

動態應變結合邊緣運算技術 在預力梁結構健康監測上之創新應用

國立中興大學土木工程系 / 林宜清
弘光科技大學資訊工程系 / 董建樺
財團法人中華顧問工程司 / 蔡欣局、黃進國、葉承軒

Photo by Modestas Urbonas on Unsplash

本文之目的在於利用動態應變資料來評估預力混凝土梁之結構健康狀態。橋梁結構健康監測 (Structural Health Monitoring, 簡稱 SHM) 技術的發展歷史已經超過 30 年, 可惜的是受限於環境溫度變化對橋梁監測資料造成明顯影響, 讓各種常用的監測物物理量指標, 例如橋梁振動頻率、變位、應變... 等, 甚難作為橋梁結構健康之量化指標。本文基於預力混凝土梁之等效撓曲剛度會因預力損失而變小之特性, 利用動態應變計來監測預力梁在車輛通過引起之動態應變反應, 作為結構健康監測指標, 由於車輛通過引起之應變反應僅有幾秒鐘時間, 故環境溫度可視為不變, 故該指標不會受季節溫度變化所影響。為了增進現場監測資料傳輸與資料分析之效能, 本文開發一個創新的具有邊緣運算功能之動態應變計, 將取樣頻率為 100 Hz 之連續資料在感測器端進行運算, 運算結果只傳輸每一分鐘內之最大動態應變資料, 這樣可將每分鐘原本有 6000 筆資料大幅降低成只傳送一筆資料, 使得每一個應變感測器可搭配低耗能廣域物聯網 (LPWAN) NB-IoT 無線通訊模組, 即可成為一個高效能且可獨立運作之動態應變感測器。

一、前言

發展橋梁結構健康監測技術一直為工程界積極努力的目標，橋梁結構健康監測乃在結構上配置各類型感測器（例如加速規、傾斜儀、位移計、應變計、荷重計、溫度計…等），作為監測結構對外在刺激所產生之反應^[1-3]。所測得之結構反應經由結構系統特性分析，可以即時檢知結構損傷或劣化情況，以達到橋梁結構使用安全之目的。結構健康監測系統一般包括感測器系統、資料擷取系統、監控中心以及訊號診斷識別技術^[4,5]。

結構健康監測以取樣頻率來分類的話，可以分為靜態監測和動態監測。通常靜態監測的取樣頻率較慢，大都是在特定時間間隔（例如一秒鐘、一分鐘、十分鐘或是一小時）才進行一次資料擷取；至於動態監測，其取樣頻率就明顯快很多，對於自然振動頻率介於 0.2 ~ 20 Hz 之間的橋梁結構而言，100 Hz 之取樣頻率（即為每秒擷取 100 筆資料）已經足夠。橋梁結構健康監測的發展歷史已經超過 30 年，可惜的是受限於環境溫度變化對橋梁物理行為有明顯影響，讓各種常用的監測物理量指標，例如橋梁振動頻率、靜態變位、靜態應變…等。由於上述物理量之量測數據都會遭受環境溫度變化之重大影響，故甚難作為量化橋梁結構健康指標之用，只能藉由各種統計分析方法來進行定性的趨勢分析。換句話說，在此領域發展一直無法獲得明確的「定量」指標，作為「即時」橋梁安全管理之用^[6]。

本研究將利用日常通過預力橋梁的車輛作為動態載重，經由配置應變計來量測預力梁在車輛動態載重作用下引起之相對應變變化。通常車輛通過預力混凝土橋梁所需歷時大約幾秒鐘而已，溫度可視為無變化，因此車輛通過引

起之相對應變變化量只會跟車輛重量與預力梁之等效撓曲剛度有關，故本研究所探討之動態應變相對變化量可以消除溫度效應。基於預力混凝土梁之等效撓曲剛度會因預力損失而變小之特性，藉由觀察車輛通過預力梁之動態應變相對變化量，就可以作為預力損失之指標。

動態應變量測技術除了資料擷取設備成本比較高以外，還必須面臨動態應變監測所需要記錄的資料量相當大，對現場監測系統會造成極大負荷，可能衍生出耗電以及系統不穩之問題，故要作為現場應用確實會令人卻步。為了解決動態量測所產生龐大資料量傳送之問題，本研究採用物聯網邊緣運算 (Edge computing) 技術，邊緣運算將應用程式對數據資料的運算分析，由網路中心節點（雲端伺服器），移往邊緣節點（感測器端）來處理，因此感測器端只需要傳送運算結果之關鍵數據。邊緣運算的最大優點為減輕網路和伺服器之負荷，使得每一個感測器可直接搭配低功耗廣域物聯網 (LPWAN) NB-IoT 無線通訊模組連上網際網路而成一個高效能之獨立監測主體，現場不需要再配置任何主機或閘道器。

二、橋梁結構健康監測現況

撓曲變位 (deflection) 與應變 (strain) 皆屬於混凝土梁受外在環境改變（外力、支承條件、溫度變化…）或是梁本身劣化受損（裂縫、火害、預力損失…）都會隨之產生變化的物理量，因此這二個物理量是橋梁監測的最主要對象。

通常橋梁不是高架橋就是跨河橋，「變位」監測只能將橋墩柱當作基準點，利用每隔

一段時間觀測一次 (靜態) 的方法，來測得橋梁某些特定點與基準點在重力方向之相對變位。但是橋梁的相對變位受季節性的溫度變化所主導如圖 1 所示，圖 1-a 為某高架橋中間跨度某一點之歷時相對變位反應，圖 1-b 為該橋之溫度變化，比較圖 1-a 與圖 1-b 可以發現橋梁的相對變位受季節性的溫度變化所主導，高

架橋中間跨度會因溫度升高而有拱起現象如圖 1-c 數值分析結果所示，反之亦然。至於每天眾多車輛通過引起之變位幾乎被溫度效應引起之變位所淹沒，這樣使得原本車輛通過應該可以反映結構劣化 (例如地震損傷或是預力損失) 造成抗撓能力弱化現象，無法即時呈現出來。

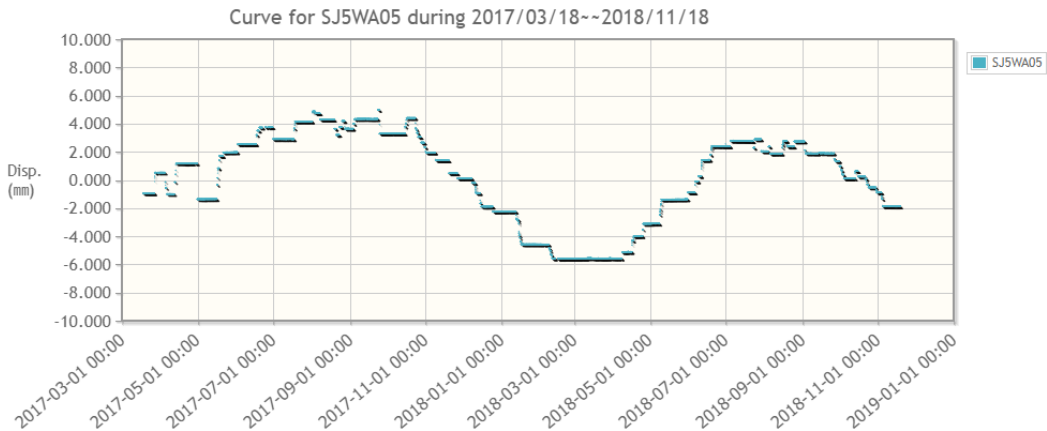


圖 1-a. 高架預力梁長期 (1 年 8 個月) 監測 - 中間跨度某一點之相對變位

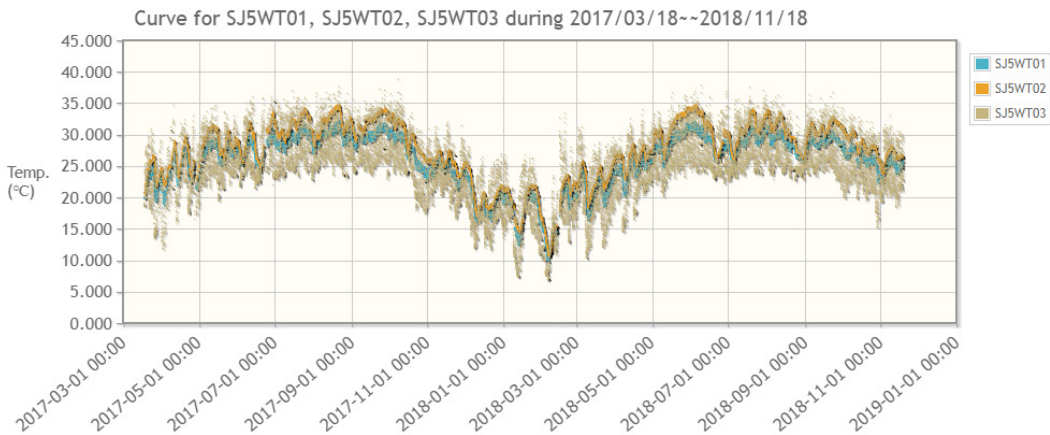


圖 1-b. 高架預力梁長期 (1 年 8 個月) 監測 - 溫度變化

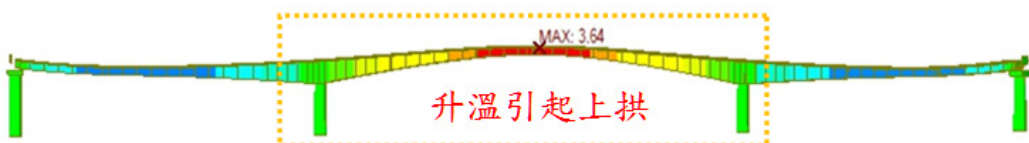


圖 1-c. 高架預力梁長期 (1 年 8 個月) 監測 - 數值分析模型

相對於變位，應變對外力的反應更為靈敏，故應變監測應該可以成為結構健康監測更佳之選擇。但是傳統上採用的靜態應變監測方法，跟橋梁變位一樣，也是會受溫度變化所影響。

圖 2-a 與圖 2-b 分別為某高架橋大梁之應變走勢與溫度變化，比較二個圖可以發現三跨度之應變走勢與溫度變化趨勢有明顯的相關性。故溫度變化主導了應變量測結果之走勢。同樣的，每天眾多車輛通過引起之應變幾乎被溫度效應所淹沒，這樣使得原本車輛通過應該可以

反映結構劣化 (例如地震損傷或是預力損失) 造成抗撓能力弱化現象，無法即時呈現出來。

通常應變計量測到之應變算是視應變 (apparent strain)，視應變包含溫度變化引起之應變與力學應變。理論上，只要能將溫度引起之應變從視應變中扣除掉，即可得到結構分析所需要之力學應變，但是由於目前常用的應變計 (電阻式、振弦式與光纖光柵式) 都會受到長時間環境溫度變化影響，所量測到之應變存在漂移 (drift) 現象，使得訊號分析相當困難，甚至無法有效得到合理的力學應變。

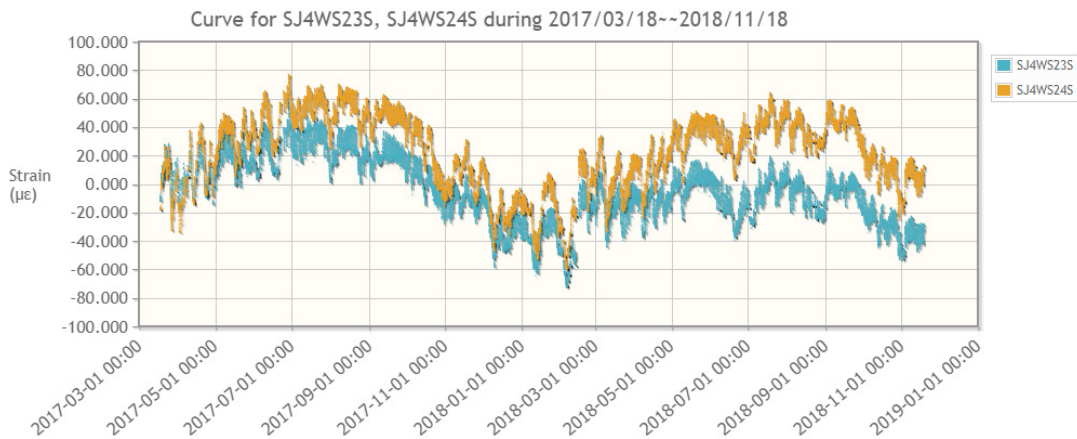


圖 2-a. 高架預力梁長期 (1 年 8 個月) 監測 - 中間跨度某一點之應變

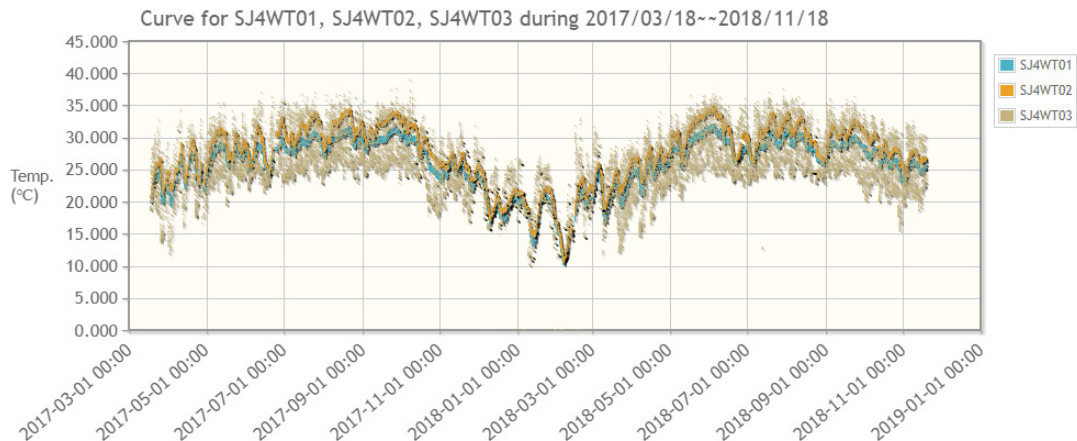


圖 2-b. 高架預力梁長期 (1 年 8 個月) 監測 - 溫度變化

三、智慧型動態應變計

傳統電阻式應變計如果配置較長的訊號線才進行類比 / 數位轉換，就容易受電磁干擾，因此必須將類比訊號線縮到最短，可有效免除電磁雜訊及導線的溫度效應干擾如圖 3 所示，該電路將以內建可程式控制放大器 (PGA) 之類比數位轉換器 (ADC) 為主，以串列數位匯流排由節點微處理器控制放大倍率及 ADC 參數。訊號轉換器選擇 24-bit Delta-Sigma 類型 ADC，可在所需取樣動態頻率範圍內 (約 1 kHz) 大幅提昇訊號解析度，並獲得較低雜訊的轉換結果。

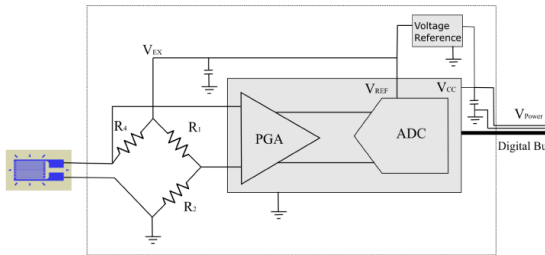


圖 3. 高精度動態應變訊號擷取電路

為免除電源飄移造成量測結果的偏差，橋式電路的激發源 (V_{EX}) 及 ADC 的參考電壓 (V_{REF}) 採軌對軌 (rail-to-rail) 設計。在同時兼顧省電及高精度的考量，與傳統電阻式應變計以 LDO (Low-Drop Regulator) 為供電電源設計不同，本研究以精準參考電壓 (Voltage Reference) IC 供應 V_{EX} 及 V_{REF} ，可同時降低耗電及自發熱效應，並提高穩定度。值得注意的是，傳統電阻式應變計處理電路，因考量長導線造成的衰減及雜訊，大多採用 12 V 以上的激發電壓，除造成高耗電問題，也只能使用輸出電壓變異較大的 LDO 做為電源，所以就算使用高解析度的 ADC，還是無法將雜訊降低至 $1\mu\epsilon$ 以下。本研究的創新設計，已大幅降低導線的干擾，可將 V_{EX} 及 V_{REF} 降低至 2.5 V。以一般 120 歐姆之

電橋電路來算，供應電流僅需 20 mA，因此可使用高精度的參考電壓 IC 直接供電，其初始輸出誤差一般可降到 0.01%，而遠低於傳統 LDO 的 1 ~ 5%。

本文所稱智慧型動態應變計是指本身具有邊緣運算功能之動態應變計。為了讓動態應變計具有邊緣運算功能，電阻式應變計旁邊需配置智慧節點，智慧節點有如微型電腦一樣，需要處理器、記憶體進行數據運算，需要標準工業通訊介面與周邊裝置溝通，需要數位 I/O 控制開關，亦需要電源供應電路驅動整個節點運作。

上述智慧節點乃採用微控制器做為核心，該晶片已內建處理器、記憶體、通訊及 I/O 介面。其主時脈將由內建 DCO (Digitally Controlled Oscillator) 振盪器驅動，可依照節能與效能需求，由韌體動態控制 (0 Hz~16 MHz)。該電路將以 SPI (Serial Peripheral Interface) 介面與前述高精密動態應變訊號擷取模組連接，由微控制器控制 PGA 及 ADC 之運作並接收數位化後之資料。此外，藉由 UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) 介面，與 NB-IoT 通訊模組連接，由微控制器發送 AT commands 進行連線控制，使節點可直接與雲端伺服器連線。

監測橋梁的動態應變可以感應各類型車輛通過引起之橋梁反應，可隨時掌握橋梁的受力行為以進行有效的安全管理。但是至今連續動態應變監測並不常被採用，除了動態量測儀器成本比較高以外，還有另一個更重要原因是動態應變監測所需要記錄的資料量相當大，對現場監測系統會造成極大負荷，可能衍生出耗電以及系統不穩之問題，故令人卻步。

本研究採用邊緣運算的創新技術，來解決既有動態應變監測系統的龐大資料量傳送所衍生之問題。邊緣運算 (Edge computing) 是一種分散式運算的架構，將雲端伺服器的資料運算工作移至邊緣節點 (感測器節點)，其最大優點為減輕網路和伺服器上的負荷。分散式感測器內部都會配置 MCU，MCU 本身會有中央處理器 (CPU)、記憶體、計時器以及各種輸入輸出介面，其最大優點是體積小成本低，可放在儀器內部，但記憶體的儲存量相當小，限制了 MCU 韌體開發之自由度，並增加動態資料暫存處理的困難度。

本研究將邊緣運算技術應用在橋梁結構健康監測主要概念說明如下：由於車輛通過橋梁會引起橋梁的暫態應變反應，可以在橋梁跨度接近中點處安裝動態應變計，以監測各種車輛通過引起之最大動態應變反應，作為結構健康監測指標。動態應變計的數據輸出方式有二種可能，第一種是傳統上的作法，就是將所有記錄到的應變數據全部傳送到伺服器，再由伺服器來進行資料的判讀；第二種則是運用創新的邊緣運算技術在感測器節點進行資料處理與判讀，最後只傳送關鍵數據 (例如只傳送每分鐘

車輛通過橋梁引起之局部相對最大應變值) 給伺服器。上述二種數據輸出方式與分析的差異性可以用圖 4 來說明。

圖 4-a 為某一 180 秒 (3 分鐘) 時段的動態應變連續輸出的數據，從圖上可以清楚看到大小車經過橋梁引起大小不一的動態應變反應，圖 4-a 是每秒擷取 100 筆資料，該連續輸出數據合計有 18,000 筆，龐大的數據輸出，會對現場監測系統造成極大負荷，可能衍生出耗電以及系統不穩定之問題。第二種輸出方式只要將某特定時間範圍內之關鍵數據輸出即可，例如圖 4-b 就是利用物聯網邊緣運算技術，將圖 4-a 三分鐘連續輸出的動態應變數據，只輸出每分鐘內局部相對最大應變反應及其發生時間之關鍵數據，例如第 1 分鐘、第 2 分鐘與第 3 分鐘分別為 4.05、9.93 與 4.54，輸出結果將如圖 4-b 所示。因此可以將原本 3 分鐘內需要輸出 18,000 筆資料大幅下降只要輸出 3 筆，如果時間延長為一天，則本來需要輸出 8,640,000 筆資料，利用第二種數據輸出方式一天只要輸出 1,440 筆，如此監測系統就可以輕鬆穩定的持續運作。

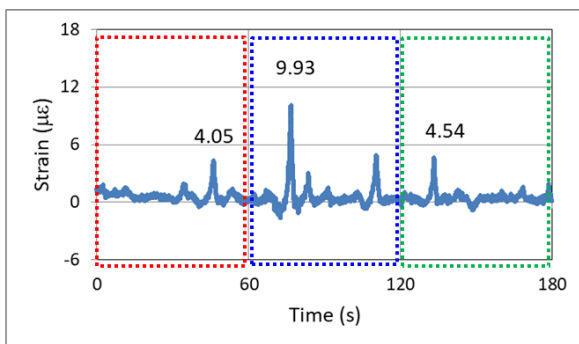


圖 4-a. 連續數據輸出

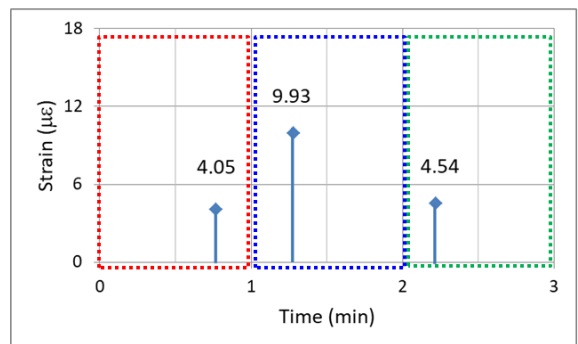


圖 4-b. 每分鐘輸出一筆最大值

圖 4. 橋梁的動態應變

本研究之動態應變監測系統結合動態類比 / 數位電路設計、高階微控制器、邊緣運算、備份用記憶體及通訊技術，形成超低耗能動態感測器網路系統，每個感測結點結合通訊節點運作時皆可達到毫瓦特 (mW) 耗電量等級。本監測技術主要特色在於各感測器端點已經完成類比 / 數位轉換，所有輸出訊號都已經是數位訊號，不大會受環境雜訊干擾其訊號傳輸，確保訊號品質，特別適合應用於橋梁之結構健康監測。

四、現場預力橋梁結構健康監測之應用

無線動態應變計之現場應用以苑裡蘭草脊背橋為例，無線動態應變計安裝在苑裡蘭草脊背橋長跨距接近中點處的南下方向箱室內靠近底部位置，如圖 5 所示。

圖 6 為無線動態應變計之儀器安裝照片，圖 6-a 為箱室內安裝完成之電阻式應變計以及具有資料擷取與邊緣運算功能之智慧節點；圖 6-b 為箱室外 NB-IoT 無線通訊與太陽能供電模組安裝完成之照片。無線動態應變計監測系

統之運作方式為由太陽能供電模組來供電給箱室內之智慧節點與箱室外之 NB-IoT 無線通訊單元，為了隨時監測過往車輛，與應變計搭配之智慧節點 24 小時無休眠的連續擷取動態應變資料，並執行邊緣運算得到每一分鐘的關鍵數據後，每 10 分鐘啟動一次 NB-IoT 無線通訊將關鍵數據資料傳送到雲端資料庫。

圖 7 為苑裡蘭草脊背橋無線動態應變計監測到每分鐘由相對最大載重車引起之橋跨動態

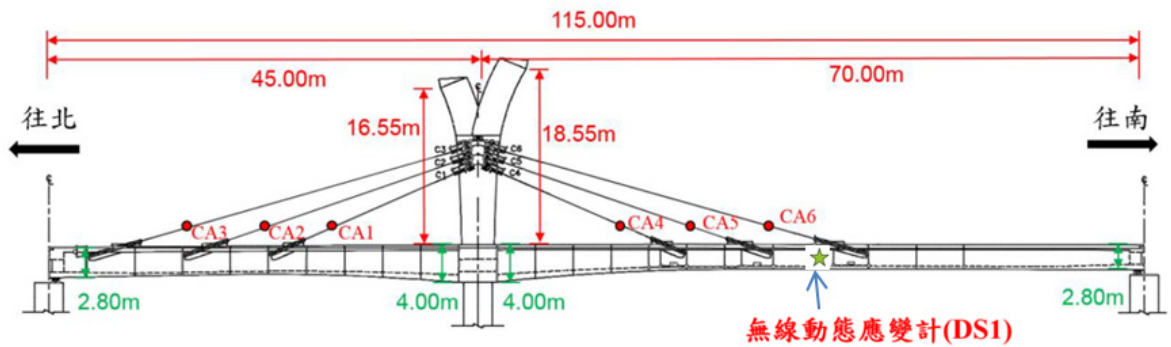


圖 5. 苑裡蘭草脊背橋無線動態應變計安裝位置示意圖

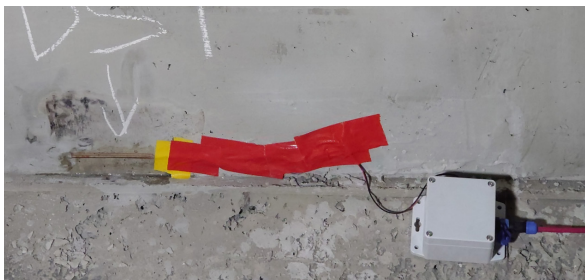


圖 6-a. 電阻式應變計與智慧節點



圖 6-b. NB-IoT 無線通訊與太陽能供電模組

圖 6. 無線動態應變計之儀器安裝

應變反應歷時曲線。由於無線動態應變計之雜訊相當小 (約 $0.2 \mu\epsilon$) 且有很高的解析度，故可以偵測到小型車之通行訊號；由圖 7 可以清楚看到星期日 (綠色框) 與其他日子出現明顯不同的二種現象：一為動態應變反應會穿插較小的反應如黃色框所示；二為動態應變反應超過 $20 \mu\epsilon$ 之次數非常少。反觀星期一到星期六，在白天期間幾乎看不到較小的動態應變反應如紅色框所示，表示每分鐘都有大型車在通行；另外，星期一到星期六動態應變反應超過 $20 \mu\epsilon$ 之次數就明顯很多，這表示星期一到星期六有不少重型車在通行。

圖 8 為苑裡蘭草脊背橋 2021/09/01 至 2021/11/17 期間之動態應變歷時反應，與圖 7 一樣橋梁每天通過之車輛引起動態應變反應呈現有一定的規律性，星期一到星期六，在白天期間幾乎看不到較小的動態應變反應，表示每分鐘都有大型車在通行，只有星期日才能看到較小的動態應變反應。對於圖 8 的動態應變歷時反應除了上述可以知道橋梁的交通狀況外，更重要的是動態應變反應可以反映出橋梁現況之撓曲勁度，當橋梁出現劣化時 (例如預力損失)，將會使得橋梁之撓曲勁度降低，而導致橋梁動態應變反應變大。因此，藉由長期動態應變監測即可以研判橋梁是否出現劣化現象。

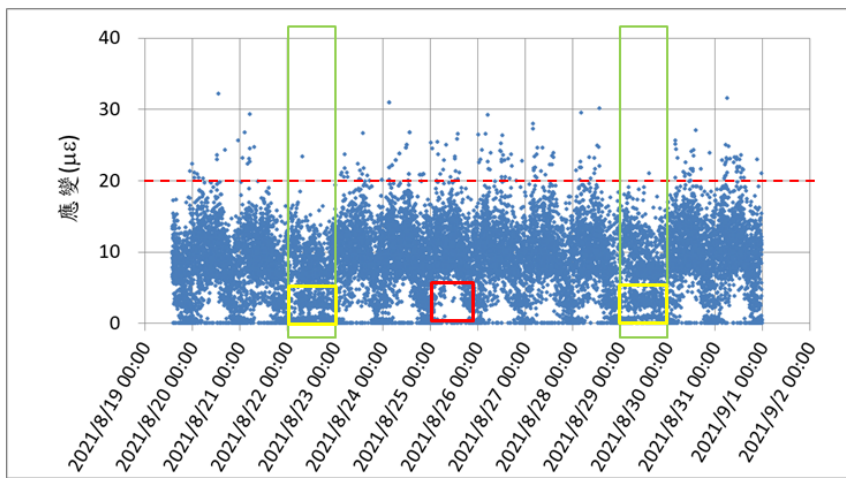


圖 7. 每分鐘相對最大載重車引起之橋跨動態應變反應歷時曲線

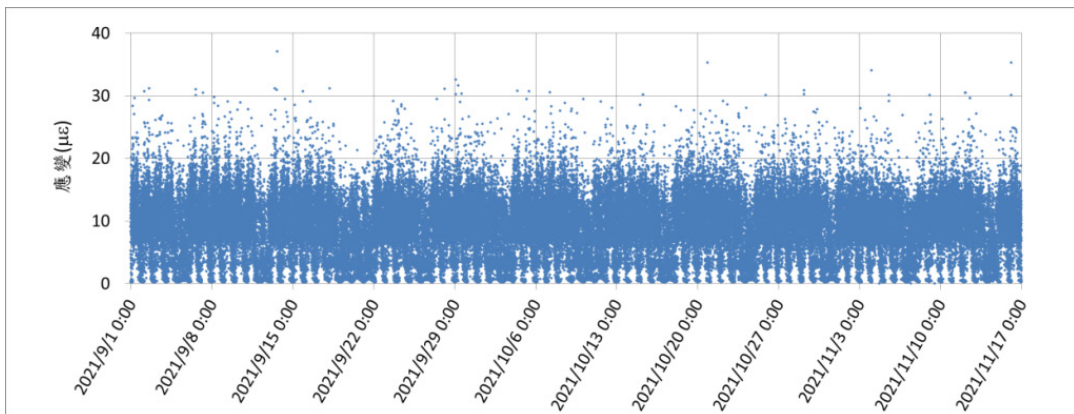


圖 8. 苑裡蘭草脊背橋 2021/09/01 至 11/17 之動態應變歷時反應

五、結語

本研究開發一個創新的具有邊緣運算功能之動態應變計節點，只傳輸每一分鐘內之相對最大動態應變資料，這樣可將每分鐘原本有 6000 筆資料大幅降低成只傳送一筆資料，使得應變感測器節點可搭配低耗能廣域物聯網 (LPWAN) NB-IoT 無線通訊模組，成為一個高效能且可獨立運作之動態應變感測器。研究結果顯示，本研究開發之動態應變計邊緣運算智慧節點，可以有效正確輸出每分鐘之關鍵數據，達到減輕監測系統龐大資料量之負擔，增進監測系統效能與穩定性之功能；橋梁每天通過之車輛引起動態應變反應會呈現一定的規律性，若監測期間的動態應變呈現穩定狀況，表示橋梁在此期間沒有發生明顯劣化現象；但是若規律性出現變化，例如應變反應有放大現象，則必須注意橋梁應該正在產生預力損失或其他劣化之行為。

參考資料

- (1) Farrar CR, Worden K. An introduction to structural health monitoring, *Philos. Trans. R. Soc. A* 2007; 365; 303–315.
- (2) Xia Y, Chen B, Weng S, Ni YQ, Xu YL. Temperature effect on vibration properties of civil structures: a literature review and case studies. *J Civ Structrual Heal Monit* 2012; 2; 29–46.
- (3) Kromanis R. Structural performance evaluation of bridges: characterizing and integrating thermal response. 2015; University of Exeter
- (4) Li HN, Ren L, Jia ZG et al. State-of-the-art in structural health monitoring of large and complex civil infrastructures. *J Civil Struct Health Monit* 2016; 6; 3-16.
- (5) Chen Z, Zhou X, Wang X, Dong L, Qian Y. Deployment of a Smart Structural Health Monitoring System for Long-Span Arch Bridges: A Review and a Case Study. *Sensors* 2017; 17, 2151.
- (6) Seo J, Hu JW and Lee J. Summary review of structural health monitoring applications for highway bridges. *J Perform Constr Facil* 2015; 30(4). DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000824.