

立體視角法對微小元件之三維形貌量測

蘇威宏	涂鐘範	謝騷璘	藍于澄
國立中山大學材料與光電 工程學系	工業技術研究院量測技術 發展中心檢測與自動化技 術發展部(R400)	工業技術研究院量測技術 發展中心檢測與自動化技 術發展部(R400)	工業技術研究院量測技術 發展中心檢測與自動化技 術發展部(R400)
wxs156@mail.nsysu.edu.t w	CFTu@itri.org.tw	toddrowe@itri.org.tw	YuYingLan@itri.org.tw

摘要

本論文以立體視覺搭配條紋投影的方式對微小物件進行三維形貌的量測。其原理是將一二維條紋投影於待測物體上，利用兩個影像擷取系統，觀察待測物體上的二維條紋。尋找兩張擷取的影像內，具有相同相位值之兩畫素，之後利用三角幾何關係，將兩組二維影像點轉換成實際的三維空間座標，即可以重建待測物體的三維形貌。此系統具有下列優點：(1) 非接觸式不會去破壞樣本；(2) 具有高精確度，高形貌樣本密度以及較低的環境干擾因素；(3) 量測時間短，而且單次量測即可重建待測物體的三維形貌，故適用動態物體的檢測。

關鍵字: 立體視覺，條紋投影，三維形貌量測技術，二維光柵

1. 前言

立體視覺系統[1-6]通常是利用兩套影像擷取裝置，對同一待測物體擷取兩張成對影像，再利用三角幾何關係，由兩張影像中，尋找同一待測點在實物座標系的位置，進而描繪出整個待測物體在實物座標系中的形貌。但是在兩張影像、尋找同一待測點的過程中，容易受到外在環境的影響而有認知上的誤差，例如影像解析度不夠、照明不均勻、物體表面有缺陷、遮擋等情況，都會在影像配對的過程中產生困難。因此，立體視覺首要解決的就是影像配對（Image Registration）問題。

本論文提出條紋投影的方式，來解決 Image Registration 的問題。其原理是利用投影在待測物體上的二維條紋，經過傅利葉轉換和相位展開的技術後，兩張成對的影像皆可得到可對應配對的相位值，使成對影像特徵點的配對問題上更容易達成。

2. 研究方法

圖1為系統架構，此架構由兩套影像擷取裝置與一組條紋投影裝置所構成。本實驗所使用的二維弦狀圖案如圖2所示。將二維條紋投影在待測物體上，再由兩組CCD擷取的影像，經過二維傅利葉轉換和相位展開的技術後，可得到兩張相位分佈圖。這兩張相位分佈圖中，相同的相位值即代表相同的待測點。故雙視角的條紋投影法，使立體視覺在影像點的配對問題上更容易進行。之後再利用三角幾何關係，將兩組二維影像點座標轉換成實際的三維空間座標，即可以得到三維形貌的重建模型。

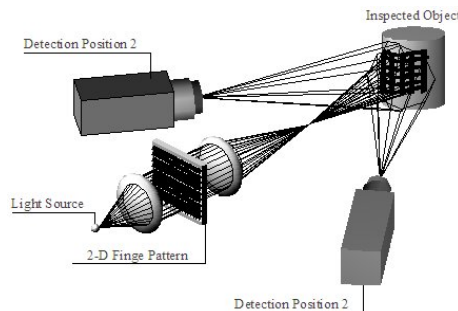


圖1 立體視覺法之系統架構

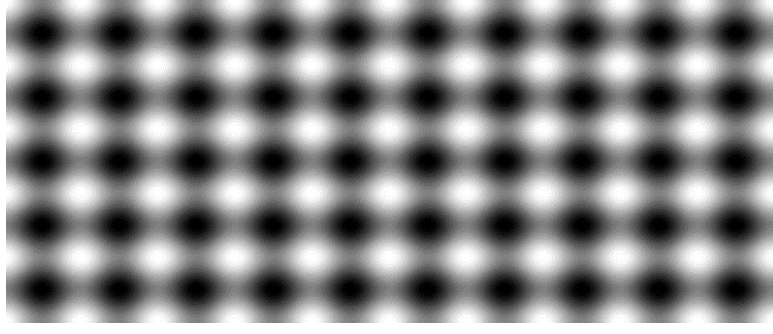


圖 2 二維弦狀圖案

條紋相位值的萃取方式，可以採用Fourier transform method [7] 與phase-shifting method [8-9]。以Fourier transform method 為例，將穿透率呈弦狀分佈的圖案，投影在待測物體表面，並由數位像機記錄。其光強度分佈可表示為：

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos\left(\frac{2\pi}{d}x + \Delta\varphi_x\right) + c(x, y) \cos\left(\frac{2\pi}{d}y + \Delta\varphi_y\right), \quad (1)$$

其中， $a(x, y)$ 為直流項， b 、 c 為CCD偵測平面座標 (x, y) 處之調變值， $\Delta\varphi_x$ 、 $\Delta\varphi_y$ 為相位值。公式(1)可進一步表示為

$$I(x, y) = a(x, y) + \frac{1}{2}\tilde{b}(x, y)e^{j\frac{2\pi}{d}x} + \frac{1}{2}\tilde{b}^*(x, y)e^{-j\frac{2\pi}{d}x} + \frac{1}{2}\tilde{c}(x, y)e^{j\frac{2\pi}{d}y} + \frac{1}{2}\tilde{c}^*(x, y)e^{-j\frac{2\pi}{d}y}, \quad (2)$$

其中， $\tilde{b}(x, y) = b(x, y) \cdot e^{j\Delta\varphi(x, y)}$ ， $\tilde{c}(x, y) = c(x, y) \cdot e^{j\Delta\varphi(x, y)}$ 。分別對 x 方向與 y 方向作一為傅氏轉換，可得

$$\mathfrak{F}_x\{I(x, y)\} = A(f_x, y) + \frac{1}{2}\tilde{B}(f_x - \frac{1}{d}, y) + \frac{1}{2}\tilde{B}^*(f_x + \frac{1}{d}, y) + \frac{1}{2}\tilde{C}(f_x, y)e^{j\frac{2\pi}{d}y} + \frac{1}{2}\tilde{C}^*(f_x, y)e^{-j\frac{2\pi}{d}y}, \quad (3)$$

$$\mathfrak{F}_y\{I(x, y)\} = A(x, f_y) + \frac{1}{2}\tilde{B}(x, y)e^{j\frac{2\pi}{d}x} + \frac{1}{2}\tilde{B}^*(x, y)e^{-j\frac{2\pi}{d}x} + \frac{1}{2}\tilde{C}(x, f_y - \frac{1}{d}) + \frac{1}{2}\tilde{C}^*(x, f_y + \frac{1}{d}), \quad (4)$$

其中， $\mathfrak{F}_x\{\tilde{b}(x, y)\} = \tilde{B}(f_x, y)$ 、 $\mathfrak{F}_y\{\tilde{c}(x, y)\} = \tilde{C}(x, f_y)$ 。

將第(3)式與第(4)式作濾波處理，可分別得到 x 方向與 y 方向之訊號項：

$$S_x(f_x, y) = \frac{1}{2}\tilde{B}(f_x - \frac{1}{d}, y), \quad (5)$$

$$S_y(x, f_y) = \frac{1}{2}\tilde{C}(x, f_y - \frac{1}{d}). \quad (6)$$

於是，第(5)式與第(6)式之反傅氏轉換為

$$s_x(x, y) = \mathfrak{F}_x^{-1}\{S_x(f_x, y)\} = \frac{1}{2}\tilde{b}(x, y)e^{j\frac{2\pi}{d}x} = \frac{1}{2}b(x, y)e^{j[\frac{2\pi}{d}x + \Delta\varphi_x]}, \quad (7)$$

$$s_y(x, y) = \mathfrak{F}_y^{-1}\{S_y(x, f_y)\} = \frac{1}{2}\tilde{c}(x, y)e^{j\frac{2\pi}{d}y} = \frac{1}{2}c(x, y)e^{j[\frac{2\pi}{d}y + \Delta\varphi_y]}. \quad (8)$$

故條紋相位值可由上述兩式求得：

$$\Phi_x(x, y) = \tan^{-1}\left\{\frac{\text{Im}\{s_x(x, y)\}}{\text{Re}\{s_x(x, y)\}}\right\}, \quad (9)$$

$$\Phi_y(x, y) = \tan^{-1}\left\{\frac{\text{Im}\{s_y(x, y)\}}{\text{Re}\{s_y(x, y)\}}\right\}. \quad (10)$$

利用Fourier transform method算得之相位值介在 $-\pi$ 與 π 之間，造成了相位的不連續性，必須藉由相位之展開獲得連續的相位變化關係。而將這些落差疊加的方法就稱之為相位展開技術(phase unwrapping) [10-13]。

3. 三角幾何關係式

圖 3 所示為立體視覺在兩觀測點之間的幾何關係。線段 AB 之長度在兩個視覺系統的觀測到的長度分別 L_1 及 L_2 。則在物點 A 與物點 B 之間的高度差為 h 可由下式求出：

$$h = \frac{L_1 \cdot M_1 / \cos \theta_1 - L_2 \cdot M_2 / \cos \theta_2}{\cot \theta_1 + \cot \theta_2}, \quad (11)$$

其中 M_1 與 M_2 分別為兩個系統的放大率， θ_1 與 θ_2 分別為兩個系統在水平方向的夾角。

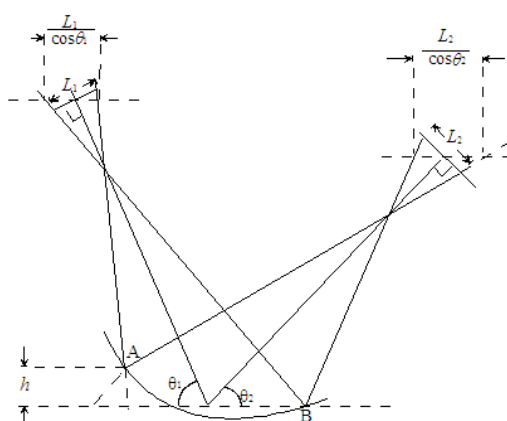


圖 3 三角幾何關係

4. 研究成果

本實驗所選定的待測物體為大小約 8mm 的貝殼，將二維條紋投影在待測物體上，再由兩組 CCD 擷取影像。圖 4(a)、(b)分別是左右兩側 CCD 所擷取到的影像，其條紋分佈隨著深度變化而改變。經過二維傅利葉轉換和相位展開的技術後，可得到兩張相位分佈圖，如圖 5、圖 6 所示。藉由相位之展開獲得連續的相位分佈後，即可尋找左右兩張照片重疊的部份、並具有相同相位值之畫素。再由公式(11)尋找待測物體每一畫素的座標。圖 9 則是以此系統量測之結果，精確值約為 5 μ m。

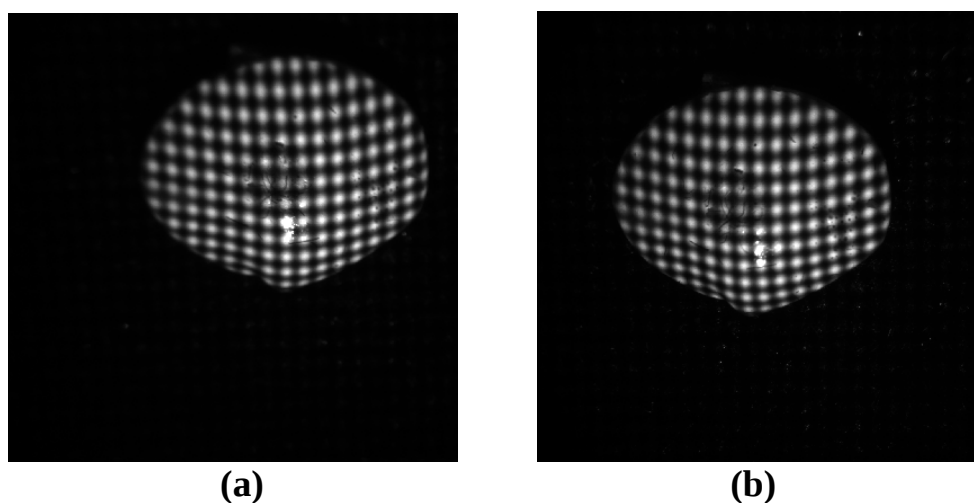
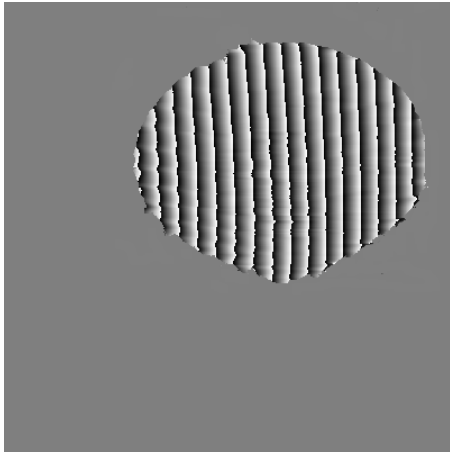
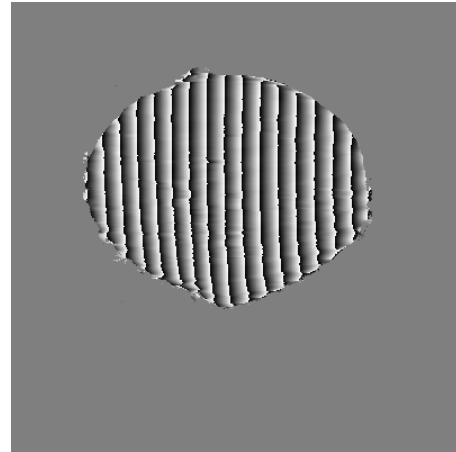


圖 4 以立體視覺法擷取之影像：(a)左側視角；(b)右側視角

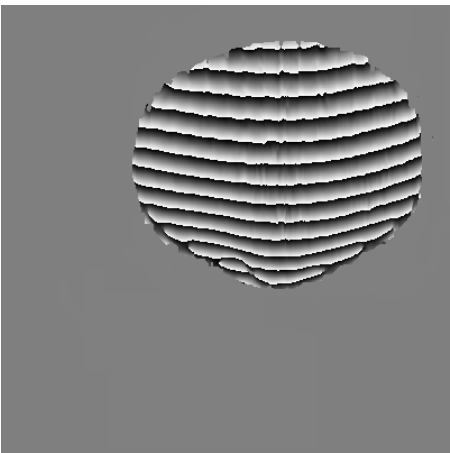


(a)

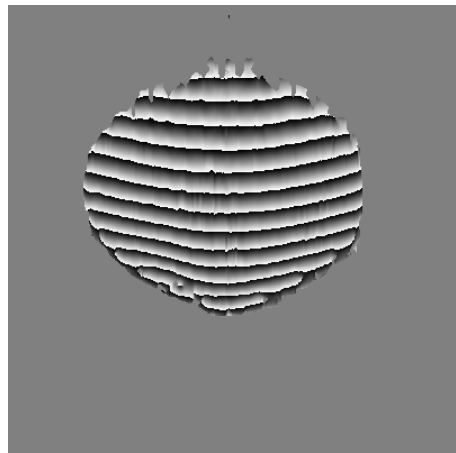


(b)

圖 5 以 Fourier transform method 求得之橫向相位分佈：
(a)左側視角；(b)右側視角

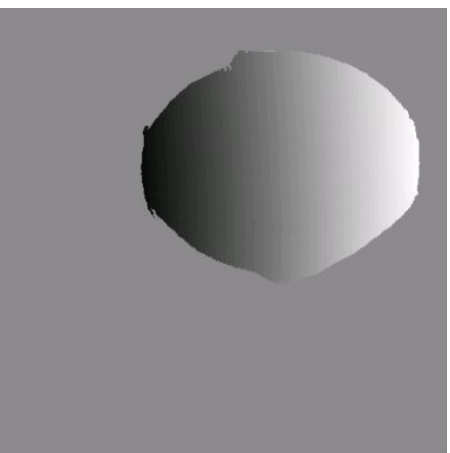


(a)

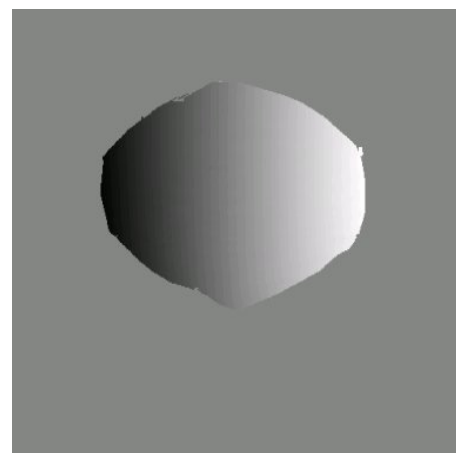


(b)

圖 6 以 Fourier transform method 求得之縱向相位分佈：
(a)左側視角；(b)右側視角



(a)



(b)

圖 7 Phase unwrapping 所得之橫向相位分佈：
(a)左側視角；(b)右側視角

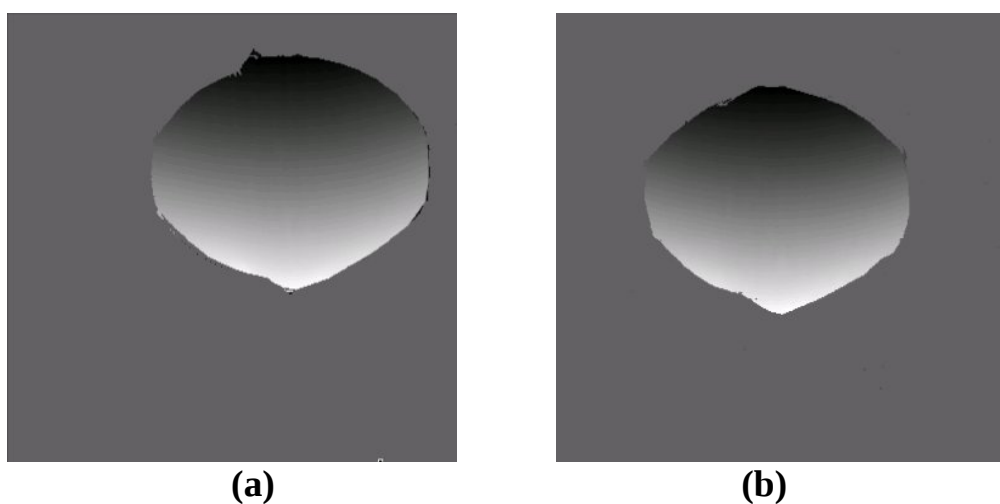


圖 8 Phase unwrapping 所得之縱向相位分佈：
(a)左側視角；(b)右側視角

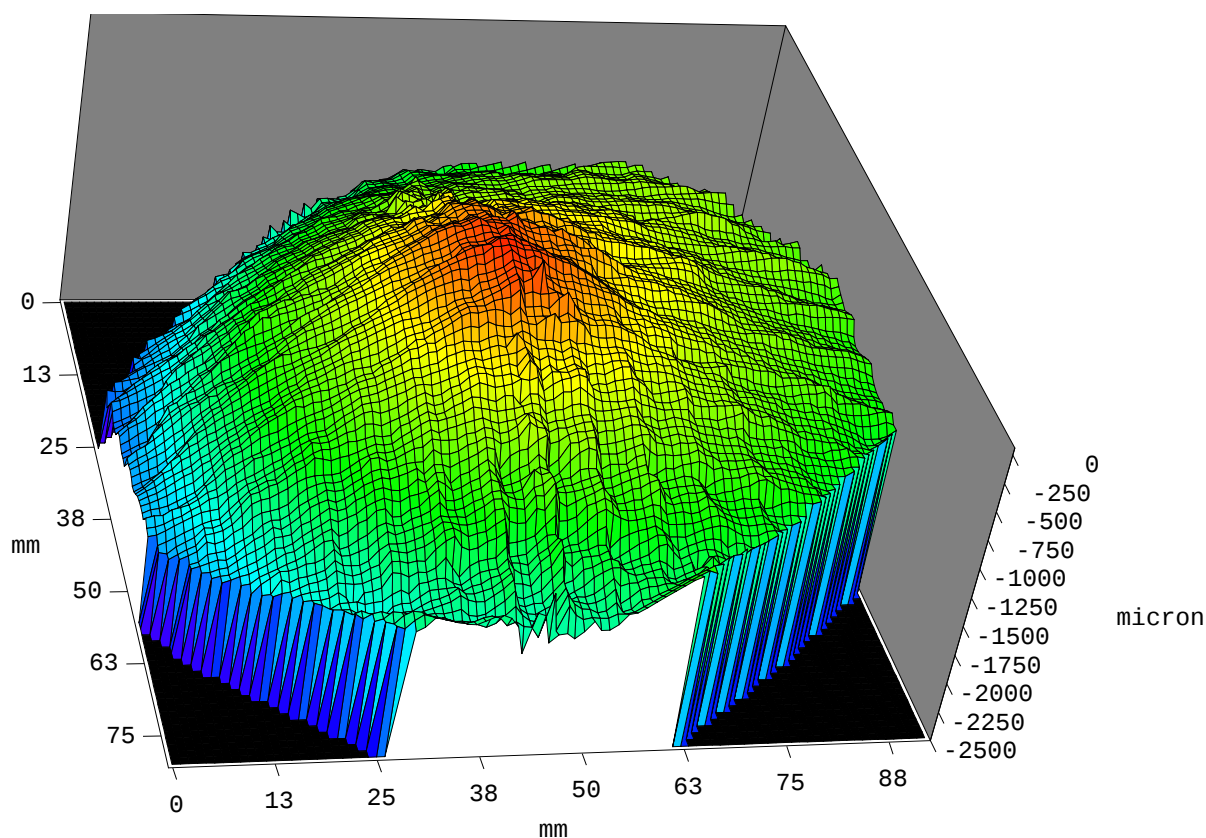


圖 9 以此量測系統重建之三維形貌

5. 結論與建議

本實驗從利用立體視角法(stereovision method)建立一套三維形貌的量測系統。此量測系統採用非接觸式表面形貌量測，具有高精確度及對環境的適應高等優點。利用投影在待測物體上的二維條紋光柵，經由傅利葉轉換、與相位展開技術，使成對影像特徵點的配對問題上更容易達成。本實驗所需之量測時間短(<1sec.)，而且單次量測即可重建待測物體的三維形貌，故適用動態物體的檢測。

6. 參考文獻

- [1] Steven D. Cochran, "3-D surface description from Binocular Stereo," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **14**, 981-994 (1992).
- [2] Y. R. Shiau and B. C. Jiang, "A Methodology to Evaluate/Improve the Performance of a Performance of a Machine Vision System," *International Journal of Production Research* **31**, 1467-1478 (1993).
- [3] P. F. Luo, Y. J. Chao, M. A. Sutton, and W. H. Peters, "Accurate measurement of three-dimensional displacement in deformable bodies using computer vision," *Exp. Mech.* **33**, 123-132 (1993).
- [4] Lane, R.A., Thacker, N.A. and Seed, N.L., "Stretch-Correlation as a Real-Time Alternative to Feature-Based Stereo Matching Algorithms," *Image and Vision Computing* **12**, 203-212 (1994).
- [5] J.J. Aguilar, F. Torres, M.A. Lope, "Stereo vision for 3D measurement: accuracy analysis, calibration and industrial applications," *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* **18**, 193-200 (1996).
- [6] S. Rovetta and R. Zunino, "A Multiprocessor-Oriented Visual Tracking System," *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **46**, 842-850 (1999).
- [7] Takeda, "Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shaped," *Appl. Opt.* **22**, 3977-3982 (1983).
- [8] K. Creath, "Phase-measurement interferometry techniques," *Progress in Optics* **26**, 350-393, E. Wolf, ed., North Holland, Amsterdam (1988).
- [9] V. Srinivasan, H. C. Liu, and M. Halioua, "Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects," *Appl. Opt.* **23**, 3105-3108 (1984).
- [10] D. C. Ghiglia and L. A. Romero, "Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods," *J. Opt. Soc. Am. A* **11**, 107- (1994).
- [11] K. A. Stetson, J. Wahid, and P. Gauthier, "Noise-immune phase unwrapping by use of calculated wrap regions," *Appl. Opt.* **36**, 4830-4838 (1997).
- [12] A. Collaro, G. Franceschetti, F. Palmieri, and M. S. Ferreiro, "Phase unwrapping by means of genetic algorithms," *J. Opt. Soc. Am. A* **15**, 407-418 (1998).
- [13] J.-J. Chyou, S.-J. Chen, and Y.-K. Chen, "Two-Dimensional Phase Unwrapping with a Multichannel Least-Mean-Square Algorithm," *Appl. Opt.* **43**, 5655-5661 (2004).