

結合三點透視相機姿態估算法與光流法於結構振動量測

江偉軒* 蔡承恩* 黃心豪*¹

*國立臺灣大學 工程科學及海洋工程學系

關鍵詞: 光流法、三點透視法、結構損傷定位、相機飄移補償、非接觸式量測、結構系統識別

摘要

基於振動的結構健康監測 (SHM) 被廣泛用於評估土木基礎設施安全性和完整性的重要方法。在傳統影像振動量測中，最主要限制相機在測量過程中必須保持靜止。然而，本研究成功地克服了這項限制，提出了一種利用可移動相機進行振動測量的新算法，有效克服了相機運動引起的訊號漂移問題。本文提出的算法包括三個模塊：光流法、相機姿態評估和運動補償。通過合成圖像的驗證實驗表明了準確的相機姿態評估及有效漂移訊號抑制。利用移動式相機以及本文提出算法提取了框架結構的動態特性。透過以下解決問題：(1) 準確評估尺度因子 (2) 補償漂移訊號，並進行實驗驗證。結果顯示了所提方法之功效和潛在應用前景。最後，本研究通過損傷定位實驗展示了實際應用的可行性。

¹ 聯絡作者 黃心豪 (hsinhaouhuang@ntu.edu.tw)

前言

在過去三十年，各國投入大量資源研究新興綠能產業，以減少對化石燃料的依賴。風能作為百分之百乾淨的可再生能源，被視為對環境友善且具有極高經濟價值。全球風能裝置容量快速增長，尤其是在台灣，其風能潛力極佳，但也面臨颱風和地震等天災挑戰。為了克服結構穩定性問題，結構健康監測技術變得至關重要，尤其是影像量測技術的應用。傳統的感測器如加速度計、應變計和光纖布拉格光柵感測器，通常用於結構健康監測(SHM)。然而，這些感測器的購買和安裝成本可能很高，需要大量的時間和精力。此外，它們容易磨損，並可能損壞輸電線路。

為了克服這些挑戰，研究人員提出了基於視覺的結構健康監測(SHM)方法。相較於傳統接觸式量測，影像量測具有非接觸式、低成本與全域量測之優勢。然而在目前的應用中，相機的穩定性是一個關鍵問題。相機必須在整個量測過程中保持固定，因為任何相機的移動都可能導致重新進行校正工作，進而影響影像分析的準確性。因此，如何確保相機在實驗量測過程中保持穩定是一個亟待解決的問題。為了最大程度地提高風力發電的效益，結構健康監測技術成為了必不可少的一環。

研究方法

本研究提出的方法主要包括三個模組：目標追蹤模組、相機姿態評估模組及運動補償模組，如圖 1 所示，本節將介紹每個模組的詳細資訊。

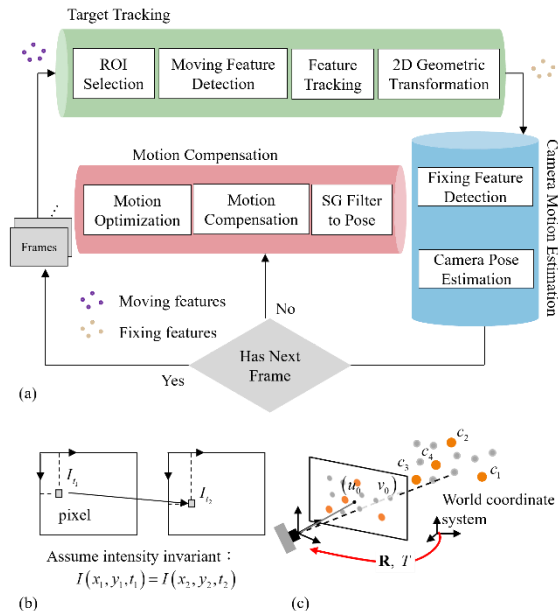


圖 1、使用可移動相機測量結構響應的演算法綜述：
(a) 提出的演算法 (b) 目標追蹤演算法的圖示 (c) 相機運動補償演算法的圖示。

1. 目標追蹤模組

1.1 基於視覺的目標位移測量

在校準相機並消除圖像失真後，通過逐幀分析影像來評估結構的動態響應。此分析涉及四個連續步驟

，如圖 1 的目標追蹤模組：(i) 最穩定區域(ROI) 選擇(ii)特徵檢測 (iii)特徵追蹤 (iv) 去除追蹤異常值。

為了實現可靠的追蹤，從感興趣的物體中檢測出獨特的特徵非常重要。這些特徵應具有高度的辨別性、顯著性，並且能夠在照明、比例和姿勢(旋轉和仿射)。為此存在各種特徵檢測方法。在這項研究中，Harris 和 Stephens 提出的角點檢測方法[1]用於從初始視頻幀中提取 ROI 內的特徵。Harris 角點檢測方法非常適合追蹤技術，例如 Kanade-Lucas-Tomasi (KLT) 演算法[2]，這將在下一節中討論。哈里斯角檢測方法量化了強度差異平方的加權和，假設有一個小的過渡偏移 (x, y) 。這種關係在數學上表示為：

$$E_{xx} = \sum_{u,v} w_{u,v} [I_{x+u,y+v} - I_{u,v}]^2 = \sum_{u,v} w_{u,v} \quad (1)$$

其中 $I_{u,v}$ 為 2D 影片中的初始幀， $I_{x+u,y+v}$ 是平移後的幀。在這個方程中， M 是決定梯度是水平還是垂直的二階矩陣表示為：

$$M = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial I}{\partial x}\right)^2 & \left(\frac{\partial I}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial I}{\partial y}\right) \\ \left(\frac{\partial I}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial I}{\partial y}\right) & \left(\frac{\partial I}{\partial y}\right)^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

為了簡化計算並降低成本，使用稱為響應函數 M_c 來評估角點響應，而不是直接計算從二階矩陣 M 的特徵值 α 和 β 。當兩者都具有較大的正值時，測得角點區域。透過使用響應函數 M_c ，在保持角點檢測有效性的同時降低了計算負載。

$$M_c = \text{Det}(M) - k \text{Tr}(M)^2 \quad (3)$$

其中 k 是可調整的參數。 M_c 在角點區域產生較大正值，在邊緣區域產生負值，在平坦區域產生小正值。

為了追蹤整個影片中從初始幀開始的選定特徵，本研究應用 KLT 演算法[2]。該演算法通過三個假設來追蹤特徵。光流法的假設如下：(1) 亮度恆定性 (2) 小位移。然而，在結構振動明顯的情況下，提高相機的幀速率 (fps) 可以幫助滿足小位移的要求。基於這些假設，可以建立以下數學方程：

$$I(x, y, t) = I(x + dx, y + dy, t + dt) \quad (4)$$

其中 $I(x, y, t)$ 是來自私有框架的強度值。 $I(x + dx, y + dy, t + dt)$ 是當前幀中的強度值。使用一階泰勒級數近似展開等式(4)的右側可以得到：

$$I(x, y, t) = I(x, y, t) + \frac{\partial I}{\partial x} dx + \frac{\partial I}{\partial y} dy + \quad (5)$$

透過忽略方程(5)中 ϵ 的無窮小項和光流法的約束方程，將方程(5)除以 dt 可以得到：

$$I_x u + I_y v + I_t = 0 \quad (6)$$

在方程式(6)中，有兩個未知數 u, v ，但只有一個方程。為了解決這些未知數，需要一個額外的假設。KLT 演算法引入了空間一致性假設，該假設指出要素點周圍的附近圖元具有相似的運動。這個假設允許我們建立以下關係：

$$\begin{bmatrix} I_x^{(1)} & \dots & I_y^{(1)} & \vdots & \vdots & I_x^{(n)} & \dots & I_y^{(n)} \end{bmatrix} [u \ v] = (7)$$

方程(7)可以使用最小二乘法求解, 得到光流。

在這種方法中, Maximum Likelihood Estimation Sample Consensus (MLESAC) 建類比合方法[3], 用於識別和消除不符合兩個連續幀之間主要幾何變換的位移。第一幀中要素的同質圖像點集, 表示為 \underline{x}_i 以及它

們在下一幀中的對應點, 表示為 \underline{x}'_i , 由變換矩陣相關。這個轉換矩陣 H 可以寫成:

$$\underline{x}'_i = H \underline{x}_i \quad (8)$$

本研究的重點是處理結構中面外運動的射影變換矩陣。為了評估變換, 追蹤了四對特徵, 但由於雜訊, 得到的矩陣可能不準確。重投影誤差計算為連續幀中原始要素和變換要素之間的距離。MLESAC 方法用於最小化這些殘餘誤差, 優先考慮與變換模型密切相關的點。被認為更可靠的模型 Inlier, 在隨後的幀中使用 KLT 演算法進行追蹤。這個反覆運算過程一直持續到最後一幀, 通過追蹤感興趣區域的中心 (ROI) 來測量物體的位移。綜上所述, 本研究利用投影變換矩陣, 採用 MLESAC 方法, 使用 KLT 演算法追蹤異常值, 通過監測 ROI 的中心來量化物體的位移。

2. 相機姿態評估

2.1 PnP 問題

透視點 (PnP) 問題, 如圖 2(a), 是一種在已知 n 個 3D 空間點的 2D 投影位置時評估相機姿態的方法。與 2D-2D 匹配相比, 3D-2D 方法可以以更少的匹配點獲得更好的運動評估結果。PnP 問題可以使用直接線性變換 (DLT)、EPnP (高效 PnP) 等演算法來解決[4]和 P3P [5]。

投影方程在 3D 世界座標與其在圖像平面上的 2D 投影之間建立關係。它能夠將 3D 世界中的點映射到其在 2D 圖像空間中的相應位置。投影方程構成了 PnP 問題的核心, 其目標是確定給定一組已知 3D 點及其相應 2D 投影的相機姿態 (位置和方向)。投影方程表示如下:

$$\lambda_i \tilde{p}_i = KR[I - T] \tilde{A}_i \quad (9)$$

其中 λ_i 是比例因子, \tilde{p}_i 是表示 2D 影像座標的齊次向量, K 是相機內部矩陣。 $R[I - T]$ 是表示相機旋轉和平移的相機外在矩陣, \tilde{A}_i 是世界座標中的 3D 點。如果相機內部矩陣是已知的和反轉的。透過將投影方程的兩邊與相機本徵矩陣 (K^{-1}) 的倒數左乘並以表示 $\tilde{v}_i = K^{-1} \tilde{p}_i$, 方程變為:

$$\lambda_i \tilde{v}_i = R[A_i - T], \quad i = 1, \dots, 3 \quad (10)$$

其中 \tilde{v}_i 表示二維點的歸一化圖像座標。隨後, 得到最終的 P3P 方程組。

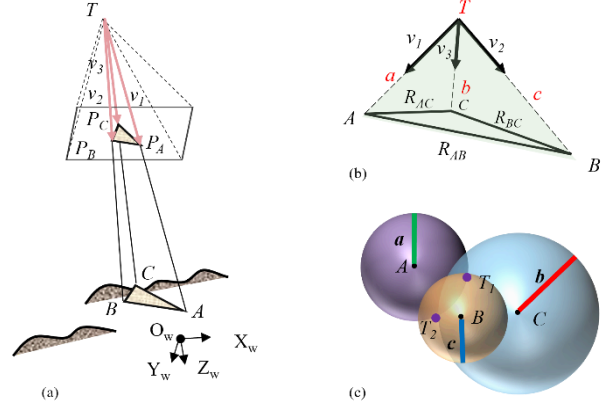


圖 2、使用 P3P 解決方案進行相機姿態評估: (a) P3P 解決方案的圖示。 (b) P3P 問題的幾何公式。 (c) 三邊測量圖示。

2.2 P3P 解決方案

P3P 解決方案由三組 3D 點及其在圖像中相應的投影 2D 點定義。如幾何關係所示圖 2(b), 紅色文本表示 P3P 演算法要求解的物理量, 而黑色文本表示已知條件。 C_{AB} 表示向量 v_1, v_2 之間角度的餘弦, C_{AC} 表示向量 v_1, v_3 之間角度的餘弦及 C_{BC} 表示向量 v_2, v_3 之間角度的餘弦。3D 點之間的距離定義如下: 點 A 和 B 之間的距離表示 R_{AB} , 點 A 和 C 之間的距離表示 R_{AC} , 點 B 和 C 之間的距離表示 R_{BC} 。最後, P3P 問題中的角度和距離之間的關係可以使用餘弦定律建立, 以下方程成立:

$$\begin{aligned} R_{AB}^2 &= a^2 + b^2 - 2a \cdot b \cdot C_{AB} \\ R_{AC}^2 &= a^2 + c^2 - 2a \cdot c \cdot C_{AC} \\ R_{BC}^2 &= b^2 + c^2 - 2b \cdot c \cdot C_{BC} \end{aligned} \quad (11)$$

將三個方程簡化為四次多項式的過程可以參考參考文獻[5]得到的四次多項式如下:

$$G_4 x^4 + G_3 x^3 + G_2 x^2 + G_1 x + G_0 = 0 \quad (12)$$

其中, 四次多項式的係數如下:

$$\begin{aligned} G_4 &= (K_1 K_2 - K_1 - K_2)^2 - 4K_1 K_2 C_{BC}^2 \\ G_3 &= 4(K_1 K_2 - K_1 - K_2) K_2 (1 - K_1) C_{AB} + 4i \\ G_2 &= [2K_2 (1 - K_1) C_{AB}]^2 + 2(K_1 K_2 - K_1 - K_2) (13) \\ G_1 &= 4(K_1 K_2 + K_1 - K_2) K_2 (1 - K_1) C_{AB} + 4i \\ G_0 &= (K_1 K_2 + K_1 - K_2)^2 - 4K_1 K_2 C_{AC}^2 \end{aligned}$$

從四次多項式獲得其四個根後, P3P 方法提供了從相機中心到 3D 點的距離。然後, 通過將源自相機

中心的三條光線與 3D 點相交來執行三邊測量，從而產生初始位置姿態評估。圖 2(c)提供這一過程的直觀表示。但數據中存在異常值或雜訊可能會影響評估的準確性。為解決此問題，採用了MLESAC演算法。

MLESAC 以反覆運算方式選擇數據子集，擬合模型，並使用最大似然性評估其品質。通過結合P3P方法、三邊測量和MLESAC的穩定性，即使在具有異常值或嘈雜數據的挑戰性場景中，也可以實現精確可靠的相機姿態評估。

3. 重建結構絕對位移

3.1 相機運動補償

假設在可移動相機測量期間，每幀中都存在一個可以追蹤的固定點。當相機在平面外移動時，振動目標會不斷變化。為了補償相機運動引起的位移漂移，利用了固定點的位置資訊。通過將固定點合併到可移動相機捕獲的圖像中，並採用P3P演算法，相機運動的絕對姿態。式(14) 用於計算使用可移動相機時監控結構的絕對位移(以cm為單位)：

$$\delta_i = s_i \times \delta_i^{klt} - \delta_i^{p3p} \quad (14)$$

其中 δ_i 是目標的絕對位移， s_i 為比例因子， δ_i^{klt} 為 KLT 演算法所計算的相對位移， δ_i^{p3p} 相機補償P3P演算法的結果。

3.2 高通濾波器

本研究參考過去研究[6]並應用高通濾波器進行補償優化。其設定採用截止頻率為0.5 Hz、截斷峰值為90 dB的7階濾波器對訊號進行濾波。

4. 振動訊號處理

4.1 頻域分析法

本研究使用FDD方法計算操作模態分析中的模態參數。FDD 涉及分析 功率譜密度(PSD)輸出訊號使用奇異值分解(SVD)，允許將PSD分離成對應於不同模式的多個SDOF系統。有關更多理論細節，請參閱[7, 8]。

為了建立未知輸入訊號 $x(t)$ 與測量響應訊號 $y(t)$ 之間的關係，使用了以下公式：

$$G_{yy}(\omega) = \overline{H}(\omega)G_{xx}(\omega)\overline{H}(\omega)^T \quad (15)$$

其中 G_{xx} 是輸入 PSD $r \times r$ 矩陣， r 是輸入數， G_{yy} 是響應的輸出 PSD $m \times m$ 矩陣， m 是響應數。 $H(\omega)$ 是頻響函數 $m \times r$ 矩陣，上劃線和上標 T 分別表示復共軛和轉置。

4.2 模態保證指標

為了驗證視覺感測器的結果，本研究利用MAC模態保證指標(Modal Assurance Criterion, 簡稱MAC)，由視覺設備確定的振動模態與從加速度計獲得的振動模態之間的差異，為評估兩模態相關性的方法，如下式(16)所示：

$$MAC_{rq} = \frac{\left| \{\phi_A\}_r^T \{\phi_B\}_q \right|^2}{\left(\{\phi_A\}_r^T \{\phi_A\}_r \right) \left(\{\phi_B\}_q^T \{\phi_B\}_q \right)} \quad (16)$$

MAC_{rq} 為MAC矩陣的第 r 行第 q 列元素。本研究中

， ϕ_A 代表以加速規計算出來的模態，而 ϕ_B 表以視覺演算法計算的模態。MAC值代表不同模態模態向量間的內積，介於0和1之間。若MAC值為0，其模態模態向量交角為90度，表示模態間的相關性很小；反之，MAC值接近1時，代表模態間相關性很大。在實用上，0.95 和 1.00 之間的 MAC 值被認為是可以接受的[9]。

4.3 模態曲率法 (MSCM)

MSCM計算模態的二階導數，分析模態曲率與結構剛度之間的關係[10]。

$$\phi'' = \frac{M(x)}{EI} \quad (17)$$

其中 $M(x)$ 為彎矩， EI 是彎曲剛度。在存在結構損傷的情況下，楊氏模量降低，導致模態曲率增加。MSCM利用楊氏模量和模態曲率之間的關係來區分受損和未受損的結構。透過分析相鄰節點之間的曲率差異，MSCM根據楊氏模量的變化來識別結構損傷，如下所示：

$$MMSC_i = \sum_{j=1}^2 \left| \phi_{ij}''^{,d} - \phi_{ij}''^{,u} \right|^2 \quad (18)$$

第 i 個節點中第 j 個模態的形狀曲率表示為 ϕ_{ij}'' ，用於表徵模態的曲率。在未損壞的結構(u)和損壞的結構(d)的情況下，局部損傷導致局部結構剛度降低，從而導致曲率變化。為了量化這些差異，使用中心差分方程計算曲率：

$$\phi_{ij}'' = \frac{\phi_{i+1,j} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i-1,j}}{h^2} \quad (19)$$

其中， h 是節點之間的距離，是 ϕ_{ij} 第 j 個座標下的第 i 個模態。

研究結果

5. 相機姿態評估實驗與驗證

5.1 虛擬影像

本研究的第2節介紹了使用固定背景參考點計算相機姿態的方法。為了驗證 P3P 演算法結果的準確性，該研究進行了一次類比，其中相機包圍了目標並捕獲了 201 幀的序列(六張選定的照片，如圖 3)圖像由於透視幾何形狀而變形。為了更清晰地描述相機在每張圖像中的位置，圖 3(b) 說明相機在不同位置拍攝的模擬圖像。

5.2 相機姿態評估結果

圖 3(c) 描述所有幀的相機姿態評估結果。P3P演算法在空間座標系中提供相機的絕對姿態。通過從第

一幀的絕對姿態中減去每一幀的絕對姿態，可以得到相對於初始位置的相對運動。考慮到相機圍繞目標移動，六個自由度的評估結果如圖 3(c)所示。

在所有幀中，移動相機在 x 方向上都發生三角波位移，導致均方根誤差(RMSE)值分別為 3.516mm 和 4.762mm 在 y 方向上。z 方向位移呈現雙峰分佈，在第 50 幀處變動最大。相機旋轉角度遵循順時針旋轉的三角波訊號。圖 3 (c)顯示 P3P 分析結果。藍線為最初雜訊，但應用Savitzky-Golay [11] 濾波器提高了精度，改進的 RMSE 值如表 1所示。

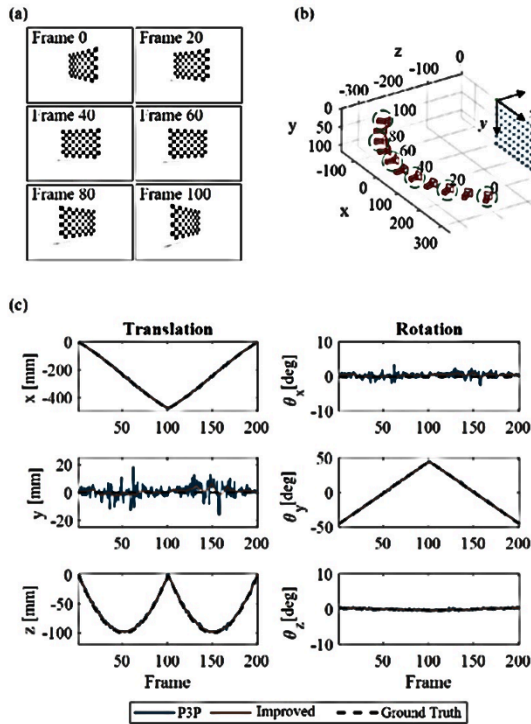


圖 3、虛擬影像的姿態評估結果:(a)虛擬棋盤圖像 (b) 相機的軌跡 (c) 相機的六自由度運動

表 1、在六個自由度(以毫米為單位平移，以度為單位旋轉)中，帶和不帶雜訊去除的相機姿態評估訊號的 RMSE比較。

	x	y	z	θ_x	θ_y	θ_z
Without SG filter	3.516	4.762	2.698	0.819	0.622	0.185
With SG filter	1.882	1.811	2.182	0.280	0.340	0.069

6. 基於混合感測方法和損傷定位的單目相機的面外結構振動測量

6.1 實驗設置

本研究中使用了以下實驗設置如圖 4所示:(1)使用振動器施加頻率掃描訊號到亞克力框架結構上;(2)目標包括:(i) 使用演算法評估相機的姿態，通過校準

的3D點;(ii) 使用固定相機的訊號進行補償性能的驗證;(iii) 使用補償後的絕對位移訊號提取結構的固有頻率和振動模式，並使用接觸式加速度計進行驗證。兩種不同的感測器用於結構響應測量:相機和加速度計。相機包括一台固定相機(尼康 D600)和一台移動相機(iPhone 8 Plus)，解析度分別為1920×1080和3840×2160，成像平面平行於結構。加速度計有四個，放置在結構上以測量特定點的振動，靈敏度約為100 mV/g，採樣頻率為25.6 kHz。

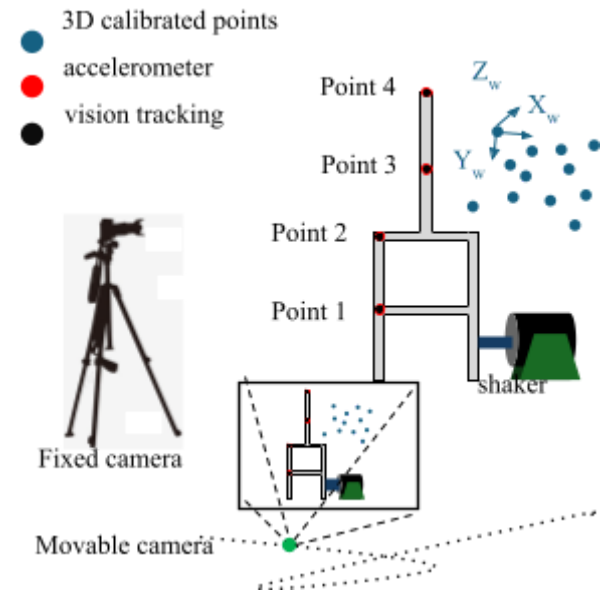


圖 4、基於混合感測方法和損傷定位的單目相機的面外結構振動測量實驗設置

6.2 測量時間序列中的訊號

圖 5 顯示相對位移訊號的濾波結果。黃線表示截止頻率為0.1 Hz，這表明過濾效果較差。截止頻率為1.0 Hz的綠線性能優於0.1 Hz 和0.5 Hz 截止頻率。但截止頻率為1.7 Hz的橙色線過濾掉重要的結構訊號，因其超過了結構第一模態。從固定相機獲得的訊號與四個濾波訊號之間的比較總結如下表 2。

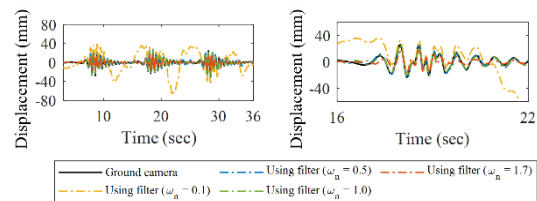


圖 5、比較四個閾值以補償測量訊號。

表 2、不同補償方法的結果比較:上表顯示了使用高通濾波器時四點的平均RMSE，而下表顯示了使用P3P方法和高通濾波器組合時的四點的平均RMSE。

Threshold	$f_c = 0.1$	$f_c = 0.5$	$f_c = 1.0$	$f_c = 1.7$
-----------	-------------	-------------	-------------	-------------

RMSE (mm)	19.90	2.51	1.62	2.21
Threshold	P3P	$P3P+f_c$	$P3P+f_c$	$P3P+f_c$
		$= 0.1 Hz$	$= 0.5 Hz$	$= 1.0 Hz$
RMSE (mm)	15.18	3.68	1.47	1.38

從P3P視覺補償與高通濾波器相結合的結果來看，圖6明確濾波器的截止頻率不應超過結構的第一模態頻率。優化結果如中所示。圖5(d)洋紅色($f_c = 0.1 Hz$)、黃色($f_c = 0.5 Hz$)和綠色($f_c = 1.0 Hz$)，平均誤差分別為3.68mm、1.94mm和1.38mm。表2總結了從固定相機和具有三個濾波訊號的P3P獲得的訊號。顯而易見，所提出的演算法(包括P3P視覺補償)在減少誤差方面優於單獨使用高通濾波器。本實驗中，校正前的位移訊號與從固定相機獲得的位移訊號之間的平均誤差為69.31mm。然而，在應用所提出的演算法後，四個測量點的平均誤差降低到1.38mm。這些結果凸顯了該演算法在校正超過98%的位移測量值方面的潛力。

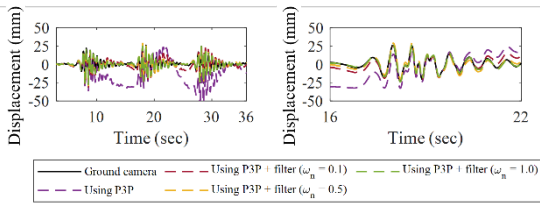


圖6、比較P3P與三個閾值以補償測量訊號。

7. 結論

本研究重點研究了利用移動相機測量結構振動的方法，並提出了一種有效的振動訊號重構演算法。通過將結果與從同一位置的固定相機獲得的訊號進行比較來執行驗證。光流法捕獲結構振動，但它包括相機運動。這個開發的相機姿態評估程式使用背景中的固定校準點來評估相機的運動。位移補償結果使用高通濾波器進行優化，並與來自固定相機的訊號進行比較。通過面外振動實驗，逐幀評估相機位置，以更新所提方法的比例因數。該研究成功地解決了使用單個平面外運動相機測量振動的挑戰。最後，論證了基於頻域分解(FDD)和模形曲率法(MSCM)的損傷定位的實際應用。研究結果和結論總結如下：

1. 虛擬影像數據集驗證了相機姿態評估演算法的準確性。Savitzky-Golay濾波改進了評估結果。
2. 在平面外振動實驗中，使用背景中的固定參考點評估相機的深度變化。位移校正演算法實現了98%的校正率。此外，視覺感測器和加速度計的比較顯示，前兩個頻率的測量誤差在5%以

內，模態保證標準值為0.99。最後，研究了濾波閾值過高時模式和固有頻率遺漏的發生。

參考文獻

- [1] C. Harris and M. Stephens, "A combined corner and edge detector," in *Alvey vision conference*, 1988, vol. 15, no. 50: Citeseer, pp. 10-5244.
- [2] C. Tomasi and T. Kanade, "Detection and tracking of point," *Int J Comput Vis*, vol. 9, no. 137-154, p. 3, 1991.
- [3] P. H. Torr and A. Zisserman, "MLESAC: A new robust estimator with application to estimating image geometry," *Computer vision and image understanding*, vol. 78, no. 1, pp. 138-156, 2000.
- [4] V. Lepetit, F. Moreno-Noguer, and P. Fua, "EP n P: An accurate O (n) solution to the P n P problem," *International journal of computer vision*, vol. 81, pp. 155-166, 2009.
- [5] X.-S. Gao, X.-R. Hou, J. Tang, and H.-F. Cheng, "Complete solution classification for the perspective-three-point problem," *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 25, no. 8, pp. 930-943, 2003.
- [6] W. Li, W. Zhao, J. Gu, B. Fan, and Y. Du, "Dynamic characteristics monitoring of large wind turbine blades based on target-free DSST vision algorithm and UAV," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 13, p. 3113, 2022.
- [7] R. Brincker, L. Zhang, and P. Andersen, "Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition," *Smart materials and structures*, vol. 10, no. 3, p. 441, 2001.
- [8] T.-P. Le and P. Argoul, "Modal identification using the frequency-scale domain decomposition technique of ambient vibration responses," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 384, pp. 325-338, 2016.
- [9] F. Frigui, J.-P. Faye, C. Martin, O. Dalverny, F. Pérès, and S. Judenherc, "Global methodology for damage detection and localization in civil engineering structures," *Engineering Structures*, vol. 171, pp. 686-695, 2018.
- [10] D. Feng and M. Q. Feng, "Computer vision for SHM of civil infrastructure: From dynamic response measurement to damage detection—A review," *Engineering Structures*, vol. 156, pp. 105-117, 2018.
- [11] R. W. Schafer, "What is a Savitzky-Golay filter?[lecture notes]," *IEEE Signal processing magazine*, vol. 28, no. 4, pp. 111-117, 2011.

VISION-BASED ALGORITHM FOR STRUCTURAL RESPONSE MEASUREMENT USING MOVABLE CAMERA AND DAMAGE LOCALIZATION

Wei-Hsuan Chiang, Cheng-En Tsai*, Hsin-Haou Huang**

*Department of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University

Keywords: Movable camera, UAV, Camera motion compensation, Structural damage localization, Vibration measurement

ABSTRACT

Vibration-based Structural Health Monitoring (SHM) is widely recognized as a prominent approach for evaluating the safety and integrity of civil infrastructure. This research presents a novel algorithm for vibration measurement using a movable camera, effectively overcoming the issue of signal drift caused by camera motion. The proposed algorithm comprises three modules: optical flow computation, camera pose estimation, and motion compensation. Validation experiments by virtual images demonstrate accurate camera pose estimation and effective mitigation of drifting signals. The dynamic characteristics of the frame structure are extracted using a movable camera and the proposed algorithm. Several challenges are addressed, including accurately estimating the scale factor to compensate for the drifting signals. Experimental validation is conducted to verify the proposed approach. The results demonstrate the efficacy and promising potential of the proposed approach. Finally, this study demonstrates the practical application through damage localization experiments.