條紋投影技術於三維形貌、移動速度、與三維形變量量測的應用

Applications of Fringe Projection Techniques to 3D Profile Inspection, Velocity Detection, and Deformation Sensing

蘇威宏、羅毓恆
Wei-Hung Su, Yu-Heng Lo

利用條紋投影 (fringe projection) 技術進行物體表面的三維形貌量測，是十分普遍的作法，本文除了介紹其量測原理，亦藉由公式推導，證明此技術亦可進行待測物各局部區域的三維速度、及三維形變量量測，甚至與形變有關的量測，例如三維熱膨脹系數、物表溫度分佈、表面駐波的分佈等，都可透過這項技術完成。在目前眾多形貌檢測技術中，是唯一一種僅由一張擷取影像，即可達到上述多項功能的光學檢測技術。

Profile measurements performed by fringe projection techniques have been commonly studied for a while. In this article, we extent its applications to the fields of velocity sensing and deformation inspection. Advantages of the proposed method include: (1) capacity of non-scanning and full-field measurements, (2) system simplicity, (3) fast measurement speed, (4) easiness for calibration, and (5) low environmental vulnerability (a major problem for interferometers). Only one-shot measurement is required for data processing. The full-field property makes it possible to inspect several objects at the same time.

一、條紋投影技術應用於三維形貌量測

1.1 條紋相位與深度座標之關聯性

條紋投影技術應用於三維形貌量測的原理，是將一穿透率呈弦狀分佈的圖案 (sinusoidal fringe pattern) 投影在待測物體上，物表上的條紋分佈，則由另一視角上的 CCD 所記錄。CCD 所擷取的條紋分佈，將隨著物體輪廓而扭曲，故條紋扭曲程度和待測物體的深度變化有關，稱為「相位－縱深」關係式 (phase-to-depth relation)，找到此關係式即可進一步得到物體表面的三維座標。其光學架構如圖 1 所示，將一穿透率呈弦狀分佈的圖案，投影在待測

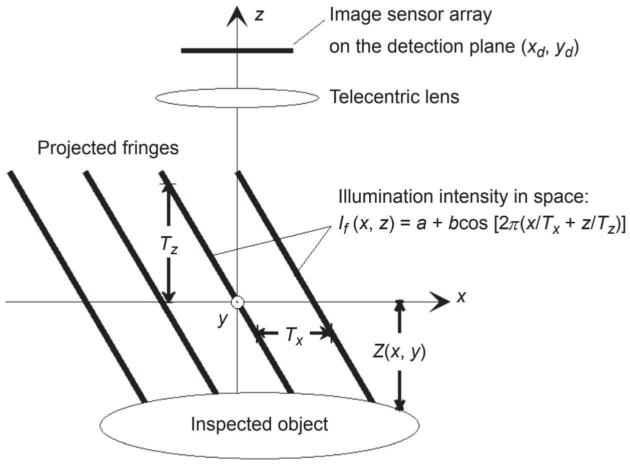


圖 1. 光學架構。

物體上，空間中的光強度分佈可表示為

$$I_f(x,z) = a + b\cos\left(\frac{2\pi x}{T_x} + \frac{2\pi z}{T_z}\right) \tag{1}$$

其中 a 為直流項，b 為條紋振幅，T_x 及 T_z 分別為 x 軸與 z 軸方向的週期。若待測物體的表面輪廓與 x-y 平面之間的距離為 $Z(x, y)$，則投射於物體表面的反射光強度可表示為

$$\begin{aligned} I_r(x,y) &= R(x,y)\cdot I_f\left(x, Z(x,y)\right) \\ &= aR(x,y) + bR(x,y)\cos\left[\frac{2\pi x}{T_x} + \frac{2\pi Z(x,y)}{T_z}\right] \end{aligned} \tag{2}$$

其中 $R(x, y)$ 為物體表面的反射率。物體表面上的條紋分佈，由單色 CCD (image sensor array) 所記錄，其灰階分佈可表示為

$$I(x_d, y_d) = A(x_d, y_d) + B(x_d, y_d)\cos\varphi_Z(x_d, y_d) \tag{3}$$

其中 x_d 、y_d 分別是 CCD 感光板所對應的水平軸、與垂直軸，$A(x_d, y_d)$ 為直流項，$B(x_d, y_d)$ 為條紋振幅，$\varphi_Z(x_d, y_d)$ 為條紋相位分佈。感光板座標系 (x_d, y_d) 與實物座標系 (x, y) 之間的關係為

$$\begin{cases} x_d = M_x \\ y_d = M_y \end{cases} \tag{4}$$

其中 M 為透鏡放大率。另一方面，CCD 所記錄的灰階分佈，在經過曝光時段 Δt 後，可表示為

$$\begin{aligned} I(M_x, M_y) &= KR(x,y)I_f(x,Z)\cdot\Delta t \\ &= \Delta t\cdot KaR(x,y) + \Delta t\cdot KbR(x,y)\cos\left[\frac{2\pi x}{T_x} + \frac{2\pi Z(x,y)}{T_z}\right] \end{aligned} \tag{5}$$

其中 K 代表反射光強度與灰階之間的轉換常數。比較公式 (3) 與公式 (5)，可得

$$
\begin{cases}
\varphi(M_x, M_y) = \dfrac{2\pi x}{T_x} + \dfrac{2\pi}{T_z} Z(x, y) & \text{(6a)} \\
A(M_x, M_y) \ = KaR(x, y)\Delta t & \text{(6b)} \\
B(M_x, M_y) = KbR(x, y)\Delta t & \text{(6c)}
\end{cases}
$$

再由公式 (6a)，得知所謂的「相位－縱深」關係式：

$$Z(x, y) = \frac{T_z}{2\pi}\varphi(M_x, M_y) - \frac{T_z}{T_x}x \tag{7}$$

亦即待測物體的形貌 (即物表上的深度座標)，可由投影其上的條紋相位 $\varphi(M_x, M_y)$ 求得。至於 $\varphi(M_x, M_y)$ 的獲取方式，則可藉由相位移技術 (phase-shifting techniques)(1)、傅氏轉換法 (Fourier transform method)(2) 完成。

一般來說，對於要求高精準度、針對靜態物體的形貌量測，往往由 phase-shifting techniques 進行相位萃取，這是因為 phase-shifting techniques 需要擷取三張以上的影像 (故適用於靜態物體)，而多次重覆性的量測，亦有助於精確值的提升。例如以顯微物鏡作為光學系統，其縱深的解析度可高達 0.2-micron(3)，而選用廣角透鏡，其縱深精確值可達到整個 field of view 的萬分之一(4)。至於 Fourier transform method 則只需擷取一張影像 (屬於 single-shot techniques)，故適用於動態物體的形貌量測，也因單張影像的資訊，容易受外在環境的干擾、或誤導 (例如陰影區誤以為是暗紋、周期較大之區域易受雜訊影響而誤判其極值位置)，故其精確值低於 phase-shifting techniques。

本文著重於動態物體的三維形貌量測，因此於章節 1.2 介紹以 Fourier transform method 進行相位萃取的原理。

1.2 利用 Fourier transform method 求條紋之相位 $\varphi(M_x, M_y)$

在公式 (3) 中，條紋的灰階分佈亦可用複數型態描述：

$$I(x_d, y_d) = A(x_d, y_d) + \frac{1}{2}\tilde{B}(x_d, y_d)e^{j\frac{2\pi x}{T_x}} + \frac{1}{2}\tilde{B}^*(x_d, y_d)e^{-j\frac{2\pi x}{T_x}} \tag{8}$$

其中，$\tilde{B}(x_d, y_d) = B(x_d, y_d)\cdot e^{j\frac{2\pi}{T_z}Z(x,y)}$，而「*」為共軛運算子。

對公式 (8) 中的 x_d 軸作一維傅立葉轉換，即可得

$$\Im\{I(x_d, y_d)\} = \mathcal{A}(f_x, y_d) + \frac{1}{2}\tilde{\mathcal{B}}(f_x - \frac{1}{T_x}, y_d) + \frac{1}{2}\tilde{\mathcal{B}}^*(f_x + \frac{1}{T_x}, y_d) \tag{9}$$

其中 $\Im\{A(x_d, y_d)\} = \mathcal{A}(f_x, y_d)$ ，$\Im\{\tilde{B}(x_d, y_d)\} = \tilde{\mathcal{B}}(f_x, y_d)$ 。在公式 (9) 中，選擇一個適當的 band-pass filter，可取出頻譜 $\tilde{\mathcal{B}}(f_x - 1/T_x, y_d)/2$ 。對 $\tilde{\mathcal{B}}(f_x - 1/T_x, y_d)/2$ 進行反傅立葉轉換，可得

$$s(x_d, y_d) = \Im^{-1}\{\frac{1}{2}\tilde{\mathcal{B}}(f_x - \frac{1}{T_x}, y_d)\} = \frac{1}{2}\tilde{B}(x_d, y_d)e^{j\frac{2\pi}{T_x}x}$$
$$= \frac{1}{2}B(x_d, y_d)e^{j\varphi((x_d, y_d)} \quad (10)$$

條紋的相位值便可以由下式來決定：

$$\varphi_{\text{wrapped}}(x_d, y_d) = \tan^{-1}\left\{\frac{\text{Im}\{s(x_d, y_d)\}}{\text{Re}\{s(x_d, y_d)\}}\right\} \quad (11)$$

其中，Im 代表的是虛部項，Re 代表的是實部項。求得的相位值和反正切函數相關，其值介於 $-\pi$ 到 $+\pi$ 之間，呈現不連續的相位分佈，因此以 φ_{wrapped} 標記之，必須利用相位展開技術 (Phase-unwrapping)，將不連續的相位值展開成連續值。

1.3 實驗

圖 2 為條紋投影技術應用於三維形貌量測的部分實驗成果，圖中每個畫素所代表的顏

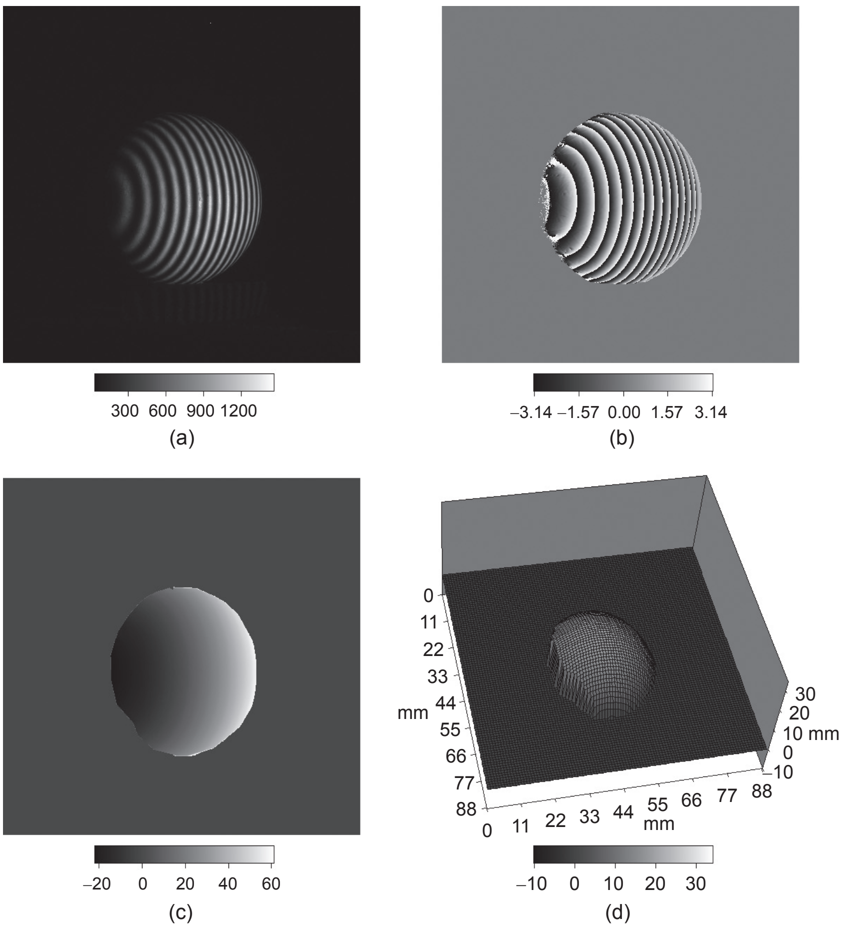
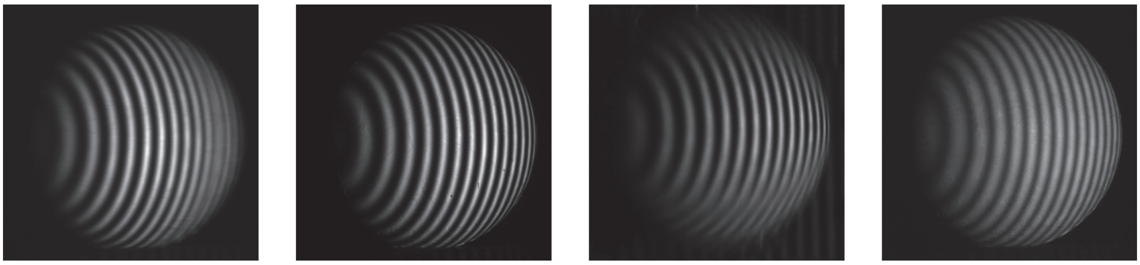


圖 2. (a) CCD 所擷取的影像；(b) 介於 $-\pi$ 到 $+\pi$ 之間的相位分佈 $\varphi_{\text{wrapped}}(M_x, M_y)$；(c) 利用相位展開技術所得之相位分佈 $\varphi(M_x, M_y)$；(d) 重建之三維形貌。圖中每個畫素所代表的顏色與數值由置於圖下的 color bar 表示。



(a) (b) (c) (d)

圖 3. 圓球物體在各種移動狀態時，CCD 所擷取之影像：(a) 圓球物體由左往右移動；(b) 圓球物體保持靜止不動；(c) 圓球物體由下往上移動；(d) 圓球物體由遠往近移動。

色與數值由置於圖下的 color bar 表示。將一直徑約為 4 公分的圓球物體，靜置於圖 1 所示的光學系統中，並以弦狀圖案投影於圓球物體上，圖 2(a) 即為單色 CCD 擷取之影像。藉由章節 1.2 所述的方式 (公式 (11))，可獲得條紋的相位分佈，其萃取結果如圖 2(b) 所示。再依 Goldstein's algorithm 作相位展開，可得 $\varphi(M_x, M_y)$，圖 2(c) 為其執行成果。再透過公式 (3)，可重建其形貌，如圖 2(d) 所示。系統精確值與投影條紋的週期、CCD 之採樣密度、band-pass filter (作用於公式 (9)) 的適當選取有關，本實驗裝置的系統精確值約 200 μm。

二、條紋投影技術應用於三維速度量測[5]

2.1 移動速度與形貌梯度、條紋對比度之關聯性

系統採用之光學架構與圖一相同，其差別處在於待測物為動態、且沿著某一方向移動。圖 3 為 CCD 在曝光時段內，圓球物體因移動而造成擷取影像時，條紋變得模糊的情況[5]，其中圖 3(a) 為物體由左往右移動時，條紋的分佈情形；圖 3(b) 為物體靜止不動時的條紋分佈；圖 3(c)、與圖 3(d) 則分別是圓球物體由下至上、與由遠至近的情況。對比各圖的差異，我們發現條紋的對比度和深度位移量 ΔZ 有關，例如圖 3(d) 的整體條紋對比度皆變差 (相對於圖 3(b) 而言)，這是因為物體各局部區域的深度位移量整體皆相同。另外，條紋對比度愈差，代表深度位移量愈大，例如圖 3(a) 的球體邊緣，其深度變化量遠大於球體中心區域的深度變化量，於是邊緣區域的條紋比中心區域的條紋更模糊，而且模糊程度與形貌梯度 $\Delta Z/\Delta x$ 有關。另一方面，圖 3(a)－(d) 的條紋分佈大致相同 (特別是圖 3(d) 與圖 3(a) 格外相似)，似乎模糊的條紋也可反映其深度輪廓。有鑑於此，我們進行了相關理論的公式推導。

承襲圖 1 的座標系統，若待測物體以速度 $(\upsilon_x, \upsilon_y, \upsilon_z)$ 於 (x, y, z) 座標系中移動，則深度輪廓 $Z(x, y)$ 為時間函數，可表示為

$$\begin{aligned} Z(x,y,t) &= Z_o(x,y) + \nabla Z_o(x,y)\cdot(\hat{x}\upsilon_x + y\upsilon_y)t + \upsilon_z t \\ &= Z_o(x,y) + \left[\upsilon_x \frac{\partial Z_o(x,y)}{\partial x} + \upsilon_y \frac{\partial Z_o(x,y)}{\partial y} + \upsilon_z\right]t \end{aligned} \tag{12}$$

其中 $Z_o(x, y)$ 表示物體在初始時間 $t = 0$ 時的深度輪廓，$\hat{x}$ 與 $\hat{y}$ 為單位向量，「∇」為二維偏微分運算子，其定義為 $\nabla = \hat{x}\dfrac{\partial}{\partial x} + y\dfrac{\partial}{\partial y}$。至於待測物體的反射率也會隨物體的移動而改變，可用 $R(x-\upsilon_x t, y-\upsilon_y t)$ 表述之。

因此，公式 (2) 中，投射於物體表面的反射光強度應修正為

$$
\begin{aligned}
I_r(x,y,t) &= R(x-\upsilon_x t, y-\upsilon_y t)\cdot I_f\left(x, Z(x,y,t)\right) \\
&= aR(x-\upsilon_x t, y-\upsilon_y t) + bR(x-\upsilon_x t, y-\upsilon_y t)\cos\left[\frac{2\pi x}{T_x}+\frac{2\pi Z(x,y,t)}{T_z}\right]
\end{aligned}
\tag{13}
$$

在感光板曝光時段 Δt 內，擷取的影像因物體移動而模糊。因此參考公式 (3)，模糊影像之灰階分佈可表示為

$$
I_{\text{blurred}}(x_d, y_d) = A_{\text{blurred}}(x_d, y_d) + B_{\text{blurred}}(x_d, y_d)\cos[\varphi_{\text{blurred}}(x_d, y_d)] \tag{14}
$$

其中 $\varphi_{\text{blurred}}(x_d, y_d)$ 代表模糊的條紋相位值，$A_{\text{blurred}}(x_d, y_d)$ 與 $B_{\text{blurred}}(x_d, y_d)$ 各為模糊影像的直流項與條紋振幅。另一方面，CCD 所得到的模糊影像與反射光強度的時間積分有關，可描述為

$$
\begin{aligned}
I_{\text{blurred}}(Mx, My) &= \int_{t_1-\Delta t/2}^{t_1+\Delta t/2}\left[KR(x-\upsilon_x t, y-\upsilon_y t)I_f\left(x, Z(x,y,t)\right)\right]dt \\
&= \int_{t_1-\Delta t/2}^{t_1+\Delta t/2}\left[KaR(x-\upsilon_x t, y-\upsilon_y t) + KbR(x-\upsilon_x t, y-\upsilon_y t)\cos\left(\frac{2\pi x}{T_x}+\frac{2\pi}{T_z}Z(x,y,t)\right)\right]dt
\end{aligned}
\tag{15}
$$

在曝光時段內，若 $R(x, y)$ 相對於 x 軸與 y 軸而言，變化不大，則公式 (15) 可改寫為

$$
I_{\text{blurred}}(Mx, My) = K\int_{t_1-\Delta t/2}^{t_1+\Delta t/2}\left[aR(x,y) + bR(x,y)\cos\left(\frac{2\pi x}{T_x}+\frac{2\pi}{T_z}Z(x,y,t)\right)\right]dt \tag{16}
$$

將公式 (12) 代入公式 (16)，可得

$$
\begin{aligned}
&I_{\text{blurred}}(Mx, My) = KaR(x,y)\Delta t \\
&+KbR(x,y)\Delta t\cdot\operatorname{sinc}\left[\left(\upsilon_x\frac{\partial Z_1(x,y)}{\partial x}+\upsilon_y\frac{\partial Z_1(x,y)}{\partial y}+\upsilon_z\right)\frac{\Delta t}{T_z}\right]\cos\left[\frac{2\pi x}{T_x}+\frac{2\pi}{T_z}Z_1(x,y)\right]
\end{aligned}
\tag{17}
$$

其中，$\operatorname{sinc}(x) = \sin(\pi x)/(\pi x)$，而 $Z_1(x, y)$ 為物體在時間 $t = t_1$ 時的深度輪廓：

$$
Z_1(x,y) = Z_o(x,y) + [\frac{\partial Z_o(x,y)}{\partial x}\upsilon_x + \frac{\partial Z_o(x,y)}{\partial y}\upsilon_y + \upsilon_z]t_1 \tag{18}
$$

比較公式 (14) 與公式 (17)，可得

$$
\begin{cases}
\varphi_{\text{blurred}}(Mx, My) = \dfrac{2\pi x}{T_x} + \dfrac{2\pi}{T_z} Z_1(x, y) & \text{(19a)} \\
A_{\text{blurred}}(Mx, My) \ = KaR(x, y)\Delta t) & \text{(19b)} \\
B_{\text{blurred}}(Mx, My) = KbR(x, y)\Delta t \cdot \operatorname{sinc}\left[\left(\upsilon_x \dfrac{\partial Z_1(x, y)}{\partial x} + \upsilon_y \dfrac{\partial Z_1(x, y)}{\partial y} + \upsilon_z\right) \dfrac{\Delta t}{T_z}\right] & \text{(19c)}
\end{cases}
$$

由公式 (19a) 知，動態物體在 $t = t_1$ 之瞬間形貌，可直接由模糊的條紋來求出，其關係式為

$$
Z_1(x, y) = \frac{T_z}{2\pi} \varphi_{\text{blurred}}(x_d, y_d) - \frac{T_z}{T_x} x \tag{20}
$$

欲求取相位分佈 $\varphi_{\text{blurred}}(M_x, M_y)$，可先由公式 (11) 計算 φ_{wrapped}，再利用相位展開技術而取得。另外，由公式 (19b) 與公式 (19c) 得知

$$
\upsilon_x \frac{\partial Z_1(x, y)}{\partial x} + \upsilon_y \frac{\partial Z_1(x, y)}{\partial y} + \upsilon_z = \frac{T_z}{\Delta t} \operatorname{sinc}^{-1}\left[\frac{a}{b} \frac{B_{\text{blurred}}(M_x, M_y)}{A_{\text{blurred}}(M_x, M_y)}\right] \tag{21}
$$

其中 T_z 為弦狀圖案投影至待測物前，沿著 z 軸方向的週期，a 與 b 分別是弦狀圖案的直流項與振幅，皆為已知常數。

由之前的研究成果得知[6]，公式 (21) 成立的條件有兩個：

1. 待檢測區域在移動期間並沒有明顯的反射率變化，亦即公式 (15) 可化簡為公式 (16) 的情況下，公式 (21) 才會成立。
2. 深度位移量 ΔZ 必須小於 T_z，否則會導致深度輪廓 $Z_1(x, y)$ 的誤判，進而造成速度量測的誤差。再依據公式 (12)，可知公式 (21) 成立的另一條件為

$$
\left[\upsilon_x \frac{\partial Z_1(x, y)}{\partial x} + \upsilon_y \frac{\partial Z_1(x, y)}{\partial y} + \upsilon_z\right] \Delta t < T_z \tag{22}
$$

公式 (21) 說明移動速度 $(\upsilon_x, \upsilon_y, \upsilon_z)$ 與形貌梯度 ($\partial Z_1 / \partial x$ 、 $\partial Z_1 / \partial y$)、條紋對比度 $(B_{\text{blurred}}/A_{\text{blurred}})$ 有關，因此，只要得知 $Z_1(x, y)$、$B_{\text{blurred}}(M_x, M_y)$、$A_{\text{blurred}}(M_x, M_y)$、$T_z$ 等參數，即有機會求出移動速度。其中 $Z_1(x, y)$ 可由公式 (20) 計算而得，至於 $B_{\text{blurred}}(M_x, M_y)$、$A_{\text{blurred}}(M_x, M_y)$ 的計算方式，將於章節 2.2 說明。然而公式 (21) 有三個未知數，分別是 υ_x、υ_y、υ_z，故至少需要三個的方程式解這三個未知數。具體的作法如下：在模糊影像 (x_d, yd) 中，取 N 個採樣點 (當然，這 N 個採樣點都必須滿足上述兩個條件)，其中 $N \geq 3$，每個採樣點代入公式 (21) 後，可獲得 N 個方程式，由於每一採樣點皆以相同的速度 $(\upsilon_x, \upsilon_y, \upsilon_z)$ 移動，因此這 N 個方程式僅有 υ_x、υ_y、υ_z 三個數為未知，可依最小平方法 (least-mean square method) 取得其速度。

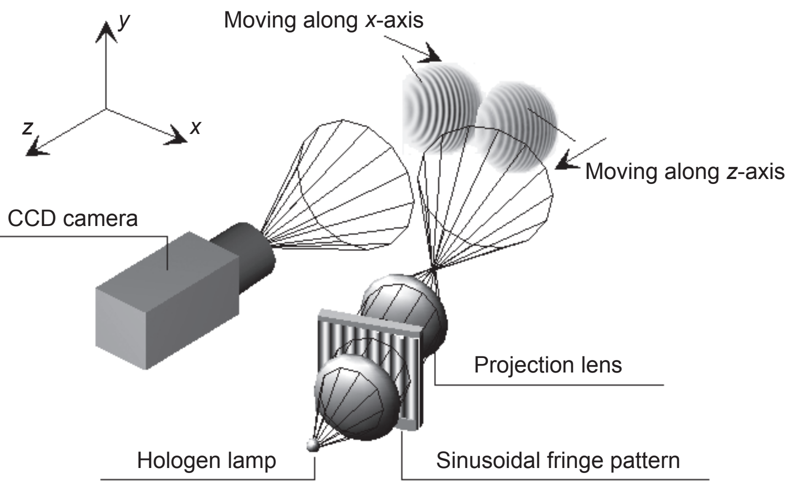


圖 4. 進行動態量測之實驗架構。

2.2 利用 Fourier transform method 求參數 $B_{\mathrm{blurred}}(M_x, M_y)$、$A_{\mathrm{blurred}}(M_x, M_y)$

在公式 (9) 中，選擇一個適當的 band-pass filters，可擷取出 $\mathcal{A}(f_x, y)$。因此模糊影像的直流項 $A_{\mathrm{blurred}}(M_x, M_y)$，可藉由反傅立葉轉換求得，如下列所述：

$$A_{\mathrm{blurred}}(x_d, y_d) = \Im^{-1}\{\mathcal{A}(f_x, y_d)\} \tag{23}$$

另外，模糊影像的條紋振幅 $B_{\mathrm{blurred}}(M_x, M_y)$，可由公式 (10) 得知：

$$B_{\mathrm{blurred}}(x_d, y_d) = 2\left|s(x_d, y_d)\right| \tag{24}$$

2.3 實驗

實驗架構如圖 4[5] 所示，待測物為直徑約 4 公分的兩個圓球物體，分別置放於兩個移動平台上，這兩個平台各以不同方向、不同速度托著圓球物體移動，左側及右側的球分別以 $(\upsilon_x, \upsilon_y, \upsilon_z)$ = (8.71 mm/sec., 0.0 mm/sec., 0.0 mm/sec.) 及 (0.0 mm/sec., 0.0 mm/sec., 8.71 mm/sec.) 移動。

圖 5(a) 為圓球物體因移動而造成擷取影像時，條紋變得模糊的情況，圖 5(b) 為利用公式 (23) 所得的直流項分佈 (即 $A_{\mathrm{blurred}}(M_x, M_y)$)，至於振幅項分佈 $A_{\mathrm{blurred}}(M_x, M_y)$ 則可由公式 (24) 求出，其結果如圖 5(c) 所示，其中的一部分雜訊已透過 band-pass filter 濾除。藉由公式 (11) 可萃取模糊條紋的相位分佈 $\varphi_{\mathrm{wrapped}}(M_x, M_y)$，其分佈如圖 5(d) 所示。依 Goldstein's algorithm 作相位展開，可得 $\varphi_{\mathrm{blurred}}(M_x, M_y)$，再依據公式 (20)，可重建 $t = t_1$ 時 (即曝光至 $\Delta t/2$ 時) 的瞬間形貌。圖 5(e) 即為量測系統所得之三維形貌，其系統精確值約為 200 μm[5]。取這兩個球體中心區域的畫素作為採樣點 (每個球體約有 8000 個採樣點)，代入公式 (21) 後，每個球體可獲得約 8000 個方程式，再依最小平方法計算移動速度，其結果為左側球體 $(\upsilon_x, \upsilon_y, \upsilon_z)$ = (8.25 mm/sec., 0.10 mm/sec., 0.87 mm/sec.)、與右側球體 $(\upsilon_x, \upsilon_y, \upsilon_z)$ = (0.09 mm/sec., 0.09 mm/sec., 9.05 mm/sec.)。

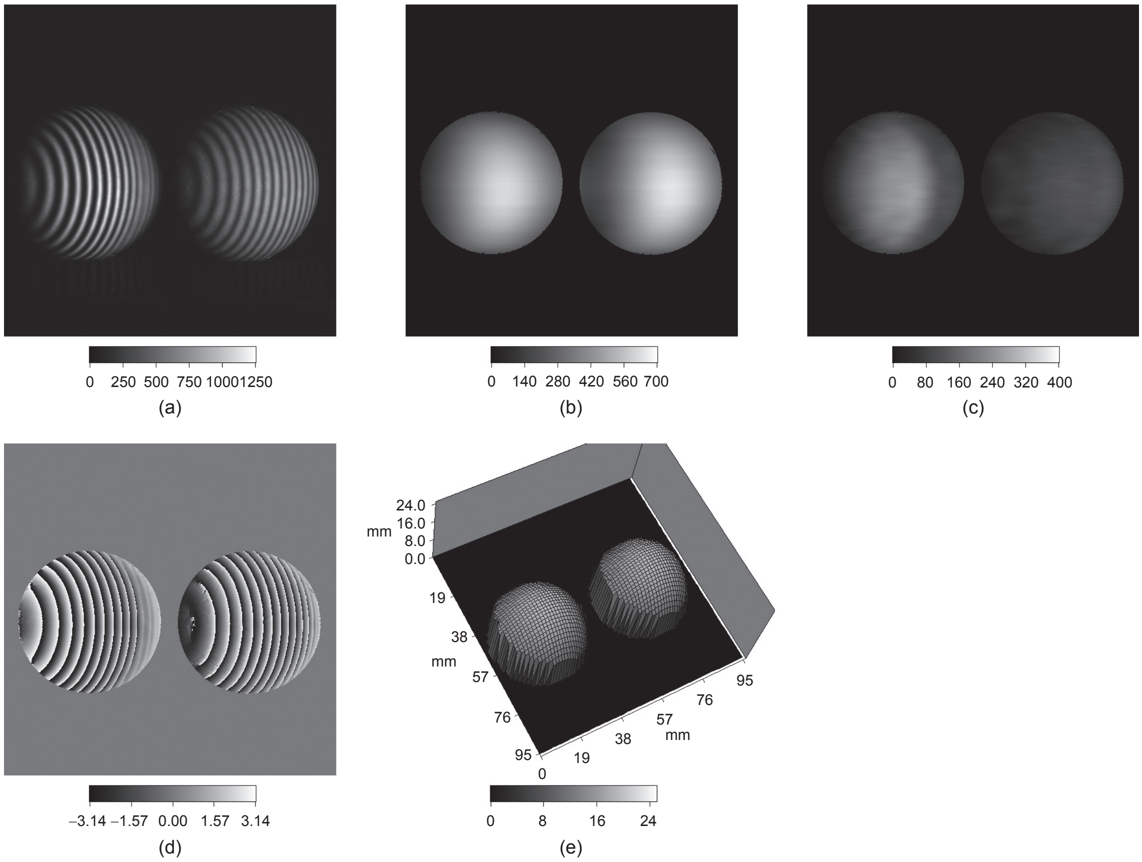


圖 5. (a) 待測物體在移動期間所擷取的影像；(b) 直流項分佈 $A_{\mathrm{blurred}}(M_x, M_y)$；(c) 振幅項分佈 $B_{\mathrm{blurred}}(M_x, M_y)$；(d) 相位分佈 $\varphi_{\mathrm{wrapped}}(M_x, M_y)$；(e) 重建之三維形貌。圖中每個畫素所代表的顏色與數值由置於圖下的 color bar 表示。

三、條紋投影技術應用於三維形變量量測[7]

若待測物並非剛體，而是具有彈性、或是縮脹性，則可從下列的論述進一步求出各局部區域之形變量。原理與方法如下：

1. 將待測物表面區隔成數千或數百個小區塊，每個區塊至少包含三個以上的採樣點，若同一區塊內的採樣點都以相似的速度 $(\upsilon_x, \upsilon_y, \upsilon_z)$ 移動，則可依章節 2.1 所述，將這些採樣點代入公式 (16)，再依最小平方法，取得各個小區塊的移動速度 $(\upsilon_x, \upsilon_y, \upsilon_z)$。
2. 各個區塊的三維形變量 (l_x, l_y, l_z) 可由曝光時間 t與移動速度 $(\upsilon_x, \upsilon_y, \upsilon_z)$ 的乘積求出。

實驗架構如圖 4 所示，取一待測物體置放於移動平台上，平台速度 $(\upsilon_x, \upsilon_y, \upsilon_z)$ = (7.54 mm/sec., 0.0 mm/sec., 4.36 mm/sec.) 托著待測物體移動。在平台移動期間，CCD 進行影像擷取，曝光時間為 0.3 秒。圖 6(a) 為 CCD 擷取的影像。依據公式 (20)，可求出曝光至 $\Delta t/2$ 時的瞬間形貌，如圖 6(b) 所示。圖 6(c) 與 (d) 為各個小區塊的分別在 x-軸與 z-軸之形變量分佈。由於整個待測物體皆以相同速度移動，因此除了邊緣區域外，各局部區塊的形變量大致相同，不過與實際移動量相比 (l_x = 2.26mm、l_z = 1.31 mm)，z-軸方向的形變量誤差較大[5]。另外，邊緣區域由於深度位移量 ΔZ 大於 T_z，因此形變量的誤差也比較大。

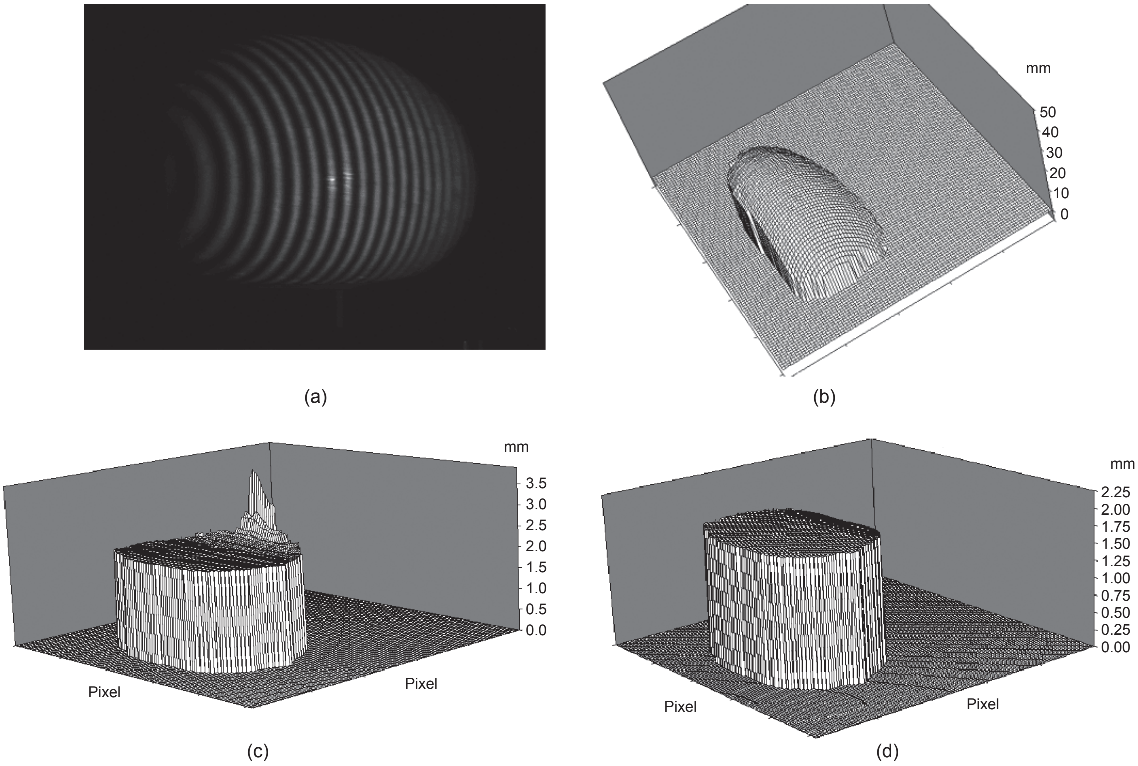


圖 6. (a) 待測物體在移動期間所擷取的影像；(b) 重建之三維形貌；(c) 待測物體在 x-軸方向的形變量；(d) 待測物體在 z-軸方向的形變量。

四、結論

本文介紹了條紋投影技術在光學量測的應用，僅由單張影像，即可獲得動態物體的瞬間形貌、三維移動速度及三維形變量。由於是 Full-field measurements，所以待測物各局部區域的速度與形變量都可求出，基於此又可衍生出其他相關的檢測，例如旋轉物體切線方向的速度、非均勻物質的三維熱膨脹系數、表面駐波的分佈等。不過深度位移量 ΔZ 大於 T_z 時，會產生極大的誤差，需慎選曝光時間與投影的條紋週期。另外，待檢測區域在移動期間有明顯的灰階變化時，也會產生極大的誤差。

參考文獻

1. V. Srinivasan, H. C. Liu, and M. Halioua, *Applied Optics*, **23**, 3105 (1984).
2. M. Takeda, and K. Mutoh, Applied Optics, 22, 3977 (1983).
3. Robert Windecker, Matthias Fleischer, Klaus K.orner, and Hans J. Tiziani, *Optics and Lasers in Engineering*, **36**, 141 (2001).
4. Hongyu Liu, Wei-Hung Su, Karl Reichard, and Shizhuo Yin, *Optics Communications*, **216**, Issues 1-3, 65 (2003).
5. Wei-Hung Su, and Wei-Ting Co, Optics and Lasers in Engineering, **81**, 11 (2016).
6. Wei-Hung Su, and Chao-Kuei Lee, Optical Engineering, **48** (7), (2009).
7. Wei-Hung Su and Wei-Ting Co, SPIE Conference Proceedings, 8497 (2012).

作者簡介

蘇威宏先生為美國賓州州立大學電機工程博士，現為中山大學材料與光電科學系副教授。

Wei-Hung Su received his Ph.D. in Electrical Engineering Department at the Pennsylvania State University. He is currently an associate professor in the Department of Materials and Optoelectronic Science at the National Sun Yat-Sen University.

羅毓恆先生為中山大學材料與光電科學系碩士班研究生。

Yu-Heng Lo is currently a M.S. student in the Department of Materials and Optoelectronic Science at the National Sun Yat-Sen University.