

結合感測、系統識別及健康診斷技術 探討橋梁結構破壞預警模式及機制(II)

Integration of sensing, system identification and health monitoring technologies for damage prognosis of bridges (II)

主管單位：交通部中央氣象局

羅俊雄¹ 趙書賢² 曾敏軒¹
Chin-Hsiung Loh¹ Shu-Hsien Chao¹ Min-Shuan Tseng²

¹ 國立臺灣大學

² 國家地震工程研究中心

摘要

台灣由於地理環境特殊，經常受到天然災害的襲擊，其中包括地震、颱風、洪水與土石流等等，因此重要的基礎建設，例如校舍、橋梁、與隧道等等，其安全性以及耐久性便成為相當重要的議題。以橋梁為例，近年來有許多橋梁在颱風侵襲期間因為暴漲的溪水或土石流沖蝕，導致橋面板的陷落以及橋體的損壞，造成人命傷亡與經濟損失。因此當務之急除了針對現有橋梁進行整體安全性評估之外，將來更需要發展準確與可靠的橋梁監測系統，對橋梁的安全性進行監測，並在橋梁損害發生與倒塌之前提供預警訊息，以減少人命與經濟的損失。

本研究之目的在發展一套有效且快速之結構健康診斷之工具，去進行正在使用中之結構(含橋梁)，利用常態反應之量測資料，進行模態分析 (Operational Model Analysis, OMA) 及其特徵(features) 判別方法之研究。並利用所識別之特徵，同時亦一併進行該結構之快速損壞檢測。對收集到之量測訊號之系統識別方法，以達到即時(almost real-time)及上線(on-line) 分析方式進行，配合遞迴性隨機子空間分析法(Recursive Stochastic Subspace Identification, RSSI-DATA &RSSI-COV)進行識別外，探討以減少運算時間為主，達到即時監測之目的。研究中並針對 SSI 之方法探討分析模式所使用之參數不確定性造成對識別結果之變異進行討論，以期正確識別結構物之動態特徵。而在快速損壞檢測之研究，以探討不同損壞指標對結構損壞檢測之敏銳度為主。研究方法將應用於實驗室縮尺橋梁實驗之沖刷試驗，同時亦嘗試在現地進行橋梁測試，整合此分析軟體於無線感測器內，進行橋梁結構之微振量測。以期發展準確與可靠的橋梁監測系統，對橋梁的安全性進行監測，並在橋梁損害發生與倒塌之前提供預警訊息。

報告內容分兩部份：常態監測及異常狀態下損壞評估。本報告首先將針對探討不同損壞指標對結構損壞檢測之敏銳度為主。研究中推導出四種損傷指標，強調以移動窗函數技術以快速及振動反應量測記錄進行分析，即時提供預警訊息。研究中亦以大型水工實驗進行驗證。報告中亦包含橋梁常態監測之振動頻率與環境因素之關聯。並將此技術應用於關渡橋之振動量測上。

關鍵詞：隨機子空間系統識別、損壞評估、結構健康診斷

Abstract

Part 1: This paper deals with the problem of a bridge structure identification using output-only vibration measurements under changing environmental conditions. Two key issues of a real-life monitoring system are addressed through analysis. The first issue is the identification of structural dynamic characteristics directly from measurements under operating conditions. The covariance-driven recursive stochastic subspace identification (RSSI-COV) algorithm is applied to extract the system dynamic characteristics. The second issue is to distinguish the system dynamic features caused by abnormality from those caused by environmental and operational variations, such as temperature, and traffic loading. In this study a solution is proposed to model and remove the uncertainty due to environmental effects from the identified system dynamic characteristics from on-going measurements. Nonlinear principal component analysis incorporated with AANN is employed to distinguish the dynamic feature changes caused by abnormality from those caused by environmental and operational variation (i.e. ambient temperature and traffic loadings). Finally, field experiment of a bridge is conducted. The variation of the identified system natural frequencies was discussed by using the proposed method.

Part 2: The objective of this paper is to discuss two different approaches on structural damage detection: one is the vibration-based damage detection and the other is the model-based damage detection. The vibration-based damage detection method is based on the extracted sub-space or null-space from the singular value decomposition (SVD) of analytic matrix formed from data Hankel matrix. Damage detection algorithm is then developed by considering the orthonormality between the subspace and null-space. To form the analytic matrix three different algorithms can be used: from the trajectory matrix in Singular Spectrum Analysis (SSA), from Toeplitz matrix in SSI-COV, or from QR decomposition of data Hankel matrix in SSI-DATA. The model-based damage detection is using the AR-ARX model to identify the model coefficients from which the damage sensitivity factor can be generated. Discussion among these damage detection methods was made through the response data collected from the shaking table test of a 6-story steel frame with different damage scenarios and the scouring test of bridge model in hydraulic lab during scouring process.

Keyword: Stochastic subspace identification, damage detection, structural health monitoring

一、前言

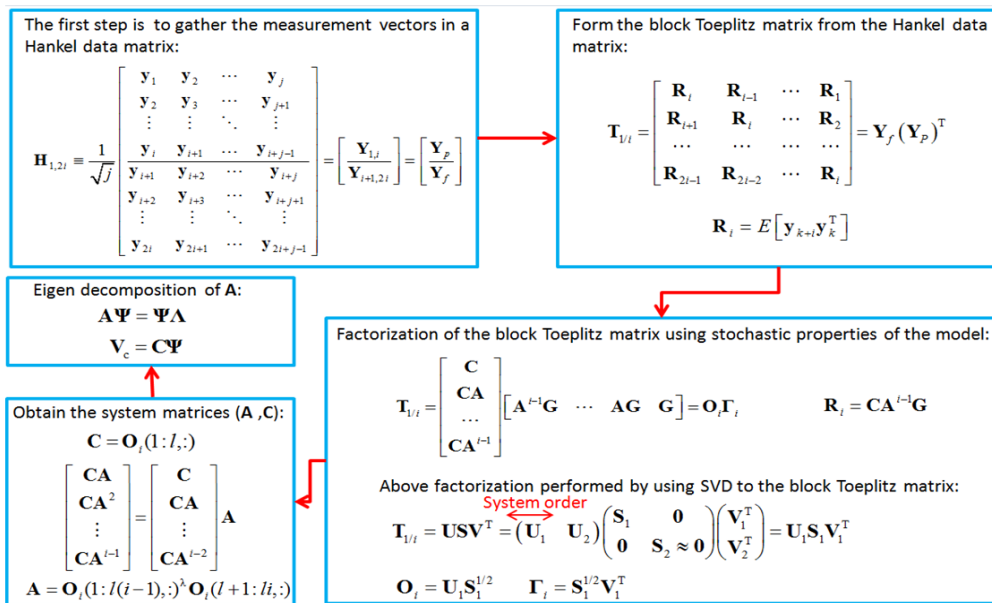
土木工程領域中結構健康診斷及損壞偵測在過去十幾年間開始被人們所注意，研究工作內容對於結構物的老化、劣化及損傷有許多討論，其目的在於預防結構物突然崩塌導致人生性命及公共建設之損失。在過去短短幾年，就發生了許多慘痛的經驗，例如 2007 年美國密西西比河橋梁突然無預警崩塌，造成十三死一百四十四人受傷的悲劇；聯絡高雄、屏東間的高屏大橋於民國八十九年，橋梁中點處第二十二號橋墩橋基下陷，並在強勁的河流沖激下移位斷裂，導致橋面斷裂落入水中，造成二十二人輕重傷；2008 年，強烈颱風辛樂克在中台灣降下超大豪雨，大甲溪溪水迅速暴漲，溪水以水躍方式不斷向橋墩拍打、沖刷，使其基樁裸露導致橋面板崩落，造成六人罹難。以上例子說明結構損壞並非肉眼觀測就可以預見，結構物表面雖無任何損壞，但其內部或邊界條件改變致使結構物損壞，需採用其他方法來偵測。近年來系統識別方法應用於結構物識別及損壞評估，量測其位移、速度或加速度等反應訊號，經由訊號處理方法判斷結構物是否受到損壞，進一步可應用於災害預警與預防性等動作。系統識別方法不同於傳統的正運算方法，其不需預先知道結構物的質量、阻尼及勁度，而是採用逆運算方法，將訊號經過適當處理或採用系統識別演算法即可得知結構物之頻率、阻尼和振態。

就常態監測而言，本文應用協方差型(SSI-COV)與遞迴協方差型隨機子空間識別法(RSSI-COV)做為結構物系統識別方法，再根據微振量測所輸出之資料萃取結構物動態參數。而異常狀態下針對量測訊號進行損壞評估，則以建置不同損傷指標，探討損傷發生時間、損傷位置及損傷程度。

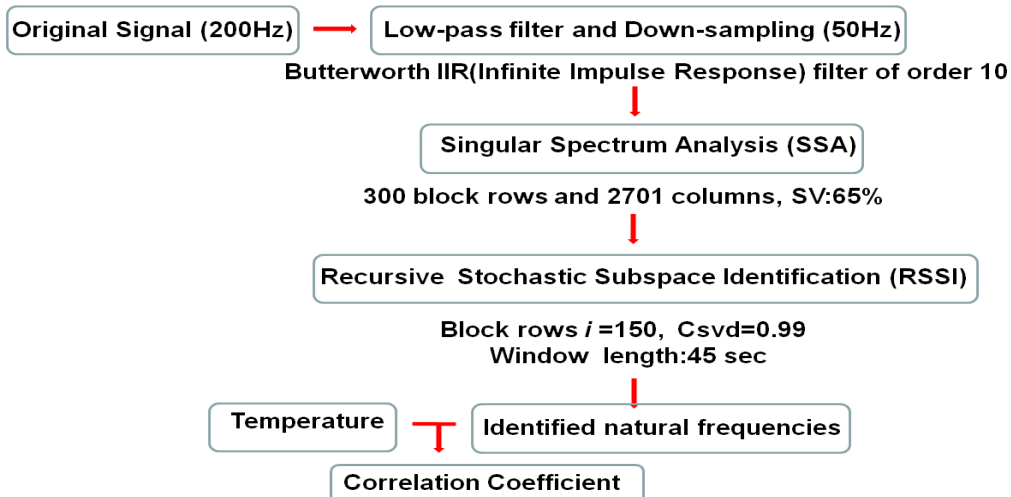
二、研究方法

隨機子空間識別法(Stochastic Subspace Identification, SSI)，其為僅使用輸出資料的識別法。發展這些理論方法其基礎來自線性代數(Linear Algebra)、系統理論(System Theory)及統計學(Statistics)。在子空間方法中需使用到線性代數的技巧有二：奇異值分解(Singular Value Decomposition, SVD)和QR分解(QR Decomposition)。隨機子空間識別法由 Van Overschee 及 De Moor 首先提出[7]，對於各種僅量測輸出訊號的系統識別方法，以 SSI 方法為基礎，推導其理論背景、運用的數學工具及系統參數識別結果皆有合理化且較佳的結論，為近來微振分析常使用的方法。對於大型土木結構例如橋梁，由於輸入資訊無法由量測得知，所以僅需輸出資訊就可以求得系統參數的隨機子空間識別法(SSSI)就適合用於此類結構物之識別。不同於離線(Off-line)分析，線上(On-line)的分析更適合用於長時間連續觀測及早期預警應用。本研究採用遞迴式協方差型隨機子空間識別法(Recursive Covariance-driven Stochastic Subspace Identification, RSSI-COV)進行常態下結構振動反應之分析，以求得結構物時變性之頻率、阻尼和振態。RSSI-COV 之分析法如圖一所示。為求得更精確之結構動態參數，在進行 SSI-COV 分析前提出訊號前處理方法(Pre-processing)。此步驟包含 Low-pass filter (以 SSA 方式或 Butterworth low-pass filter)，down-sampling 及穩定圖分析，其分

析流程如圖二所示。



圖一：協方差型(SSI-COV)隨機子空間識別法



圖二：量測訊号前處理過程

有關損傷評估方法，則結合SSI-COV提出不同損傷指標，以能即時偵測結構異常反應，進而判斷損傷位置及損傷程度。所提之損傷指標以採用on-line方式分析，以達到預警效果。其損傷指標之定義包含下列種類：

- (1) 以RSSI-COV方法識別時變性結構振動頻率及振形，配合時變振形分析Mode shape curvature，由curvature之變化判斷損傷發生之時間。
- (2) 配合資料之建置及奇異值分解，建立 Null-space & subspace-based damage index。

其定義如下：

$$DI_s = \frac{\sum_{i=1}^K (\mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_i^T \mathbf{U}_{s0} \mathbf{U}_{s0}^T \mathbf{x}_i)}{\sum_{i=1}^K \mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_i} \quad \text{或} \quad DI_n = \text{mean}\{|\mathbf{U}_s \mathbf{U}_{n0}^T|\}$$

(3) 利用 Euclidean Norm of signal Hilbert Amplitude Spectrum 以識別損害位置。其判

別指標定義如下：
$$\mathbf{e}_{t,t}^j = \frac{\sum_t \sum_f (H^{d_j}(t,f) - H^{Ref}(t,f))}{\sum_t \sum_f H^{Ref}(t,f)}$$
。其中 $H(t,f)$ 為反應量測之

Hilbert amplitude spectrum (Time-frequency analysis)

(4) 利用特定頻率下能譜值在不同狀況下之變化量，定義損傷指標：

$$DI_{s.p.}(t = t_i) = \frac{\sum_{i=1}^m |S(\tilde{f}; x_i | t = t_i) - S(\tilde{f}; x_i | t = \text{ref})|}{\sum_{i=1}^m S(\tilde{f}; x_i | t = \text{ref})}$$

其中 $S(\tilde{f}; x_i)$: Power spectral density of dominant frequency at measurement location x_i ,

x_{ref} 為所選定之參考點。藉由能譜值之變化以判定損傷之發生。

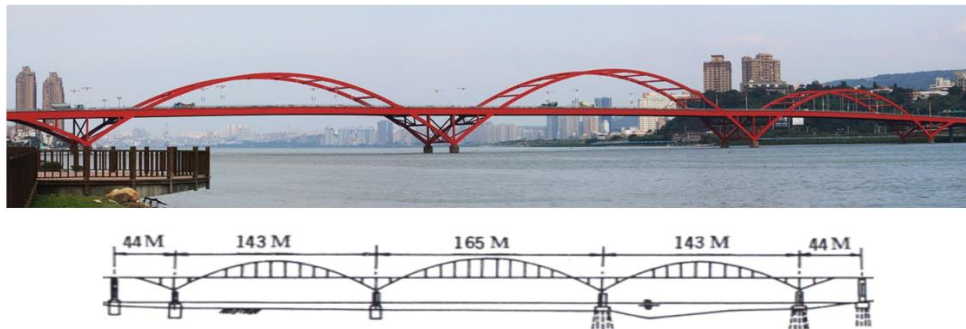
(5) 採用 Model updating 技術以判斷損傷程變。

三、研究成果

為驗證所提之系統識別及損傷評估方法，研究中以兩個實驗進行驗證。首先探討關渡大橋為例。實驗過程中主要為量測振動(加速度)訊號，運用隨機子空間識別法(SSI-COV)及遞迴式隨機子空間識別法(RSSI-COV)識別其頻率、阻尼和振態。圖三則顯示關渡大橋之影像及資料收集之資訊。從 2011 年 4 月至 2012 年 1 月總共進行了四次全橋振動量測實驗，振動量測方向為垂直於橋面板方向，其日期及測站擺放位置說明如下：

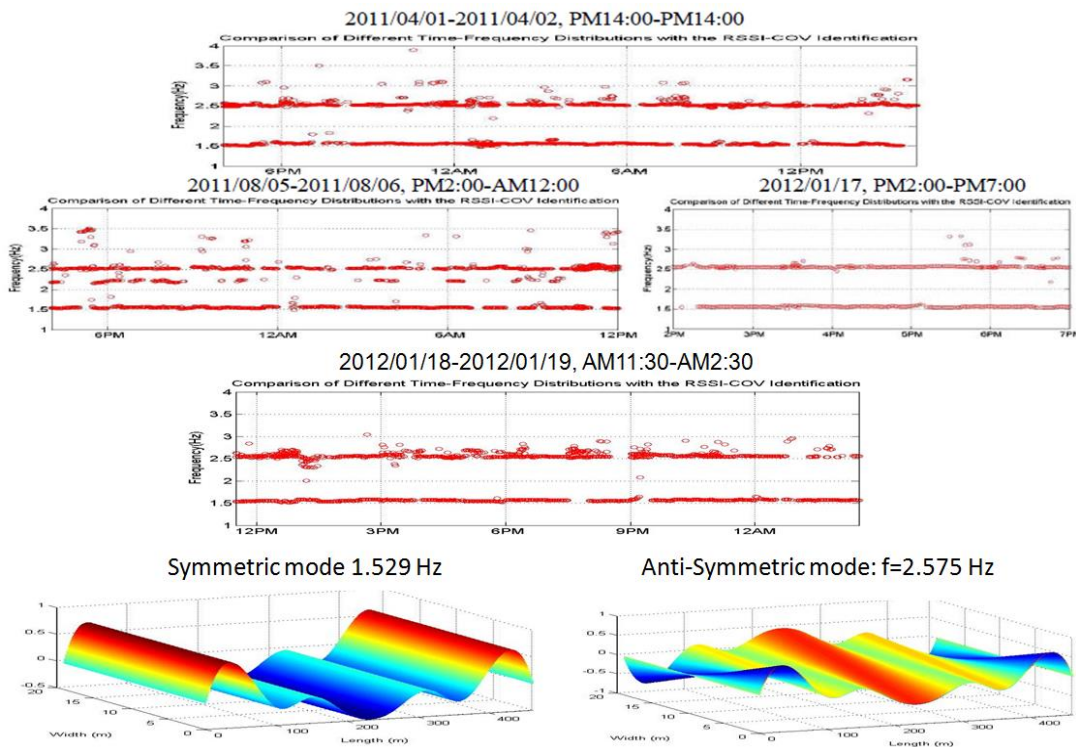
1. 2011 年 4 月 1 日至 2011 年 4 月 2 日:儀器擺放位置如圖 4.3。無線感測器模組每半個小時自動驅動程式蒐集資料，進行了連續 24 小時的觀測，每筆資料記錄一分鐘(60 秒)歷時，取樣頻率為 200Hz，總共量測資料數為 48 筆。
2. 2011 年 7 月 21 日: 儀器擺放位置如圖 4.4。此儀器擺放分為 Setup 1、Setup 2 及 Setup 3 的目的在於頻率識別後，由於扭轉效應的產生導致會有扭矩之振態，故用此擺設來判別振態。每個 Setup 分別量測 4 筆資料，每筆資料記錄一分半鐘(90 秒)歷時，取樣頻率為 200Hz。
3. 2011 年 8 月 5 日至 2011 年 8 月 6 日:儀器擺放位置如圖 4.3。無線感測器模組每半個小時自動驅動程式蒐集資料，進行了連續 20 個小時的觀測，每筆資料記錄一分鐘(60 秒)歷時，取樣頻率為 200Hz，總共量測資料數為 40 筆。
4. 2012 年 1 月 17 日至 2012 年 1 月 19 日:儀器擺放位置如圖 4.3。無線感測器模組每半個小時自動驅動程式蒐集資料，原本欲進行連續三天觀測，但因某些不可抵抗之外力因素，故所量測到的資料為較不連續時間之資料，但仍可做為後續溫度和車載對於識別結果關係之探討。每筆資料記錄二分鐘(120 秒)歷時，取樣頻率為 200Hz，總共量測資料數為 53 筆。

透過以上步驟，進行 SSI-COV 方法前將訊號經過 Low-pass Filter 至 25Hz 和 Down-sampling 至 50Hz(原取樣率為 200Hz)。圖四則針對所識別之其中兩個振態及利用 RSSI-COV 所識別之時變性振頻($f=1.529\text{ Hz}$ 及 $f=2.575\text{ Hz}$) 予以繪出。就微振量測訊號進行識別，其可識別出之振態如圖五所示。由常態之振動量測記錄，經由 RSSI-COV 分析，可識別出結構系統之振動頻率隨不同量測時間而有所變化。此變化之產生可能來至於環境溫度之不同所造成，及車載之變化所造成振幅之變化所引致。若配合識別之結構振頻，量測之環境溫度及車載之振幅，則可利用非線性主成份分析法(nonlinear PCA)，如 Auto-associate Neural Network 之方法找出此三個主要變數之關聯性。



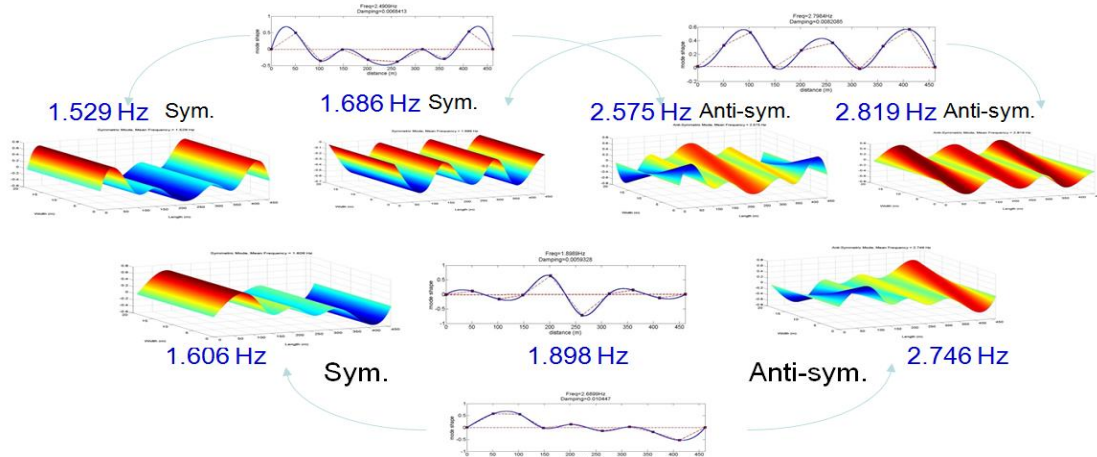
- Location: Taipei, Taiwan.
- It is a steel arch bridge with five spans. The center span length is 165 meter and the other span is with length of 143 meter and two 44 meter side spans.
- 10 uni-axial accelerometers (Tokyo Sokushin AS-2000) were employed for vibration measurements.
- Sampling rate: 200Hz, Data length: 60sec (12000 points).

圖三：關渡大橋及量測系統之規格



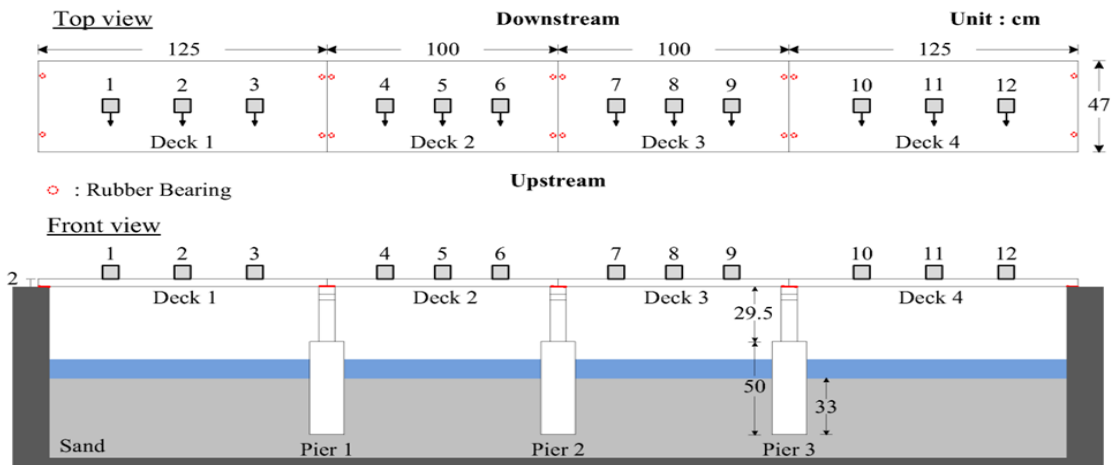
圖四：對稱及反對稱振態($f=1.529\text{ Hz}$ 及 $f=2.375\text{ Hz}$)

Mode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Freq. (Hz)	1.39	1.56	1.65	1.78	1.92	2.23	2.47	2.52	2.57	2.77	2.89	
Damping Ratio (%)	1.3	1.3	1.1	1.0	0.8	1.0	0.1	0.7	5.6	0.6		
Note			Symmetric vs. Anti-symmetric modes				Symmetric vs. Anti-symmetric modes					
					Symmetric vs. Anti-symmetric modes							

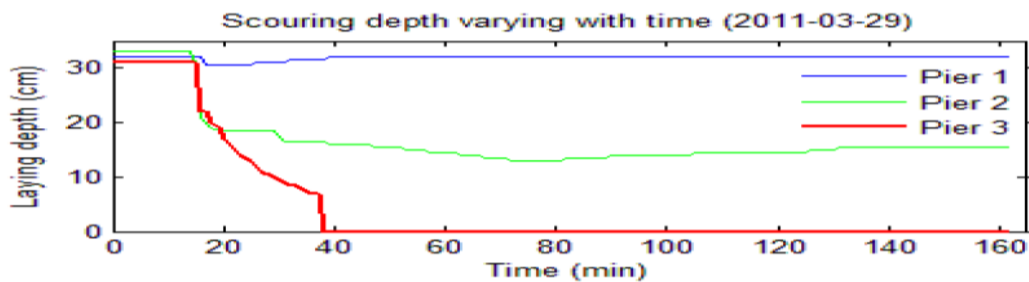


圖五：關渡大橋微振量測訊號識別出之振態

為探討即時損傷識別能力，於大型水工實驗場進行橋墩冲刷引致之橋梁振動實驗，如圖六所示。配合在橋面上所量得之訊號，以移動窗函數及遞迴性系統識別方法，探討所提出之不同損傷診斷指標對此訊號之即時分析所呈現之特徵。由實驗中並觀察橋墩冲刷狀況(如圖七) 所示，可知在Pier-3中，其橋墩冲刷狀況最為嚴重。

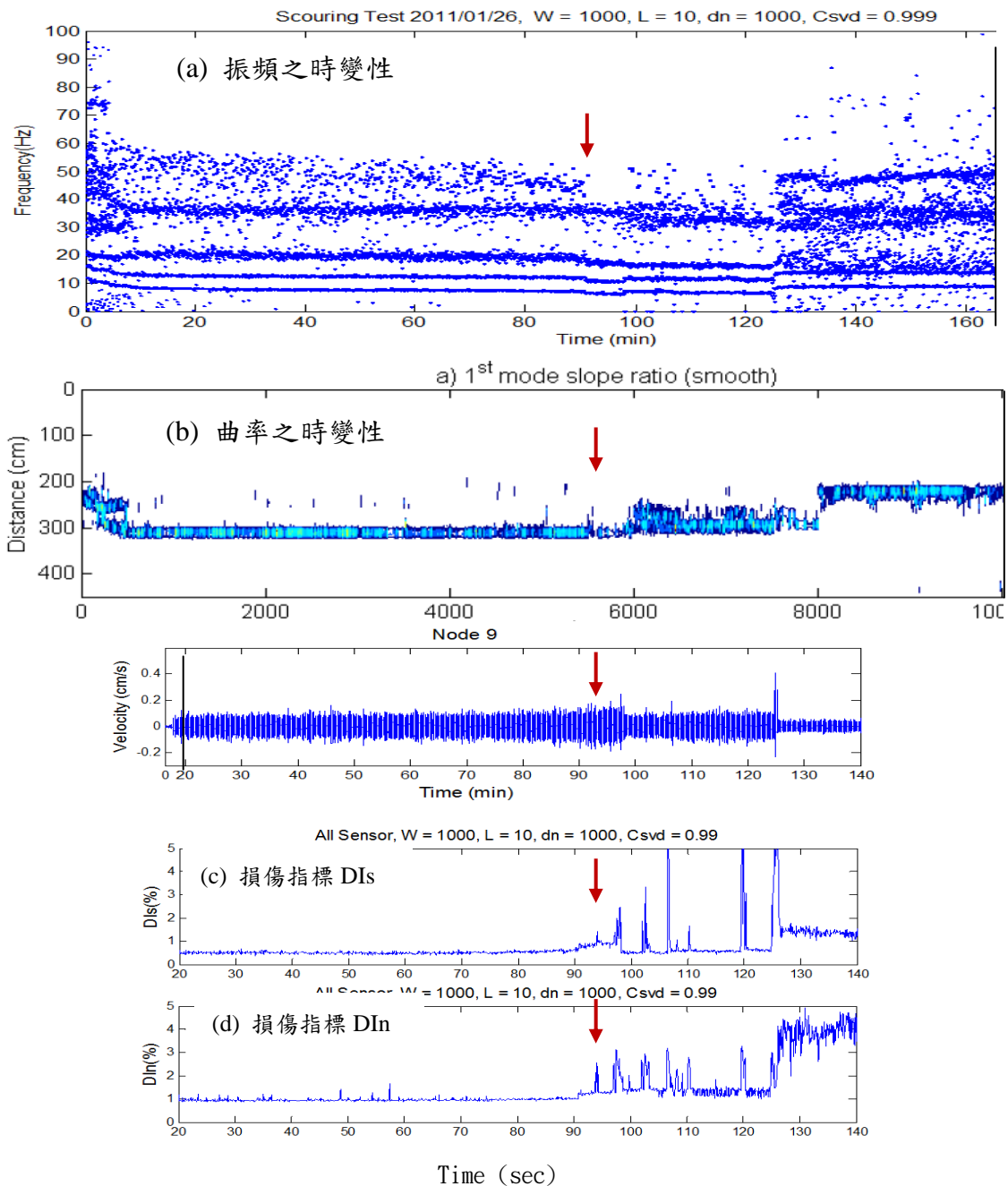


圖六：大型水工實驗進行橋墩冲刷之相關配置圖



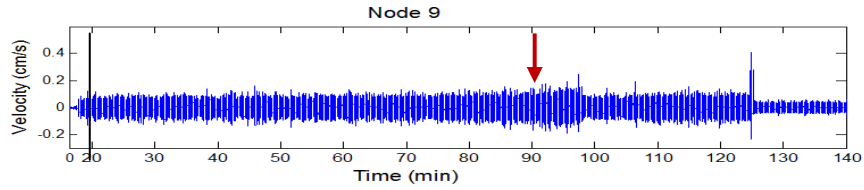
圖七：各橋墩冲刷深度之變化圖

今配合所提出之損傷指標(近乎即時上線分析)偵測各指標之時變性，以判斷損壞發生之時間、位置及程度。無論針對在常態結構振動監測或具有事件下(如沖刷)，對振動特性之識別或損傷評估，資料之選取均為Multi-variate式(多點資料一併分析)。圖八則列出：(1) Sensor-9之反應記錄，(2)振頻之時變性(RSSI-COV)，(3)Null-space and Subspace Damage Index; (4) 瞬時振形之曲率之變化量；(5) Novelty index of time-frequency analysis; (6) 形狀能譜之變異量分析；(7) 配合有限元模式更新識別損傷程度。由此一系列之分析可了解，損傷發生之時間及破壞程度，而此評估方法僅採用反應量測訊号之分析結果予以判定。

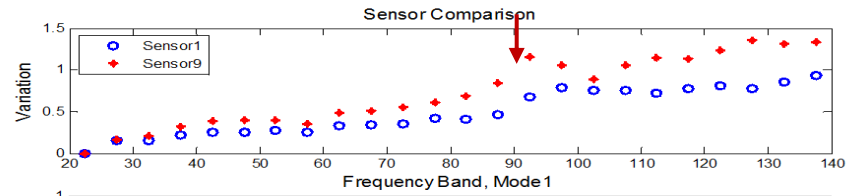


圖八a：利用RSSI-COV識別振頻之時變性、曲率之時變性、損傷指標DI_s及DI_n，與 sensor-9所記錄之反應訊號比較

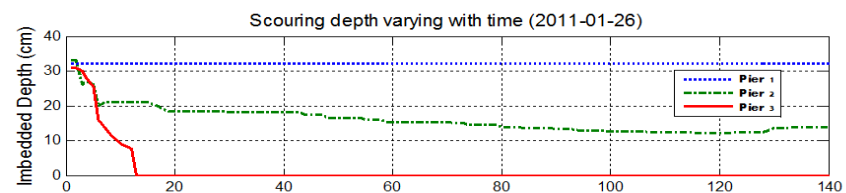
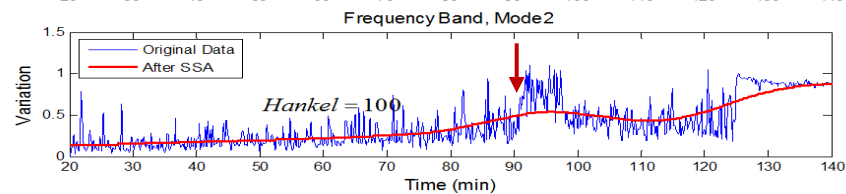
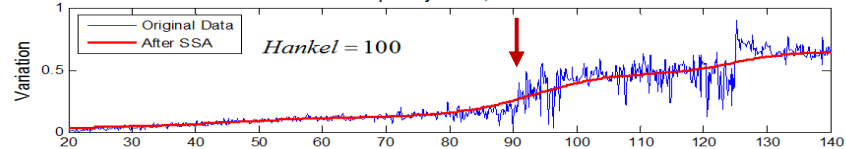
Recorded data:
From sensor 9



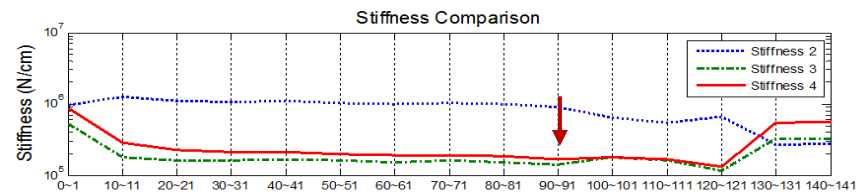
Novelty index:
difference on
Spectrogram



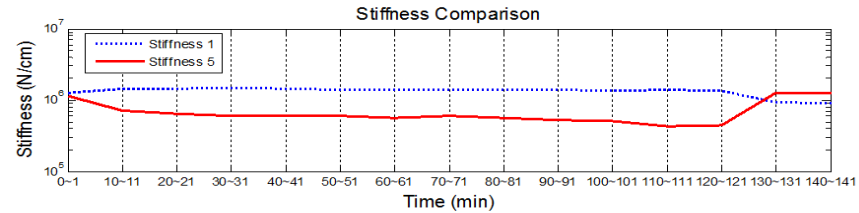
Correlation of
Spectral shape



Model updating:
Pier 1,2 and 3
墩基礎勁度
之變化



Model updating:
基礎勁度之變化



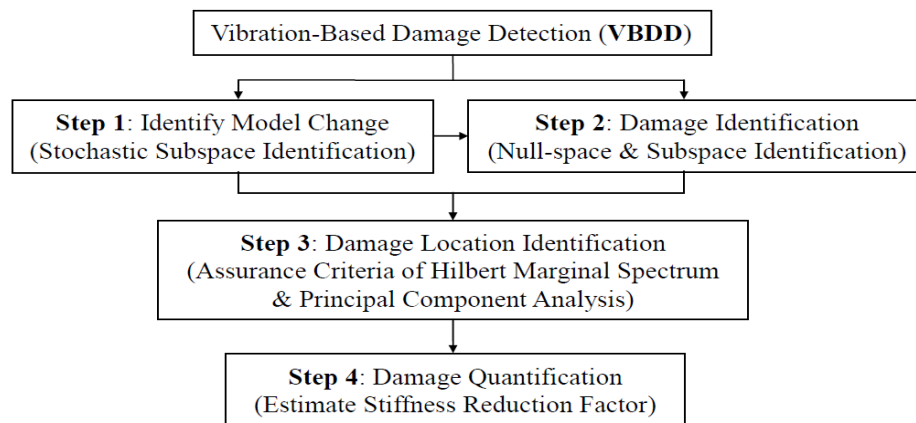
圖八b: Novelty index (difference on spectrogram), and
Stiffness change from Model updating

四、結論與建議

近年來台灣有許多橋梁在颱風侵襲期間因為暴漲的溪水或土石流沖蝕，導致橋面板的陷落及橋體的損壞，造成人命傷亡與經濟損失。當務之急除了針對現有橋梁進行整體安全性評估之外，將來更需要發展準確與可靠的橋梁監測系統，對橋梁的安全性進行即時的監測，並在橋梁損害發生與倒塌之前提供預警訊息，以減少人命與經濟財產的損失。本研究利用無線傳輸技術，開發以振動量測為基礎的橋樑監測平台，並採用遞迴隨機子空間識別法(Recursive Stochastic Subspace Identification, RSSI)對收集之量測訊號進行分析，以及開發橋梁損壞指標，以達到橋梁監測與預警

之目的。該監測平台已成功應用至實驗室縮尺橋樑模型試驗，以及現地關渡大橋微振動的長期監測。圖九則展示整體監測模組之流程，除可即時偵測結構之損壞外，亦可探討損傷位置及損傷程度。此研究成果包含：

- (1). 即時橋樑監測平台的建立：其中包含了無線傳輸單元的製作、感測器的選擇與性能研究、資料處理平台的建置、軟硬體的开发與整合等等。
- (2). 系統識別方法的研究與改進：其中包含了遞迴式子空間識別法的研究、數值演算法的改進與計算效率的提升等等。
- (3). 橋樑損壞評估與預警方式的研究：其中包含了不同的損壞指標之特性以及其適用性等等。
- (4). 試驗場橋樑模型沖刷實驗：其中包括了試驗的規劃、橋樑模型的设计、橋墩沖刷的監測、振動訊號的量測與分析，系統識別與損壞評估方法的驗證等等。



圖九：整體監測分析模組之流程(含探討損傷位置及損傷程度)

參考文獻

1. Loh, C.H. and Liu, Y.C., "Application of recursive SSA as data pre-processing filter for stochastic subspace identification," *Accept for publication in Smart Structures and Systems*, Vol.11, No.1 (2013)
2. Chao, S. H. and Loh, C. H., "Application of Singular Spectrum Analysis to Structural Monitoring and Damage Diagnosis of Bridges," *Accept for publication J. of Structures and Infrastructural Systems* (2012)
3. Liu, Y. C., Loh, C. H. and Ni, Y. Q., "Stochastic Subspace Identification for Output-only Modal Analysis: Application to Super High-rise Tower under Abnormal Loading Condition," *Earthquake engineering & Structural dynamics* (Accepted, in printing), 2012.
4. Loh, C. H., Liu, Y. C. and Ni, Y. Q., "SSA-based stochastic subspace identification of structures from output-only vibration measurements," *Smart Structures and Systems*, Vol.10, No.4-5, 331-351, 2012
5. Loh, C. H.*, J.-H. Weng, Yi-Cheng Liu, Pei-Yang Lin and Shieh-Kung Huang, "Structural Damage Diagnosis Based on On-line Recursive Stochastic Subspace Identification," *J. Smart Materials and Structures*, Vol. 20, No. 5, May 2011.
6. Weng, J.H. and Loh, C. H., "Recursive Subspace Identification for Online Tracking of Structural Modal Parameter," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25 (2011) 2923-2937.