

應用數位影像相關法檢測軟性材料力學行為之簡介

Investigation of Mechanical Behavior of Soft Materials by Digital Image Correlation Method

王偉中、何義傑、沈宏燦、張廷宇、張雅欣、曹鈞勝、吳亭瑩、陳柏甫

Wei-Chung Wang, Yi-Chieh Ho, Hung-Tsan Shen, Ting-Yu Chang, Ya-Hsin Chang, Chun-Sheng Tsao, Ting-Ying Wu, Bo-Fu Chen

近年來，軟性材料蓬勃發展，勢必會對電子產業與生醫產業帶來革命性的影響，若能夠準確地檢測軟性材料於各種負載下之力學行為，必能掌握新世紀電子產業與生醫產業之關鍵技術。本文將分享國立清華大學動力機械工程學系光測力學實驗室應用數位影像相關法於軟性材料力學行為之量測實例，以期能增進讀者對於軟性材料檢測的認識。

In recent years, the rapid development of soft materials must give revolutionary impact on electronics and biomedical industries. If the mechanical behavior of the soft materials under various loads can be accurately measured, the key technology of electronics and biomedical industries can then be controlled. In this paper, to provide updated information to the readers, several practical examples of measuring mechanical behavior of soft materials at the Laboratory Photomechanics of the Department of Power Mechanical Engineering of National Tsing Hua University were introduced.

一、前言

科技日新月異，從前人的幻想與好萊塢式誇張的電影特效，慢慢地在你我生活中呈現，薄如紙張的顯示器，可任意捲曲收藏的電子產品，已不再是專屬於電影中的情節，而這些科技發展最重要的關鍵，即是軟性材料的問世。

軟性材料雖然讓電子產品突破以往的設計侷限，但也因為軟性材料的可撓性與應變量皆比傳統材料大，於產品初期的設計階段或是後端的品質檢

測，如何準確地評估產品於各種環境外力下的力學行為，即是一重要課題。同樣地，軟性材料在生醫產業上也扮演著相當重要的角色。

本文將介紹國立清華大學動力機械工程學系光測力學實驗室應用數位影像相關法於軟性材料之量測實例，以供大家參考。

二、數位影像相關法

數位影像相關 (digital image correlation, DIC)

法最早由 Peters 及 Ranson 於 1982 年提出⁽¹⁾，其利用雷射在物體上形成干涉斑紋，對物體在變形前後分別拍攝數位影像，並進行數值比對而算出物體的表面位移，其後許多學者紛紛投入 DIC 領域。歷經眾多學者的努力，於 1990 年由 Kahn-Jetter 和 Chu 提出了三維數位影像相關 (three dimensional digital image correlation, 3D-DIC) 法⁽²⁾，以二台平行且垂直於待測物表面的相機，結合 2D-DIC 法理論與立體幾何概念，成功地發展出 3D-DIC 法。而 1993 年 Luo 等人以待測物為參考座標⁽³⁾，計算出待測物與二台相機於空間中之座標，發展出全新的 3D-DIC 法，運用此方法，二台相機可任意角度且不必垂直於待測物表面即可進行量測。

至今，隨著軟硬體的進步，DIC 法所能量測的範圍亦越來越廣泛，大至橋梁的檢測，微小至配合掃描式電子顯微鏡 (scanning electron microscope, SEM)、原子力顯微鏡 (atomic force microscope, AFM) 與一般光學顯微鏡，於眾多的領域之中，皆可見 DIC 法的蹤影。

利用 DIC 法進行量測時，最重要的前提是待測物之表面需有足夠之特徵，此特徵可以是人工製造，亦可為待測物自身之隨機斑點。DIC 法是利用數值分析比對變形前與變形後之影像，以獲得影像上欲量測之關注區域 (area of interest, AOI) 的位移與應變等資訊。

首先在物體變形前拍攝影像，設定為參考影像 (reference image)，隨著物體開始變形後，依據試件變形的情形與實驗所需之時間，擷取單張或設定間隔時間擷取多張變形後影像，而後在參考影像上選取欲量測之 AOI，並指定一種子點 (seed point) 為相關性比對的初始點，藉由此點估算初始值，通常種子點選擇在試件移動或變形最小的區域。

根據試件表面特徵的大小，設定子區域 (subset size) 與每個子區域的間隔 (step size)，假設子區域大小設定 31 而間隔 10，則軟體將在 AOI 內由種子點開始，每隔 10 像素點，以邊長 31×31 個像素點的子區域，比對參考影像與變形影像的相關性，找出變形前後灰階值最相似的區域，以計算出變形量。

本文中所使用之 3D-DIC 系統為美國

Correlated Solutions 公司所開發的 VIC-3D 系統⁽⁴⁾，其中包括：

- (1) 電荷耦合元件 (charge coupled device, CCD) 相機為德國 Allied Vision Technologies 公司所製造生產⁽⁵⁾，型號為 Marlin F-201B，解析度為 1628 (H) \times 1236 (V)，數位介面 (digital interface) 為 IEEE 1394 插槽。
- (2) 定焦鏡頭為由德國 Schneider-Kreuznach 公司生產⁽⁶⁾，型號為 Xenoplan 1.9/35-0901。
- (3) 腳架由日本 Velbon Corporation 公司生產製造⁽⁷⁾，型號為 Neo Carmagne840。腳架重量為 3.050 公斤，最大負重為 14 公斤。固定腳架之套管為三重套管，可防止腳架晃動。另外搭配型號 PHD-61Q 雲臺，可輕易地轉動相機之角度。
- (4) 筆記型電腦為日本 Toshiba 公司所生產製造，型號為 Satellite X205-S9349，搭配 Intel 中央處理器 Core 2 Duo T7100 1.8 GHz，記憶體為 2 GB DDR2 667。
- (5) 分析軟體為美國 Correlated Solution 公司所研發的 VIC-2D 和 VIC-3D 軟體，分別是二維和三維之 DIC 法為基礎的套裝軟體，皆安裝於上述筆記型電腦中，配合影像擷取軟體 VIC-Snap 和影像擷取設備，構成 DIC 法系統。

此套系統分析平面內位移的精確度是取像視野 (field of view, FOV) 的 1/50000，對於平面外 (out-of-plane) 位移的精度為 FOV 的 1/25000，量測應變的精度可達 0.00015，但軟體之精確度受到許多因素的影響，例如：相機解析度、光源的均勻度、特徵斑點的品質和環境干擾等。

此套 VIC-3D 系統已被許多美國研究單位、學術機構和公司使用，其中包括 NASA、3M 與 Intel 等單位，有極佳的可信度與精密度。原理簡介如下文⁽⁸⁾。

如圖 1 所示，物體在受外加負載時會產生變形。而假設物體表面之特徵斑點與物體變形一致，因此便可藉由比對變形前後之數位影像，分析物體表面特徵斑點之相對位置，進而求出物體之變形量。

假設待測物在未變形前之某一點座標 (x, y) ，

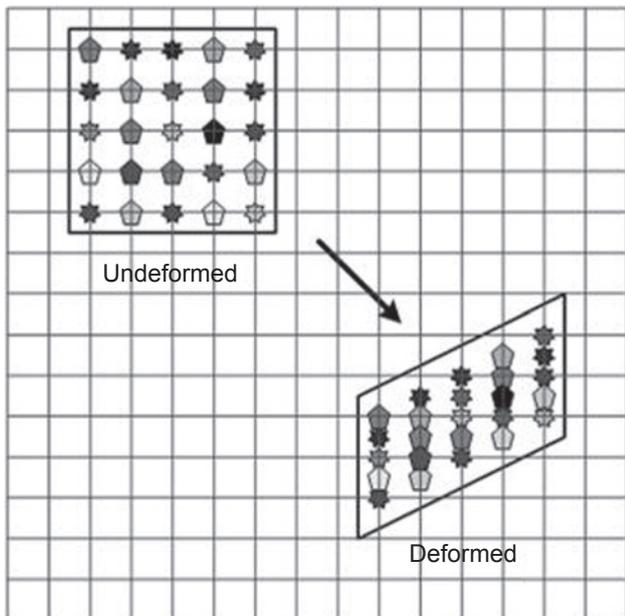


圖 1. 變形前後斑點相對位置示意圖⁽⁹⁾。

其灰階值為 $G(x, y)$ ，而變形後之對應點為 (x', y') ，而變形後對應點之灰階值為 $G(x', y')$ 。根據 DIC 法之基本假設，亦即變形前後灰階值不變之原則，則 $G(x, y) = G(x', y')$ 。在比對變形前後影像之吻合度，便是將變形前後影像之灰階值代入相關函式 (correlation function) 中，由相關函式計算出相關係數 (correlation coefficient) 來判斷其吻合度。

為了求得變形參數，一般透過數值方法找出其最佳化解，代入其相關函式，求出相關係數。在理想情況下，最佳化參數解所得到之變形，即為真實待測物之變形。

照相像機內部感光晶片所取得試片表面的光強資訊，轉換成數位影像後，為一量化的數值矩陣，構成此數值矩陣之每一單元稱為像素，而像素的值即為該像素點之灰階值，也就是此像素點之明暗程度。因此灰階值僅定義在整數級的像素點，而在非整數之像素點上沒有灰階值存在，因此數位影像具有離散性，如圖 2 所示。然而物體在變形後，並非所有值皆落在整數級之像素點上，所以若要得知非整數級像素點的灰階值，就必須進行影像重建，以得知像素與像素之間的灰階值。通常透過整數灰階值的數值內插計算，可重新使離散之數位影像成為

連續的曲面，便可精確地得知非整數級像素點的灰階值。

在 2D-DIC 法中，由於假設平面外位移極小，不影響平面內位移的情況下，忽略平面外位移。但在真實情況下，平面外位移卻始終影響著平面內位移，忽略平面外位移所得到的分析結果，在準確度上存在著一定的誤差。

如圖 3 所示，3D-DIC 法是利用二台 CCD 相機在同一時間對試件表面取像，藉由 2D-DIC 法，配合立體空間座標軸轉換，成功地計算出平面外位移，將平面影像轉換成立體空間的資訊，即為 3D-DIC 法的重點。

三、應用實例介紹

國立清華大學動力機械工程學系光測力學實驗室近五年來致力於發展 DIC 法之應用，將 DIC 法廣泛地應用於各式領域之中，如人工網膜 (生醫材料)^(9,10)、背光模組中之光學膜片⁽¹¹⁾ 高分子黏彈材料的機械性質測定⁽¹²⁾、熱電致冷器的熱應變分析⁽¹³⁾、複合材料平板及圓管的缺陷檢測與木材濕度效應的收縮應變量測。

其中應用於修復骨盆腔內器官脫垂之人工網膜、背光模組中之光學膜片與環氧樹脂試片，其變形量皆超過一般金屬材料，因此，本文將分享此三種材料的研究經驗，以期能使讀者進一步瞭解 DIC 法於檢測軟性材料之應用。

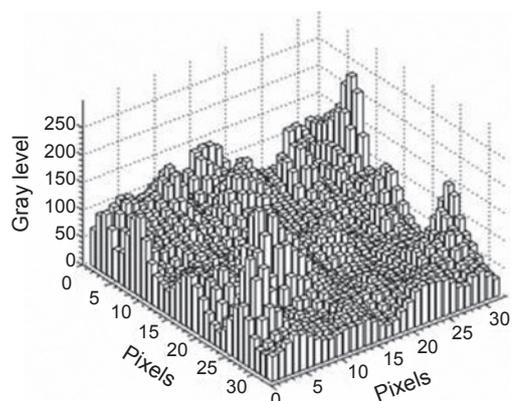


圖 2. 數位影像之離散性⁽⁹⁾。

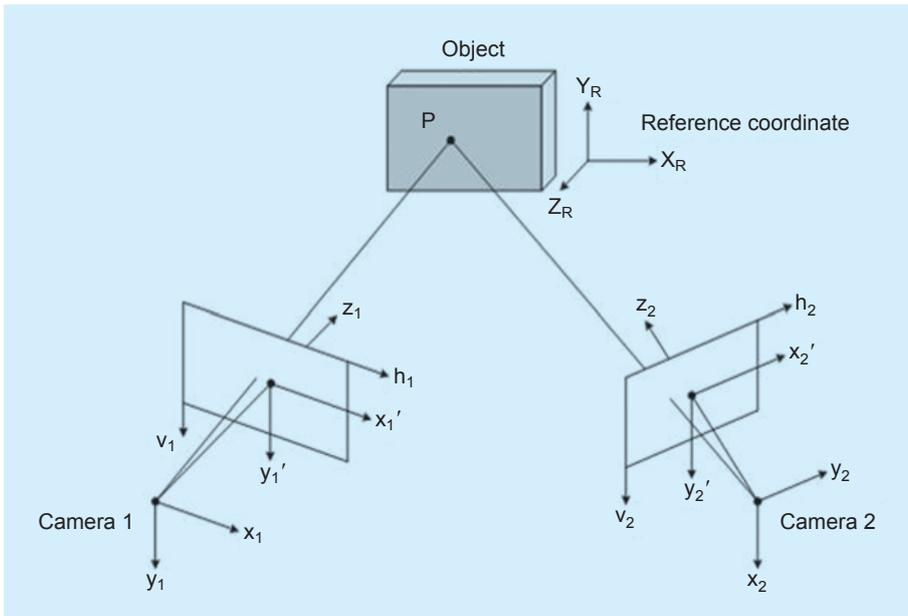


圖 3. 三維影像相關法立體幾何模型⁽⁹⁾。

1. 人工網膜

醫學研究發現，利用人工合成的網膜組織，可有效增加骨盆腔底韌帶和肌肉筋膜的強度，達到修補效果。然而，人工網膜置入體內，長期承受器官與組織間之重量負載，勢必造成人工網膜產生非均勻的變形與收縮現象，進而壓迫或拉扯到神經與血管組織。目前醫學針對人工網膜的研究，主要著重於人工網膜與人體組織間的相容性、排斥與發炎反應，鮮少針對人工網膜植入活體前後之力學行為進行探討。如圖 4(a)–(c) 所示為三種商品化之人工網膜，主要是由聚丙烯 (polypropylene, PP) 編織而成之網狀結構體。

本實驗利用 DIC 法，透過單軸向拉伸，檢測人工網膜的機械性質，以克服傳統拉伸機所獲得的資訊皆為夾頭之位移。進而獲得全域性之應變資訊，檢測人工網膜之機械性質，以供醫師參考。

實驗架設如圖 5 所示，本實驗是使用美國 Instrom 公司所生產之 Instron-8848⁽¹⁴⁾ 進行單軸向拉伸實驗，並以 3D-DIC 法進行人工網膜試片之應變分析。

人工網膜本身並無明顯特徵，且為避免人工網膜試片反光，造成特定亮點閃爍，致使 DIC 法分析有誤，本實驗利用暗色粉餅⁽¹⁵⁾，於人工網膜表面先撲上一層暗色粉底液，再以黑色奇異筆逐一點

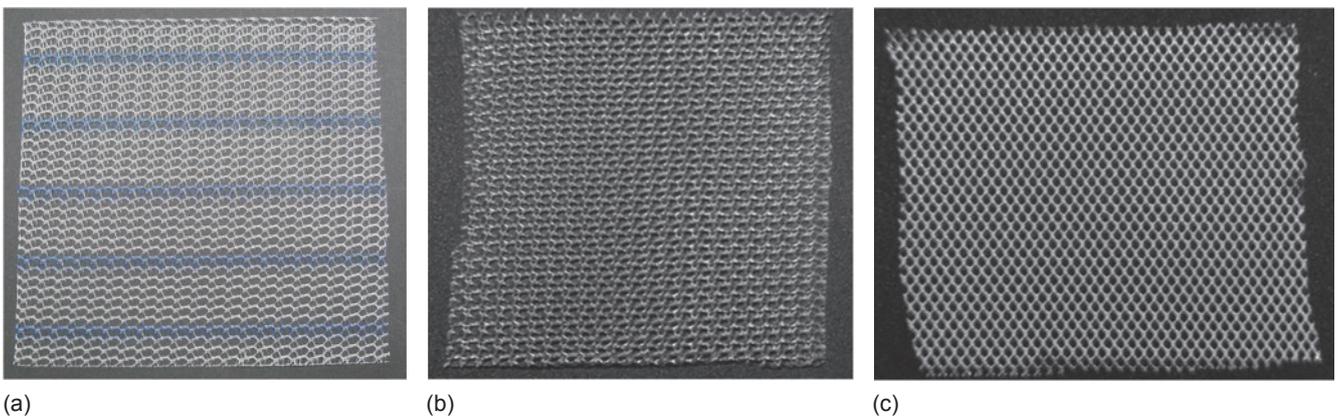


圖 4. 三種商品化之人工網膜，(a) Gynemesh，(b) Marlex，(c) Mersilene。

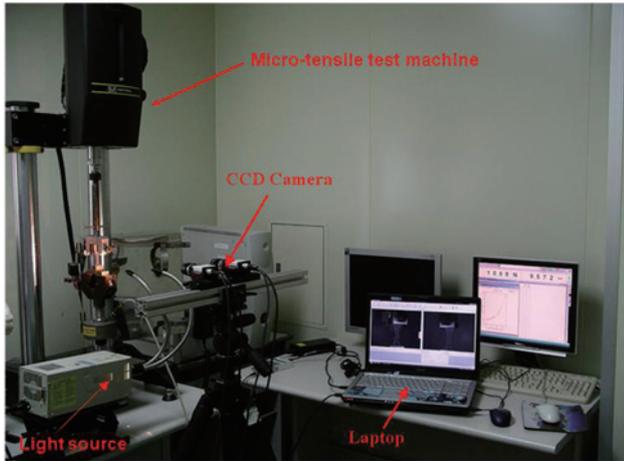


圖 5. 實驗架設圖⁽⁹⁾。

上特徵斑點，並以橡膠做為尾板 (end tab)，使用氰基丙烯酸 (cyanoacrylate, CN) 膠黏合尾板，以避免金屬夾頭破壞試片和拉伸時出現滑移，如圖 6 所示。

圖 7 為 VIC-3D 軟體之原始分析影像，圖中可發現人工網膜變形程度遠大於一般傳統材料，而透過 3D-DIC 系統於實驗過程中擷取影像，即可有效測得試片表面之全域性應變資訊。

將 3D-DIC 法所量測之三種人工網膜橫向與縱向應變之比 (ratio between the transverse strain and longitudinal strain, RTL) 繪製成直方圖，如圖 8 所示，有別於一般材料，人工網膜之 RTL 值遠超過傳統蒲松氏比 (Poisson's ratio) 之上限值 0.5。

2. 背光模組中之光學膜片

薄膜電晶體液晶顯示器 (thin film transistor-liquid crystal display, TFT-LCD) 因重量輕、體積薄

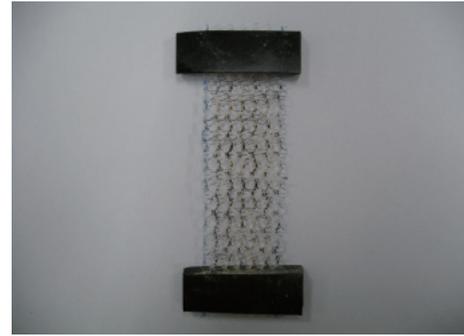


圖 6. 人工網膜製作特徵斑點完成圖。

型及耗電量較低的優勢，近幾年已幾乎取代傳統陰極射線管 (cathode ray tube, CRT) 顯示器，甚至成為台灣兩兆雙星之一的關鍵產業。如何進行準確的數值模擬，以提供業者進行設計的參考，便是一重要的課題。而欲準確的進行 TFT-LCD 模擬，TFT-LCD 結構中的各光學膜片之機械性質即相當重要，本實驗利用單軸向拉伸試驗，以 3D-DIC 系統擷取影像，進而分析出試片全場的變形資訊。

圖 9(a)-(b) 為二種光學膜片，光學膜片為透明薄板，本身並無明顯特徵。因此，於實驗前需先以白色漆料噴塗薄薄一層底色，再以黑色漆料噴塗上隨機斑點，如圖 10 所示。

利用 3D-DIC 系統量測之結果如表 1 所示。求得 TFT-LCD 結構中的四種光學膜片之機械性質後，即可進行數值模擬。後續詳細的分析結果，可參閱文獻 11。

3. 環氧樹脂試片

在數值模擬中，蒲松氏比是個相當重要的參

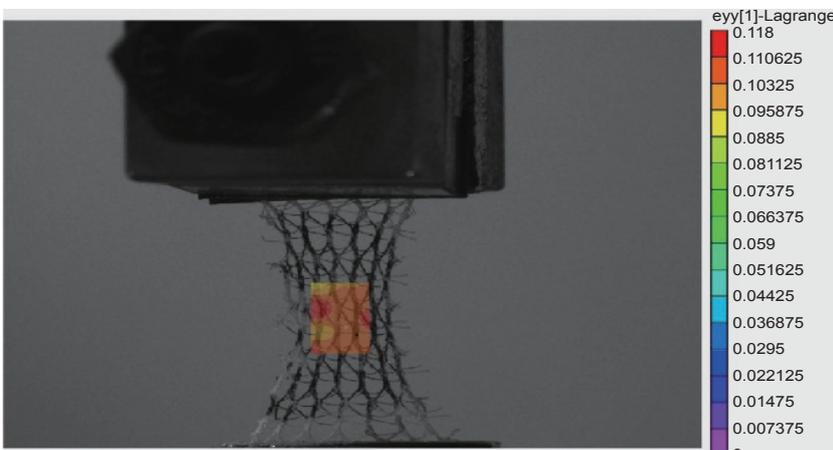


圖 7.

VIC-3D 軟體之原始分析影像結果。

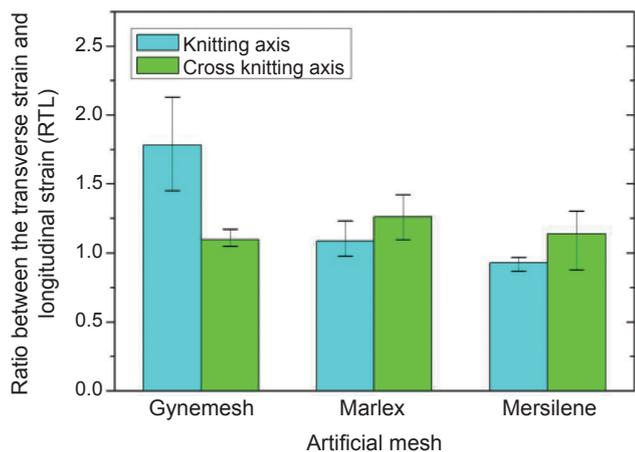


圖 8. 三種人工網膜 RLT 之直方圖⁽⁹⁾。

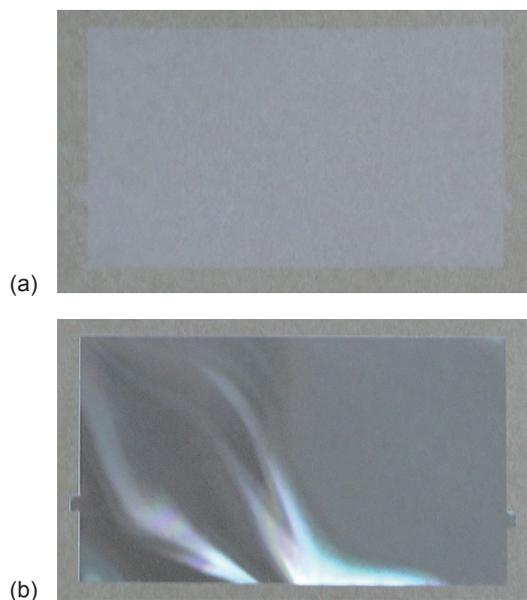


圖 9. 二種光學膜片⁽¹¹⁾，(a) diffuse sheet，(b) prism sheet。

數，因此，如何透過拉伸試驗以求取準確的蒲松氏比則是非常重要的課題。於環氧樹脂片拉伸實驗中，不僅使用 3D-DIC 法進行量測，亦利用軸向與橫向之應變規量取應變資訊，以驗證 3D-DIC 系統之準確性。圖 11 為根據 ASTM B557M⁽¹⁶⁾ 規範所設計之環氧樹脂試片。

3D-DIC 系統所量測之軸向與縱向之應變結果如圖 12 所示，透過線性擬合求得斜率，可求得蒲松氏比為 0.358。利用應變規與 3D-DIC 系統

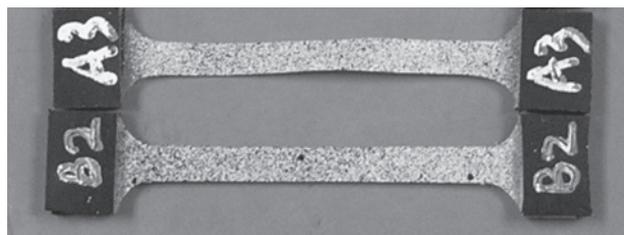


圖 10. 二種光學膜片噴塗斑點完成圖⁽¹¹⁾。



圖 11. 環氧樹脂拉伸試片⁽¹²⁾。

所量測三次試片之蒲松氏比如表 2 所示，可發現 3D-DIC 系統與二次應變規所測得之蒲松氏比差異不大，結果相當理想。

表 1. 3D-DIC 系統之量測結果⁽¹¹⁾。

Specimens type	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
Diffuse sheet	2.52	0.37
Prism sheet	2.12	0.43

表 2. 應變規與 3D-DIC 系統之量測結果⁽¹²⁾。

	Poisson's ratio	Method
I	0.362	Strain gage
II	0.338	Strain gage
III	0.358	3D-DIC
Average	0.353	

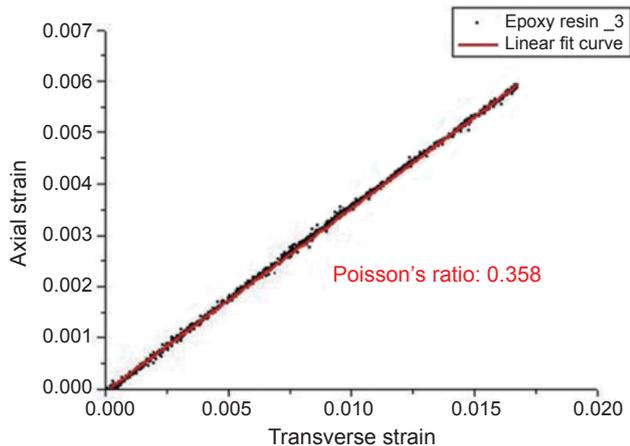


圖 12. 3D-DIC 系統應變量測結果圖⁽¹²⁾。

四、結論

似紙非紙的軟性材料，未來勢必會為電子產業和生醫產業帶來革命性的影響。如何能夠於設計初期或是產品後端檢測，準確地檢測出軟性材料於各種負載下的力學行為，勢必為產業間一大關鍵競爭技術。

文中所提及的軟性材料量測實例中，皆證實 DIC 法的確具有足夠的精度與量測範圍，可應用於軟性材料的檢測。而若讀者想更進一步瞭解文中量測實例的研究細節，敬請參閱文後之相關文獻，亦歡迎產學研各界人士指教，互相砥礪。

誌謝

本文中所有研究成果，均因為國立清華大學動力機械工程學系光測力學實驗室之博碩士班學生的辛勤努力才能順利產出。另外，由於行政院國家科學委員會（計畫編號：NSC 95-2221-E007-011-MY3、NSC96-2221-E075B-001-MY3 與 NSC98-2221-E007-012-MY3）、榮民總醫院與國立清華大學研究發展處（計畫編號：VGHUST99-P5-24）於研究計畫經費上的支援，才能促使各項研究順利進行，謹此致謝。

參考文獻

1. W. H. Peters and W. F. Ranson, *Optical Engineering*, **21** (3), 427 (1982).

2. Z. L. Kahn-Jetter and T. C. Chu, *Experimental Mechanics*, **30** (1), 10 (1990).
 3. P. F. Luo, Y. J. Chao, M. A. Sutton, and W. H. Peters III, *Experimental Mechanics*, **33** (2), 123 (1993).
 4. <http://www.correlatedsolutions.com/>
 5. <http://www.alliedvisiontec.com/>
 6. <http://www.schneider-kreuznach.com/>
 7. <http://www.velbon.cn/gb/index.html>
 8. 陳柏甫, 國立清華大學動力機械工程學系碩士論文 (2010).
 9. 張廷宇, 國立清華大學動力機械工程學系碩士論文 (2008).
 10. 沈宏燦, 國立清華大學動力機械工程學系碩士論文 (2007).
 11. 張雅欣, 國立清華大學動力機械工程學系碩士論文 (2009).
 12. 曹鈞勝, 國立清華大學動力機械工程學系碩士論文 (2009).
 13. 吳亭瑩, 國立清華大學動力機械工程學系碩士論文 (2010).
 14. <http://www.instron.com.tw/>
 15. <http://www.yesco.com.tw/>
 16. ASTM Test Designation B557M, *Annual Book of ASTM Standards*, **02.02**, 578, Philadelphia (1984).



王偉中先生為美國愛荷華州立大學工程力學博士，現任國立清華大學動力機械工程學系教授兼任國際事務處國際長。

Wei-Chung Wang received his Ph.D. degree in engineering mechanics from Iowa State University, USA. He is currently a professor in the Department of Power Mechanical Engineering at National Tsing Hua University (NTHU) and Dean of International Affairs at NTHU.



何義傑先生現為國立清華大學動力機械工程所博士班學生。

Yi-Chieh Ho is currently a Ph.D. student in the Department of Power Mechanical Engineering at National Tsing Hua University.



沈宏燦先生為國立清華大學動力機械工程碩士，現任鴻海精密公司全球研發部工程師。

Hung-Tsan Shen received his M. S. degree in power mechanical engineering from National Tsing Hua University. He is currently a research engineer in the Department of Global Research and Design in Hon-Hai Precision Company in Taiwan.



張廷宇先生為國立清華大學動力機械工程碩士，現任國立清華大學動力機械工程系研究助理。

Ting-Yu Chang received his M.S. degree in power mechanical engineering from National Tsing Hua University. He is currently a research assistant in the Department of Power Mechanical Engineering at National Tsing Hua University..



張雅欣小姐為國立清華大學動力機械工程碩士，現任中強光電股份有限公司工程師。

Ya-Hsin Chang received her M.S. degree in power mechanical engineering from National Tsing Hua University. She is currently a research engineer in the Coretronic Corporation.



曹鈞勝先生為國立清華大學動力機械工程碩士，現任華碩電腦股份有限公司研發部工程師。

Chun-Sheng Tsao received his M.S. degree in power mechanical engineering from National Tsing Hua University. He is currently a research engineer in the ASUSTek Computer Inc.



吳亭瑩小姐為國立清華大學動力機械工程碩士，現任新奇美電子股份有限公司工程師。

Ting-Ying Wu received her M.S. degree in power mechanical engineering from National Tsing Hua University. She is currently a research engineer in the Chimei Innolux Corporation.



陳柏甫先生為國立清華大學動力機械工程碩士，他現正服兵役中。

Bo-Fu Chen received his M.S. degree in power mechanical engineering from National Tsing Hua University. He is now taking compulsory military service.