

影像量測於結構監測之應用

黃仲偉／國家地震工程研究中心副研究員

紀乃文／台灣大學土木工程學系博士後研究員

陳北亭／中原大學土木工程學系博士

楊元森／臺北科技大學土木工程系副教授暨國家地震工程研究中心兼任副研究員

林詠彬／國家地震工程研究中心研究員

摘要

近年來影像量測方法已被廣泛應用在各種實驗力學，相較於傳統貼附感測器的量測，影像量測提供一種非接觸式的量測技術，可在不干擾待測物的情況下進行全域性的量測。本文旨在介紹影像量測的相關理論，並自行開發雙相機系統探討三維位移場與應變場之量測以及表面裂縫偵測與診斷，透過靜態拉伸實驗、振動台實驗與混凝土軸壓實驗加以驗證。實驗結果顯示影像分析軟體可精確至像素，與傳統應變計的量測結果的相對誤差可在 5% 之內。本文並提出目前影像的一些限制與未來發展方向，可供國內各單位推廣或應用影像量測於結構監測參考。

ABSTRACT

Digital image measurements have been widely used in experimental mechanics to measure displacement and strain fields in recent years. Compared with strain gages and displacement sensors, digital image technology provides non-contact and full-field measurements without interfering objects. In this paper, the theories of image measurements are introduced and an in-house dual-camera system was developed to study the three-dimensional displacement/strain fields on the specimen. The developed system was verified by the static tensile tests, vibration tests on the shaking table, and concrete compressive tests. Experiments results demonstrate that the developed system has a pixel precision and the relative errors with the results from

strain gages can be less than 5%. Finally, the current limitation and future potential developments of image measurement are proposed, which could help engineers to spread or apply image measurements in structural health monitoring.

前言

對於結構監測而言，如何快速、便利、有效地量測結構體的全域變形是業界與學界不斷致力發展與研究的目標。量測時一般可依儀器之使用方式區分為「接觸式」與「非接觸式」兩種類型。傳統的感測器多屬於接觸式，在實務過程中常遭遇安裝困難、價格昂貴、僅能提供量測點位資訊或因感測器本身的存在反而影響結構真實反應等限制。相較之下，非接觸式感測器則嘗試利用待測物周遭環境（如光、微波、超音波、磁力、氣壓）的變化組成各式的量測系統，在不接觸待測物的情形下透過環境的變化反推待測物的物理量。本文的重點則是探討影像量測在結構監測之應用。

近年來影像感光元件的解析度平均以兩年為其倍增週期，目前千萬畫素的高階數位相機已經成為平價的普及器材；加以個人電腦記憶容量與處理器速度的提昇，允許進行更複雜的分析程序，因此影像量測的解析精度與應用範圍亦不斷持續提昇。數位影像量測係根據物體在變化前、後兩張影像間的相對位置分析物體表面資訊推估所欲探求的物理量。舉例而言，藉由影像中特徵點位空間資訊的變化，可進而推算出待測物表面的位移場與應變場；或藉由灰階值的變化，可推估待測物表面裂縫產生與否以及裂縫的量化資料。

影像量測方式的特性在於量測的尺度範圍取決於像素與真實長度之間的轉換，而非單純的長度單位。故配合不同鏡頭，吾人可進行微奈米等級的變形量測，也可以進行大型結構乃至大地變形量測。影像的來源也可以相當廣泛，諸如一般尺度下的光學相機影像，高速相機影像；大至空拍影像、衛星影像；小至電子顯微鏡、原子力顯微鏡所得影像；甚至雷射掃描或超音波掃描後所得強度轉換的灰階影像都可以當作影像量測的對象。透過影像像素與真實距離之間的轉換關係，吾人即可透過影像分析計算影像上點位的變化再轉換得到點位在真實空間中的變化。

其次，對於非均勻材料或不可預測結構破壞點等問題，全域量測所需的應變計或位移計數目可能高達數百個，不僅成本昂貴、安裝費時，甚至感測器的傳輸線也可能阻礙研究人員和工程師順利地觀察結構物的表面。且在某些較危險或不易接觸的區域，使用接觸式的感測器有其困難甚至不可行。相較之下，影像適用的應變量測範圍大，目前應用上自萬分之一到百分之百應變都可計算，且不侷限於特定方向。可透過數位影像解析物體表面全域的應變分佈，影像量測的設備成本遠低於傳統以點或線佈置的儀器系統。

本篇旨在介紹影像量測的原理，包含座標轉換、圖樣識別、三角定位、位移與應變計算，以及裂縫偵測與診斷；根據前述理論建立三維影像量測的流程以及自行開發相關所需的軟、硬體，並以靜態平板拉伸實驗、振動台振動實驗以及混凝土圓柱抗壓實驗作為驗證，將所得結果與應變計、位移計相比較。最後針對影像量測目前在結構監測方面的限制做一說明，希冀能推廣影像量測在各方面檢測之應用。

影像量測相關理論

影像座標轉換

十六世紀所發展出的黑箱相機可謂是光學影像裝置的濫觴，後世的影像裝置多是建立在改良黑箱相機的基礎上發展而成。黑箱相機的理論依據主要是透視投影法 (perspective projection)，儘管透視投影法相當簡化，但它仍然被廣泛使用在近代的影像處理過程中。為方便後續推導先建立所謂的相機座標系統，其座標原點 O 在針孔處 (參見圖 1)，並令其對應的 X_c - Y_c 平面

平行於影像裝置的影像擷取平面 Π' (亦即感光元件所在平面)。影像平面 Π' 與相機座標的 X_c - Y_c 平面之間的距離也就是相機的焦距 f ，通過 O 且與 Π' 平面垂直的直線即為光軸 (optical axis)，也就是相機座標的 Z_c 軸。光軸穿透影像平面 Π' 的 C' 點則為影像中心 (image center)，此交點可作為影像座標系統 X_i - Y_i 的原點。若 (x_p, y_p, z_p) 為相機座標系統中的物點座標， (x_i, y_i) 為其投影至影像平面之座標，透過幾何可以得到如下關係：

$$\begin{cases} x_i \\ y_i \end{cases} = \begin{bmatrix} f & 0 \\ 0 & f \end{bmatrix} \begin{cases} x_p / z_p \\ y_p / z_p \end{cases} \quad (1)$$

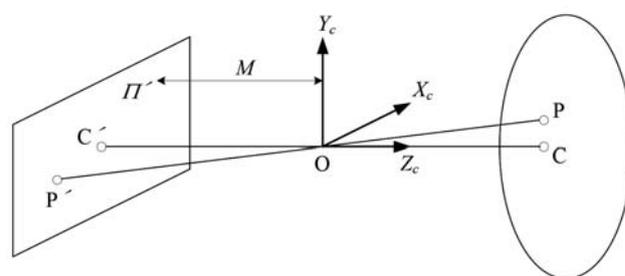


圖 1 針孔相機座標系統示意圖

上式的意義在於：若已知相機焦距 f 以及待測物到相機的距離 z_p ，則透過量測待測物在影像座標的長度或位置變化，可以推估影像在真實空間的長度或位置變化。然而前述的推導係假設待測物表面平行於影像擷取平面，但在實際量測過程中難以確保影像擷取平面與待測物表面平行，故又引進世界座標系統描述物體位置在真實空間中的三維座標。一般影像座標系統，相機座標系統與世界座標系三者之間有相互的關聯如圖二所示，其中若進一步考慮鏡頭可能非完美針孔的情況導致影像產扭曲，在扭曲程度不大的前提下，影像座標系統與相機座標系統之間的轉換式可寫為^[1]：

$$\begin{cases} x_i \\ y_i \\ 1 \end{cases} = \begin{bmatrix} f \cdot S_u & f \cdot S_u \cdot \alpha & x_0 \\ 0 & f \cdot S_v & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} x_p / z_p \\ y_p / z_p \\ 1 \end{cases} \quad (2)$$

上式中 f 為焦距， S_u 、 S_v 的代表像素在感光元件上非正方形而存在比例關係， x_0 、 y_0 為影像座標系統的平移參數， α 為影像座標系統兩個主軸夾角，以上這六個參數稱為相機的內部參數 (intrinsic parameters)。另一方面，關於相機座標系統和世界座標系統轉換的參數稱為的外部參數 (extrinsic parameters)，包括三個旋轉角

和三個平移量，三個旋轉角可以組合成一個旋轉矩陣 \mathbf{R} ，而三個平移量則為平移矩陣 \mathbf{T} 。這兩個矩陣帶代表了世界座標系統與相機座標系統之間的轉換關係，轉換式如下^[1]：

$$\begin{Bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \\ 1 \end{Bmatrix} = [\mathbf{R} | \mathbf{T}] \begin{Bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & t_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & t_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (3a)$$

$$(3a) \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos(r_z) & \sin(r_z) & 0 \\ -\sin(r_z) & \cos(r_z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(r_y) & 0 & -\sin(r_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(r_y) & 0 & \cos(r_y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(r_x) & \sin(r_x) \\ 0 & -\sin(r_x) & \cos(r_x) \end{bmatrix} \quad (3b)$$

$$\mathbf{T} = \begin{Bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{Bmatrix} \quad (3c)$$

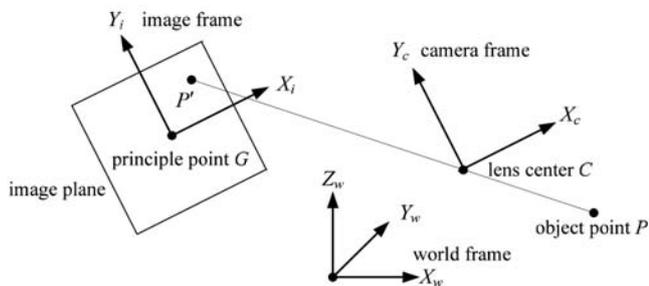


圖 2 不同座標系統示意圖

相機的內、外部參數可透過相機校正的步驟得到，而相機校正的原理都在於先建立世界座標系統中的三維空間點 \$(x_w, y_w, z_w)\$ 轉換至像素座標系統上二維平面點 \$(x_i, y_i)\$ 的數學模式，無論是利用前述之透視投影法或其他假設之函數。其次是拍攝一系列校正板（或其他已知空間中相對位置的物體）的照片。理論上校正板的各點（或其他已知空間中相對位置的物體）在影像座標中仍要維持某種對應的關係，藉由調整數學模式中的各參數值使成像平面所得之影像座標最佳化，亦即成像座標與假設之數學理論結果最接近。至於參數最佳化的方法又可分為：線性最小平方法^[2,3]與非線性最佳化方法^[4,5]兩大類。

圖樣識別

影像量測是根據物體變化前、後兩張影像的相對位置分析物體表面的位移場，其中一個重要的關鍵便是要識別出所欲探討之量測點在變形前、後兩張影像中的位置。搜尋影像中特定物的技術稱為圖樣識別（pattern recognition），使用者必須先提供參考影像（reference image）所欲搜尋的圖樣，影像分析程式再自動追蹤此標的圖樣在目標影像（target image）中的位置。文獻上對於圖樣識別常見的四種方法分別是：樣板匹配法（template matching）；統計分類法（statistical classification）；語句或結構匹配法（syntactic or structural matching）；類神經網路（neural network）^[6]。

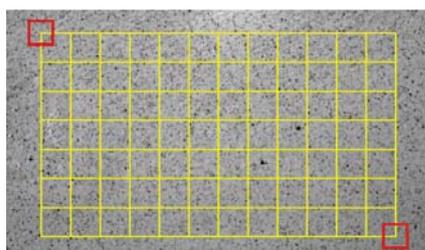
一般在結構監測上常用的影像識別多為樣板匹配法，若只需追蹤某些特定點位，則可在待測物之特定點位貼上規標，由影像分析程式自動追蹤目標影像上規標所在位置^[7,8]。若欲得到全域的分佈圖，文獻上常見的方式為數位影像相關係數法（digital image correlation method）^[9-11]。對於給定的參考影像與目標影像，數位影像相關係數法首先將參考影像劃分為 \$M \times N\$ 的區間（區間的大小可由使用者自行決定），圖中的格點即為所欲探討的量測點。其次為了追蹤參考影像上特定量測點 \$P\$ 在目標影像上的位置，在此選擇了矩形的子集合（subset）作為比對的目標（template），且子集合的形心恰落於 \$P\$ 點之上，如圖 3(a) 中的左上方之方格所示。利用矩形子集合取代原先的觀察點作為比對目標的原因在於一方面較於區分不同目標之間的差異；另一方面可以達到次像素的精確度。

參考影像上的子集合經過變形（含平移與旋轉）之後在目標影像上的位置與形狀可能改變，如圖 3(b) 與 3(c) 所示。若子集合夠小，則可假設子集合為均勻變形，亦即變形梯度為常數。數位影像相關係數法即是在目標影像上搜尋某一子集合，並找出一組變形向量 \$D\$ 使子集合在參考影像與目標影像之間的相關係數最大，其中影像相關係數之定義如下^[12]：

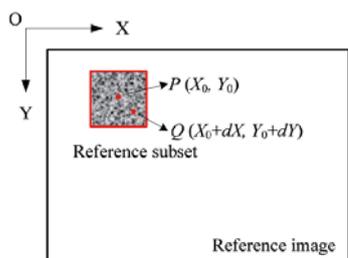
$$C = \frac{\sum_{s \in S, s' \in S'} [I_0(s) I_d(s')]}{\sqrt{\sum_{s \in S} I_0^2(s) \sum_{s' \in S'} I_d^2(s')}} \quad (4)$$

上式中 \$S\$ 代表參考影像上之子集合區域（subset），\$S'\$

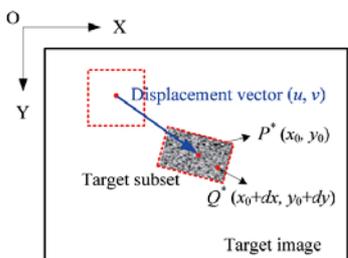
代表目標影像上之子集合。而 I_0 與 I_d 分別代表參考影像與目標影像之數位影像灰階值函數。對於任一小區域而言，若所假設的變形向量 \mathbf{D} 為最佳解，那麼這將會使 (4) 式中的 $C(\mathbf{D})$ 值為最大值，此時之 S' 形心即為所求。而為了讓各子集合具備足夠的特徵進行圖樣識別，通常實驗進行前會在待測物表面噴上顆粒漆或繪製任意不規則圖案，如圖 3(a) 所示。



(a) 參考影像上之區間



(b) 參考影像上之子集合



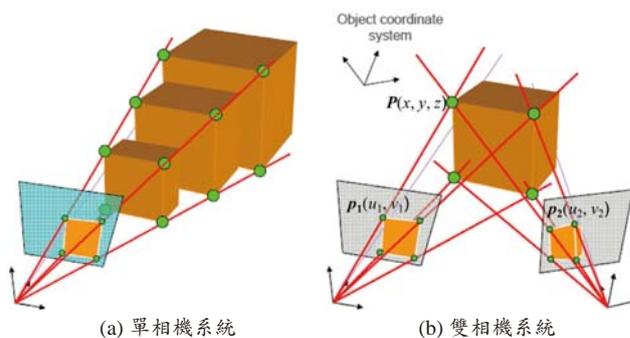
(c) 目標影像上之子集合

圖 3 數位影像相關係數示意圖

三角定位

在未知待測物與相機之間的距離下，吾人無法僅由單一相機影像以及方程式 (1) 決定物體的尺寸或點位空間資訊。以圖 4(a) 為例，不同尺寸但外觀相似的待測物在不同距離下所得之影像大小相同。然而若使用雙相機配合三角定位，則可決定待測物在空間的點位資訊或尺寸，如圖 4(b) 所示。所謂的三維影像量測係使用兩台以上的相機拍攝目標物，再藉由三角定位計算目標物在空間中的座標。以圖 4(b) 為例，若 P 點在兩台相機所得影像上之影像座標 $p_1(u_1, v_1)$ 與 $p_2(u_2, v_2)$ 為已知，則利用三角定位可以決定 P 點在空間中的座標 (x, y, z) 。

然而使用三角定位必須滿足兩個假設：首先，兩台相機的相對位置以及角度必須為已知，這些參數可透過相機校正步驟得到。其次， P 點在左右相機所得之兩張影像中的對應點位（即 p_1 與 p_2 ）必須正確，此一步驟可利用前述圖樣辨識達成。最後，利用三角定位公式或求解共線可得方程式可得物體在空間中之座標^[13-15]。



(a) 單相機系統 (b) 雙相機系統

圖 4 單相機與雙相機系統示意圖

應變計算

在眾多的結構監測項目中，除了位移之外，應變亦是一項極為重要的參數。原因在於判斷材料的破壞與否，一般係利用應變或應力張量代入不同的破壞準則加以檢核。若利用影像量測定出待測物表面於影像上的格點在變形前、後的空間座標，便可利用點位的座標計算出各點位對應的位移向量，再進一步由位移向量計算應變張量。

由連體力學可知 Green-Lagrange 應變與位移之間的關係式如下^[16]：

$$\epsilon_{jk} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \quad (5)$$

上式中 ϵ_{jk} 為二階應變張量 (strain tensor)，而 u_i 與 x_i 分別為位移向量與變形後的座標軸，而採用 Green-Lagrange strain 的主要原因是此種應變定義不受微小變形的限制。由於影像量測只能得到離散觀測點的位移向量，並無位移場的連續解析式，故無法按照方程式 (5) 的定義以偏微分計算應變張量，只能藉由數值的方式計算各觀測點位上的應變。結構監測中常見的應變計算方式為有限差分與有限元素，前者僅適用於規則點位，後者可應用於不規則點位。若採用圖 5(a) 所示規則點位為例，假設所有點位 x 向之間距均為 Δx ，則 A 點的之 x 向應變可按有限差分計算如後^[17]：

$$\epsilon_{xx}|_{x=A} = \frac{\partial u}{\partial x}|_{x=A} = \frac{u(A+\Delta x) - u(A-\Delta x)}{2\Delta x} = \frac{u_2 - u_1}{x_2 - x_1} \quad (6)$$

另一方面，若採用有限元素的方式計算應變，以平面線性等參元素 Q4 為例，其對應之應變可利用下式進行計算^[18]：

$$\boldsymbol{\epsilon} = \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial y \\ \partial/2\partial y & \partial/2\partial x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \partial \mathbf{u} = \partial \mathbf{N} \mathbf{d} = \mathbf{B} \mathbf{d} \quad (7)$$

其中 \mathbf{u} 與 \mathbf{d} 分別代表位移場向量與節點位移向量， \mathbf{N} 為形狀函數矩陣。

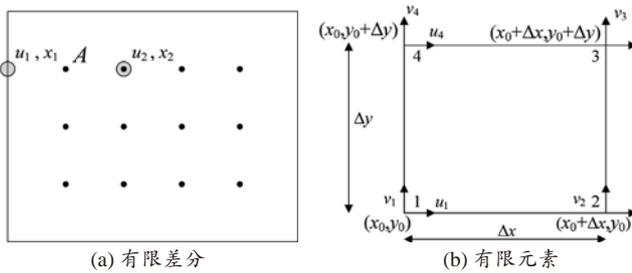


圖 5 應變計算方式示意圖

裂縫偵測

混凝土表面裂縫監測牽涉到兩個層面，亦即為裂縫偵測 (crack detection) 及裂縫診斷 (crack diagnosis) 兩個部分。裂縫偵測在於依據影像的形態特徵，利用敏適裂縫偵測之準則，用以確認結構物表面是否有裂縫存在，而非汙漬或其他黏貼物。而裂縫診斷則必須在裂縫偵測的結果確定後，才可進行後續裂縫特徵的計算，如量測裂縫的長度、寬度、方向、深度、間距等特徵。

文獻上利用影像處理技術進行裂縫偵測一般是以梯度運算偵測邊緣線 (諸如 Canny 法與 Sobel 法) 為主，然而此種方法的正確率普遍無法達到 80% 以上^[19,20]，或多或少仍需藉由人為方式輔助系統進行裂縫偵測的確認。此外，傅立葉或小波轉換法^[21,22] 以及利用影響特徵配合統計的方式^[23,24] 也可當作裂縫偵測的工具。綜合而言，以梯度運算為基底的裂縫偵測方法容易受到混凝土表面汙漬或其他黏貼物影響而產生誤判，以影像灰階值為基底的方法儘管能降低表面汙漬或其他黏貼物的影響，但對於既有裂縫則無法識別。目前文獻上已有一些研究利用類神經網路等人工智慧的方法來提升裂縫偵測正確度^[25]。

裂縫特徵

利用方法偵測出影像中的待測物表面裂縫後，一般可搭配影像形態學 (image morphology) 和影像分割 (image segmentation) 等方式進行裂縫特徵量化分析^[26]。目前利用影像技術計算裂縫長度、面積、密度等特徵的研究已相當成熟，唯獨裂縫寬度的計算仍存在爭議。原因在於裂縫寬度的定義並不明確：理論上裂縫寬度係指在垂直裂縫中心線方向上的距離，然而對於歪斜、分叉的裂縫，裂縫中心線並不容易定義；兼以影像的最小單位為像素，因此當裂縫寬度非像素整數倍數時都可能引致影像分析的誤差^[27]。

然而就混凝土構件而言，表面裂縫寬度往往是結構健康診斷的重要指標。為提升裂縫寬度計算的精確度，目前較可行的方式是將裂縫分段切割，把裂縫離散成多段來進行寬度的計算。將所有識別出的裂縫計算其中心線與水平軸的夾角，再將裂縫旋轉至水平向或是垂直向後計算寬度。另一替代的方案是取裂縫面積除以裂縫長度可得裂縫的平均寬度^[28]。

影像量測之應用

本研究根據前述理論建立對應的影像量測與分析系統，系統硬體主要由兩台單眼數位相機組成，軟體則主要是利用 Matlab 平台進行開發，再搭配相關既有的程式庫 OpenCV^[29] 與 Camera calibration tool box^[30]。並以靜態拉伸實驗、振動台實驗與混凝土試體軸壓實驗進行驗證，將影像量測的結果與應變計、位移計所得結果相比較。

靜態拉伸實驗

本實驗利用萬能實驗機進行鋁板拉伸測試，並將量測的結果與傳統應變計比較，測試三維影像技術在應變量測上之成效。實驗方式是以萬能試驗機在一個鋁製矩形平板兩端施加靜態 (慢速) 軸向拉力，平板的一面將噴上顆粒漆作為雙相機拍攝的待測物，俾利進行影像應變量測；另一面則是以貼上六組三軸應變計量測應變，再與影像量測結果相比較。實驗方式是利用萬能試驗機以拉-停的方式施加增量之軸向拉力，直到試體斷裂為止。實驗過程以位移控制，由位移零緩慢增加至位移為 6 cm，拍攝張數與試體拉伸位移的關係列於表 1。

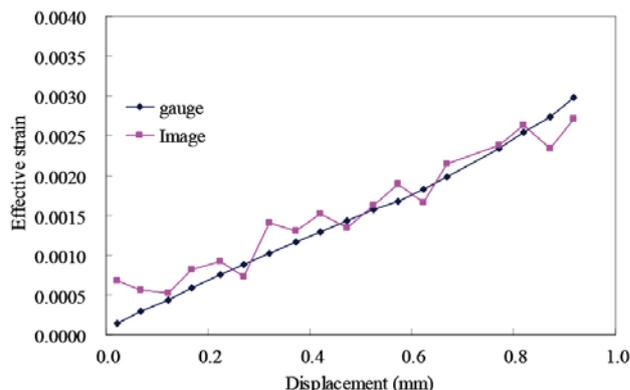
拉伸實驗結束再將相機所得影像輸出至電腦進行分析，同時將影像中平板試體之量測範圍細分成 40×20 的網格區間，俾利進行全域的位移場與應變場計算。由於在比較影像量測與應變計之結果時，無法確定應變計貼附處是否恰有對應的區間格點，故在影像分析中取接近應變計貼設位置的小區域，取 2×2 區間影像量測所得應變的平均值再與應變計量測值比較。此外，由於應變計的貼設方向不一定能完全符合拉伸方向，故本研究是將應變計與影像量測所得的平面應變皆換算成有效應變進行比較。礙於篇幅所限，本文僅列出一組應變計與對應該位置影像分析所得之結果。圖 6 (a) 與 (b) 分別為平板在拉伸位移達到 1 mm 與 10 mm 前分別利用應變計與影像量測所得的應變值，從圖 6(a) 中可以看到兩種方式所得的結果大致相符皆為線性的趨勢，唯影像量測的結果會約略在應變計所得的結果上、下跳動。圖 5(b) 則顯示應變計在平板有效應變達到 0.02 時開始陸續脫落，無法再提供相關數據；但影像量測不受到此限制，且在平板達到拉伸破壞之前皆可持續量測，而最終平板的破壞形式亦與數位影像計算的結果相符合（如圖 7 所示）。值得一提的是隨著平板拉伸至破壞，鋁板表面的噴漆已有脫落的情況，此時影像量測方法在執行影像識別的準確度已下降，故此時局部的應變值已非正確。

表 1 平板拉伸實驗規劃

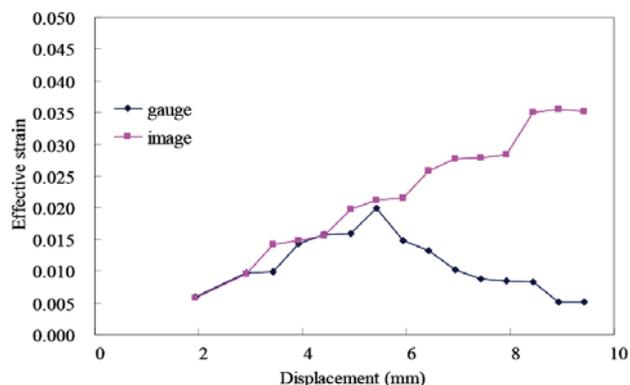
拉伸位移	拍照位移	拍攝數量 (張)
0mm ~ 1mm	每 0.05 mm 拍攝照片	20
1mm ~ 10mm	每 0.5 mm 拍攝照片	18
10mm ~ 60mm	每 2.5 mm 拍攝照片	20

振動台實驗

本實驗目的在於測試在不產生殘影以及訊號交疊的狀態下，數位相機攝影模式的影像量測所能追蹤的最大振動頻率為何。同時藉由影像量測的位移資訊與位移計 (LVDT) 的結果相比較，探討影像量測結構位移動態反應的精確度。實驗所規劃的進行方式是將鋁板安裝於振動台上，並在給定的振幅下令振動台進行簡諧運動，振動台的運動方向與平板所在平面垂直。兩台單眼數位相機採攝影模式記錄鋁板在振動下之反應。每秒的掃描頻率為 30 次 (30p)，每次錄影時間為十秒。

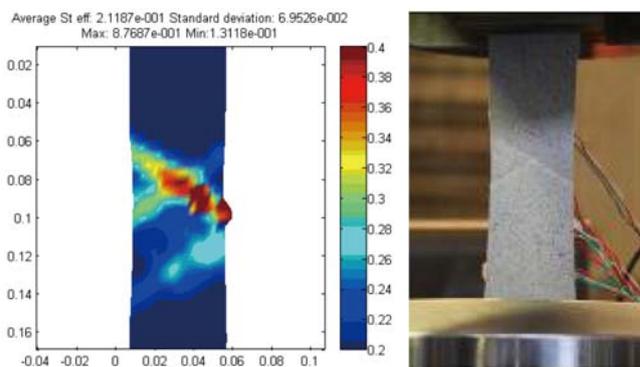


(a) 拉伸位移達到 1 mm 前



(b) 拉伸位移達到 10 mm 前

圖 6 鋁板拉伸實驗之應變結果



(a) 破壞時影像量測所得的應變場 (b) 破壞時的左相機所得之影像

圖 7 鋁板達到拉伸破壞時的應變場分佈與實際影像

圖 8(a) 至 (d) 為鋁板上特定點位在不同振幅與不同頻率的面外實驗中的運動歷時圖。此處選取的特定點位其一為位移計所在的點位，俾利影像量測的結果與位移計量測的結果相比對（圖中註記為 Image measurement 1）；其二選擇靠近振動台的點位（鋁板底部），影像量測的結果可與振動台輸入的振動訊號相比對（圖中註記為 Image measurement 2）。從圖 7 中可以看出：兩個影像量測點位與位移計所得之歷時曲線頻率大致相同，而靠近振動台之第二點位的振幅在振動

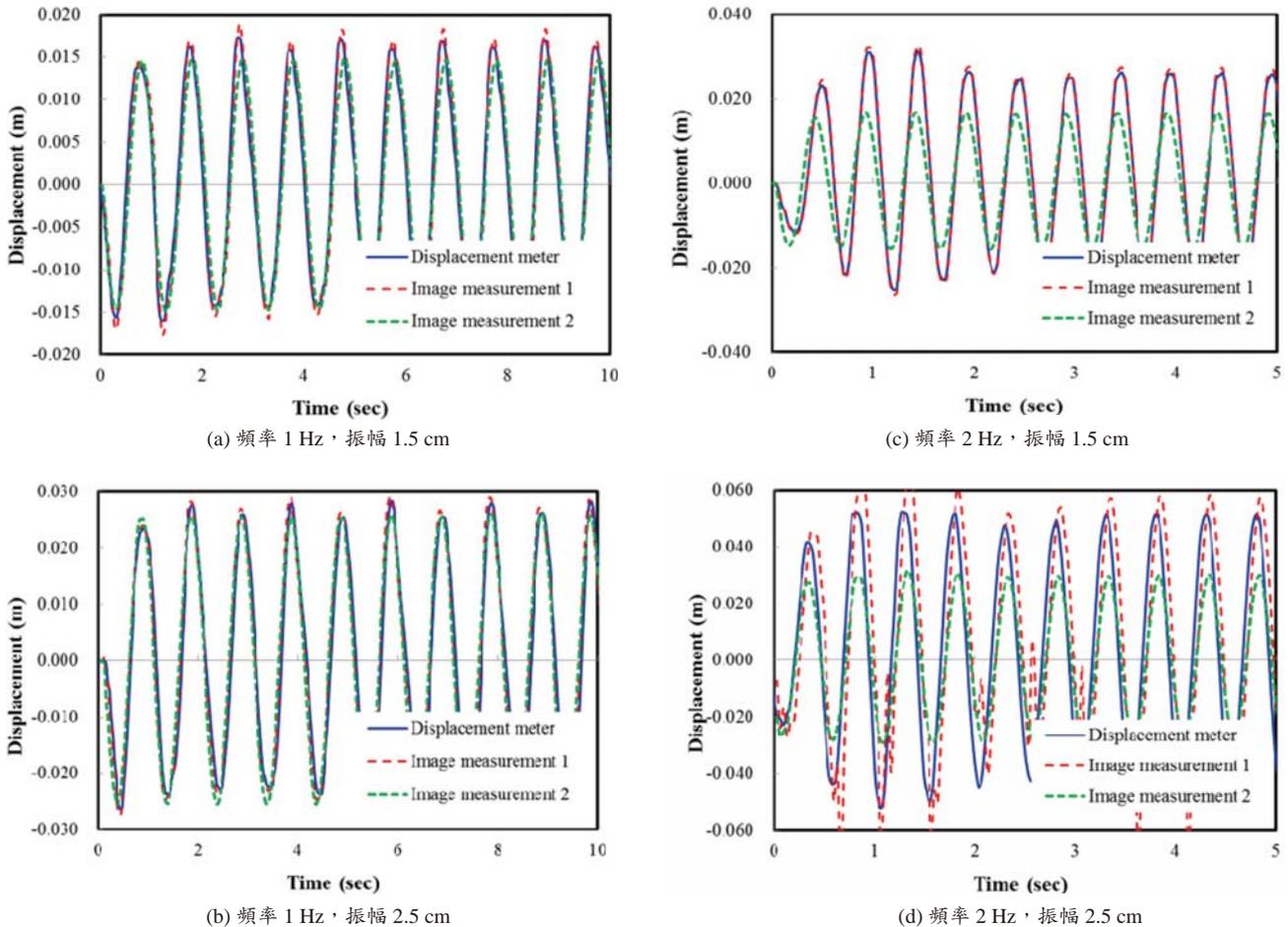


圖 8 平板面外運動特定位點之位移歷時圖

歷時中大致保持定值，但位移計所在點位（即第一點位）的振幅在振動歷時中並非定值而是略有高低。原因在於鉛板的變形除了隨振動台的剛體運動之外，還有因動力效應（慣性力、阻尼力和恢復力）引致之自然變形的部份。且結構在簡諧載重作用下達到穩態反應之前的瞬態反應，除了與簡諧載重的頻率有關之外，也與結構本身的自然振動頻率以及初始條件有關，因此其他點位的振動歷時反應會與靠近振動台點位的反應不盡相同。其次，影像量測在第一點位所得之振幅約略高於位移計量測所得之振幅，且影像量測與位移計兩者之振幅差異在頻率與振幅增大時更為明顯。

混凝土試體軸壓試驗

本研究採用光學影像強度相減法進行裂縫偵測，比較不同時期的光學影像可發現在裂縫產生處會伴隨灰階值的改變，可據此判定裂縫位置。此法的優點在於可輕易克服試體表面既有裂縫或汙漬造成的裂縫誤判，然而由於試體在監測過程中可能因加載或其他因素而偏離原位，故必須影像重合（image registration）的方式先行校正載進行影像強度相減。透過影像強度變化初步判定裂縫之後，再利用影像處理的方式移除其他可能的雜訊（如混凝土剝落、漆斑等等），整體的步驟包含：灰階化、影像疊合、影像相減、閉合連接、二值化、刪除顆

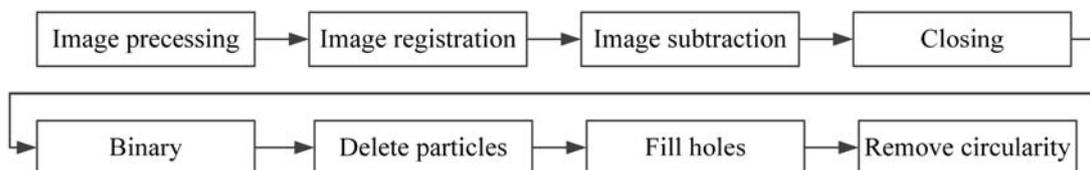
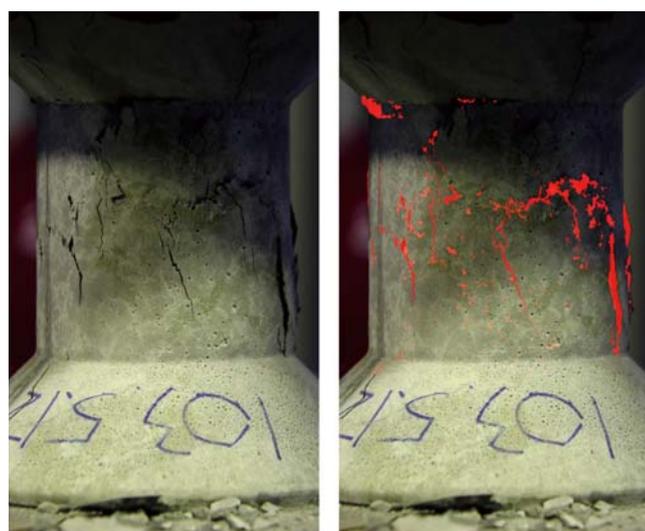


圖 9 裂縫影像分析流程

粒、物件連通、近圓捨去等，用以識別出影像中裂縫，關於裂縫偵測的整體流程如圖 9 所示。

實際將實驗所得之混凝土試體裂縫影像利用本研究開發之裂縫偵測程式進行測試：圖 10(a) 為原始的裂縫影像，圖 10(b) 則是將識別出的裂縫（以紅色標註）重新繪於影像之上。比較原始裂縫的光學影像可發現本研究所提之裂縫偵測程式具備相當高的裂縫鑒別度，但段段於若干試體上陰影部分的裂縫，則因影像像素強度變化不明顯，故無法正確識別。



(a) 原始裂縫影像

(b) 程式識別之裂縫

圖 10 裂縫偵測影像測試比較

影像量測遭遇的問題

相較於傳統感測器，目前影像量測所得之影像仍難做到即時線上的全域性位移場或應變場計算，主要是因為圖樣識別等步驟計算量過大。目前的克服方式包括將部分影像分析程式採用平行處理^[31]或改以嵌入式晶片^[32]取代，但在工程實務上仍有相當大的改善空間。

影像量測在結構監測應用上的最大限制在於相機必須在量測過程中維持不動，一旦相機移動便需要重新進行校正工作。因此如何確保相機在實驗量測過程中保持不動，避免因為戶外強風、腳架不穩固、非預期的碰撞等因素，造成相機偏移導致後續影像分析的嚴重誤差是亟待克服的問題。尤其對於結構物在動力下（特別是地震）的反應，如何突破相機在影像監測過程中確保不動的限制，是影像量測於結構監測之應用得以推廣普及的關鍵。目前較為可行的方式是透過固定的參考點位，隨時進行校正。但此法仍存在諸多限制。

對於待測物應變的計算，利用誤差分析可知有限差分法在應變計算上的誤差 $\sigma_\epsilon = 2\sigma_s/\Delta$ ；而採用有限元素法 Q4 元素在應變計算上的誤差 $\sigma_\epsilon = \sqrt{2} \sigma_s/\Delta$ 。其中 σ_s 為影像量測在位移計算上的誤差， Δ 為應變計算時所選取的網格尺寸^[33]。從誤差分析的結果可看出：當網格越細緻，應變計算的誤差量越大。然而工程實務上，吾人希冀得到越精緻的應變場分佈，所需的網格就需越細緻。因此如何更正確的計算應變，不會在網格細緻化的過程中引進過大誤差也是影像量測的課題。此外，前述有限差分和有限元素兩種由位移計算應變的數值方法，在待測物剛體旋轉過程中會引致虛擬的應變^[34]。可行的替代方案是利用線性轉換法^[35]或利用逆向運動的觀念^[36]，由待測物的變形資訊中正確識別剛體運動與自然變形。

目前利用光學影像來記錄混凝土結構表面的狀況，再以影像處理的技術分析表面裂縫各項特徵的技術已逐漸成熟。然而利用影像技術進行裂縫監測，最終只能得知混凝土表面裂縫的存在以及對應的特徵。吾人最關心的應該還是結構安全與否，故可否由裂縫特徵推估其對結構生命週期的影響是吾人仍需努力克服的問題。理論上裂縫特徵與混凝土構件之承載狀態（應力組合）息息相關，不同的應力組合可能會引致不同的破壞模式，導致伴隨不同的裂縫特徵（諸如裂縫角度與間距）。故裂縫的特徵與應力狀態的關係也是值得探討。

結論

數位影像量測的意義並非在於取代傳統的量測方式，而是提供另一種量測方法的選擇。目前利用相機或其他影像擷取儀器進行非接觸式的全域性量測，是結構監測上日益可行與普及的方式之一，且可有效地應用在各種不同規模與尺寸的工程實驗，特別對於存在大變形或相對高危險的實驗，影像量測可以安全且有效觀察變形與應變場。

本研究自行開發之影像量測系統從實際測試中已證實影像量測技術可適用在曲面與平面試體，整體測試顯示影像量測在位移計算上可以精確到次像素的等級，但對於高頻的運動可能會因攝影模式而喪失部分解析度。應變量測的結果與傳統應變計所得結果的相對誤差可控制在 5% 之內，且應變量測範圍更廣為並可得全域應變分佈。而在計算裂縫特徵的測試方面，即使面對連續轉變的曲線或分叉的線條，分析軟體基本上也可正確處理，並將誤差控制在像素等級。

誌謝

本研究承蒙行政院國家科學委員會贊助研究經費，計畫編號為 NSC 99-2221-E-027-042 -MY3 與 NSC 102-2221-E-033-038，特此致上謝忱。

參考文獻

1. Faugeras, O., *Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint*, MIT Press, London (1993).
2. Sobel, I., "On calibrating computer controlled cameras for perceiving 3-D scenes," *Artificial Intelligence Journal*, 5(2), pp. 184-198 (1974).
3. Wong, K. W., "Mathematical formulation and digital analysis in close-range photogrammetry," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 41(11), pp. 1355-1373 (1975).
4. Hartley, R. I., "An algorithm for self calibration from several views." *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 94)*, pp. 908-912 (1994).
5. Heikkilä, J., and Silvén, O., "A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction," *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 97)*, pp. 1106-1112 (1997).
6. Antani, S., Kasturi, R., and Jain, R., "A survey on the use of pattern recognition methods for abstraction, indexing, and retrieval of images and video," *Pattern Recognition*, 35(4), pp. 945-965 (2002).
7. Lee, J. J. and Shinozuka, M., "Real-time displacement measurement of a flexible bridge using digital image processing techniques", *Experimental Mechanics*, 46(1), pp. 105-114 (2006).
8. Shan, B. H., Zheng, S. J., and Ou, J. P., "Free vibration monitoring experiment of a stayed-cable model based on stereovision," *Measurement*, 76, pp. 228-239 (2015)
9. Chu, T. C., Ranson, W. F., Sutton, M. A., and Peters, W. H., "Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics," *Experimental Mechanics*, 25(3), pp. 232-244 (1985).
10. Sutton, M. A., Cheng, M., McNeill, S. R., Chao, Y. J., and Peters, W. H., "Application of an optimized digital correlation method to planar deformation Analysis," *Image and Vision Computing*, 4(3), pp. 143-150 (1988).
11. Sutton, M. A., Bruck, H. A., and McNeill, S. R., "Determination of deformations using digital correlation with the Newton-Raphson method for partial differential corrections," *Experimental Mechanics*, 29(3), pp. 261-267 (1989).
12. Sutton, M. A., McNeill, S. R., Helm, J. D., and Chao, Y. J., "Advances in two-dimensional and three-dimensional computer vision," *Photomechanics*, 77, pp. 323-372 (2000).
13. Helm, J. D., McNeill, S. R., and Sutton, M. A., "Improved three-dimensional image correlation for surface displacement measurement", *Optical Engineering*, 35(7), pp. 1911-1920, (1996).
14. Sheng, C., Dawei, T., Guozheng, L., and Juan, Y., "Fusing range and 2-D images in multi-sensor for robot vision," *IN TENCON'02. Proceedings of IEEE Region 10 Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering*, 1, pp. 565-568 (2002).
15. Hartley, Z., and Zisserman, A., *Multiple View Geometry in Computer Vision*, 2nd edit., Cambridge University Press., Singapore, (2003).
16. Holzapfel G. A., *Nonlinear Solid Mechanics: A Continuum Approach for Engineering*. Wiley, Chichester (2000).
17. Yang, Y. S., Huang, C. W., and Wu, C. L., "A simple image based strain measurement method for measuring the strain fields in an RC wall experiment," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 41(1), pp. 1-17 (2012).
18. Yoneyama, S., "Smoothing measured displacements and computing strains utilising finite element method," *Strain*, 47(2), pp. 258-266 (2011).
19. Yu, S. N., Jang, J. H., and Han, C. S., "Auto inspection system using a mobile robot for detecting concrete cracks in a tunnel," *Automation in Construction*, 16(3), pp. 255-261 (2007).
20. Kabir, S., Rivard, P., He, D.C., and Thivierge, P., "Damage assessment for concrete structure using image processing techniques on acoustic borehole imagery," *Construction and Building Materials*, 23(10), pp. 3166-3174 (2009).
21. Mallat, S., and Zhong, S., "Characterization of signals from multiscale edges," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 7(14), pp. 710-732 (1992).
22. Chandan, C., Sivakumar, K., Masad, E., and Fletcher, T., "Application of imaging techniques to geometry analysis of aggregate particles," *Journal of Computing in Civil Engineering*, 18(1), pp. 75-82 (2004).
23. Hutchinson, T. and Chen, Z., "Improved image analysis for evaluating concrete damage," *Journal of Computing in Civil Engineering*, 20(3), pp. 210-216 (2006).
24. Abdel-Qader I., Pashaie-Rad, S., Abudayyeh, Q., and Yehia, S., "PCA-based algorithm for unsupervised bridge crack detection," *Advances in Engineering Software*, 37(12), pp. 771-778 (2006).
25. Jahanshahi, M. R., Masri, S. F., Padgett, C. W., and Sukhatme, G. S., "An innovative methodology for detection and quantification of cracks through incorporation of depth perception," *Machine vision and applications*, 24(2), pp. 227-241 (2013).
26. Litorowicz, A., "Identification and quantification of cracks in concrete by optical fluorescent microscopy," *Cement and concrete Research*, 36(8), pp. 1508-1515 (2006).
27. Chen, Z., and Hutchinson, T. C., "Image-based framework for concrete surface crack monitoring and quantification," *Advances in Civil Engineering*, 2010.
28. Nishikawa, T., Yoshida, J., Sugiyama, T., and Fujino, Y., "Concrete crack detection by multiple sequential image filtering," *Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 27(1), pp. 29-47 (2012).
29. Intel Corporation, "Open Source Computer Vision Library," (OpenCV), web page: <http://www.intel.com/research/mrl/research/opencv>, (accessed 2009).
30. Bouguet, J. Y., *Camera Calibration Toolbox for MATLAB*, Web page: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html, (accessed 2009).
31. Tong, X., Furukawa, T., and Taheri, S., "Speed enhancement of displacement and strain field measurement using graphics processing unit," *IASME 2012 Rail Transportation Division Fall Technical Conference*, pp. 37-44 (2012).
32. Lin, C., Tai, J. C., and Song, K., "Traffic monitoring based on real-time image tracking," *Robotics and Automation, Proceedings. ICRA'03. IEEE International Conference*, 2, pp. 2091-2096 (2003).
33. 蔡瑞豐, 「雙相機系統於應變量測之應用」, 碩士論文, 中原大學土木工程研究所, 桃園 (2011)。
34. Jagannathan, D. S., Christiano, P. P., and Epstein, H. I., "Fictitious strains due to rigid body rotation," *Journal of the Structural Division*, 101(11), pp. 2472-2476 (1975).
35. Han, J. Y., "Noniterative approach for solving the indirect problems of linear reference frame transformations," *Journal of Surveying Engineering*, 136(4), pp. 150-156 (2010).
36. Ting, E. C., Shih, C., and Wang, Y. K., "Fundamentals of a vector form intrinsic finite element: Part II. plane solid elements," *Journal of Mechanics*, 20(2), pp. 123-132 (2004).

