機參數求取此 T 個影像點於未扭曲(undistorted)時的影像座標，即可求得此 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。
- (17) 以此位於非共平面的三組 T 個世界座標點代入方程式(10)，即可決定相對於世界座標系統的光條紋平面方程式。
- (18) 重複(15)至(16)之步驟，可求取右邊雷射投影機所投射的雷射光條紋平面方程式。

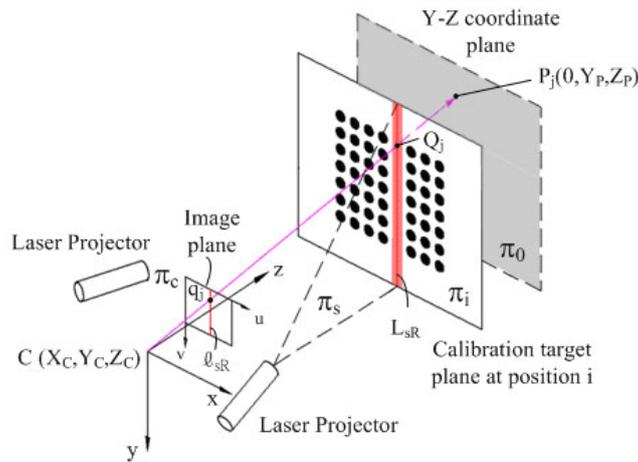


圖6 將右雷射投影機光條紋影像之二維座標轉換成在世界座標系統下之三维座標

三、基本量測誤差之評估

在完成結構光條紋視覺系統之校正後，本計畫將以下列步驟進行系統基本量測誤差之評估：

- (1) 開啟左邊雷射投影機之電源，使光條紋投射於試件上。
- (2) 於X方向移動校正試件至 $X = d$ mm之位置，並以CCD相機擷取其影像。
- (3) 利用Luo等人[10]提出之缺陷排除最小平方法及角平線方程式，求得各雷射光條影像之中心線方程式，並自此中心線方程式得到在此中心線上具次像素精度的 N 個影像點座標。
- (4) 將上述求得之影像座標點代入方程式(1)、(2)以及(9)中，即可求得光條紋中心線各點的世界座標位置。
- (5) 比較量測的 X 座標值以及已知的 X 方向的世界座標，即可評估使用左邊雷射投影機時本系

統的基本量測誤差。

- (6) 關閉左邊雷射投影機並開啟右邊雷射投影機之電源，並以CCD相機擷取其影像。重複步驟(3)至(5)，以評估使用右邊雷射投影機時本系統的基本量測誤差。

本文於X方向移動校正試件至 $X = 8 \text{ mm}$ 、 5 mm 、 -5 mm 以及 -8 mm 等四個位置，以進行基本量測誤差之評估。

四、物體表面之3D量測

在完成結構光條紋視覺系統之校正及誤差評估後，本文以如下所示之流程進行物體表面之3D量測：

- (1) 將待測物固定於平移台上，並使待測物本身深度平均置於世界座標系統下Y-Z平面之兩側。
- (2) 將平移台往+Y方向移動D mm的距離，直至無法再移動為止，以期能做最大範圍之檢測。
- (3) 調整待測物至離左邊雷射投影機所投射的雷射光條紋約1 mm左右之位置，此時光條紋並未投影至待測物表面。
- (4) 開始設定程式所需之相機校正參數及每次平移台的移動距離d mm。
- (5) 開啟左邊雷射投影機以投射光條紋至待測物置放區域。
- (6) 以98年度核定計畫所發展的曲線結構光偵測法抽取光條紋曲線之次像素位置，即可由此第一條結構光曲線上的2D影像點精確求出相對應的物體表面上的相關點的3D世界座標(X, Y, Z)。
- (7) 由於平移台已先移動D mm之距離，所以上一步驟所求得之座標值需修正為(X, Y-D, Z)。
- (8) 之後平移台每往-Y方向移動一固定距離d mm，則使平移台停止並取像進行分析，所求得之世界座標將為(X, Y-H+nd, Z)，n為移動次數。
- (9) 當掃瞄至物體表面深度的最高點時，關閉左邊雷射投影機並開啟右邊雷射投影機以投射光條紋至待測物置放區域。
- (10) 重複(9)、(10)以及(11)等三個步驟，直至掃描完整個待測物表面並將所求得之3D資訊予以儲存以利更進一步之分析。

五、圓管尺寸量測

以校正的結構光條紋視覺系統量測圓管，可得到在圓管表面上的光條紋的各特徵點的世界座標(X,Y,Z)，這些點將在雷射光條紋平面上形成一圓弧。圖7為所求取之3D資料點(理論上應成一圓弧)以及試件座標系統x-y-z之示意圖。由於在完成結構光條紋視覺系統之校正後，即可求得世界座標系統X-Y-Z以及光條紋平面方程式 $aX + bY + cZ + d = 0$ ，因此光條紋平面之單位法線向量n可以下式表示

$$\mathbf{n} = \frac{(a, b, c)}{(a^2 + b^2 + c^2)^{1/2}} \quad (11)$$

本文以第一個3D資料點的世界座標值 (X_1, Y_1, Z_1) 以及最後一個資料點之世界座標值 (X_n, Y_n, Z_n) ，估計圓弧的圓心座標值 (X_0, Y_0, Z_0) ：

$$X_0 = \frac{X_1 + X_n}{2}, \quad Y_0 = \frac{Y_1 + Y_n}{2}, \quad Z_0 = \frac{Z_1 + Z_n}{2} \quad (12)$$

以及x軸向的單位向量u：

$$\mathbf{u} = \frac{(X_1 - X_0, Y_1 - Y_0, Z_1 - Z_0)}{\sqrt{(X_1 - X_0)^2 + (Y_1 - Y_0)^2 + (Z_1 - Z_0)^2}} = (u_1, u_2, u_3) \quad (13)$$

由光條紋平面的單位法線向量n以及此x軸向之單位向量u即可求y軸向之向量v

$$\mathbf{v} = \mathbf{n} \times \mathbf{u} = \begin{bmatrix} i & j & k \\ n_1 & n_2 & n_3 \\ u_1 & u_2 & u_3 \end{bmatrix} = (v_1, v_2, v_3) \quad (14)$$

因此圓弧上任意一點的區域座標 (x, y) ，可以下式轉換成相對於世界座標系統的座標 (X, Y, Z) 。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & n_1 & X_0 \\ u_2 & v_2 & n_2 & Y_0 \\ u_3 & v_3 & n_3 & Z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

上式可改寫成

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & X_0 \\ u_2 & v_2 & Y_0 \\ u_3 & v_3 & Z_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

求得 \mathbf{H} 之反矩陣 \mathbf{H}^{-1} ，即可將圓弧上各點的世界座標轉換成在區域性座標系統下的座標。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H}^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (17)$$

將各圓管表面 3D 資料點的世界座標值帶入式(16)即可得到相對於區域性座標系統的座標值 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ ，最後再帶入最小圓弧逼近法即可求得圓弧半徑。

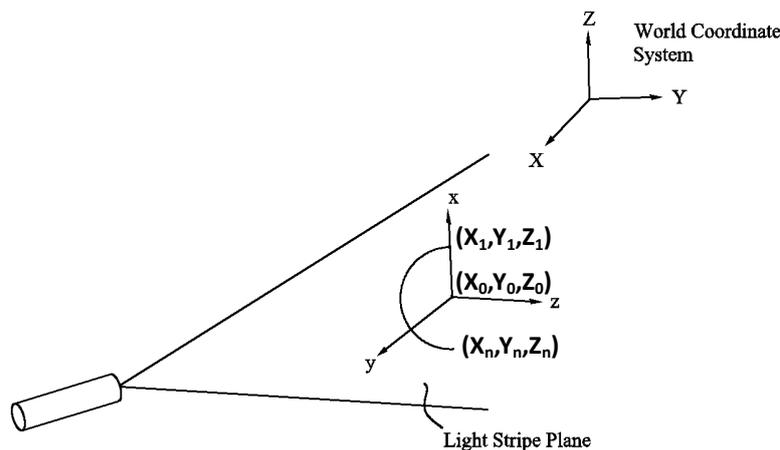


圖7 在雷射光條紋平面上的圓管表面3D資料以及試件座標

參、研究結果

如圖8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顯示使用左邊雷射的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5 μm 以內。而表2則顯示使用右邊雷射的結構光條紋視覺系統時其平均深度量測誤差約在6 μm 以內。

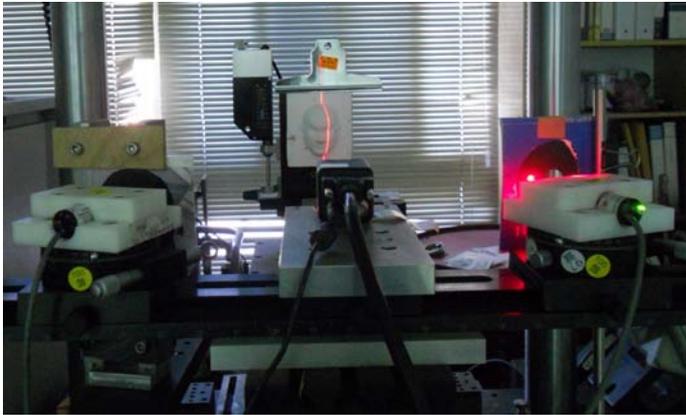


圖8 實驗設備



圖9 臉譜模型

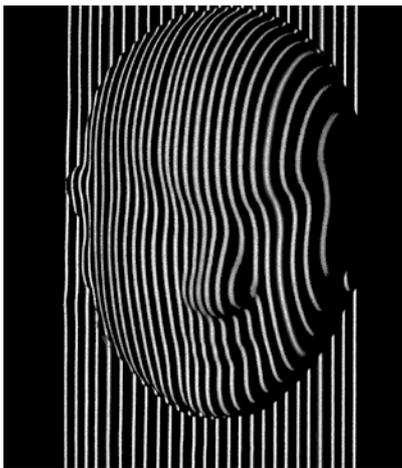


圖10 使用左邊雷射所得之雷射光條紋綜合影像圖

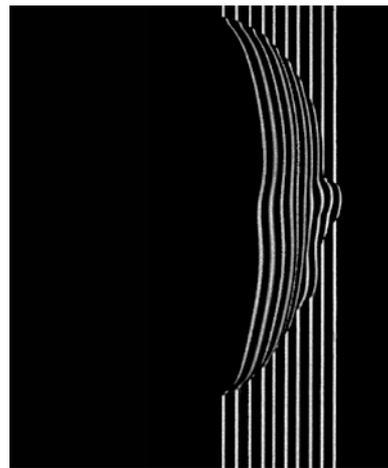


圖11 使用右邊雷射所得之雷射光條紋綜合影像圖

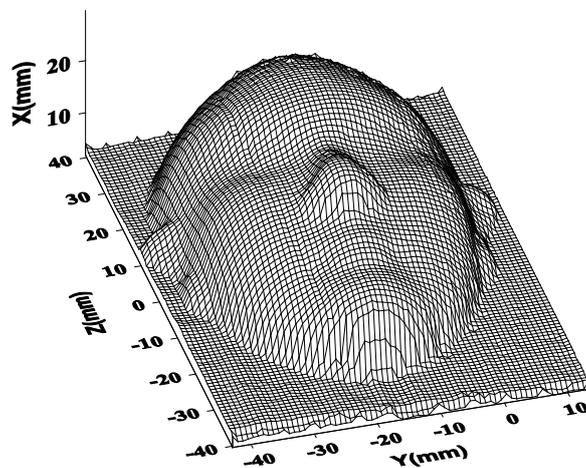


圖12 Orthographic臉譜視圖

在完成結構光條紋視覺系統之校正及誤差評估後，本研究以雙雷射進行物體表面之量測。本文將圖9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10與11分別為使用左邊雷射及右邊雷射所得之雷射光條紋綜合影像圖，圖12則為量測而得之臉譜模型3D輪廓視圖。

在完成結構光條紋視覺系統之校正及誤差評估後，本研究亦進行圓管尺寸之量測，所使用的圓管試件直徑為 20 與 35 mm。為避免取像時因試件表面所產生的反光影響實驗結果，本文利用高密度噴槍於試件表面均勻的噴覆上平光白漆，以減少因反光所造成的誤差。完成後將圓管試件架設於三軸平移台上，並調整左邊雷射投影機使光條紋平面垂直於圓管試件中心軸，此時雷射光條紋在圓管試件表面上幾乎成一直線，即可正式執行圓管量測實驗。圖 13 為雷射光條紋投影至圓管試件上之影像，圖 14 為雷射光條紋經過細線化後所得之影像。利用此影像本文可求取位於圓管表面上的 3D 資料點。圖 15 與 16 即分別顯示 R10 及 R17.5 之圓管表面的量測資料點與所求得的圓管斷面的圓弧。表 3 與 4 分別呈現 R10 及 R17.5 圓管試件於不同斷面位置的量測誤差分析。



圖 13 圓管尺寸之量測實驗

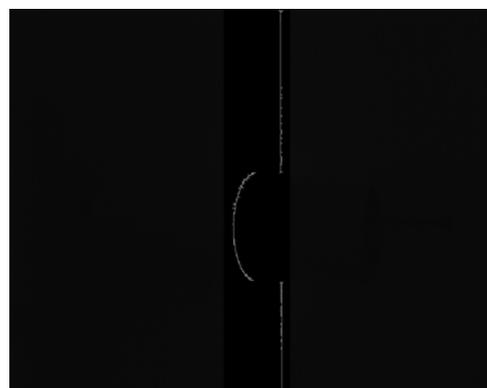


圖 14 細線化後之雷射光條紋影像

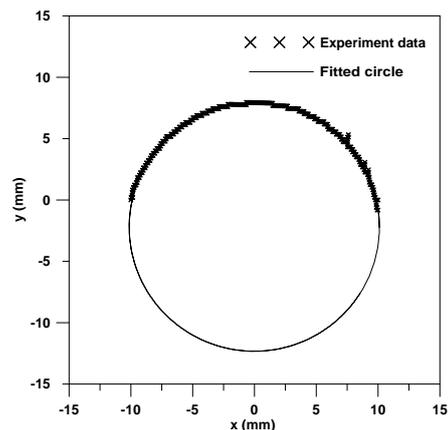
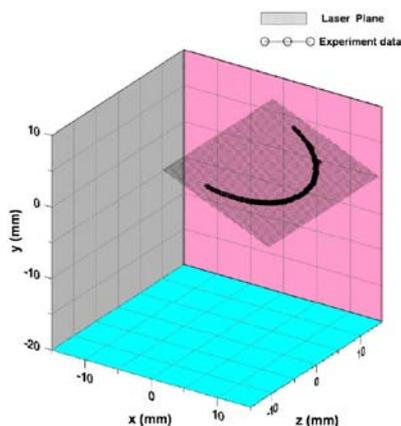


圖15 R10圓管表面的量測資料點與所求得的圓管斷面的圓弧

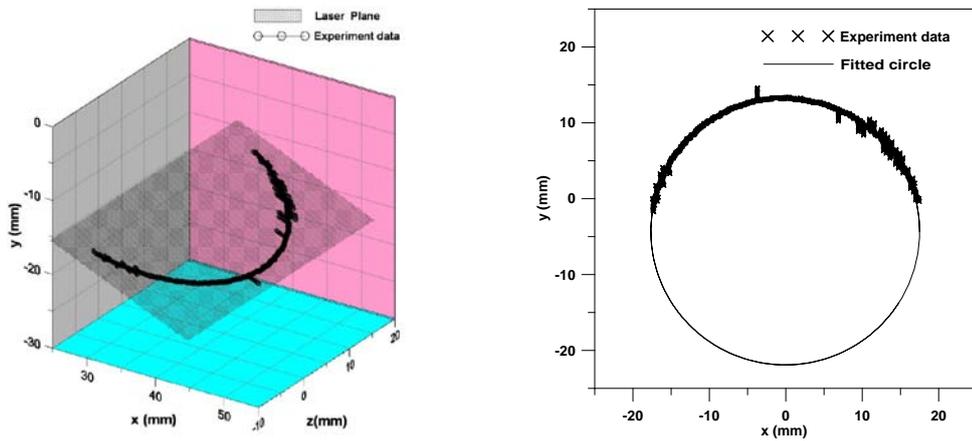


圖16 R17.5圓管表面的量測資料點與所求得的圓管斷面的圓弧

肆、結論與建議

本文係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。由於雷射投射角度之影響，當物體移動至某一位置時將引起雷射平面與物體表面相切，造成雷射光條紋無法投射至位於此切面下的物體表面，使得系統無法量測其表面輪廓，因此在相機的另一側多加裝一台雷射投影機，並調整校正方法，以解決此問題。本文亦利用結構光條紋視覺系統量測圓管尺寸，實驗結果顯示圓管半徑量測誤差約在 $70\mu\text{m}$ 以內。本文目前所使用的細線化所求得的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。

參考文獻

1. 羅鵬飛、蕭世昌、魏豪彥，2010，「結構光3D視覺系統之校正」，第十屆全國AOI論壇與展覽，新竹市。
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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, 73–86, September 1999.
6. Heikkila, J., “Geometric Camera Calibration Using Circular Control Points,” *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(10), October 2000.
7. Kanatani, K., *Geometric Computation for Machine Vision*. Oxford: Clarendon Press, 1993.
8. Press, W. H., Teukolsy, S. A., Vetterling, W. T., and Flannery, B. P., *Numerical Recipes in C—The Art of Scientific Computing*, second ed., Cambridge University Press, 1992.
9. Luo, P. F. and Hsu, C. Y., “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, 2006.
10. Luo, P. F. and Chu, T. C., “Application of computer vision and laser interferometer to the inspection of line scale” *Optics and Laser in Engineering*, 42, 563-584, 2004.

X (mm)	MEAN (μm)	VARIANCE (μm)	STANDARD DEVIATION (μm)
-8	5.147	0.0026	5.092
-5	3.524	0.0016	4.026
5	1.810	0.0083	2.083
8	4.733	0.0020	1.401

表 1 結構光條紋視覺系統深度方向的量測誤差（左邊雷射）

X (mm)	MEAN (μm)	VARIANCE (μm)	STANDARD DEVIATION (μm)
-8	5.822	0.0018	1.085
-5	3.568	0.0049	4.116
5	2.930	0.0095	4.739
8	4.733	0.0082	6.795

表 2 結構光條紋視覺系統深度方向的量測誤差（右邊雷射）

Position of Cross Section	Laser	CMM	Error (mm)
1	10.1298	10.06240	0.0674
2	10.0974	10.05895	0.0385
3	10.0601	10.05400	0.0610
4	10.0867	10.05575	0.0310

表 3 R10 圓管試件於不同斷面位置的量測誤差評估

Position of Cross Section	Laser	CMM	Error (mm)
1	17.5513	17.5270	0.0243
2	17.6043	17.5307	0.0736
3	17.5079	17.5340	0.0261
4	17.5933	17.5370	0.0563

表 4 R17.5 圓管試件於不同斷面位置的量測誤差評估

國科會補助計畫衍生研發成果推廣資料表

日期:2011/10/12

國科會補助計畫	計畫名稱：結構光條紋視覺系統表面量測與軟體開發之研究		
	計畫主持人：羅鵬飛		
	計畫編號：99-2221-E-216-035-		學門領域：精密量測
研發成果名稱	(中文) 結構光條紋視覺系統表面量測		
	(英文) Surface Measurement of a Structured Light Stripe Vision System		
成果歸屬機構	中華大學	發明人 (創作人)	羅鵬飛
	<p>(中文) 藉由2D的投影資料重建物體表面的3D形狀，已成為電腦視覺裡一個越來越重要的研究課題，且已被應用在各種不同的領域。例如在逆向工程的製程上，可藉由量測實體模型的表面資料逆向重建3D虛擬模型形貌，以加速成品的開發。此外許多工業製程（例如陶瓷、塑膠、鑄造以及製鞋等工業）產品常具有複雜的幾何形狀，因此也需要對其產品進行精確的3D量測。本文係以一台CCD相機、兩台雷射投影機以及一組三軸移動平台形成結構光條紋視覺系統。由於在相機的兩側各裝置一台雷射投影機，可解決光條紋無法投射至物體某些部分的問題，以便取得完整的3D量測資訊。</p> <p>(英文) Reconstructing 3D shape from 2D projections is becoming an increasingly important topic in computer vision and has been applied in various domains. In reverse engineering, product development may be expedited by measuring the surface information of a solid model to reconstruct its 3D virtual model in the reverse sense. In addition, many industrial processes need an accurate 3D measurement of their products. This is particularly important for parts of complex geometry, which are present at several industries such as ceramics, plastics, castings, shoe making, etc. In this paper a CCD camera, two laser projectors, and an X-Y-Z translation stage is used to form a structured light stripe vision system. Two laser projectors are used to solve the problem that the stripes may not be projected onto some part of an object surface to ensure that complete 3D surface measurement information may be acquired.</p>		
產業別	機械製造業；製傘業；光學及精密器械製造業；其他工業製品製造業		
技術/產品應用範圍	<ol style="list-style-type: none"> 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，其產品常需精確的量測複雜的3D幾何形狀。 		
技術移轉可行性及預期效益	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。		

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。

99 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：99-2221-E-216-035-					
計畫名稱：結構光條紋視覺系統表面量測與軟體開發之研究							
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	0	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	1	1	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	0	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>	<p>無。</p>
--	-----------

	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）

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）

本研究成果具有下列創新：

1. 使用一個特殊格點排列的試件同時校正相機及兩台雷射投影機。
2. 可解決光條紋無法投射至物體某些部分的問題，以便取得完整的 3D 量測資訊。
3. 可僅使用一台 CCD 相機及一台雷射投影機進行圓柱尺寸量測，此量測方法可應用於管路量測。

本研究成果可應用於下列產業實務：

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。

本文目前所使用的細線化所求得的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。