

# 基於影像量測之模態 萃取技術之探討與比較

國立臺灣大學 / 周肇昱 博士生、張家銘 副教授

結構健康監測 (Structural Health Monitoring, SHM) 的主要目標為<sup>[1]</sup>：

- (一)、了解結構的性能
- (二)、進行載重的評估
- (三)、損傷位置的偵測
- (四)、結構的損傷預警

其中，模態萃取為一常用的結構健康監測技術，用來識別結構動力特性參數。針對這些參數的長期觀察，如結構自然頻率、阻尼比及模態振形，能夠了解結構的狀態變化。透過感測器量測結構物的振動反應，能夠進而透過分析獲得該結構物之動力參數<sup>[2]</sup>。然而，在傳統的量測系統中，安裝的感測器往往為有線並且需要人工安裝於特定位置。這不但大幅提高了安裝的人力成本，且需要耗費許多時間。除此之外，大尺度結構可安裝感測器的範圍有限，也提高工程師於安裝時發生意外的風險。隨著科技進步，透過影像量測也可以捕捉結構振動反應。這不單解決了傳統量測系統的缺點，也因為由像素點取代感測器，大幅提高可捕捉的結構行為，將反應由離散轉為近乎連續。在本文中，三種基於影像量測萃取模態的方法將被介紹及比較。第一種，針對局部像素點強度透

過光流法 (Optical flow) 計算特定位置之振動反應<sup>[3]</sup>。該方法能夠有效達到傳統感測器的量測精度，並可進一步進行模態萃取。再者，透過超解析度成像原理 (Super-resolution imaging)<sup>[4]</sup>，利用雙線性像素擴增法，能夠將影像的準確度大幅提升，提供更精確的振動量測，也提供更精準的結構動力參數。最後，透過瑞茲金字塔 (Riesz Pyramid) 中影像相位進行振動放大技術<sup>[5]</sup>，能夠將影片中的振動反應放大，提供更精準的振動量測資訊。與前述兩種方法不同，該方法能夠捕捉近乎連續的模態振形。在本文中，將透過各方法之實際案例應用進行探討，並比較其各的使用限制及捕捉效果優劣。

## 一、方法介紹與應用

本章節將介紹三種影像量測方法及其應用，分別是

- (一)、利用局部像素點強度透過光流法計算特定位置之振動反應
- (二)、透過超解析度成像原理捕捉更精準之振動
- (三)、透過瑞茲金字塔 (Riesz Pyramid) 中影像相位進行振動放大技術

### (一)、光流法 (Optical flow)

光流法是利用物體運動時所造成相對於觀察者的像素強度變化來進行估算<sup>[3]</sup>。如圖 1 所示，當物體由座標  $(x,y)$  產生  $(\Delta x, \Delta y)$  之移動量時，其在拍攝的影像中將會造成該像素點強度變化。此變化為一漸變式的變化而非跳躍式改變，如圖中所示。透過這個變化的關係，可以間接計算出該像素點的移動量。

然而，使用單點像素做計算往往會造成許多誤差，像是因為物體移動後造成不同光影影響所造成的誤差。若假設該物體局部為剛體運動（點與點之間移動量一致），則可透過一重點區域 (Region of interest, ROI) 中多個像素點的光流變化，計算出該局部區域之振動反應。

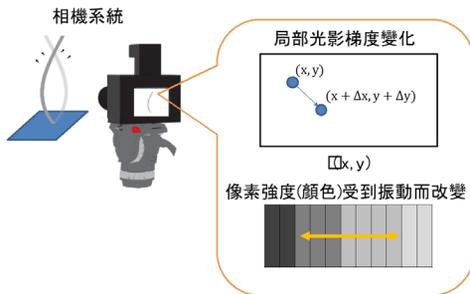


圖 1. 光流法示意圖

在實際案例應用中，光流法可用於捕捉一些幾何形狀不規則，抑或感測器無法安裝之結構桿件振動反應，進而了解該結構桿件的天然頻率。如圖 2 所示，透過高速相機拍攝待測結

構物，並利用影像處理技術萃取出重點區域，可成功捕捉到其振動歷時。其中歷時圖中藍色為柱頂之位移，紅色為柱子中部之振動反應。圖 3 則為透過柱頂之振動反應利用快速傅立葉變換所得的頻率反應。如圖所示，該柱子的第一模態自然頻率為 2.9 Hz。

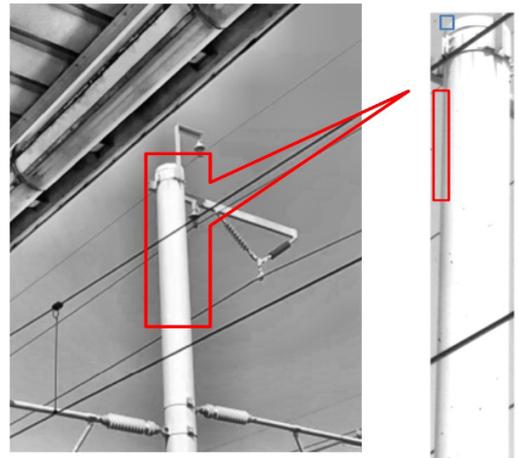


圖 2-a. 光流法之實際應用  
(左: 拍攝影像, 右: 重點區域)

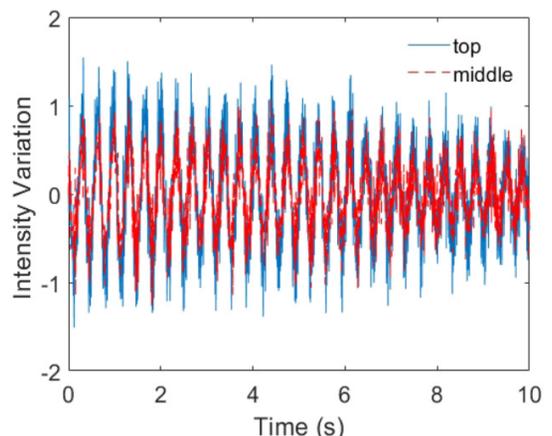


圖 2-b. 光流法之實際應用 (捕捉振動歷時)

## (二)、超解析成像 (Super-resolution imaging)

由於相機拍攝之影像為將連續的物體透過感光元件及相機本身轉換為離散的像素點。倘若僅利用像素點追蹤計算物體的移動量，則精度將受到像素點本身的限制，造成量測之位移呈現鋸齒狀，如圖 4-a 所示。若是將鄰近像素點間視為一雙線性關係，則可透過式 1 計算，如同光流法，超解析成像可針對局部重點區域進行使用以減少不必要之計算量。圖 5 為於國

家地震工程研究中心 (NCREE) 進行四層樓構架之振動台試驗。如圖所示，透過框選各樓層樓板與柱子接點，可利用超解析成像獲取各樓層振動歷時。圖 6 為利用該振動歷時所進行的模態識別。透過超解析成像所識別出的模態振型以及自然頻率皆與透過加速規量測所識別的結果一致，驗證了該超解析成像法捕捉振動反應的效能。

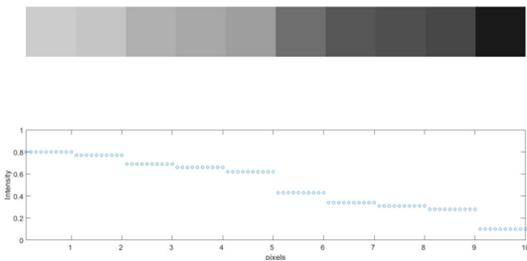


圖 4-a. 利用相機像素捕捉振動的超解析成像示意圖

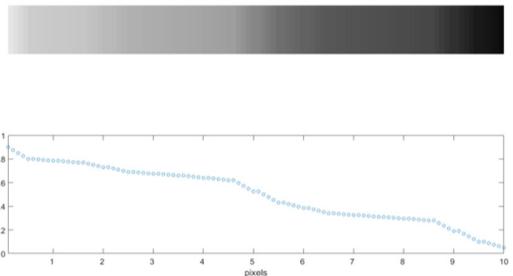


圖 4-b. 利用利用超解析成像捕捉振動的超解析成像示意圖

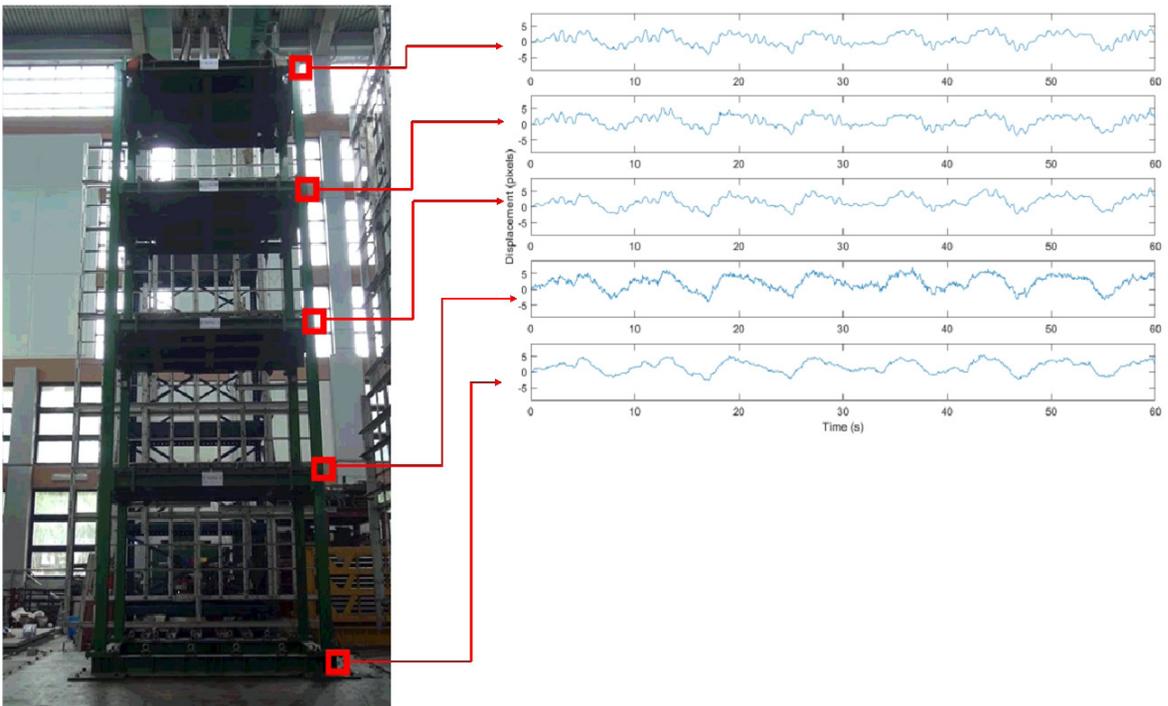


圖 5. 超解析成像之實驗驗證

$$f(x, y_1) \approx \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(Q_{11}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(Q_{21})$$

$$f(x, y_2) \approx \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(Q_{12}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(Q_{22})$$

$$f(x, y) \approx \frac{y_2 - y}{y_2 - y_1} f(x, y_1) + \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} f(x, y_2)$$

——(1)

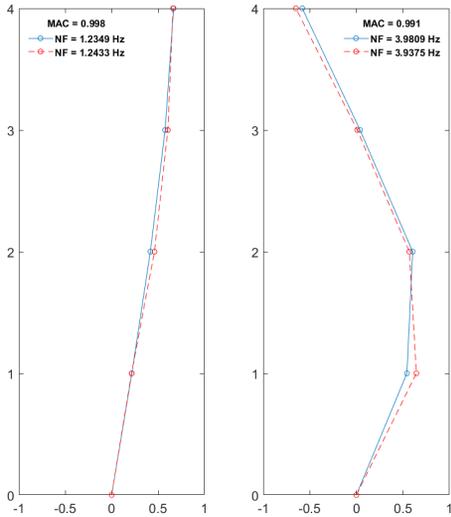


圖 6. 基於超解析成像與加速規量測之模態參數比較

### (三)、影像局部相位放大技術

#### (Phase-based motion magnification)

為了克服微小振動於影像中較難捕捉利用，Chen et al. [5] 研發一放大影像振動的方法。該方法首先利用瑞茲影像金字塔 (Riesz pyramid) 將影像拆解成不同層級的影像解析度與頻率帶寬，並將各層透過瑞茲轉換以計算各像素點之局部相位差。這些局部相位差歷時含有結構的動力特性，因此可透過頻率域隨機子空間識別 [6] 來萃取結構模態參數。最終，多層的識別結果需透過金字塔重組將之轉換為原始的影像空間中，完成全域的連續模態參數識別。

在實驗驗證中，以小型六層樓構架做敲擊試驗，如圖 7 所示。該圖說明了其局部相位差歷時可達到小於一像素點的精度，並且透過頻譜分析可獲得與加速規量測之結果相似，其中前三個模態分別為 1.64 Hz、5.22 Hz 以及 8.35 Hz。由於較高模態之反應超過相機可捕捉範

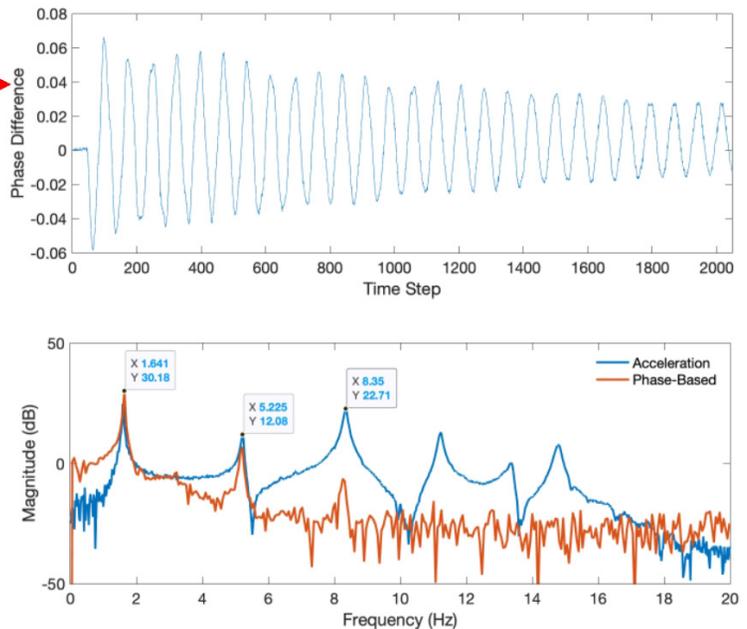
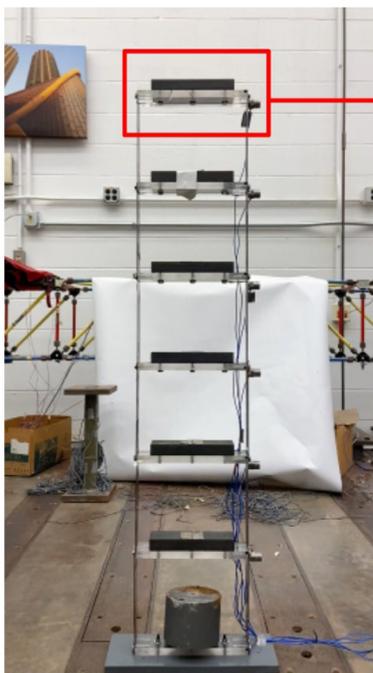


圖 7. 小型六層樓構架之振動反應及頻譜

圍，因此無法從圖中頻譜觀測。透過針對最高層次的影像金字塔進行局部相位放大技術，並將前三個模態反應分別放大 10 倍、30 倍及 50 倍，則可得模態振型如圖 8 所示。由於僅使用最高層次 (最低解析度) 之影像金字塔進行識別，其結果會因為影像缺少空間高頻率反應而模糊。然而從圖中仍然可清楚觀測出結構物的前三個連續模態振型。此外，識別的三個模態自然頻率分別為 1.73 Hz、4.85 Hz 以及 8.06 Hz，與加速規量測之結果吻合。

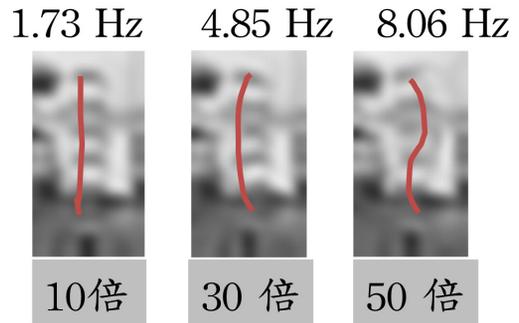


圖 8. 透過影像局部相位放大技術之模態參數識別

表 1. 三種影像量測之比較

比較項目	影像量測方法		
	光流法	超解析成像	局部相位放大技術
連續性	局部(離散)	局部(離散)	趨近連續
量測精度	低	高	高
相機配置	高	中	中
運算時間	低	中	高

## 二、優劣比較

表 1 為各方法針對不同項目的比較，其中分別針對量測的連續性、量測的精準性、相機配置的需求以及所需的運算時間做討論。從表中可知，相比於局部相位放大技術，光流法及超解析成像法僅能針對局部的區域做量測，而局部相位放大技術則可針對結構做全域的量測。就量測的精準度而言，雖然各方法皆能達

到小於一像素點的精度，使用超解析成像及局部相位放大技術仍然有較精準的振動量測。而針對相機的配置，由於光流法對於細微顏色變化較為敏感，因此其相機配置需求較其餘兩者高。然而，若要進行快速的量測捕捉，則利用光流法可以最有效率的獲得可接受精度的振動量測。

### 三、結語

透過影像量測技術可進行影像的動態反應捕捉，可量測一些不易安裝感測器或不易到達之結構桿件及區域。在本文中，分別針對局部光流法、超解析成像及影像相位放大技術進行介紹與比較。三種方法皆能擁有小於一像素點的精度，然而僅有局部相位放大技術能做全域量測，其餘的僅能針對局部重點區域進行量測。透過影像量測，雖然量測值與傳統量測單位不同，然而仍可獲得如同加速規反應般的動態歷時，並萃取出離散的模態振形。透過實驗驗證該振形與加速規之結果一致，表示其方法之可靠性及精確性。再者，透過局部相位放大技術可獲得近乎連續之模態振形，了解更全面的結構動力特性。若以實際應用而言，可使用運算較為快速的光流法作為初步結構健康的快篩，爾後透過超解析成像及局部相位放大技術了解結構細部的動力特性。

### 參考資料

- [1] J. Kim, System identification of civil engineering structures through wireless structural monitoring and subspace system identification methods, Ph.D. thesis, University of Michigan: Ann Arbor, MI, (2011).
- [2] J.M.W. Brownjohn, Ambient vibration studies for system identification of tall buildings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 32 (2003) 71-95.
- [3] A. Singh, Optic flow computation: a unified perspective, IEEE Computer Society Press 3 (1991).
- [4] D. Capel and A. Zisserman, Computer vision applied to super resolution, *IEEE Signal Processing Magazine* 20(3) (2003) 75-86.
- [5] J.G. Chen, N. Wadhwa, Y.J. Cha, F. Durand, W.T. Freeman, and O. Buyukozturk, Modal identification of simple structures with high-speed video using motion magnification, *Journal of Sound and Vibration* 345 (2015) 58-71.
- [6] C.M. Chang and J.Y. Chou, Modal tracking of seismically-excited buildings using stochastic system identification, *Smart Structures and Systems* 26(4) (2020) 419-433.