

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 期末報告

## 智慧型無線感測監控系統平臺建構與其在土木結構診斷應用之研究--子計畫:無線壓電式結構局部損傷偵測監測器之研發(I)

計畫類別：整合型  
計畫編號：NSC 101-2625-M-009-006-  
執行期間：101年08月01日至102年10月31日  
執行單位：國立交通大學土木工程學系(所)

計畫主持人：洪士林

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：丁君廷  
碩士班研究生-兼任助理人員：林子陽  
碩士班研究生-兼任助理人員：沈錦鴻  
碩士班研究生-兼任助理人員：李奇霖  
碩士班研究生-兼任助理人員：徐義洋

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

公開資訊：本計畫可公開查詢

中華民國 103 年 01 月 14 日

中文摘要：近年來，結構健康監測在土木基礎建設上越來越高的重視，而其中運用壓電材料於檢測結構局部損傷在近年來被廣泛討論與應用。由於在分析壓電材料之電阻抗譜通常係透過一台阻抗分析儀器，而採用阻抗分析儀器由於其體積龐大且須較多之電源供應，因此不太適於較長期土木結構監測以及現地部屬。而無線感測網路技術有著省電、價格低廉、體積小安裝快速等優點，因此如何發展一個體積小、低成本、高穩定度與低功耗之無線壓電阻抗感測器，應用於長期之結構局部損傷監測為一項重要之議題。有鑑於此，本計畫研發基於低功耗無線壓電式結構局部損傷偵測器，應用結構局部健康監測上。主要分為三個部份；第一個部份為整合阻抗量測晶片技術、低功耗無線傳輸與微處理器運算技術，用以監測結構物之局部阻抗參數並重建阻抗頻譜。第二部分為開發一套基於此智慧壓電感測器之控制軟體與使用者介面，達到監測之結構物環境資訊化與網路組織維護，以節省建置之時間。第三部分為嵌入壓電式結構阻抗局部損傷偵測器演算法與損傷指標方法，識別出結構局部之損壞位置與損壞程度。本計畫完成了感測器之軟硬體設計與開發，並於縮尺模型下進行局部損傷實驗，其結果顯示可有效的辨識出非常微小之結構局部狀態變化，未來可充分運用於土木之結構局部監測應用。

中文關鍵詞：結構健康監測、局部損傷偵測、壓電材料、壓電阻抗法、無線感測器

英文摘要：The Electro-Mechanical-Impedance (EMI)-Based damage detection method has been studied extensively as a powerful technique at localizing damage. However, the EMI methods required the use of expensive and bulky impedance analyzers that are not suitable for long-term field deployment. Therefore, this project presents development of a wireless-based multi-channel impedance sensing system for detecting location of structure local damage. This project is composed of three parts. First part is the development of wireless impedance sensor node. The second part is development of application software. The final part is local damage detection schemes. The wireless impedance sensor node is consists of a microprocessor, wireless communication module, and a powerful impedance analysis chip as well as two multiplexers. The sensor not only has the properties of cost-efficient, low power requirements, small

size, and simple deployment, but also has the multi-channel function that allows the user to monitor seven-channel PZT patch from a single device. Herein, local damage detection schemes include root-mean-square deviation (RMSD) index to locate the local damages of the structure. The feasibility of the proposed wireless impedance-based sensing system was assessed using a 1/8-scale three-storey steel-frame model with various damage scenarios. It was confirmed experimentally that good sensing quality can be achieved via proposed system and locations of structure local damages can be identified.

英文關鍵詞： structural health monitoring； local damage detection； piezoelectric material (PZT)； Electro-Mechanical Impedance； wireless sensor

# 行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

(期中進度報告/期末報告)

智慧型無線感測監控系統平臺建構與其在土木結構診斷應用之研究

-子計畫：無線壓電式結構局部損傷偵測監測器之研發(I)

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 101-2625-M-009-006

執行期間：101年8月1日至102年10月31日

執行機構及系所：國立交通大學 土木工程學系

計畫主持人：洪士林

共同主持人：

計畫參與人員：丁君廷、林子揚、李奇霖、徐義洋、沈錦鴻

本計畫除繳交成果報告外，另含下列出國報告，共 2 份：

執行國際合作與移地研究心得報告

出席國際學術會議心得報告 兩份

期末報告處理方式：

1. 公開方式：

非列管計畫亦不具下列情形，立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權，一年二年後可公開查詢

2. 「本研究」是否已有嚴重損及公共利益之發現：否 是

3. 「本報告」是否建議提供政府單位施政參考 否 是，\_\_\_\_\_（請列舉提供之單位；本會不經審議，依勾選逕予轉送）

中華民國一〇三年一月十日

## 中文摘要

近年來，結構健康監測在土木基礎建設上越來越高的重視，而其中運用壓電材料於檢測結構局部損傷在近年來被廣泛討論與應用。由於在分析壓電材料之電阻抗譜通常係透過一台阻抗分析儀器，而採用阻抗分析儀器由於其體積龐大且須較多之電源供應，因此不太適於較長期土木結構監測以及現地部屬。而無線感測網路技術有著省電、價格低廉、體積小安裝快速等優點，因此如何發展一個體積小、低成本、高穩定度與低功耗之無線壓電阻抗感測器，應用於長期之結構局部損傷監測為一項重要之議題。有鑑於此，本計畫研發基於低功耗無線壓電式結構局部損傷偵測器，應用結構局部健康監測上。主要分為三個部份；第一個部份為整合阻抗量測晶片技術、低功耗無線傳輸與微處理器運算技術，用以監測結構物之局部阻抗參數並重建阻抗頻譜。第二部分為開發一套基於此智慧壓電感測器之控制軟體與使用者介面，達到監測之結構物環境資訊化與網路組織維護，以節省建置之時間。第三部分為嵌入壓電式結構阻抗局部損傷偵測器演算法與損傷指標方法，識別出結構局部之損壞位置與損壞程度。本計畫完成了感測器之軟硬體設計與開發，並於縮尺模型下進行局部損傷實驗，其結果顯示可有效的辨識出非常微小之結構局部狀態變化，未來可充分運用於土木之結構局部監測應用。

**關鍵字:** 結構健康監測、局部損傷偵測、壓電材料、壓電阻抗法、無線感測器

## **Abstract**

The Electro-Mechanical-Impedance (EMI)-Based damage detection method has been studied extensively as a powerful technique at localizing damage. However, the EMI methods required the use of expensive and bulky impedance analyzers that are not suitable for long-term field deployment. Therefore, this project presents development of a wireless-based multi-channel impedance sensing system for detecting location of structure local damage. This project is composed of three parts. First part is the development of wireless impedance sensor node. The second part is development of application software. The final part is local damage detection schemes. The wireless impedance sensor node is consists of a microprocessor, wireless communication module, and a powerful impedance analysis chip as well as two multiplexers. The sensor not only has the properties of cost-efficient, low power requirements, small size, and simple deployment, but also has the multi-channel function that allows the user to monitor seven-channel PZT patch from a single device. Herein, local damage detection schemes include root-mean-square deviation (RMSD) index to locate the local damages of the structure. The feasibility of the proposed wireless impedance-based sensing system was assessed using a 1/8-scale three-storey steel-frame model with various damage scenarios. It was confirmed experimentally that good sensing quality can be achieved via proposed system and locations of structure local damages can be identified.

**Keywords:** structural health monitoring; local damage detection; piezoelectric material (PZT); Electro-Mechanical Impedance; wireless sensor

## 目錄

一、 前言 .....	1
二、 研究背景與目的 .....	3
三、 文獻回顧 .....	5
3.1 基於壓電式阻抗下結構局部損傷診斷研究探討 .....	5
3.2 無線式壓電式結構局部感測器之研究探討 .....	6
四、 研究方法 .....	8
4.1 壓電智慧材料 .....	8
4.2 壓電阻抗法(Impedance-based techniques) .....	10
4.3 壓電阻抗法之結構局部損壞指標之方法 .....	11
4.4 無線壓電式阻抗偵測器之軟硬體設計 .....	12
4.4.1 軟硬體平台簡述與資源運用分析 .....	12
4.4.2 硬體電路設計與開發 .....	15
4.4.3 軟體設計與開發 .....	18
五、 研究結果與討論 .....	21
5.1 縮尺三層樓之鋼構架之案例一 .....	21
5.2 縮尺三層樓之鋼構架之案例二 .....	25
5.3 壓電螺栓墊片實驗之案例三 .....	28
六、 結論 .....	31
參考文獻 .....	32

## 一、前言

近年來地震、水災、風災、土石流等天然災害不斷的對人們的生命財產造成許多嚴重的傷害。因此在諸如地震、颱風等災難發生前後，對結構物進行健康之診斷與評估更是目前重要的研究工作之一，尤其是特定之重要公共建設或設施如醫院、消防局、災難處理中心、發電廠、水庫、主要橋梁道路等。同樣的，如何在最短的時間內把主要倒塌或損壞結構的資訊傳送到災害應變中心，以做最快速有效的災害搶救與資源分配也是相當重要的事。因此為了達到快速的資料收集、處理、傳送、分析與結構健康監測與維護之目的，建立一有效的結構健康監測系統實為目前國內外致力研究之課題與未來之趨勢。

本計劃為整合型計劃”智慧型無線感測監控系統平臺建構與其在土木結構診斷應用之研究”之子計畫之四，此整合計畫為以台灣目前在世界居於領先地位的先進資訊通訊技術（Information and Communication Technology）為基礎，依據「地震與地震工程領域研究課題 7：新材料、新工法與結構耐震性能之研究子項(2)發展先進智能材料成通訊技術在結構安全即時監測與控制之應用」，擬開發建構『智慧型無線感應器系統平臺』並研究『其在土木結構診斷應用』。本整合計畫將透過技術開發與應用需求結合，以整合土木、通訊、電路設計、訊號處理、自動控制與資訊軟體等相關跨領域之技術與專家，以建構專屬於土木結構診斷應用之『智慧型無線感應器系統平臺』。希望藉由本計畫之執行與預期成效的獲得，能夠於未來強化防災科技及其相關基礎研究與應用之研究，期能達到有效落實與推動智慧型防災與預警系統之建立。

此發展之『智慧型無線感應器系統平臺』為基於「無線感測網路」為基礎之監測系統，線感測網路應用於土木結構健康監測可以看成一個完整的生命週期，如圖 1 所示。經過有效的設計規劃進行感測器的佈置，進而建立一個完整的監測系統，監測系統將資訊回授給後端做資料分析與損害評估，接著做出決策與判斷，最後將經驗也就是知識存進知識庫中，提供給下一次監測系統設計與規劃的輔助資訊。此生命週期的每一個環節都將提供其必要的資訊，使得智慧型監測系統可以自動修正與檢討而達到最佳且完整的狀態。



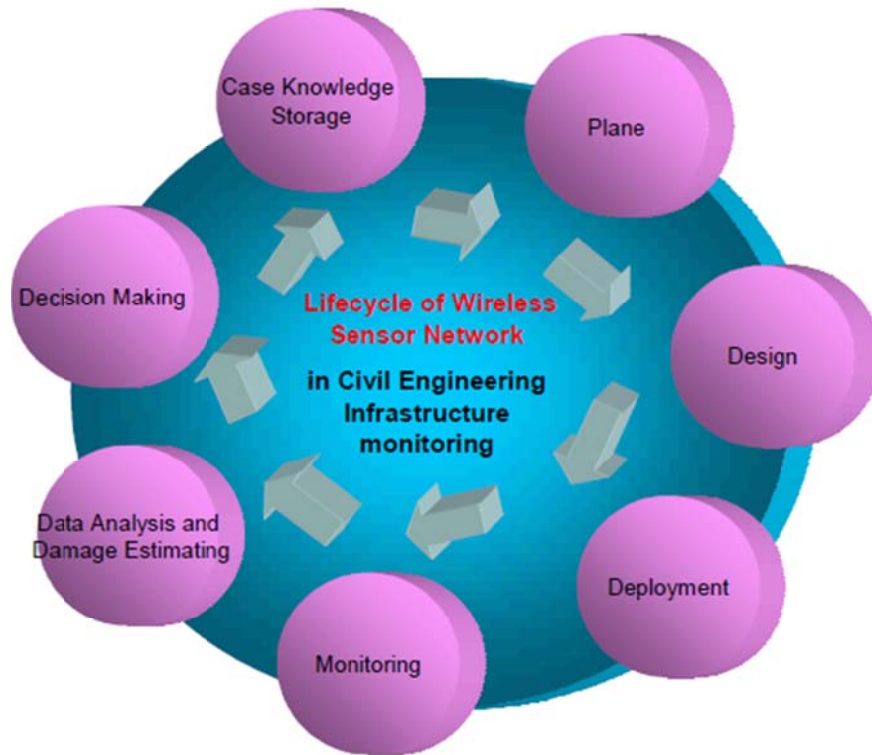


圖 1 無線感測網路應用於土木工程監測之生命週期

結構健康監測系統透過許多智慧感測器所組成的系統來長期監控結構的狀態，提供結構在維持營運與修復時必要的資訊。然而藉由單一的診斷方法並無法正確且可靠的判斷結構的健康狀態，不同的結構健康監測目的需要不同的智慧感測器來進行處理，因此建立一個整合性的結構健康監測系統以結合全域、局部結構健康監測方法來監測與評估結構物健康狀態是目前重要的研究方向之一。此子計畫之四『無線壓電式結構局部損傷偵測監測器之研發』為針對『局部』之結構健康監測之應用。本計畫規劃為三年期計畫之第一年期，主要重點為無線壓電式結構局部損傷偵測監測器之研發與測試，此計畫整合智能壓電材料、硬體電路、計算、通訊與嵌入式軟體之結構局部損傷偵測器之研發，透過智能材料具有感知環境刺激，對其進行分析、處理、判斷並採取一定的措施進行適度響應訊號的特徵擷取，達到局部結構健康診斷之目的，並結合無線感測網路技術，以期發展之智能材料局部損傷監測技術擁有輕易部署、低成本、高穩定度與無線傳輸之特性。

## 二、研究背景與目的

一般結構健康監測可以分為全域健康監測(Global Health Monitoring)與局部健康監測(Local Health Monitoring) (Chang et al. 2003)，全域健康監測法一般主要是以解析結構震(振)動反應為主的方法(Vibration-Based Method)，透過震動反應訊號來推估結構物模態如自然頻率、結構阻尼與振型(Doebling et al. 1998)，早期的結構檢測方法主要針對於結構自然頻率的改變為主，然而有些損害的構件其損壞行為並不會表現在基礎模態下，此時以判斷結構自然頻率是否改變的方法就很難施展出其效用。在模態振型(Mode Shape)方面，也有學者提到，損壞對於結構其實是一個局部的現象，模態振型在局部結構的破壞來說較不敏感 (Cawley and Adams 1979)。因此目前結構健康監測普遍策略為首先利用全域結構健康監測方法來判斷結構物是否有損害，接著再利用局部健康監測的方法來進行進一步的評估，如損害的位置及程度等等。局部健康監測方法則為針對微小損傷以及損傷初期損傷診斷的一套評估技術，例如以超音波量測應力的狀態，渦電流決定裂縫的位置，近年來常用的還有聲發射法(Acoustic Emission) (Nair and Cai 2009; Read et al. 2002)、Lamb Wave 法 Lamb Wave 法(Cawley and Alleyne 1996; Kessler et al. 2002)、壓電阻抗法(Piezoelectric Impedance) (Park et al. 2003; Bhalla and Soh 2003)，檢測結構物局部性的健康狀態在某些損壞案例下將比全域性的檢測方法達到更有效的結果。

在結構局部檢測中採用壓電陶瓷(Piezoelectric Ceramic ; PZT)的機電耦合特性為主的壓電阻抗方法(Impedance-Based Method)由於材料便宜、輕便、耐用且可黏貼於結構物上，因此在近年來被廣泛運用於檢測結構局部損傷的其中一種有效之方法(Niezrecki et al. 2001; Chopra. 2002)。其檢測原理為當結構物處於某種狀態時(健康狀態)，他的機械阻抗是恆定的，如果當結構物出現的變化(如出現損壞)，其機械阻抗也會發生相應的變化，而量測其阻抗之變化來達到監測結構物之局部損壞。然而，直接量測結構物的機械阻抗值是非常困難的，因此，透過黏貼於結構表面之壓電材料(Piezoelectric; PZT)，發射出激勵電壓產生交流電場，壓電片會產生機械震動(逆電壓效應)，並同時帶動結構物產生共振。同時，結構物的震動反應又會對 PZT 產生電壓變化響應(正電壓效應)。因此，PZT 也可視為一套電路系統，藉由電子元件發出訊號激勵電壓至 PZT，並同時間量取其 PZT 的壓電阻抗訊號即包含了結構局部的狀態訊息，

達到結構局部健康診斷的目的。但由於目前的阻抗量測幾乎都是藉助於大型阻抗分析儀來進行，阻抗分析儀最大的缺點為不便於攜帶、部屬且價格十分昂貴，且大都為有線擷取系統的方式也大幅增加現地長期部屬的難度與長期監測的成本與不便(圖 2 為阻抗分析儀與壓電材料之連結環境)。



圖 2 阻抗分析儀與壓電材料之連結環境

有鑑於此，本計畫主要係研發基於低功耗無線壓電式結構局部損傷偵測器(Wireless Local Impedance Device; WLID)，並應用於結構局部健康監測與損傷偵測上。WLID 可以透過無線的所帶來的優勢在遠端主動檢測結構物健康狀態，改善目前結構監測系統感測器與資料擷取器大都為實體線路傳輸的缺憾。另外結合微處理器之整合應用於無線感測器上，降低土木工程基礎設施之監測網路的建置成本。主要分為三個部份；第一個部份為整合阻抗量測晶片技術與低功耗無線傳輸微處理器於壓電式感測無線傳輸模組，用以監測結構物之局部阻抗參數並重建阻抗頻譜。第二部分為開發一套基於此智慧壓電感測器之控制軟體與使用者介面，達到監測之結構物環境資訊化與網路組織維護，以節省建置之時間。第三部分為嵌入壓電式結構阻抗局部損傷偵測器演算法與損傷指標方法，識別出結構局部之損壞位置與損壞程度。

### 三、文獻回顧

本計畫主要針對基於壓電阻抗方法之局部損壞技術與無線感測於壓電阻抗量測技術來進行文獻回顧，以下分別進行相關文獻探討。

#### 3.1 基於壓電式阻抗下結構局部損傷診斷研究探討

本計畫今年所欲研發之結構局部損傷感測模組係以壓電阻抗(Electro-Mechanical Impedance, EMI)為主的監測方法，此方法應用於結構健康監測最早是由 Liang *et al.* (1994)所提出，隨後有許多研究學者接著發展(Sun *et al.* 1994; Chaudhry *et al.* 1994; Ayres *et al.* 1996; Park, G *et al.* 1993, 2003, 2006; Giurgituti *et al.* 1999, 2002; Soh *et al.* 2000; Bhalla *et al.* 2002b, 2004; Naidu *et al.* 2002)。Park (Park *et al.* 2003) 等人利用壓電阻抗法來檢視管線的損壞，其研究也歸納了先前研究之實驗成果與壓電阻抗診斷技術，包括對於壓電材料採用的激勵頻率大於 30Khz，激勵電壓採用至少(1V)大小以上來激勵，可以判斷結構的局部損壞位置與破壞程度。Peled (Peled *et al.* 2002) 等人利用電阻抗譜來探討碳纖維水泥複合材料在受拉力時的損害特性。壓電阻抗法也常被用來作為飛機結構損傷的指標與判斷方法 (Giurgituti *et al.* 2002)。沈星等人(2010)以裝有多個螺栓和多片壓電元件(PZT)的鋁梁為實驗標的，研究激盪頻率對壓電材料電阻抗值的影響以及壓電元件對於較近螺栓鬆動與較遠螺栓鬆動的靈敏性。其並建立一個 BP 類神經網路，以各個螺栓分別鬆動時所測得的所有壓電元件的阻抗值作為網路的訓練案例，輸入到類神經網路進行訓練。其實驗結果發現，壓電材料能靈敏地反映出結構狀態的微小變化；且離鬆動螺栓越近的壓電材料其電阻抗譜的變化大於離鬆動螺栓遠的電阻抗的變化。而對於同一壓電元件，激盪頻率不同，其阻抗變化量也不同。因此，選取電阻抗值變化明顯的頻率點來當成神經網路輸入向量，訓練後的神經網路能夠快速並精確地判斷出鬆動的螺栓位置。

以上論述說明壓電阻抗法(EMI)在高頻率範圍對結構局部損傷偵測非常有效，而這些局部結構損傷相較於全域結構監測以低頻振動量測的方法來說，對於結構整體性能沒有較大的影響。因此，機電阻抗方法(EMI)表現出對結構早期損傷高的敏感性證明它更適合用作結構損傷的識別。儘管阻抗方法與模態方法類似，但與模態方法依賴於低頻模態，相反地阻抗方法依靠高頻模態，它能識別出局部的、微小的結構狀態的變化。在此項研究技術的發展與困難在

現階段主要面臨五個難題：(1) 結構元件之局部損傷偵測與辨識、(2) 補償方法於消除環境雜訊影響(如溫度)之阻抗診斷指標、(3) 材料自我診斷技術與黏貼狀態自動檢測技術、(4) 結構有限元素模擬實驗於壓電耦合分析、(5) 發展較為輕便與無線傳輸之主動式感測器。本計畫主要目的為發展一套輕便與無線傳輸之無線壓電式結構局部損傷偵測器，另外開發一套基於此智慧壓電感測器之控制軟體與使用者介面，並嵌入除環境雜訊影響(如溫度)之阻抗診斷指標之局部損傷偵測器演算法與損傷指標方法，識別出結構局部之損壞位置與損壞程度。在下一子章節中將介紹基於微處理器架構之無線壓電式結構局部阻抗感測器之相關研究回顧。

### 3.2 無線式壓電式結構局部感測器之研究探討

結合無線感測網路與壓電阻抗量測技術方面，美國洛斯阿拉莫斯國家實驗室 (Los Alamos National Laboratory) 研發團隊在 2006 年至 2010 年期間設計了一系列無線阻抗量測裝置 (Wireless Impedance Device; WID)，其第三代(WID3)硬體元件主要使用 Analog Device 公司所推出的 AD5933 阻抗量測晶片、ATmega1281 微處理器與無線傳輸模組(Zigbee)。其裝置也整合低頻(125kHz)的無線喚醒晶片(Wakeup chip)，因此可以長時間的處於休眠模式，並透過外部的無線訊號喚醒裝置進行結構物阻抗檢測(Overly et al. 2007; Overly et al. 2008)。該研究團隊在鋁板上部屬壓電片陣列，並測試其材料自我診斷技術與黏貼狀態自動檢測技術。其結果顯示，當壓電材料發生脫膠時將使導納(虛部值)斜率值上升，而當壓電材料受到斷裂時，導納斜率會隨著破壞程度而下降。

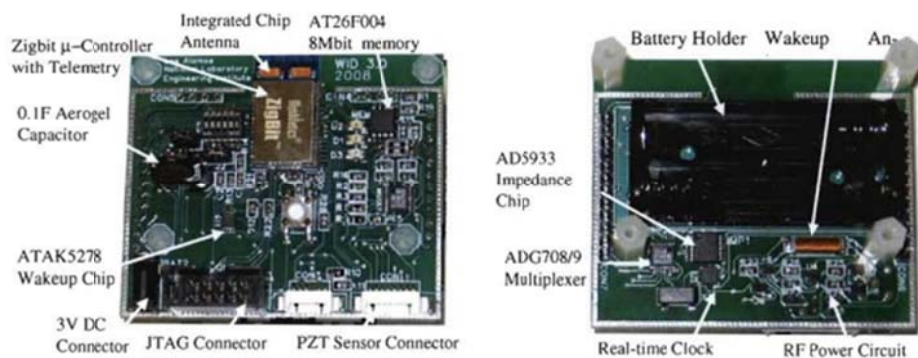


圖 3 Wireless Impedance Device (WID3) 實體圖

Kim 與 Nguyena (Kim et al. 2011; Nguyena et al. 2012) 等人設計了一套名為 SSeL-IM 的阻抗量測模組，此模組為無線感測網路平台 Imote2 的擴充版，同 WID 裝置也是使用 AD5933 阻抗量測晶片。該實驗團隊針對壓電阻抗法於螺栓鬆動實驗案例中，設計了特別的壓電片介

面(PZT Interface)，在螺栓墊片上安裝長方形的鋁板，並將壓電材料部屬在此鋁板上(圖 4)，此鋁板類似懸臂梁的概念，此設計的目的主要是使壓電片的感測範圍縮小，讓電阻反應更能精確的表現出螺栓鬆動時的變化。研究結果顯示，在螺栓上增加此介面所量取到的壓電數據，與沒有使用壓電片介面的數據反應相比，電阻耦合反應較能準確地偵測螺栓鬆動的程度。該研發團隊也針對鋼筋錨定做電阻抗監測，實驗了在不同的預應力下，會隨應力越大而產生增長的頻率偏移趨勢。



圖 4 壓電片介面(PZT Interface) (右)結合 Imote2/SSeL-IM 實體照

觀察國外針對壓電式結構局部診斷所發展之感測器之主要元件，Analog Devices 公司推出之 AD5933 開啟了新的契機，且隨著無線感測網路 (Wireless Sensor Network) 技術與廣域無線電信網路 (Wide Area Network) 技術之突飛猛進，一個結合阻抗量測技術、微處理器單晶片與無線傳輸的電路模組變成一項可行且成本低的解決方案。此低成本的無線壓電式結構局部損傷偵測器在未來可以提供遠距與即時監測的方式，可有效降低大規模部屬監測的成本，各監測節點監測之資料可透過目前已成為產業標準之 IEEE802.14.5 網路彙集至閘道器 (Gateway)，再由閘道器透過 3GUMTS/或 3.5GHSDPA(或 4G WiMAX/LTE)等廣域電信網路將資料傳輸至監控中心，強化預警功能，並據以作為規劃土木設施修繕保養及更新替換之經費調配優先順序，其未來在商業上亦具有甚大的潛力。有鑑於此，本計畫所發展之感測器初步採用此晶片作為感測器原型開發，並整合無線處理器晶片(SoC)發展出一套低成本、具備無線傳輸功能之結構局部診斷感測器。

#### 四、研究方法

本計畫主要發展一個無線壓電式結構局部損傷偵測器(Wireless Local Impedance Device; WLID)，應用於智慧建築與結構之結構局部健康監測上，主要的研究方法分為：

- 壓電阻抗模組與無線模組之建立：本研究利用使用微機電技術所發展之微感測器，結合微處理器、記憶體與無線通訊模組配合適當之電路設計，建立一壓電阻抗量測與無線感測單元。
- 無線傳輸方法：在無線方面以低功耗 IEEE 802.15.4 標準傳送資料，並設計可靠的資料傳輸模式與協定。
- 無線感測網路之建立與使用者介面程式之開發：以無線感測單元建立無線感測網路，並開發使用者介面，接收端應用程式與資料庫建立：接收端發展一視窗化介面，可使用於可攜式裝置或是資料接收之固定式電腦設備，
- 結構局部損傷指標建立：透過縮尺模型實驗，收集結構阻抗頻譜數據，並分析出結構局部損傷特性之損傷指標。

基於上述之研究方法與步驟後，本研究首先探壓電阻抗相關之基礎理論方法，接著介紹基於阻抗方法下之結構局部損傷指標建立，而為了實現無線壓電式結構局部損傷偵測器，接著將簡述軟硬體平台與資源運用分析，最後則是使用相關開發工具開發出應用軟體與使用者介面以及穩定的無線傳輸協定。分別論述如下：

##### 4.1 壓電智慧材料

壓電材料由於其具有獨特的高分子結構，因此可以在機械變形和電場變化下具有機電耦合的能力，而藉由此能力經常被運用於感測器與致動器上。壓電材料有許多種類型，經常被使用在不同領域，尤其是在結構物動態應用監測，原因是其重量輕、耐用性高、造價便宜且可依照需求製成不同形狀大小的感測器。根據以上之優點，有機會發展出實用之小型化高性能壓電感測器，並且應用於結構健康監測上。

當機械應力作用於一壓電材料時，材料兩端伴隨著產生一個與應力大小成比例之電荷(或電壓)，稱之為『正壓電效應』。相反地，當一直流電場加入材料兩端時，材料的形變會隨著電場的大小來改變，稱之為『逆壓電效應』。利用壓電材料的正壓電效應可發展出壓電感測器，

逆壓電效應則發展出壓電致動器。以一個線性的壓電材料而言，電力和機械的交互作用可以用以下的壓電方程式表示：

$$D_i = \varepsilon_{ij}^T E_j + d_{im} T_m$$

$$S_k = d_{jk} E_j + s_{km}^E T_m$$

其中  $D_i$  為電位移， $S_k$  為應變向量， $E_j$  為作用電場， $T_m$  為應力， $\varepsilon_{ij}^T$  介電常數， $d_{im}$  和  $d_{jk}$  為壓電係數， $s_{km}^E$  為彈性柔度。

以一個單層的壓電片為例，利用下面示意圖表示如何根據壓電片的幾何形狀改變來做感測器和驅動器使用。

(1) 感測器：當一個機械應力作用於壓電陶瓷材料於縱向時(平行極化方向)，壓電片變形到回到原來狀態時會產生電壓。相同地，當機械應力作用於材料橫向時(垂直極化方向)，壓電片變形到恢復原狀態也會產生電壓。所以當一個結構物受到拉伸或彎曲時，在結構物上的壓電片會不斷地產生電壓訊號。

(2) 致動器：當一個與壓電材料相同極性方向的電場被安置在通過壓電材料厚度方向，壓電片的縱向將會拉伸，產生震動。橫向伸縮的原理也是相同。

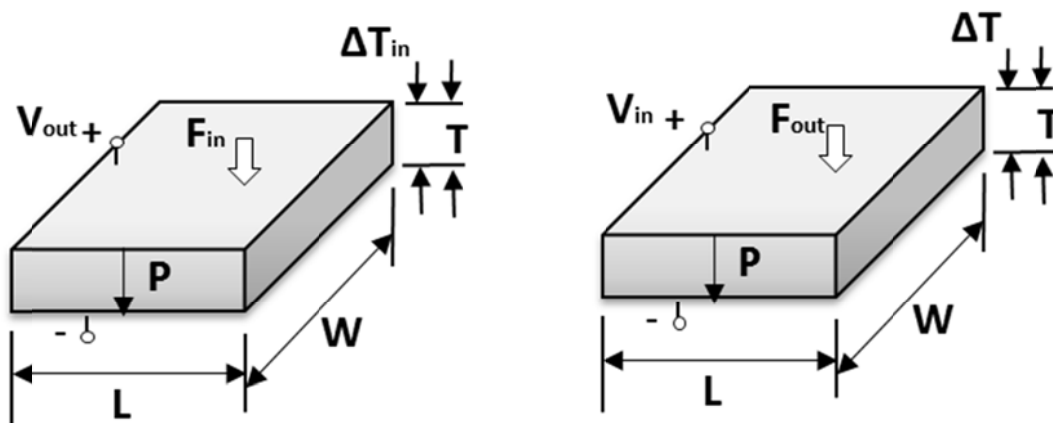


圖 5 壓電效應示意圖 (左)感測器(右)致動器

壓電轉換元件雖然有諸多優點，但其中無法對靜態訊號進行感測，沒有靜態輸出，以及有很高的電輸出阻抗，因此進行訊號處理時，需要高輸入阻抗之放大器與低電容、低雜訊電纜，另外壓電材料也對溫度變化特別敏感，大多工作溫度最高只到 250 度，因此未來局部結構損壞指標偵測須此溫度變化作溫度補償模型或是考量。



## 4.2 壓電阻抗法(Impedance-based techniques)

壓電阻抗法主要為利用訊號發射器對壓電材料產生激勵，並同時量取壓電材料與結構耦合之反應電阻抗譜，利用電阻抗譜的改變來判斷結構是否產生損壞。壓電材料與結構耦合可以看成一個電路系統(圖 6)。

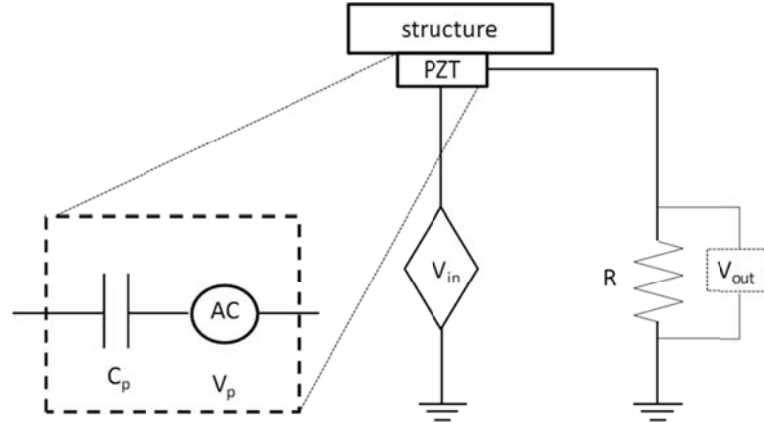


圖 6 壓電材料與結構耦合示意圖

如式(1)所示，其中，壓電材料模擬成包含一個電容 $C_p$ 與一個自我輸出電壓 $V_p$ 構成的元件。當輸入電壓訊號 $V_{in}$ 後，可以量測到一個自我輸出電壓 $V_p$ 與輸入電壓訊號相互耦合的輸出電壓 $V_{out}$ 。

$$V_{out}(\omega) = \frac{Z_R(\omega)}{Z_R(\omega) + Z_p(\omega)} (V_{in}(\omega) + V_p(\omega)) \quad (1)$$

式中， $Z_R$ 為參考電阻的電阻抗、 $Z_p$ 為壓電材料的電阻抗，可以寫成下式

$$Z_p(\omega) = Z_R(\omega) \left\{ \frac{V_{in}(\omega) + V_p(\omega)}{V_{out}(\omega)} - 1 \right\} \quad (2)$$

因為自我輸出電壓 $V_p$ 為壓電材料與結構耦合產生的，與結構的特性有關，因此當結構產生變化後 $V_p$ 也會產生改變。壓電材料與結構的機電耦合阻抗(EMI)模型可以由式(3)來描述，

$$Y(\omega) = j\omega \frac{wl}{t} \left\{ \left( \bar{\epsilon}_{33}^T - d_{31}^2 \hat{Y}_{11}^E \right) + \frac{Z_p(\omega)}{Z_p(\omega) + Z_s(\omega)} d_{31}^2 \hat{Y}_{11}^E \left( \frac{\tan(kl)}{kl} \right) \right\} \quad (3)$$

其中  $w, l,$  和  $t$  分別為壓電材料的寬度、長度和厚度， $\hat{Y}_{11}^E$  為在零電場時的壓電材料複楊式模數， $\bar{\epsilon}_{33}^T$  為壓電材料的複介電常數， $d_{31}^2$  為耦合壓電常數， $k = \omega \sqrt{\rho / \hat{Y}_{xx}^E}$  為與質量密度 $\rho$ 有關的波數， $\omega$  為電壓激盪頻率， $Z_p$  與  $Z_s$  分別為壓電材料與結構的機械阻抗。對於單自由度系統，

結構的機械阻抗可以定義為：

$$Z_s(\omega) = \frac{F_0}{\dot{v}} = |Z_s(\omega)|e^{i\theta} \quad (4)$$

$$|Z_s(\omega)| = \sqrt{c^2 + \frac{(m\omega^2 - k)}{\omega^2}} \quad (5)$$

其中， $F_0$ 為在 $\omega$ 頻率下之諧波激震力， $\dot{v}$ 為速度反應、 $m$ ,  $c$  與  $k$  分別為質量阻尼與勁度。由式(3)可以看出機電耦合阻抗與結構的機械阻抗有關，當壓電材料的材料特性不變時，結構產生損壞造成的機械阻抗改變會反應在機電耦合阻抗上，因此，由量測機電耦合阻抗可以來監測局部結構的損壞。

### 4.3 壓電阻抗法之結構局部損壞指標之方法

當壓電材料黏貼於結構物時，藉由監測壓電材料電阻的變化程度來偵測結構物的損壞為一個簡單且有效的做法，因此基於統計為基礎的損壞指標公式不只可反應出損壞的位置，其變化的程度也可進一步推估損壞的程度。Peairs(Peairs et al. 2006) 等人比較了數種損壞指標公式，其中最為人所使用的為均方根差(Root Mean Square Deviation; RMSD)法與交叉相關係數(cross-correlation coefficient; CC)法，分別為下式(6)與式(7)，

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \{R_e(Z_0(\omega_i)) - \bar{Z}_0\} - \{R_e(Z_1(\omega_i)) - \bar{Z}_1\}\}^2}{\sum_{i=1}^n R_e(Z_0(\omega_i)) - \bar{Z}_0)^2}} \quad (6)$$

$$\text{CC} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{\{R_e(Z_0(\omega_i)) - \bar{Z}_0\} \{R_e(Z_1(\omega_i)) - \bar{Z}_1\}}{\sigma_{Z_0} \sigma_{Z_1}} \quad (7)$$

式中 $Z_0(\omega)$ 為健康時(未損壞或初始狀態)的所記錄的壓電電阻抗訊號並作為參考基準(baseline)； $Z_1(\omega)$ 為現況或是未來的壓電電阻抗訊號(concurrent condition)； $n$ 為激發訊號之頻率點(frequency points)； $\bar{Z}_0$ 與 $\bar{Z}_1$ 分別為 $Z_0(\omega)$ 與 $Z_1(\omega)$ 之平均值； $\sigma_{Z_0}$ 與 $\sigma_{Z_1}$ 分別為 $Z_0(\omega)$ 與 $Z_1(\omega)$ 之標準差。

上述之損壞指標方法都是基於以基準訊號 $Z_0(\omega)$ 為比較差異之量化方法，且是以垂直偏移量(vertical shift)之差之總和的損壞指標公式。因此，RMSD 指標值越大意味著 $Z_0(\omega)$ 與 $Z_1(\omega)$ 的訊號差異越大並反應出結構狀態的改變，而越小的 CC 指標則代表反應結構的差異越大。然

而，環境的參數變化如溫與濕度也會間接影響垂直偏移的變化，而可能導致結構損傷的誤判情況(Koo et al., 2009)。特別是溫度參數對於阻抗頻譜的偏移量有顯著的影響，因此，一些研究則探討在壓電阻抗量測中避免受到溫度的影響。Bhalla et al. (2002)研究了結構阻抗中對於結構致動器與溫度參數間的交互影響。Koo et al. (2009)提出改良式 CC 指標，其主要為計算在  $Z_0(\omega)$  與  $Z_1(\omega)$  個頻率點中計算出最高的 CC 指標位置，並考量此最大交叉相關係數 (maximum cross-correlation coefficient) 為底的頻率偏移量 (effective frequency shift; EFS  $\tilde{\omega}$ )，運用此頻率位置的 CC 指標來偵測結構物的損壞，以減少受到溫度環境變化的影響(式 8)。

$$CC = \underset{\tilde{\omega}}{MAX} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{\{R_e(Z_0(\omega_i)) - \bar{Z}_0\} \{R_e(Z_1(\omega_i)) - \bar{Z}_1\}}{\sigma_{Z_0} \sigma_{Z_1}} \right\} \quad (8)$$

#### 4.4 無線壓電式阻抗偵測器之軟硬體設計

##### 4.4.1 軟硬體平台簡述與資源運用分析

在局部感測節點的軟硬體設計與開發資源分析方面，無線式壓電結構局部損傷偵測器 (WLID) 必須具備低功耗、體積小、便於部屬、無線傳輸與壓電阻抗量測等功能，在裝置組件上需要微處理器進行周邊晶片的控制、無線通訊與微控制軟體的撰寫，軟體必須整合周邊晶片的控制、嵌入結構局部損傷偵測演算法與穩定的無線傳輸控制。

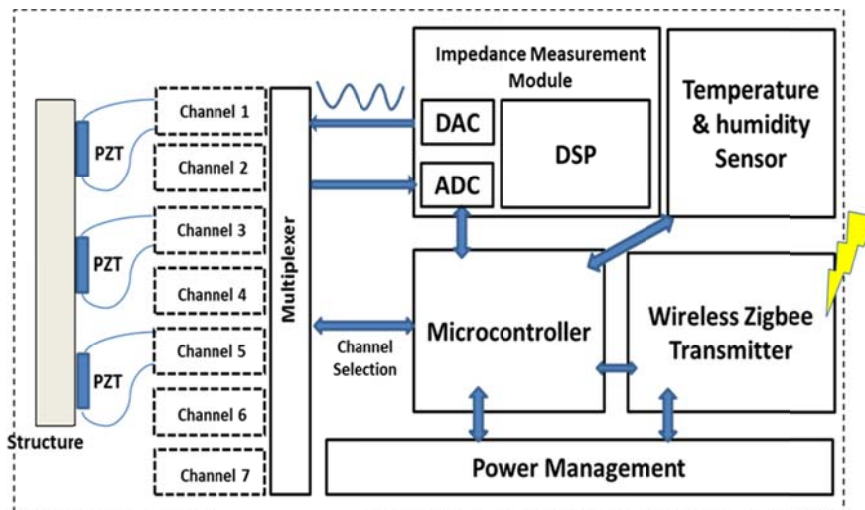


圖 7 無線壓電式結構局部損傷偵測器設計架構

WLID 的硬體架構圖如圖 7，此硬體架構的設計上有幾項特性：

- 1) 考量在結構局部監測上會使用兩片以上的壓電材料陣列部屬於同個桿件，因此需要多工器 (Multiplexer) 來進行多點 (Multipoint) 壓電控制。

- 2) 壓電材料透過電荷激勵產生結構耦合之反應電阻抗譜，因此需要訊號發射器(DAC)激勵壓電材料，並透過類比轉數位轉換器(ADC)採集壓電反應訊號。
- 3) 電阻抗譜數據可藉由量測之壓電耦合訊號並經數位訊號處理轉換至頻率域分析，因此藉由硬體晶片提供的數位訊號處理功能可降低處理的運算時間。
- 4) 感測器的無線通訊方面建立在低功耗 IEEE 802.15.4 協定上，減少感測器所需的電力功耗和提供多點感測器的部屬的通訊能力。
- 5) 由於壓電耦合反應訊號會受到溫度的變化而影響，因此 WLID 需提供溫度與溼度的參數以利未來訊號的校正。
- 6) 電源管理模組可提供微處理器藉由 ADC 介面量測電池所剩的電力，並考慮長期監測與現地環境，電源管理模組可提供能源採集(Energy harvesting)的連接介面，用以連接如太陽能板、風力發電模組。
- 7) 微處理器的記憶體容量必須有足夠的空間紀錄壓電阻抗譜數據，且必須足夠嵌入一系列結構局部損傷偵測的演算法所需的運算空間。

藉由上述特性，在本研究中 WLID 的微處理器採用 NXP Jennic JN-5148 的無線微處理器整合晶片，JN-5148 為一個 32-bit 基於 OpenRISC 的單晶片微處理機，其運算時脈可設定為 32、16、8 與 4 MHz，並包括了 128KB 的 RAM 以及可搭配外部擴充的 512KB 的 Flash Memory，Jennic 是目前在低功耗 IEEE 802.15.4 單晶片無線微處理機市場中，唯一能提供低耗電與最大的運算儲存容量的晶片，在周邊的整合上也提供完整的控制 IO 功能包括 SPI、I2C、UART 與 GPIO 可以整合周邊晶片，並且有足夠的 RAM 和儲存空間存放壓電阻抗譜訊號，以利結構局部診斷演算法的運算。此無線微處理機模組依功率與頻段的不同可以傳至數公尺(低功率)或公里(高功率)級的無線傳輸距離。圖 8 為 JN-5148 模組的實體圖與 Block Diagram。

在壓電阻抗量測方面使用 AD5933 阻抗量測晶片，AD5933 是一款高精度的阻抗量測晶片，此晶片內置了頻率發射器可以產生特定的頻率(1-100kHz)來激勵外部電阻。電阻上得到的回應訊號被數位轉換器(ADC)所採樣，並透過晶片上的 DSP 進行離散傅立葉轉換，量取在這個輸出頻率下的實部值 R 和虛部值 I，一次掃描最多可以量測 512 個頻率點(Point)，可以進一步地計算出在每個頻率掃描下的傅立葉轉換和電阻的相角，微處理機可以透過 I2C 介面連結並

控制此晶片(圖 9 為 AD5933 Diagram)。

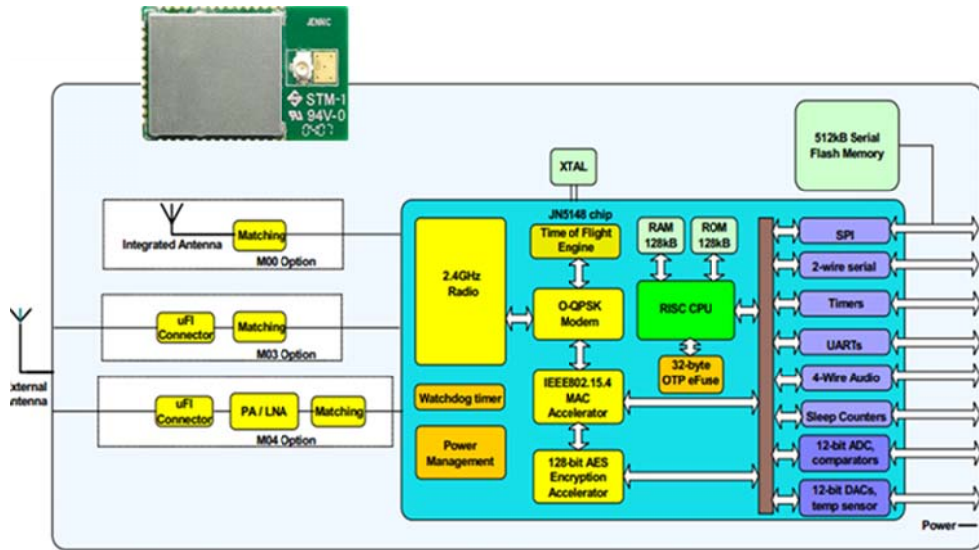


圖 8 Module Block Diagram[Jennic]

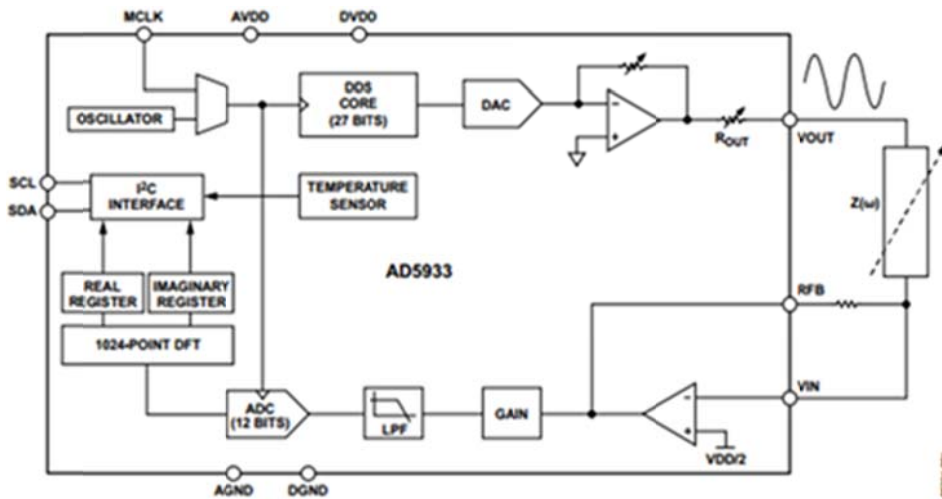


圖 9 AD5933 Diagram[Analog Device]

多工器方面使用兩顆 8-Channel 多工器 ADG708 晶片，分別控制八組 DAC 輸出與 ADC 輸入共 16 條訊號線，其中一組 IO 將作為阻抗量測校正用通道，因此 WLID 將可支援 7 條訊號通道用以量測壓電阻抗頻譜。溫溼度感測方面使用 SHT21 晶片，使用 I2C 介面與微處理器連結。圖 10 為 WLID 組件方塊圖。

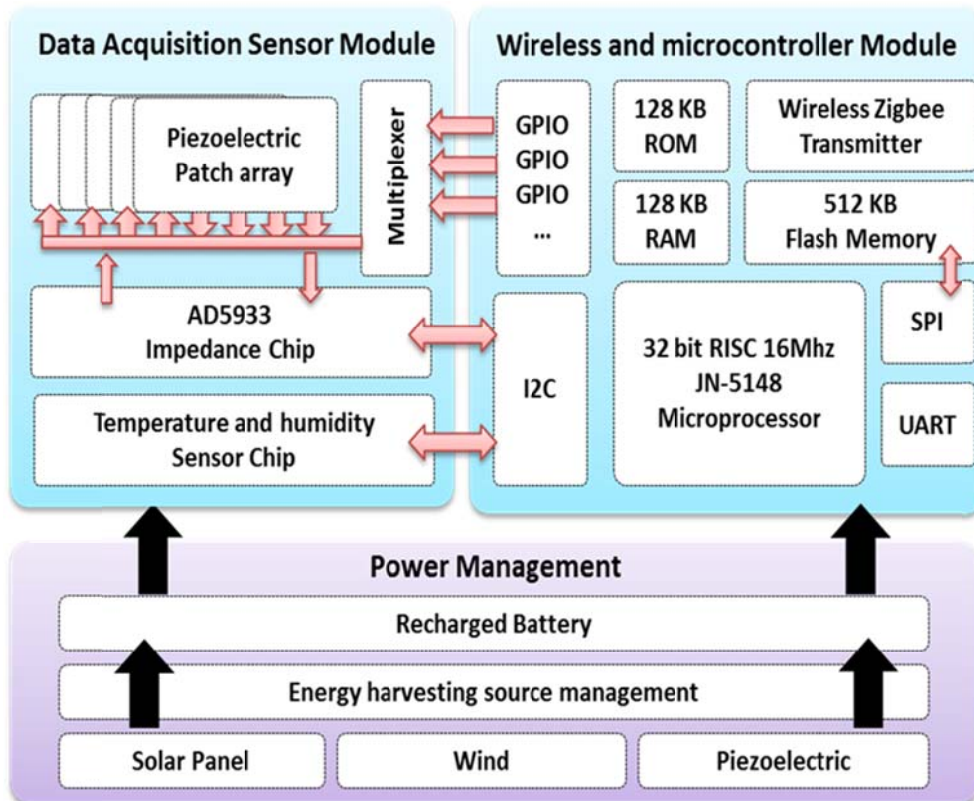


圖 10 WLID 硬體與通信介面方塊圖

#### 4.4.2 硬體電路設計與開發

在無線壓電阻抗感測器的硬體設計方面，微處理器與無線射頻的部分採用 Jennic JN5148 SoC 晶片，並透過 I2C 的介面連結阻抗量測晶片 AD5933，圖 11 為本計畫中 AD5933 的周邊電路圖，其中 R2 的部分為 RFB(External Feedback Resistor)為根據待測物所需量測的阻抗範圍而調整的阻值，在本系統當中設為  $100\Omega$ 。AD5933\_Vin 與 Vout 的部分為連接壓電材料的介面。

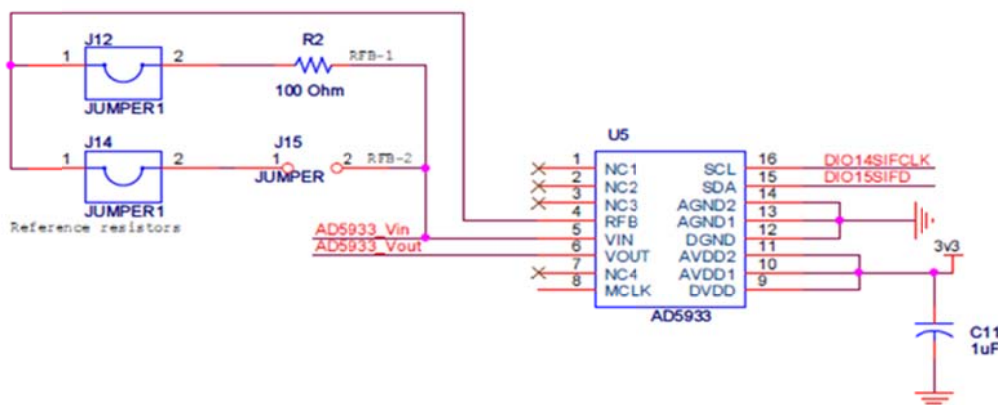


圖 11 阻抗量測晶片 AD5933 周邊電路

而為了可以同時連結多片壓電材料，因此整合了兩組 AD708 多工器晶片，圖 12 為其周邊電路圖，AD708 為 8 通道的多工晶片，分別連結 AD5933 的 Vin 與 Vout，其中一組通道保留給 RFB(100Ω)校正使用，因此可以此模組可以支援 7 組壓電材料片。

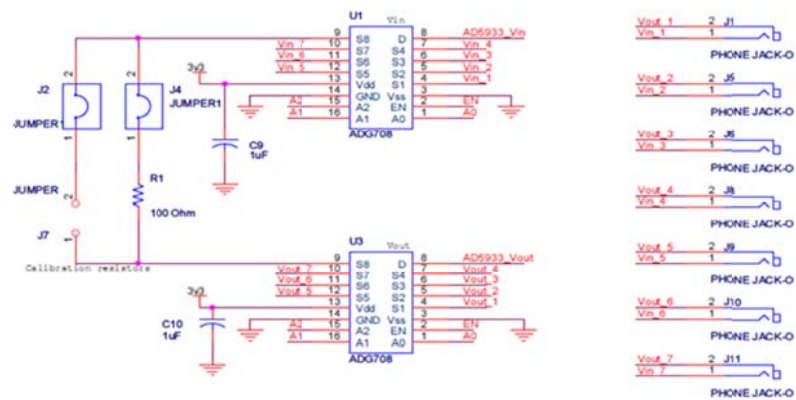


圖 12 多工器 AD708 周邊電路

在電源管理模組可提供微處理器藉由 ADC 介面量測電池所剩的電力(如圖 13, BatteryADC 介面)，並考慮長期監測與現地環境，電源管理模組可提供能源採集(Energy harvesting)的連接介面，用以連接如太陽能板(Solar)、風力發電模組。

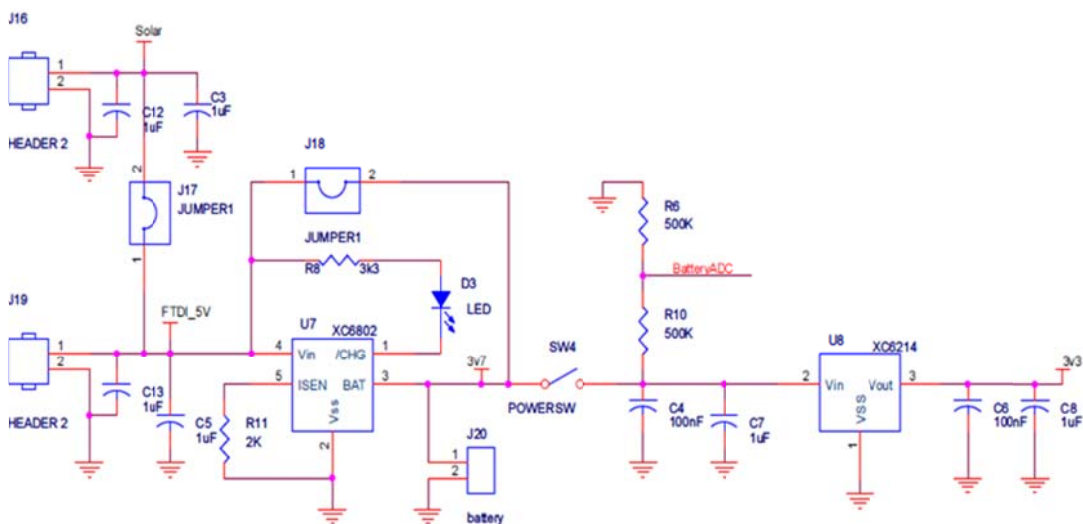


圖 13 電源管理電路

由於壓電耦合反應訊號會受到溫度的變化而影響，提供溫度與溼度的參數以利未來訊號的校正，因此需整合溫溼度感測器，圖 14 為 SHT21 溫溼度感測晶片與處理器 Jennic 周邊電路圖。

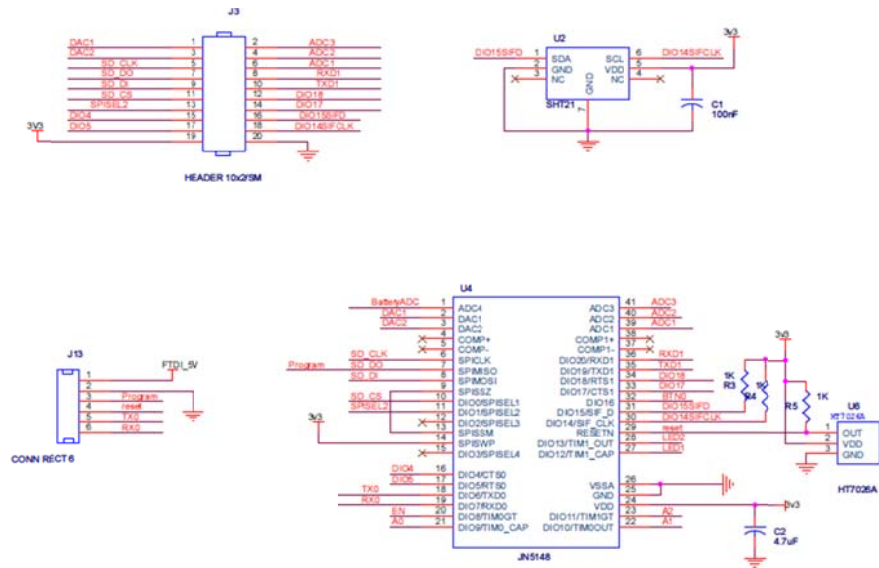


圖 14 溫溼度感測晶片與微處理器周邊電路

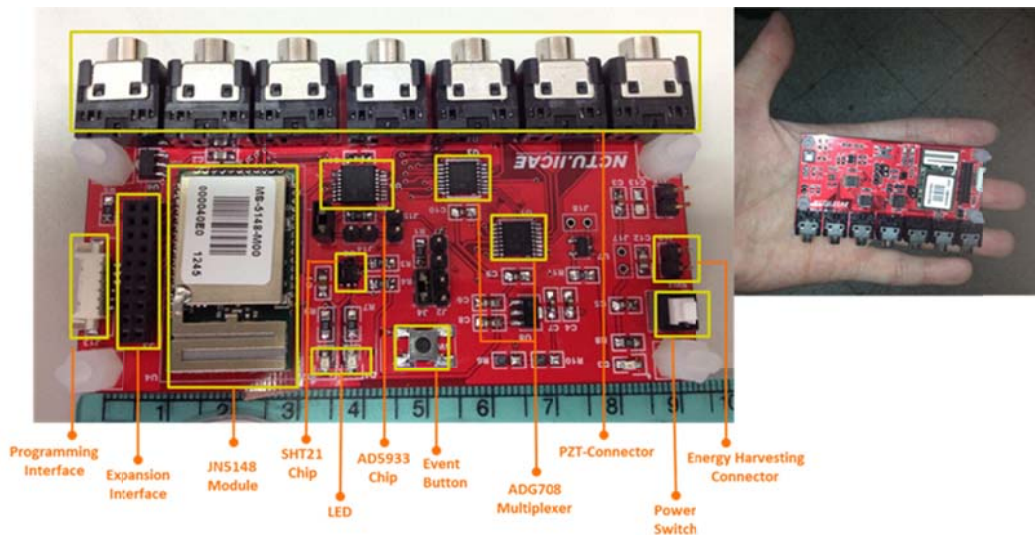


圖 15 無線壓電式阻抗量測模組實體照

圖 15 為無線壓電式阻抗量測模組實體照，其大小與重量為 91.6 x 48 x 7 (mm) / 45g，且在壓電連接介面上考量插拔之方便性，採用 2.0mm 麥克風接頭，與壓電材料連結之環境如圖 16。

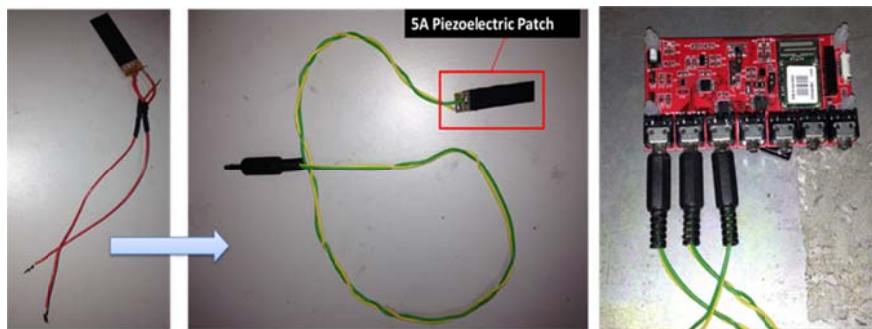


圖 16 壓電材料片與無線壓電模組連接環境



### 4.4.3 軟體設計與開發

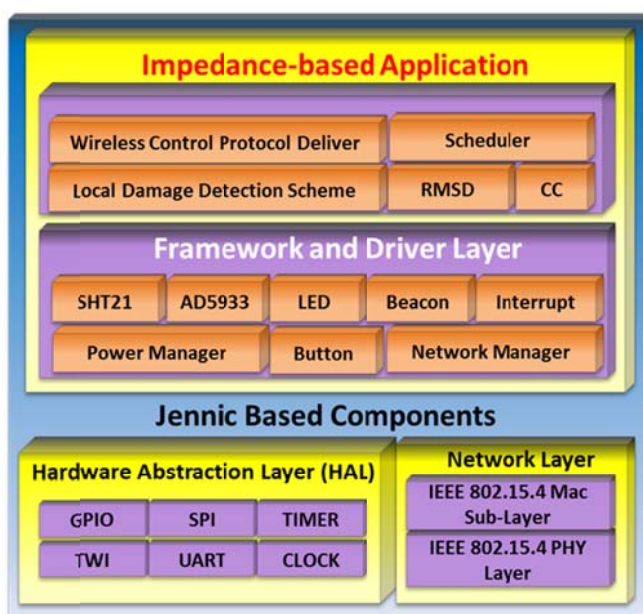


圖 17 無線壓電式感測器軟體架構堆疊圖

圖 17 為 WLID 的軟體架構堆疊圖，最底層的部分為硬體周邊(Peripheral)抽象化層，主要目的為抽象化硬體平台之相依功能如時鐘(Timer)、時脈管理(Clock)、通用 IO 控制(GPIO)、串列周邊介面(SPI)和內部整合電路(I2C)等等，以及 IEEE 802.15.4 的無線傳輸 MAC 抽象化模組。上層的部分分為軟體應用框架層(Framework)以及應用層(Application)，框架層的目的為建立應用層所需的呼叫介面 API，使得應用層可以更快速建立所需的應用程式。此分層的目的為增加軟體的彈性，所開發的軟體在未來可更快速的移植於其他硬體平台上。本研究在系統的開發上分為無線壓電式感測器(WLID)以及後端電腦分析與紀錄軟體，在感測器的軟體開發上使用 C 語言進行開發相關 IO 控制、感測訊號擷取與無線傳輸等功能，開發環境使用 Eclipse 整合開發環境以及交叉編譯工具(Cross-Compiler Toolchain) BA2 Compiler。

感測器的無線通訊方面建立在低功耗 IEEE 802.15.4 協定上，減少感測器所需的電力功耗和提供多點感測器的部屬的通訊能力。無線壓電式結構局部損傷偵測器之無線傳輸協定如表 1，傳輸間之廣播封包採用以 binary 型態的傳輸通訊方式。而本系統當中的訊號傳輸的廣播封包欄位將由 Header、Data、Checksum 三項所組成，其中 Header 和 Checksum 的長度是不變的、Data 的長度是可變動的。在設計上 Header 中主要有幾項考量：(1) Start byte 將設計成與內容較不會衝突的格式 (2) Start byte 將設計成與內容較不會衝突的格式 (3) 封包的總長度 (4)

感測器的編號以辨識感測器的位置和性質 (5) 時間同步用的時間戳記 (6) 可變動的傳輸資料的長度欄位 (7) 傳輸資料的型態 (8) 驗證碼的設計(XOR)

表 1 無線傳輸封包協定設計

Type	Field Name	Description
uint16_t	Start byte	Starting of the packet ,ex(0xEF 0xFF)
uint8_t	Packet length	Length of the packet
uint16_t	Device ID	Identification of sensor device
uint8_t	Device type	Identification of sensor type
uint32_t	Timestamp	Epoch of Sending timer
uint8_t	Data response/request	Identification of the master or slave from sender
uint8_t	Data type	Type of the data
uint8_t	Data length	Length of the data
uint8_t	data	Main data
.....	.....	.....
uint8_t	XOR	Calculate the XOR of all packets

在電腦控制端的部分，本計畫使用.NET C#設計一套結構阻抗頻譜分析軟體(圖 18)，此軟體將包括阻抗量測參數設定、無線指令操作、資料接收、頻譜圖顯示與結構損壞指標分析。藉由此研發之軟體將控制電腦端的無線收發器，可與無線壓電感測模組做通訊與控制，量取其局部壓電阻抗抗譜並進行結構診斷與損壞偵測。

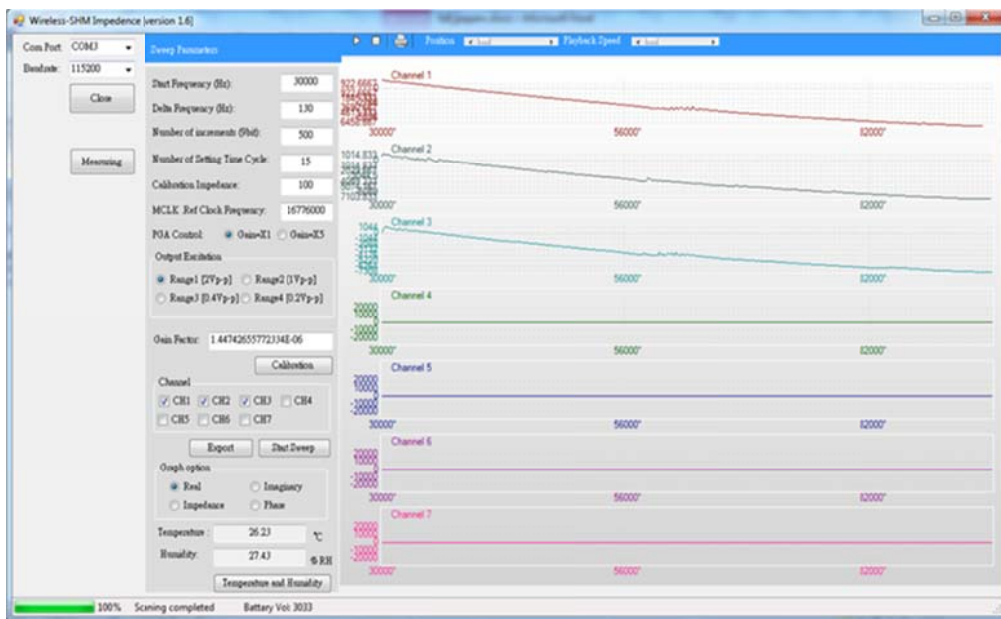


圖 18 應用軟體與使用者介面

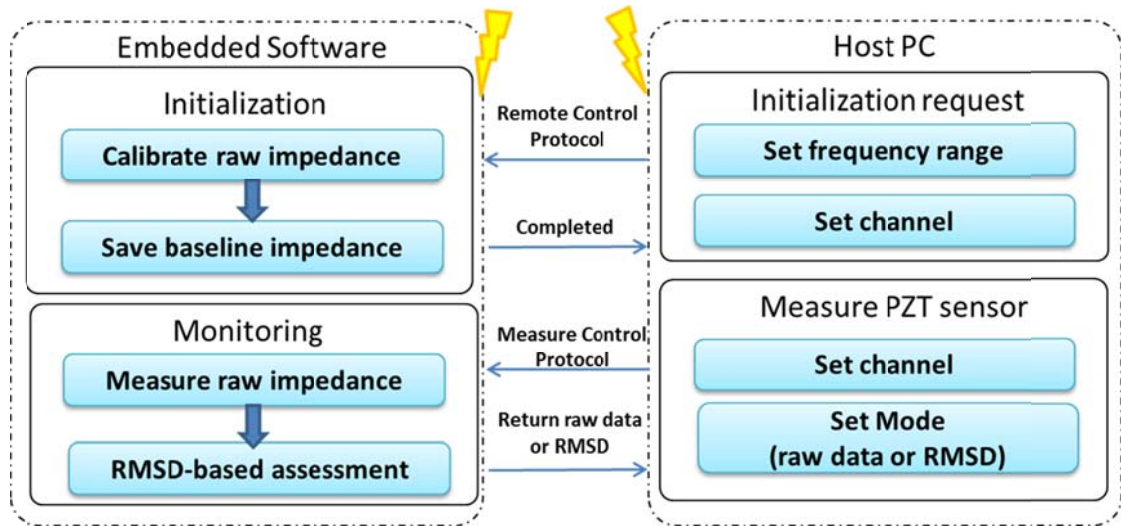


圖 19 後端電腦與無線壓電感測器之實驗流程

圖 19 為局部診斷演算流程，首先可設定欲激勵之訊號範圍(Sweep)，並量取其校正之增益因子(Gain Factor)，其校正因子可透過公式 9 算其訊號震幅(Magnitude)，所算得之大小可以依照公式 10 推導出阻抗值，並透過公式 11 計算出來，計算出增益因子後將其存放在感測之 Flash 當中，校正後其所量測到的資訊會暫存在內部暫存器內，接著則透過此增益因子量取此壓電材料之初始電阻抗，接著即可透過結構局部損傷指標方法(如 RMSD，式 12)，代入破壞前的阻抗向量值 $I_i^U$ 與破壞後之阻抗向量值 $I_i^D$ ，計算出結構阻抗參數變化量。

$$Magnitude = \sqrt{R^2 + I^2} \quad (9)$$

$$Impedance = \frac{1}{Gain\ Factor * Magnitude} \quad (10)$$

$$Gain\ Factor = \frac{1}{Impedance * Magnitude} \quad (11)$$

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=a}^b (I_i^D - I_i^U)^2}{\sum_{i=a}^b (I_i^U)^2}} \times 100 \quad (12)$$

## 五、研究結果與討論

### 5.1 縮尺三層樓之鋼構架之案例一

為了初步評估與驗證本系統，本研究設計了一個 1/8 比例之三層樓之剛構架，此鋼構架每層質量為 3.8 kg，每一根梁柱之斷面積為 0.8 cm<sup>2</sup>，每層樓高為 0.44m，所使用之壓電材料為 PZT-5A 型號。在第一個測試案例中，本計畫將壓電材料黏貼於 1 樓柱頭靠近螺栓處，並透過鬆動螺絲來驗證壓電材料之局部結構損傷偵測之敏感度(圖 20)。表 2 為縮尺三層樓之鋼構架之案例一之實驗流程，首先先記錄螺栓尚未鬆動時之各壓電材料阻抗數據，並且依序鬆動螺栓 1、2、3，最後將螺栓 1 重新拴緊。圖 21~25 為各壓電材料在各實驗情境之壓電阻抗譜訊號。

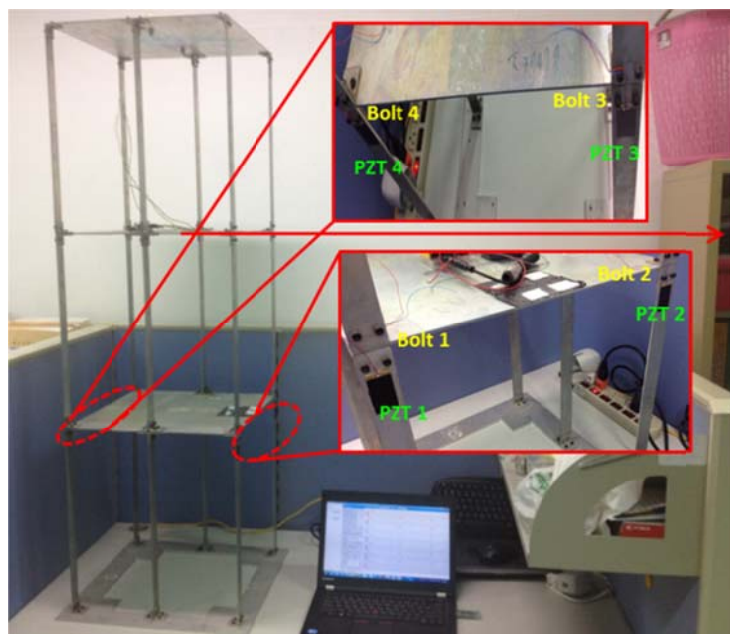


圖 20 案例一、螺栓鬆動實驗配置

表 2 實驗流程、縮尺三層樓之鋼構架之案例一

Case	Damage Description	Loosened Bolts
1	No damages	None
2	Loosen bolt 1	1
3	Loosen bolt 2 (Bolt 1 & 2 are loosened)	1,2
4	Loosen bolt 3 (Bolt 1 ,2 & 3 are loosened)	1,2,3
5	Bolt1 refastened	2,3

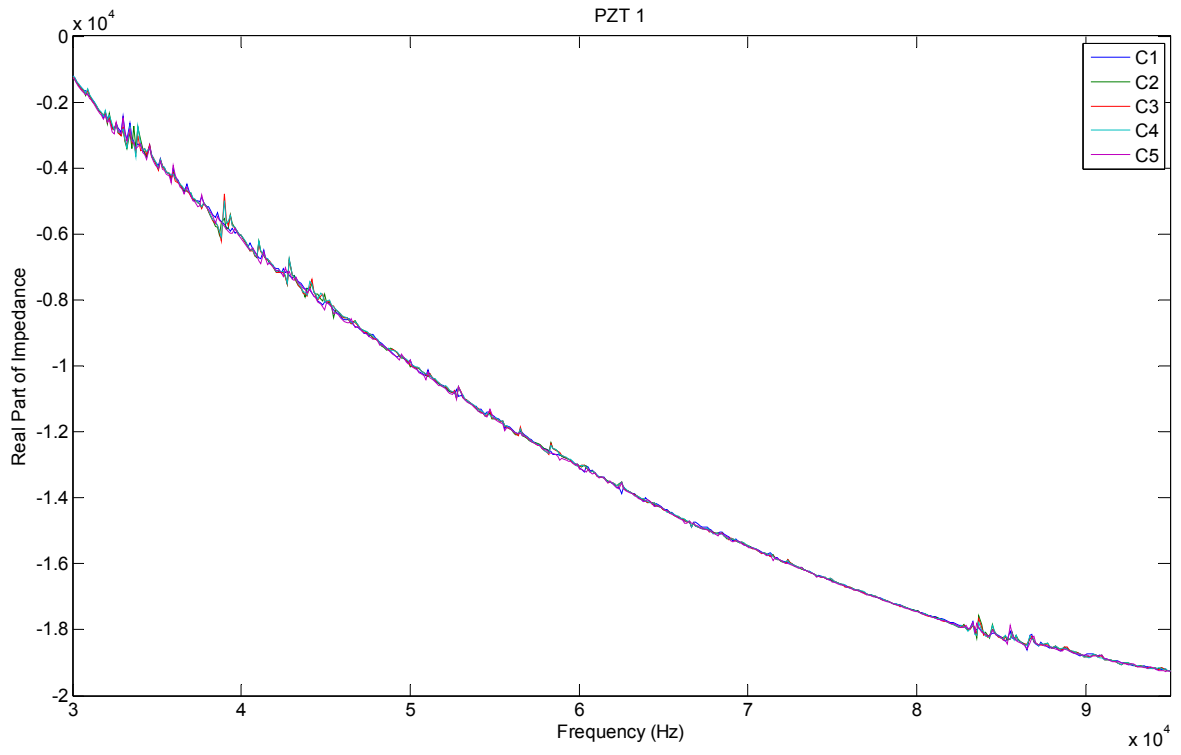


圖 21 案例一、PZT1 號訊號在各實驗下之阻抗頻譜

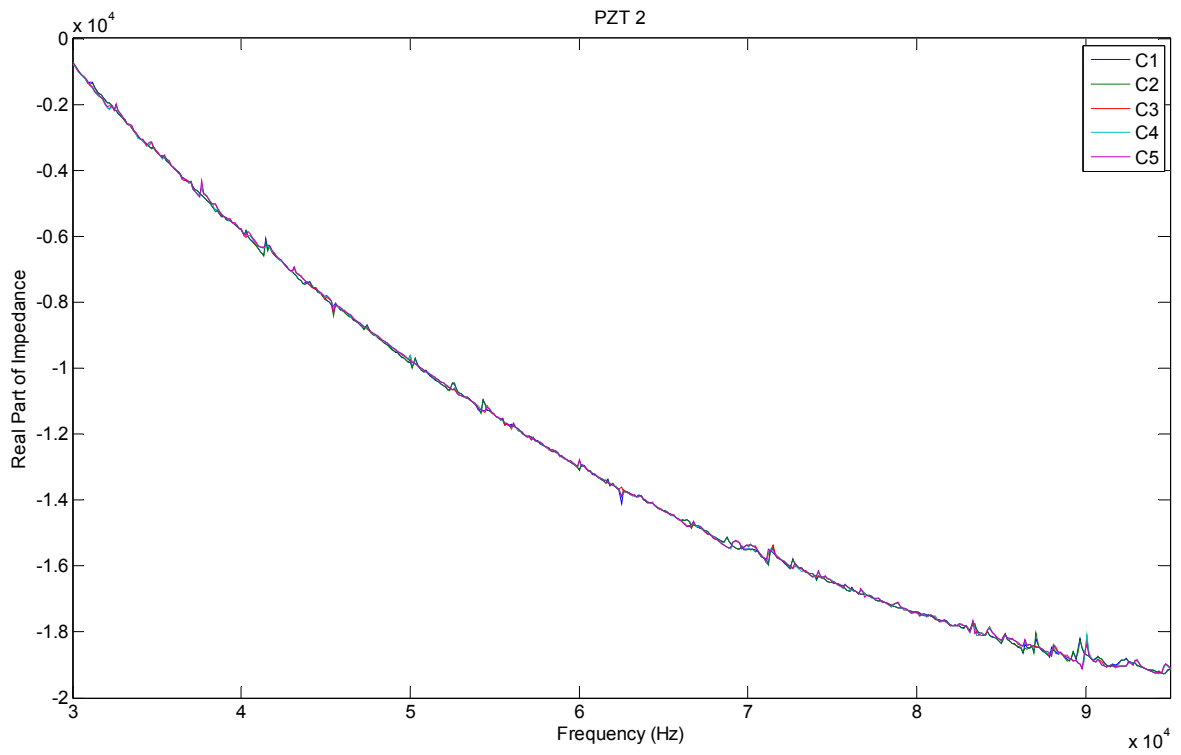


圖 22 案例一、PZT2 號訊號在各實驗下之阻抗頻譜

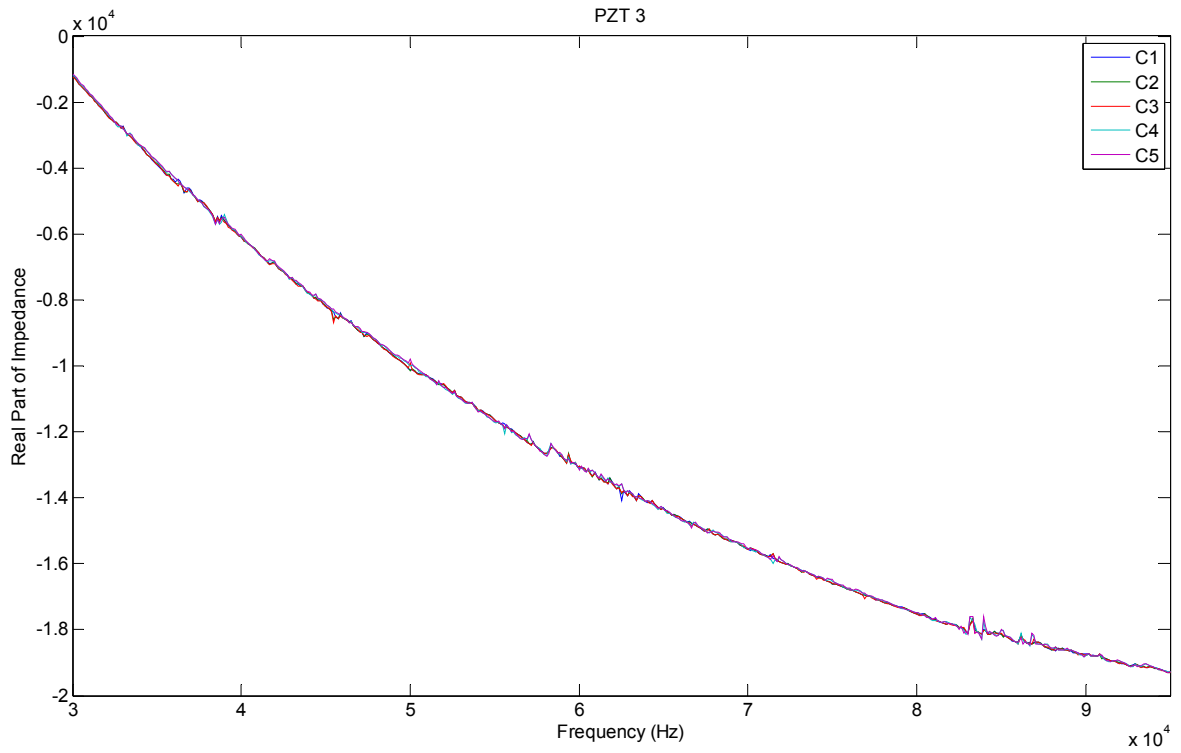


圖 23 案例一、PZT3 號訊號在各實驗下之阻抗頻譜

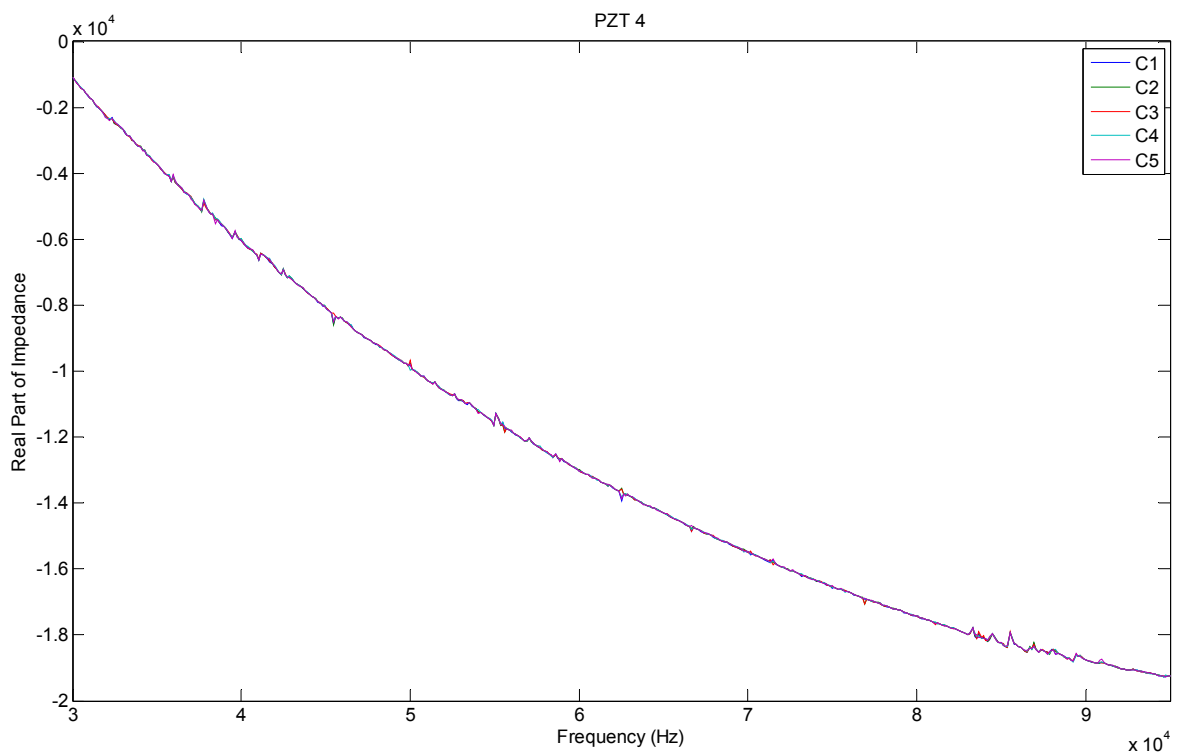


圖 24 案例一、PZT4 號訊號在各實驗下之阻抗頻譜

圖 25 為各壓電材料在各實驗情境下之阻抗抗譜統整圖，其激勵訊號頻路為 30-95kHz 之間，在 83-89kHz 間有較為明顯的諧振頻率，此區塊較為可能為結構本身的高頻阻抗抗譜，因此在後續的損壞指標演算法可以運用於此區塊之訊號。

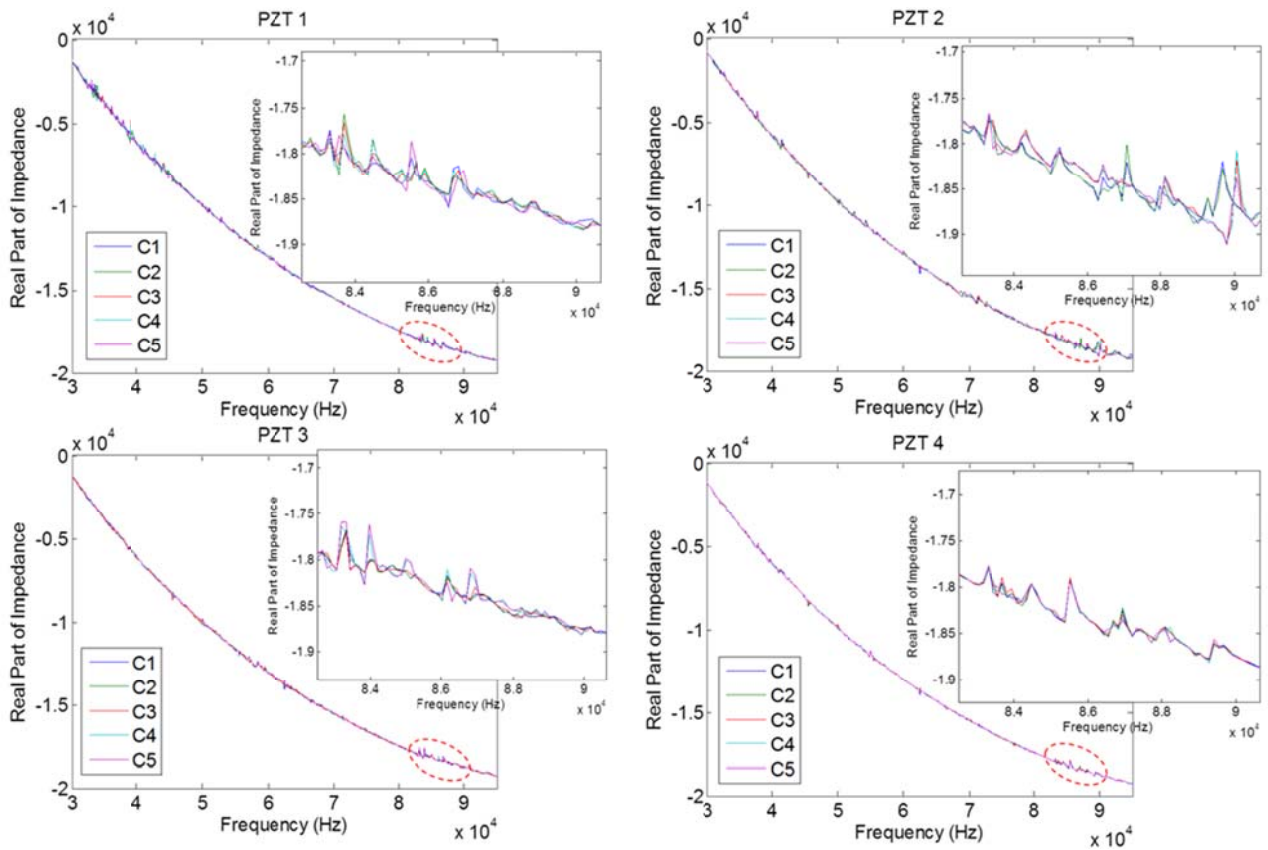


圖 25 案例一、各實驗情境下之阻抗抗譜

圖 26 為案例一在各實驗案例下之 RMSD 損壞指標值，其主要是計算個別壓電材料本身之初始(螺栓尚未鬆動時)量測數據與鬆動實驗數據之差異指標，其可很明顯地觀察出鬆動之螺栓有較高的指標值，且當最後將螺栓從新拴緊時可觀察其指標值將下降。最主要的是壓電材料之阻抗抗譜可很敏感的反應出其局部結構參數的變化，且此抗譜反應可觀察出其變化程度(重新拴緊)之行為，不過就算將螺栓重新拴緊，與原有之初始狀態也有些微之落差。

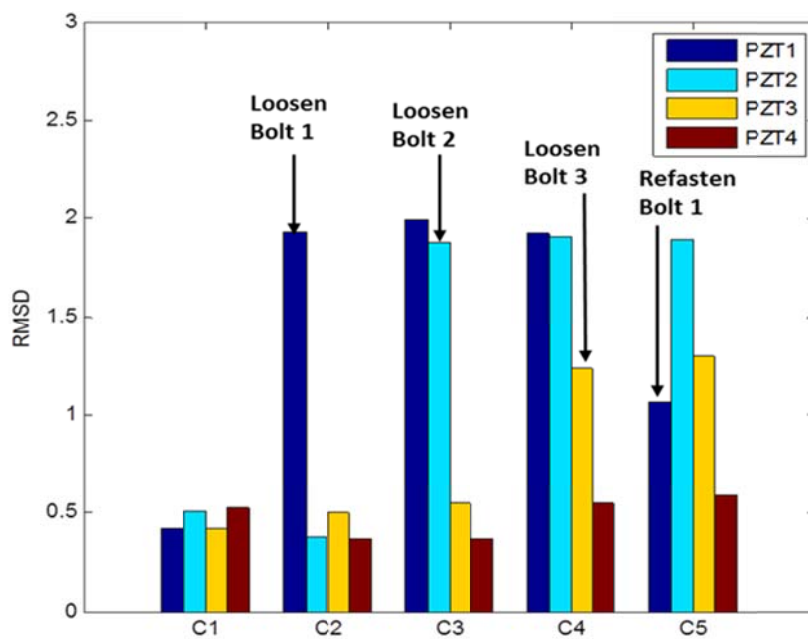


圖 26 案例一在各實驗案例下之 RMSD 損壞指標值

## 5.2 縮尺三層樓之鋼構架之案例二

在案例二中將壓電材料黏貼於柱子之上、中與下之位置，主要目的係以實驗壓電材料部屬位置與螺栓鬆動位置之局部損壞偵測，用以驗證損壞位置越靠近壓電材料之電阻抗譜變化將越大之假設(圖 27)。

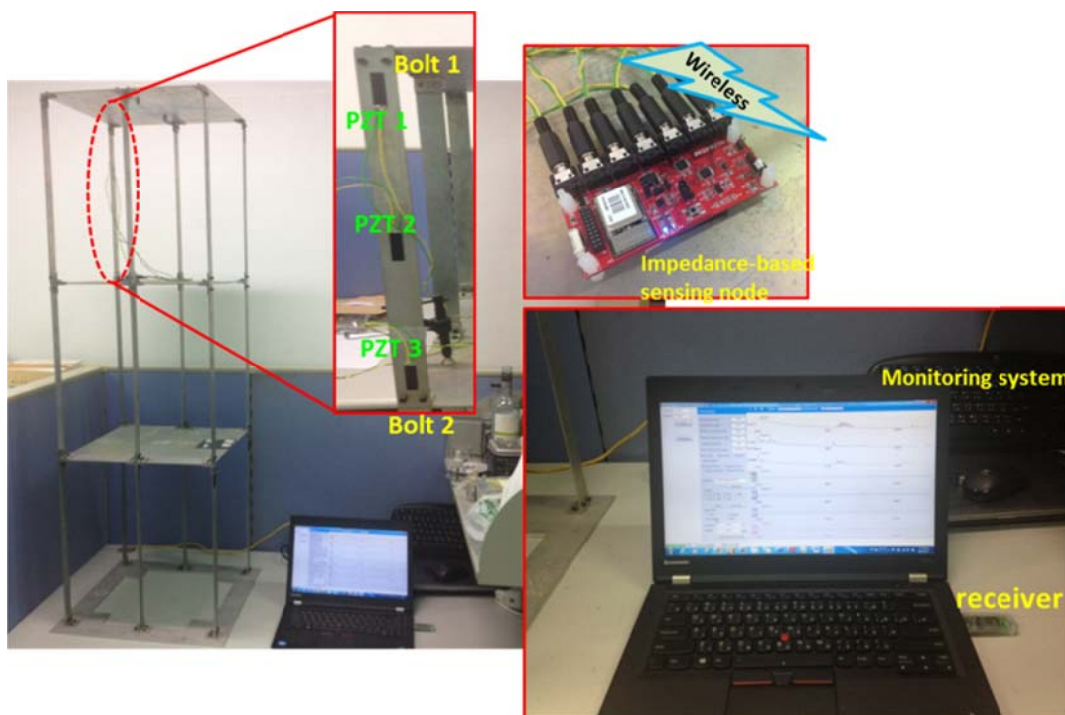


圖 27 案例二、柱子之上、中與下部屬壓電材料實驗環境

表 3 為縮尺三層樓之鋼構架之案例二之實驗流程，此實驗案例目的主要係以實驗壓電材料部屬位置與螺栓鬆動位置之局部損壞偵測，用以驗證損壞位置越靠近壓電材料之電阻抗譜變化將越大之假設，因此將壓電材料黏貼於同根桿件之較容易發生破壞之位置(上、中與下)，且依序鬆動螺栓 1(柱上)後並將其重新栓緊；接著鬆動螺栓 2(柱下) 並將其重新栓緊。圖 28~30 為上(PZT1)、中(PZT2)與下(PZT3)之壓電材料在各實驗情境之壓電阻抗譜訊號。

表 3 實驗流程、縮尺三層樓之鋼構架之案例二

Case	Damage Description	Loosened Bolts
1	All fastened	None
2	Loosen bolt 1	1
3	Bolt1 refastened	None
4	Loosen bolt 2	2
5	Bolt2 refastened	None



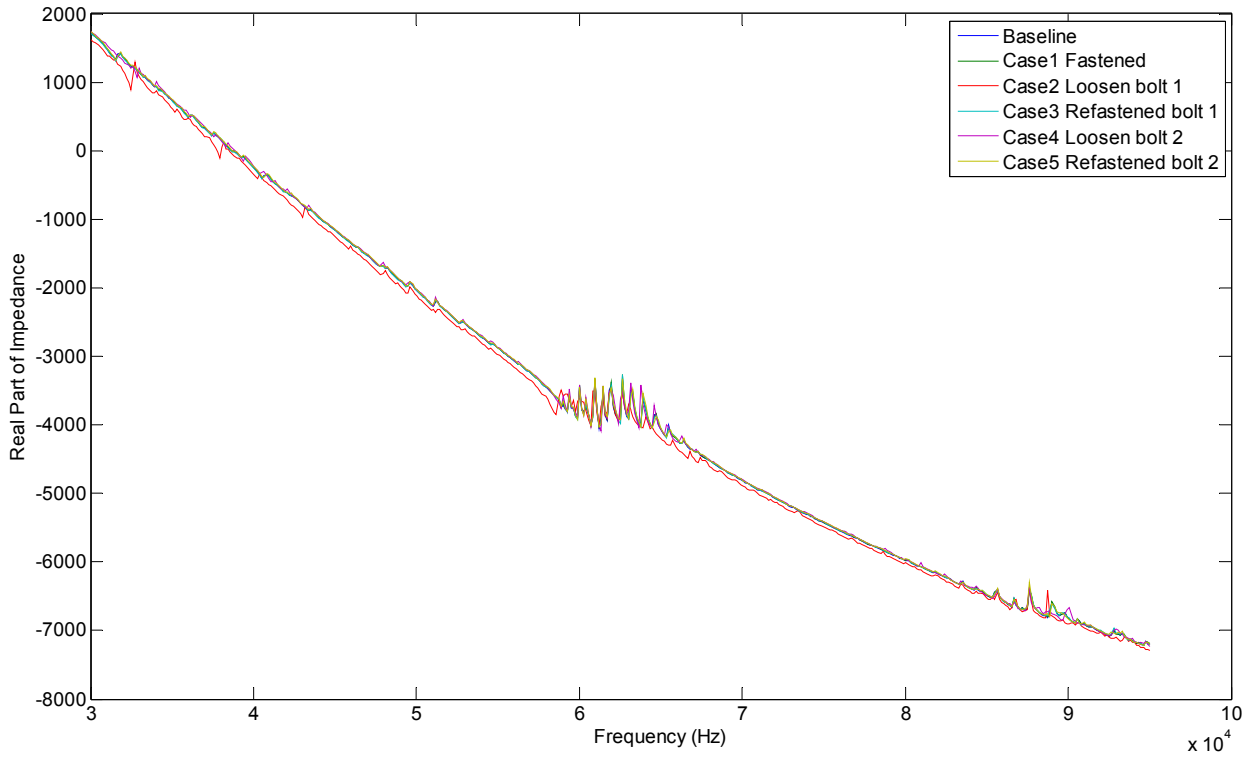


圖 28 案例二、PZT1 在各實驗下之阻抗頻譜

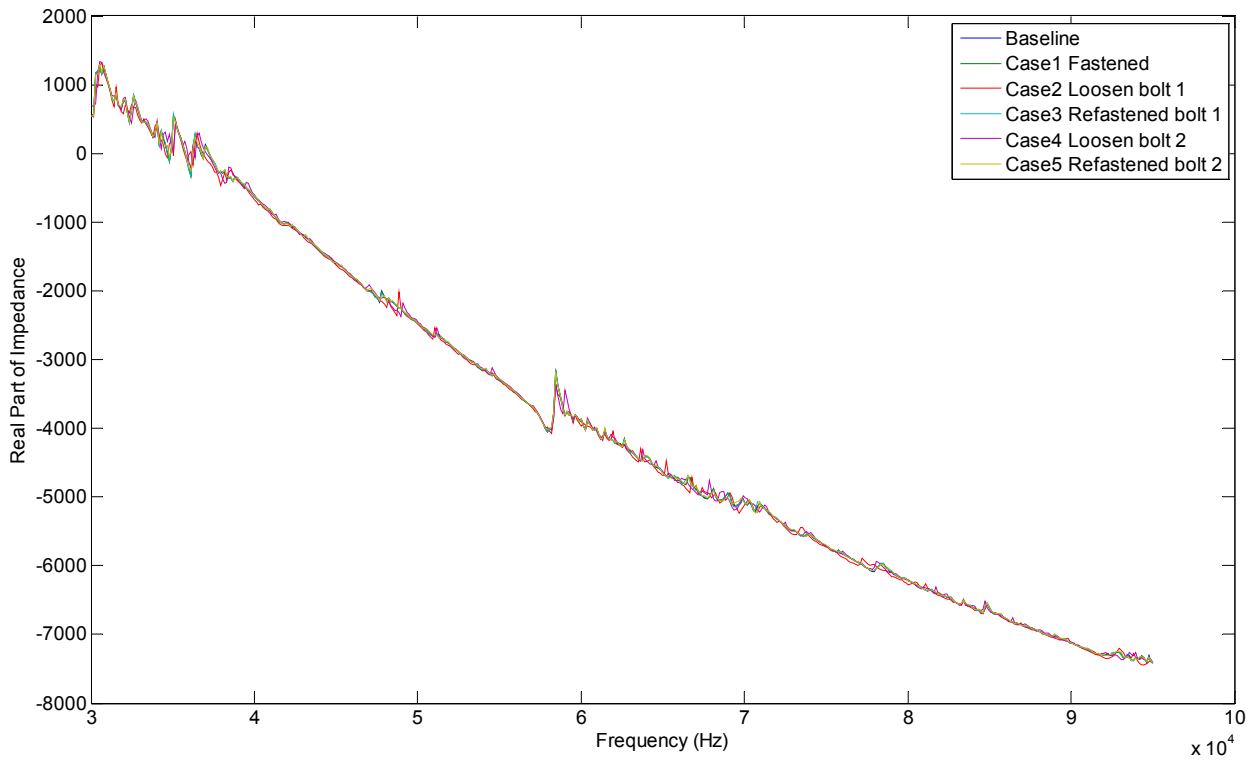


圖 29 案例二、PZT2 在各實驗下之阻抗頻譜

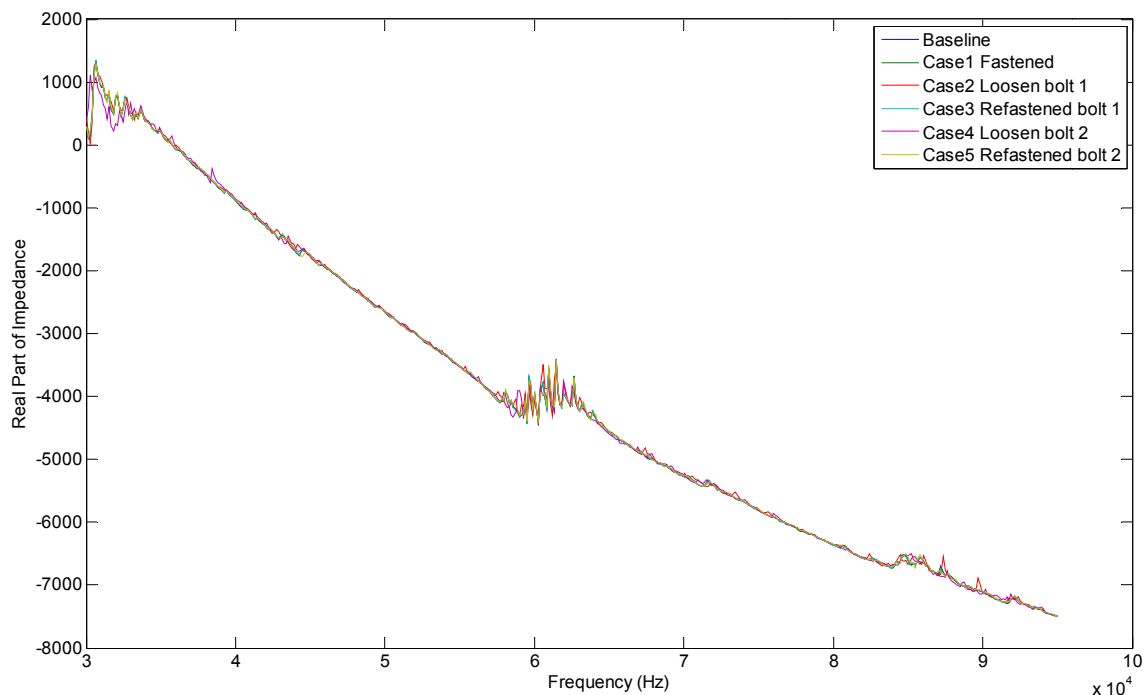


圖 30 案例二、PZT3 在各實驗下之阻抗頻譜

圖 31 為案例二在各實驗案例下之 RMSD 損壞指標值，其主要是計算個別壓電材料本身之初始(螺栓尚未鬆動時)量測數據與鬆動實驗數據之差異指標。從結果顯示，當螺栓鬆動時，每個壓電材料所量測之壓電阻抗抗譜皆產生變化，此主要係由於在縮尺模型下實驗，其邊界條件較窄，而各壓電材料皆能量測到桿件的為小參數改變；另外，在距離鬆動螺栓位置較近的壓電材料有較為明顯的差異，且與距離成正反比之關係，因此可運用此特徵來推估螺栓鬆動之位置。

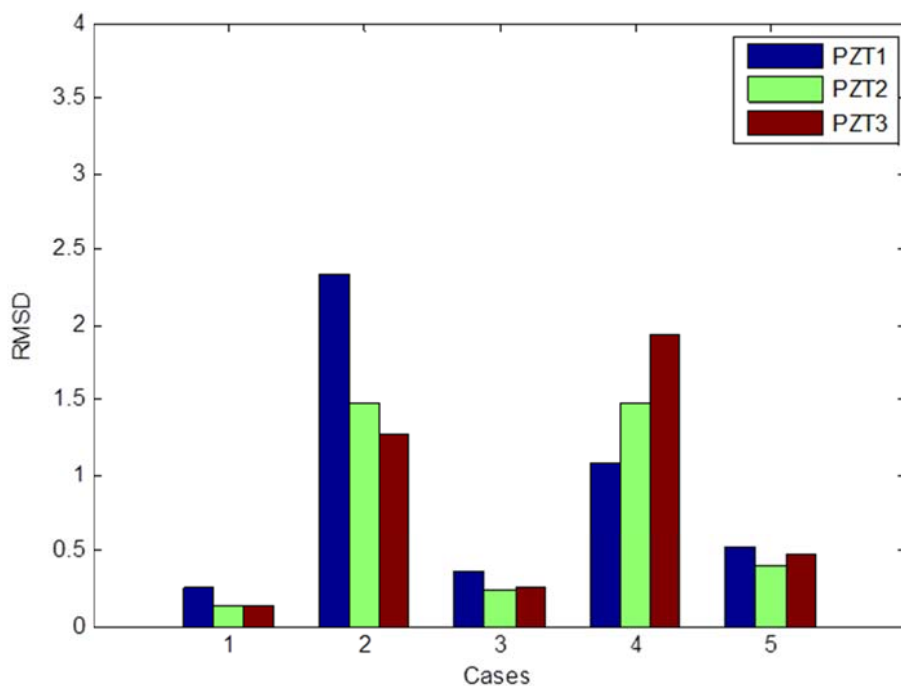


圖 31 案例二在各實驗案例下之 RMSD 損壞指標值

### 5.3 壓電螺栓墊片實驗之案例三

為了驗證無線壓電式阻抗感測器的可行性以及結構阻抗量測之敏感度，本計劃設計鑽有四個 M12 規格的螺栓牙之實驗構架(圖 32)，並在牙洞旁黏貼一壓電片(PZT)，拉出壓電片的陰極和激勵端子並連接自無線壓電阻抗感測器的訊號激勵腳位(V-OUT)與 ADC 訊號採樣腳位(V-IN)。主要實驗設計理念為測試在不同的螺栓扭力下之阻抗頻譜之變化。且為了進一步衡量螺栓的鬆動程度與阻抗頻譜的關係，本研究使用可量測 10 至 70 牛頓力(n.M)之指針式扭力扳手(圖 33)來驗證實際螺栓承受之扭力值，並記錄在不同的扭力下螺栓周圍的壓電阻抗反應變化。

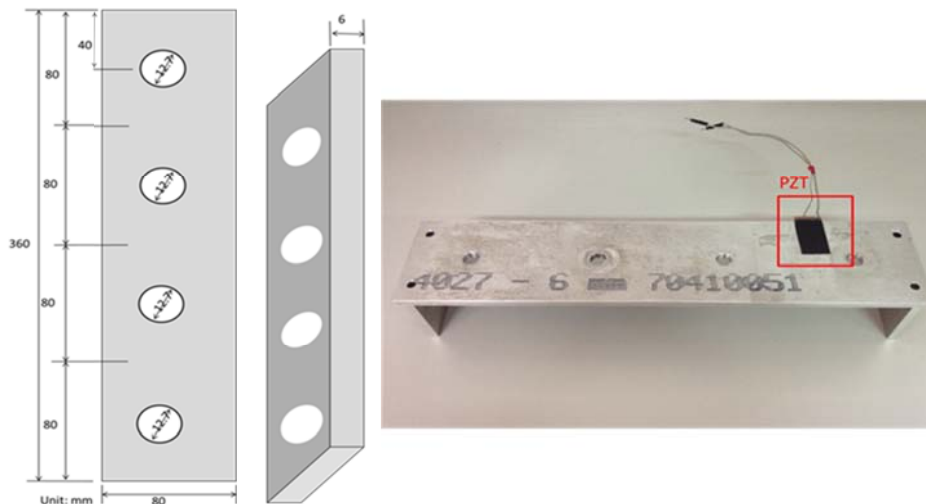


圖 32 螺栓鬆動實驗縮尺構架



圖 33 扭力扳手(10-70 n.M、3% error rate)

另外參考 Kim(Kim et al. 2011; Nguyena et al. 2012) 等人之研究成果，由於壓電所產生的機電耦合範圍是侷限的，因此所黏貼之結構物邊界條件的範圍也會影響阻抗的敏感度，因此本計畫而外設計了改良式的螺栓墊片(圖 34)，其特點為可直接將 PZT 直接黏貼上去，此設計主要目的是使壓電材料的機械震動的響應的邊界條件也限制於特殊的螺栓墊片，來增強阻抗頻譜的結構特徵反應，特別是提升對於螺栓鬆動偵測的敏感度，圖 35 為實驗環境圖。

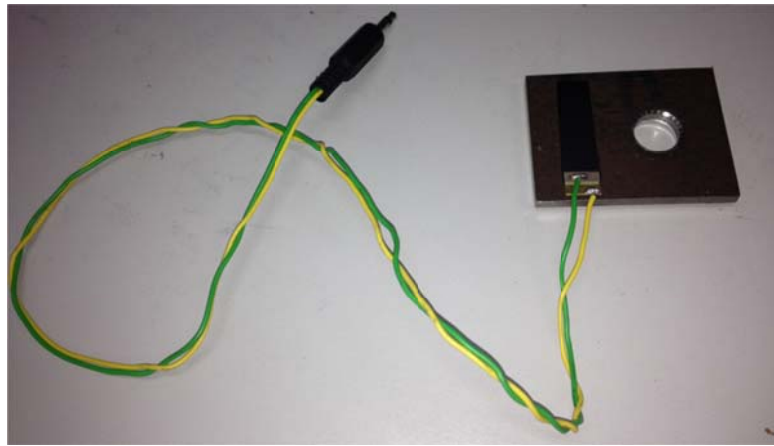


圖 34 長方形之壓電介面實體照

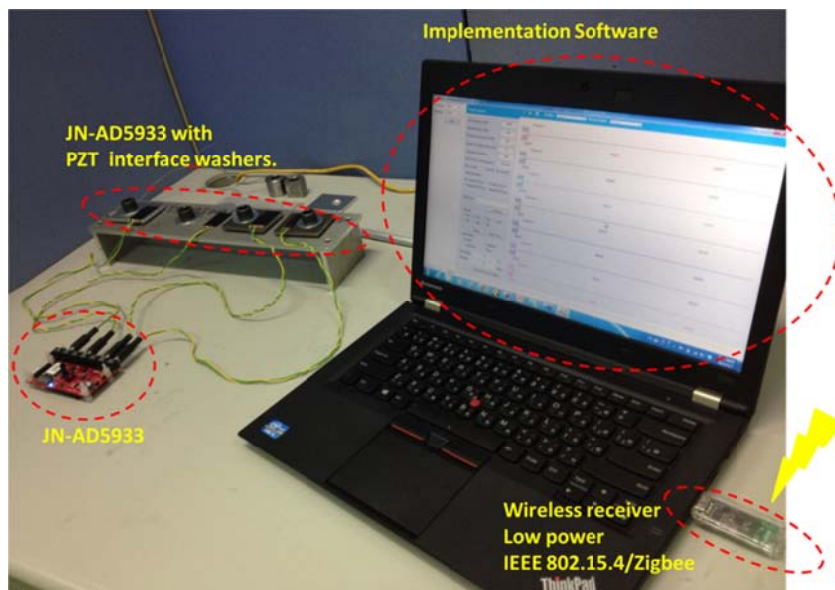


圖 35 螺栓鬆動實驗構架實驗環境圖

圖 36 為壓電螺栓墊片在不同螺栓扭力下之阻抗抗譜量測結果，首先將螺栓透過扭力扳手轉至 30 牛頓力，並依序轉鬆至到 2 牛頓力。其實驗結果發現在 56kHz 至 60kHz 有很明顯的波峰，且此波峰會隨著螺栓的扭力下降而往高頻偏移，此阻抗抗譜反應也與結構力學之螺栓墊片受力減少而結構變軟而往高頻移動特性相似。且由此實驗案例與前二之實驗案例相比可發現由於其機械震動的響應的邊界條件也限制於特殊的螺栓墊片，因此在在阻抗頻譜的結構特徵與波峰也更加明顯，特別是提升對於螺栓鬆動偵測的局部敏感度。也因此藉由此特性透過回歸方程可推導出此受力的線性關係，進而從阻抗頻譜回推螺栓鬆動程度(圖 37)。

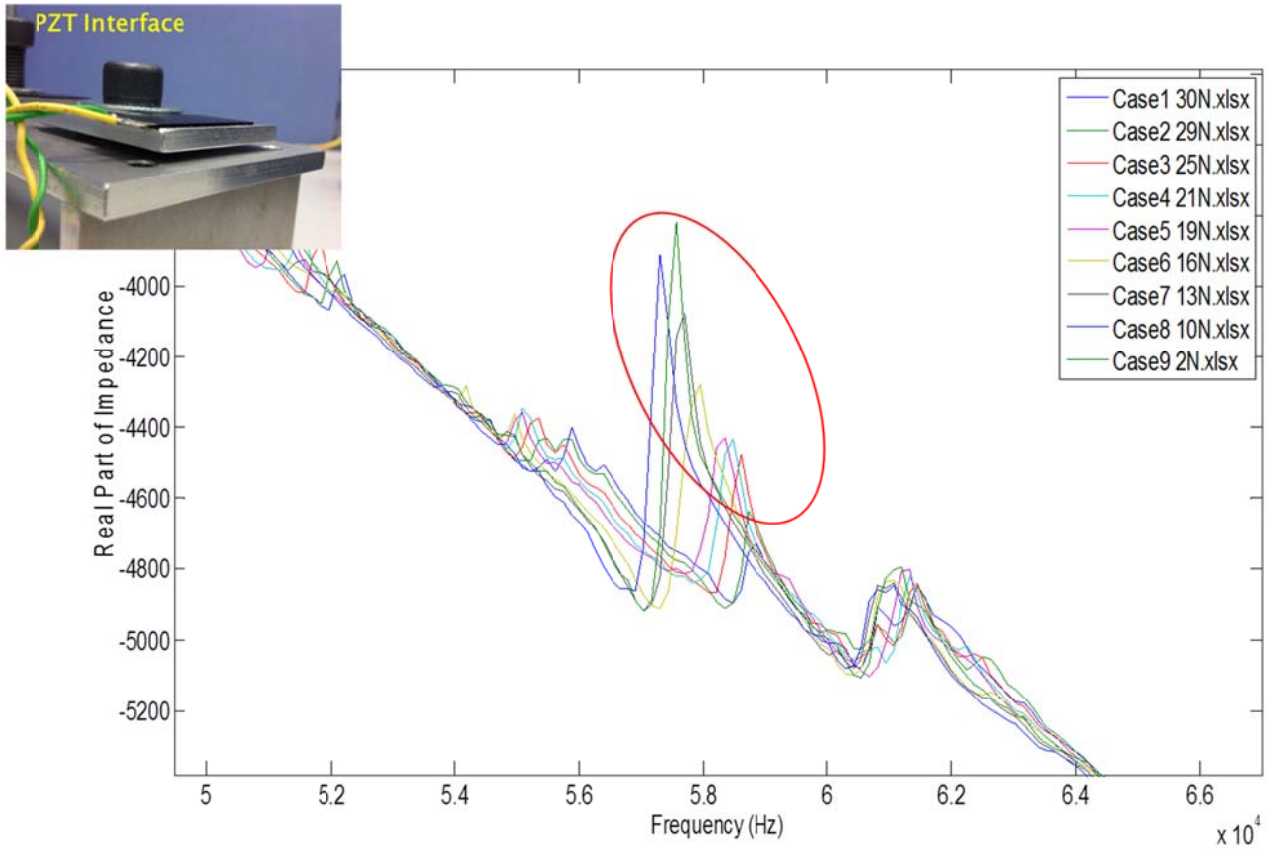


圖 36 壓電螺栓墊片在不同螺栓扭力下之阻抗抗譜量測結果

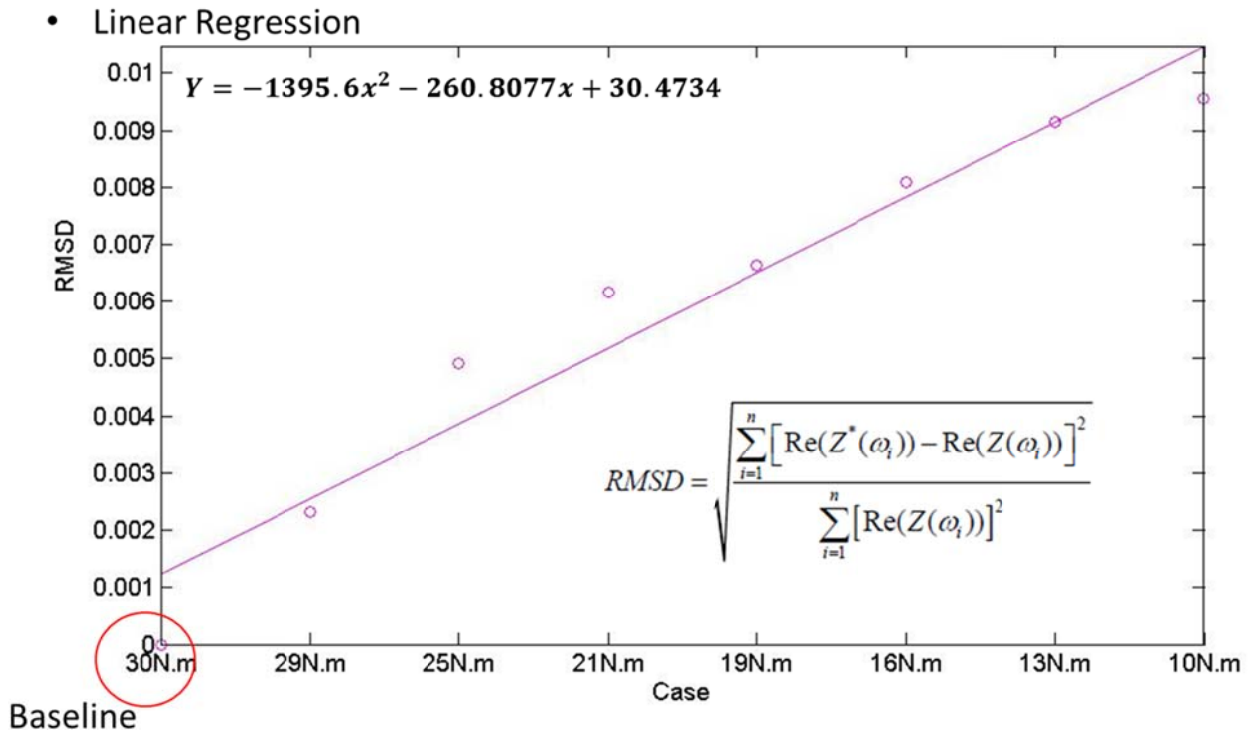


圖 37 壓電螺栓墊片在不同螺栓扭力下之 RMSD 線性回歸曲線

## 六、結論

本計畫主要發展一個無線壓電式結構局部損傷偵測器(WLID)，應用於結構局部健康監測上，WLID 主要採用先進的訊號處理晶片、整合微處理器與低功耗 IEEE 80215.4 標準之射頻模組(SoC)平台所組成。WLID 除了具有傳統無線感測網路的優點，在平時亦可對於結構局部之健康監測量測與預警功能外，更可以透過無線的所帶來的優勢在遠端主動檢測結構物健康狀態，改善目前結構監測系統感測器與資料擷取器大都為實體線路傳輸的缺憾。另外結合微處理器之整合應用於無線感測器上，降低土木工程基礎設施之監測網路的建置成本。在實驗過程中平均一個節點的建置小於 2 分鐘，比起傳統的有線監測系統，在時間成本的節省上更顯現出本系統的優勢。另外完成了感測器的韌體與阻抗分析桌面訊號蒐集軟體，整個軟硬體將在一個縮尺螺栓構架測試 WLID 的性能與結構局部阻抗量測變化的敏感度，重建壓電阻抗波譜(Electrical Impedance spectroscopy)進行結構局部損壞評估。由於 PZT 受到激勵電壓後所產生的震動特性，其黏貼於結構物的構架大小對於機電耦合反應現象的共振邊界條件有莫大的影響。因此本研究輔以特殊的螺栓墊圈形狀控制 PZT 與結構物影響的阻抗邊界條件，可大幅增加結構頻率的敏感度，可有效的辨識出螺栓鬆動的程度，未來可充分運用在機械或是土木領域的結構局部健康監測應用。另外方面，壓電陶瓷在通訊、雷達、航太、導彈、超音波技術、精密測量、紅外線技術、引燃引爆、家用電器與機械震動發電都有非常廣泛的應用。本研究所發展之無線壓電阻抗量測裝置主要目的是以土木結構的局部損壞偵測應用為主，而相關的衍生應用包括飛機的機翼或是重要的機械結構局部監測，甚至是生醫應用中的血液阻抗測量，均有非常前瞻與廣泛的應用前景。

本計畫主要貢獻如下：

- 一個更輕便、成本更低、低功耗與無線傳輸功能的壓電阻抗量測裝置(WLID)。
- 改善目前阻抗結構局部損傷檢測中受限於阻抗分析儀的一套替代方案。
- 設計特殊的螺栓墊圈(Washer)，藉此控制壓電材料機電耦合反應的邊界條件，除了使壓電材料可以方便的黏貼上去，也增加結構阻抗頻譜的特徵反應。
- 設計一套螺栓鬆動構架實驗，實際驗證 WLID 的結構局部損傷偵測的敏感程度。
- 將阻抗頻譜訊號的分析演算法實際嵌入在 WLID 中，此局部損傷偵測演算法能有效的反應結構局部的損壞或變化。
- 完成國內第一個完成無線壓電式結構局部損傷偵測器技術的研製。

## 參考文獻

- P. Chang, A. Flatau, and S. Liu, "Review paper: health monitoring of civil infrastructure," *Structural Health Monitoring*, vol. 2, no. 3, pp. 257, 2003.
- S. W. Doebling, C. R. Farrar, and M. B. Prime, "A summary review of vibration-based damage identification methods," *Shock and Vibration Digest*, vol. 30, no. 2, pp. 91-105, 1998.
- P. Cawley, and D. Alleyne, "The use of Lamb waves for the long range inspection of large structures," *Ultrasonics*, vol. 34, no. 2-5, pp. 287-290, 1996.
- A. Nair, and C. Cai, "Damage Detection of Concrete Structures Using Acoustic Emission," *Key Engineering Materials*, vol. 400, pp. 402, 2009.
- I. Read, P. Foote, and S. Murray, "Optical fibre acoustic emission sensor for damage detection in carbon fibre composite structures," *Measurement Science and Technology*, vol. 13, no. 1, pp. N5-N9, 2002.
- P. Cawley, and D. Alleyne, "The use of Lamb waves for the long range inspection of large structures," *Ultrasonics*, vol. 34, no. 2-5, pp. 287-290, 1996.
- S. Kessler, S. Spearing, and C. Soutis, "Damage detection in composite materials using Lamb wave methods," *Smart Materials and Structures*, vol. 11, pp. 269-278, 2002.
- G. Park, H. Sohn, C. Farrar, and D. Inman, "Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward," *Shock and Vibration Digest*, vol. 35, no. 6, pp. 451-464, 2003.
- S. Bhalla, and C. Soh, "Structural impedance based damage diagnosis by piezo-transducers," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 32, no. 12, pp. 1897-1916, 2003.
- Niezrecki, C., Brei, D., Balakrishnan, S., and Moskalik, A. (2001), "Piezoelectric Actuation: State of the art", *Shock and Vibration Digest*, Vol. 33, No. 4, 269-280.
- Chopra, I. (2002), "Review of the State of the Art of Smart Structures and Integrated Systems," *AIAA Journal*, Vol. 20, No. 11, 2145-2187.
- Liang, C., Sun, F.P., and Rogers, C.A. (1994). "Coupled electromechanical analysis of adaptive material systems-determination of the actuator power consumption and system energy transfer", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 5, pp. 12-20.
- Liang, C., Sun, F.P., and Rogers, C.A. (1996). "Electro-mechanical impedance modeling of active material systems", *Smart Materials and Structures*, 5, pp. 171-186.

- Sun, F.P., Liang, C., and Rogers, C.A. (1994). "Experimental modal testing using piezoceramic patches as collocated sensors-actuators", Proceedings of the 1994 SEM Spring Conference & Exhibits, Baltimore, MI.
- Sun, F., Chaudhry, Z. and Rogers, C.A. (1995). "Automated real-time structure health monitoring via signature pattern recognition", Proceedings of SPIE Conference on Smart Structures and Materials, San Diego, CA.
- Chaudhry, Z. and Ganino, A.J. (1994). "Damage detection using neural networks: an initial experimental study on de-bonded beams", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 5, pp. 585-589.
- Chaudhry, Z., Lalande, F., Ganino, A., and Rogers, C. (1996). "Monitoring the integrity of composite patch structural repair via piezoelectric actuators/sensors", AIAA-1996-1074-CP.
- Ayres, T., Chaudhry, Z., and Rogers, C. (1996). "Localized health monitoring of civil infrastructure via piezoelectric actuator/sensor patches", Proceedings of SPIE Conference 2719, pp. 123-131.
- Ayres, J.W., Lalande, F., Chaudhry, Z., and Rogers, C.A. (1998). "Qualitative impedance-based health monitoring of civil Infrastructures", Smart Materials and Structures, 7, pp. 599-605.
- Bhalla, S., Naidu, A.S.K., and Soh, C.K. (2002a). "Influence of structure-actuator interactions and temperature on piezoelectric mechatronic signatures for NDE", Proceedings of ISSS-SPIE Conferences on Smart Materials Structures and Systems, Bangalore, India.
- Bhalla, S., Naidu, A.S.K, Ong, C.W. and Soh, C.K. (2002b). "Practical issues in the implementation of electro-mechanical impedance technique for NDE", Proceedings of SPIE SPIE's International Symposium on Smart Materials, Nano-, and Micro-Smart Systems, Melbourne, Australia.
- Bhalla, S., and Soh, C.K. (2004). "Electromechanical impedance modeling for adhesively bonded piezotransducers", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 15, pp. 955-972
- Naidu, A., and Bhalla, S. (2002). "Damage detection in concrete structures with smart piezoceramic transducers", Proceedings of ISSS-SPIE2002, International Conference on Smart Materials Structures and Systems, Bangalore, India.
- Giurgiutiu, V., Reynolds, A., and Rogers, C.A. (1999). "Experimental investigation of E/M impedance health monitoring of spot-welded structure joints", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 10, pp. 802-812.



- V. Giurgiutiu, A. Zagrai, and J. Jing Bao, "Piezoelectric wafer embedded active sensors for aging aircraft structural health monitoring," *Structural Health Monitoring*, vol. 1, no. 1, pp. 41, 2002.
- A. Peled, J. Torrents, T. Mason, S. Shah, and E. Garboczi, (2001) "Electrical impedance spectra to monitor damage during tensile loading of cement composites," *ACI Materials Journal*, vol. 98, no. 4, pp. 313-322.
- 沈星, 吕娟, 章建文, and 王宁, (2010) "基于压电阻抗技术和 BP 网络的结构健康监测," *南京航空航天大学学报*, vol. 42, no. 4, pp. 418-422.
- Overly, T.G., Park, G., Farrar, C.R. and Allemang, R.J. (2007), "Compact hardware development for structural health monitoring and sensor diagnostics using admittance measurements", *Proceedings of the IMAC-XXV: A Conference & Exposition on Structural Dynamics*, Orlando, FL, February.
- Overly, T.G., Park, G., Farinholt, K.M., Farrar, C.R., (2008) ,"Development of an extremely compact impedance-based wireless sensing device," *Smart Materials and Structures*, 17(6), 065011, 10.1088/0964-1726/17/6/065011
- K.D. Nguyena, J.H Parka, J.T Kim, (2011), "Imote2-based multi-channel wireless impedance sensor nodes for local SHM of structural connections", *Proceedings of the SPIE*, 79811P (April 14, 2011); doi:10.1117/12.879613
- K.D. Nguyena, P.Y. Lee, J.T Kim, (2012), "PZT-interface for SHM in tendon-anchorage of cable-stayed bridge", *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems. Proceedings of the SPIE*, Volume 8345, pp. 834519-834519-11.
- Peairs, D.M., Tarazaga, P.A., and Inman, D.J. (2006). "A study of the Correlation between PZT and MFC Resonance Peaks and Damage Detection Frequency Intervals Using the Impedance Method", *International Conference on Noise and Vibration Engineering*, Leuven, Belgium.
- Koo, K.Y., Park, S., Lee, J.-J., and Yun, C.-B. (2009) "Automated Impedance-based Structural Health Monitoring Incorporating Effective Frequency Shift for Compensating Temperature Effects", *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 20, 367-377,
- Bhalla, S., Naidu, A.S.K., and Soh, C.K. (2002) "Influence of structure-actuator interactions and temperature on piezoelectric mechatronic signatures for NDE", *Proceedings of ISSS-SPIE Int'l Conferences on Smart Materials Structures and Systems*, Bangalore.
- Koo, K.Y., Park, S., Lee, J.-J., and Yun, C.-B. (2009) "Automated Impedance-based Structural Health

Monitoring Incorporating Effective Frequency Shift for Compensating Temperature Effects”, J. Intell. Mater. Syst. Struct., 20, 367-377,

K.D. Nguyena, J.H Parka, J.T Kim, (2011), “Imote2-based multi-channel wireless impedance sensor nodes for local SHM of structural connections”, Proceedings of the SPIE, 79811P (April 14, 2011);  
doi:10.1117/12.879613

K.D. Nguyena, P.Y. Lee, J.T Kim, (2012), “PZT-interface for SHM in tendon-anchorage of cable-stayed bridge”, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems. Proceedings of the SPIE, Volume 8345, pp. 834519-834519-11 .

# 國科會補助專題研究計畫出席國際學術會議心得報告

日期：103年9月15日

計畫編號	NSC 101 — 2625 — M — 009 — 006		
計畫名稱	智慧型無線感測監控系統平臺建構與其在土木結構診斷應用之研究-子計畫:無線壓電式結構局部損傷偵測監測器之研發(I)		
出國人員姓名	洪士林	服務機構及職稱	國立交通大學土木工程學系/教授
會議時間	102年9月8日至 102年9月12日	會議地點	韓國 濟州島
會議名稱	(中文) 2013 先進結構工程與力學會議 (英文) The 2013 World Congress on Advances In Structural Engineering and Mechanics		
發表題目	(中文) 無線壓電式結構局部損傷偵測器之研製 (英文) Development of a wireless-based multi-channel impedance sensing system for structure local damage detection		

## 一、參加會議經過

2013結構工程與力學進展世界大會(The 2013 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM13))於2013年9月8至12日在韓國濟州島的濟州國際會議中心(International Convention Center Jeju, Jeju, Korea)舉行，筆者之碩士班學生丁君廷亦由本計畫之【出席國際會議】經費補助共同參與此次研討會，研討會中有發表一篇論文” Development of a wireless-based multi-channel impedance sensing system for structure local damage detection。”此論文乃本年度國科會補助計畫之研究成果。雖然濟州與台北已有直航航線，但因出發當日無直飛班次，所以於9月7日搭乘韓國釜山航空的班機先達釜山後，再轉機至濟州島。時程雖較長，但因台灣離韓國僅2小時時程，轉機之等候時間尚可接受。會議結束後於12日以原

路線返國。

結構工程與力學進展世界大會於2011年於韓國首爾舉辦過第一屆大會，今年的大會則整合了七個相關的國際研討會共同舉行，讓與會者更有機會接觸相關領域的研究議題與成果，藉由發表論文與討論亦能增廣研究範疇與尋求未來研究方向。今年有近三百多位來自世界40多個國家的學者專家參加此次會議，算是一極成功的國際研討會。此次大會共有415篇論文被收集於論文集，並於大會中分9個研討室平行報告討論。期間亦安排了10位Keynotes進行精彩的專題報告。誠如上述，因此次大會係整合七個與結構工程及工程力學相關領域之國際大會，所以Keynotes的報告議題涵蓋相當廣，單就這10場精闢且深入的專題報告就已值得。其中，筆者在由Prof. Casciati所報告的Sensor placement driven by model order reduction (MOR) reasoning及Prof. Takewaki所報告的Smart system identification of super high-rise buildings using limited vibration data during 2011Tohoku earthquake兩場專題演講收益頗多。筆者之論文安排在研討會的最後一天的場次中的最後一篇論文發表。為訓練研究生之英文發表與回覆問題能力，本次所發表的論文由參與本計畫之研究生發表，整體表現優異，對與會學者發問的問題亦能提出簡短適確的回應。報告後Park, G.教授亦提出一些問題共同討論。Prof. Park, G.是目前在piezoelectric impedance-based health monitoring研究領域重要的學者之一。本次大會為結構工程與力學領域重的世界大會，所以國內亦有多位教授學者(台大、成大等)參加。藉此次盛會，難得聚在韓國彼此分享研究經驗與成果，亦是本次會議的收穫之一。

## 二、與會心得

此次有機會參與2013結構工程與力學進展之重要的國際會議，藉由聯合七個相關的

國際研討會之大型會議，聆聽多篇精闢的專題報告。其中結構安全監測系統(Structural health monitoring)是筆者近年來著重的研究領域，能與國際學者友人討論交換意見，受益良多。同時亦感受世界各國學者專家無不日以繼夜埋首鑽研，並期望在學術界有更高層次的突破發展，以獲最佳成果來增進科技進步與個人學術地位。此次研討會中結交不少同道，交換彼此研究心得，增進不少見聞，相信對今後不論教學與學術研究將有頗多助益。

韓國濟州島位於韓國南端，是一由火山噴發所成之島。島上的高山與四周蔚藍海洋使它成為韓國重要的觀光景點。島上有所謂三多，風多、石頭多，還有女人多。其柱狀火山岩已列入聯合國世界自然遺產中。為了讓與會者有機會遊覽濟州的自然景觀，大會亦安排了一個半日遊。因時間許可，筆者亦趁機遊覽濟州的美景，也算是此次會議的另一收穫。四天來，發覺濟州真是一個極有特色的島嶼，且其在發展觀光的努力與用心！

### 三、建議

此次藉由國科會補助參加此次國際研討會，與各國學者專家聚集一堂，藉論文發表、溝通理念、介紹新知、並進可敦睦國民外交，收穫良多。建議應盡可能同時補助學生同時參與國際研討會，也可真正落實所謂的”國際化”。並希望國科會能更積極鼓勵研究人員鑽精研究，政府亦盡可能多方資助國內學者及研究生出席國際性會議，藉由學術論文發表，促進科技交流，並而提昇個人以及國家學術水準及形象。

### 四、發表論文全文或摘要

附至本附錄章節最後。

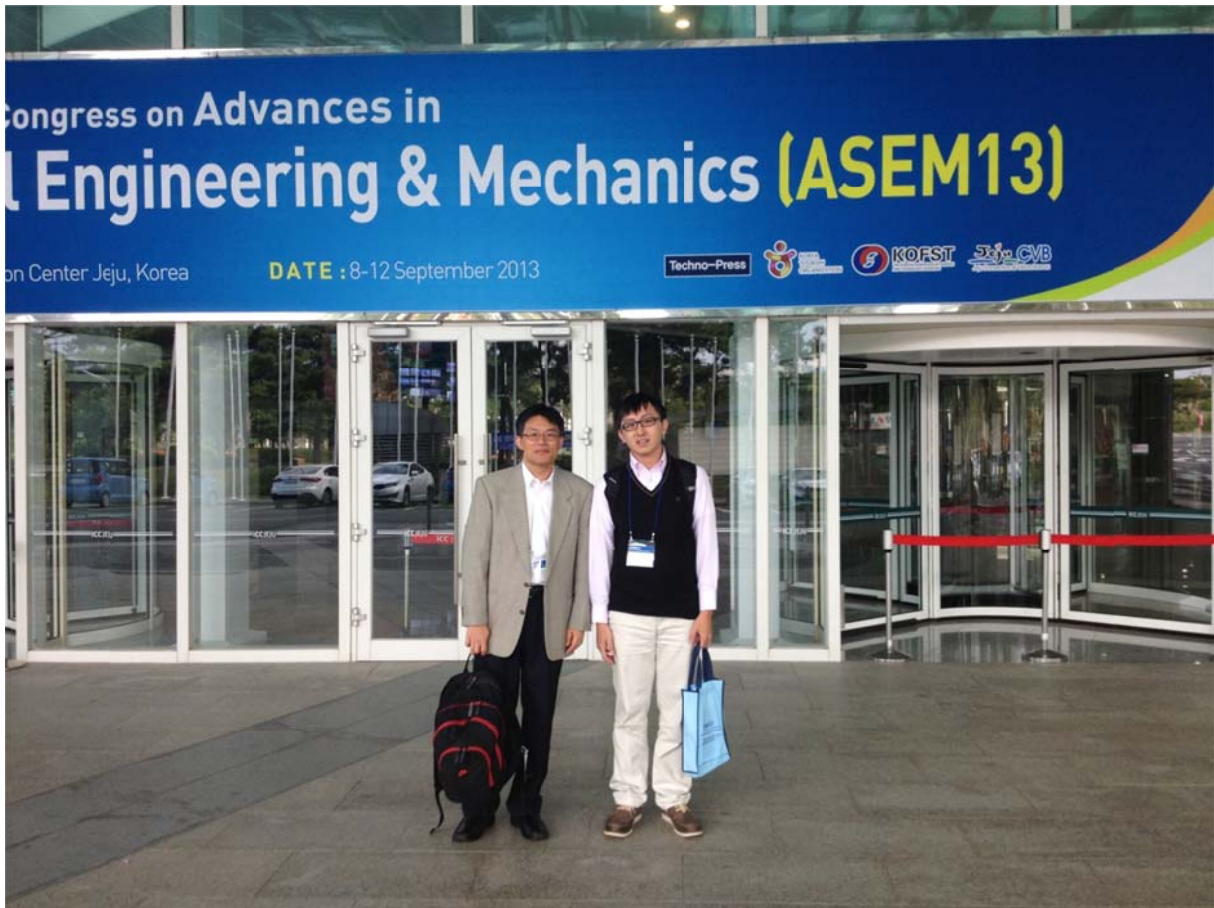
### 五、攜回資料

- 論文摘要全集

- 會議議程
- 論文摘要及全文電子檔(光碟)

## 五、附件

會場與學生之照片及投稿於本次研討會的論文乙篇。



# 國科會補助專題研究計畫出席國際學術會議心得報告

日期：103 年 9 月 15 日

計畫編號	NSC 101 — 2625 — M — 009 — 006		
計畫名稱	智慧型無線感測監控系統平臺建構與其在土木結構診斷應用之研究-子計畫:無線壓電式結構局部損傷偵測監測器之研發(I)		
出國人員姓名	丁君廷	服務機構及職稱	國立交通大學/土木工程謝/碩士生
會議時間	102 年 9 月 8 日至 102 年 9 月 12 日	會議地點	韓國 濟州島
會議名稱	(中文) 2013 先進結構工程與力學會議 (英文) The 2013 World Congress on Advances In Structural Engineering and Mechanics		
發表題目	(中文) 無線壓電式結構局部損傷偵測器之研製 (英文) Development of a wireless-based multi-channel impedance sensing system for structure local damage detection		

## 一、參加會議經過

2013 年先進結構工程與力學會議在韓國濟州島舉行，會議期間為民國 2013 年 9 月 8-12 日。世界各國，共有上百人的學術界與業界人士參加。第一天晚上主要是註冊與茶會，認識了一些與會先進與學生，第二天開始就是正式的會議發表，本人報告是排在第三天。由於我是第一次出國以英文報告論文，因此還蠻緊張的，到了韓國時每晚在飯店還是持續練習簡報。在研討會議中可以看到各國的學生或是教授們報告，各有優缺點。在我報告的過程還算順利，大部分的問題也回答出來，但是對於自己的簡報穩定度和英文表達還不是很滿意，我想自己還有很多進步的空間，期待未來能更加提昇自己的英語相關能力並能更加精進，尤其是在發音與熟習外國口音

的部分，還需要多加強。這次研討會也觀察到了許多相關壓電材料方面的研究成果，吸取了許多寶貴的資訊。希望未來可有更多機會出國參加國際研討會為台灣發並努力與加油。

## 二、與會心得

這次參加這個會議，是我第一於國外參加的會議，有蠻多心得的。在會議中你可以看到各國所做的研究，可以看到有比你差有也比你好的研究。且許多亞洲國家的英文簡報能力普遍來說都不錯。雖然自己的表現的不是非常完美，但是對於英文口頭報告有了一定的體驗，對於爾後的自信度有了相當的提昇。這次出國大大增加了國際觀，也給自己相當多的刺激，除了英文要加強之外，更加深了我要更加用功與努力的動力。這次的經驗讓我對研究更加充滿鬥志與熱情，在國際化時代，有機會一定要常常踏出去，讓自己的視野更加的開闊，也可以讓研究與世界接軌。

## 三、發表論文全文或摘要

附至本附錄章節最後。

## 四、建議

這次能夠參加這次的研討會，很感謝國科會的經費補助，讓我能夠到國外去發表，相信對未來一定有相當的幫助。

## 五、攜回資料名稱及內容

- 論文摘要全集
- 會議議程
- 論文摘要及全文電子檔(光碟)



# Development of a wireless-based multi-channel impedance sensing system for structure local damage detection

\*Shih-Lin Hung<sup>1)</sup> and Chun-Ting Ding<sup>2)</sup>

<sup>1), 2)</sup> *Department of Civil Engineering, National Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan*

<sup>1)</sup> [slhung@mail.nctu.edu.tw](mailto:slhung@mail.nctu.edu.tw)

## ABSTRACT

This work presents development of a wireless-based multi-channel impedance sensing system for detecting location of structure local damage. The system is composed of a wireless impedance sensor, application software, and local damage detection schemes. The wireless impedance sensor consists of a microprocessor, wireless communication module, and an AD5933 impedance chip as well as two multiplexers. The sensor not only has the properties of cost-efficient, low power requirements, small size, and simple deployment, but also has the multi-channel function that allows the user to monitor seven-channel PZT patch from a single device. Users can communicate with these sensors through the dongle with computer wirelessly. Through the application software we developed, the measurement parameters and sampling period can be set and record the measured impedance data on the computer. When the sensor is in idle state, it can be switched into sleep mode to reduce power consumption. Herein, local damage detection schemes include root-mean-square deviation (RMSD) index to locate the local damages of the structure. The feasibility of the proposed wireless impedance-based sensing system was assessed using a 1/8-scale three-storey steel-frame model with various damage scenarios. It was confirmed experimentally that good sensing quality can be achieved via proposed system and locations of structure local damages can be identified effectively.

## 1. INTRODUCTION

The approaches of structural health monitoring (SHM) can be classified as global and local monitoring. The global structural monitoring methods are conventionally adopted vibration-based (acceleration-based) schemes. These methods identify damage by detecting modal property change, such as natural frequencies, modal damping, or mode shape. However, vibration-based methods are not very effective in detecting tiny or incipient damage locality. Therefore, the electro-mechanical-impedance (EMI)-based damage detection method has been studied extensively as a powerful technique at localizing damage (Liang et al.1994; Sun et al. 1995; Park et al. 2000; Bhalla et al, 2004).

---

<sup>1)</sup> Professor

<sup>2)</sup> Graduate Student

When many sensors and diagnostic methods are implemented, wireless communication appears to be an attractive approach as conventional wired sensor systems can only deploy limited numbers of sensors because of cost constraints or excessive complexity. Wireless sensors are expected to diminish these problems by simplifying the installation of wired sensors. Smart wireless sensor networks (WSNs) are an attractive sensing technology for SHM applications because of their low manufacture costs, low power requirements, small size, and simple deployment (i.e., lack of cables) (Lin et al. 2012).

The development of wireless impedance sensor node has been investigated by several studies in literature. Mascarenas et al.(2009) and Park et al. (2010) designed the sensing node based on an Atmega128 microcontroller. Nguyen et al. (2011) proposed wireless impedance sensor node based on an Imote2 platform. The aforementioned sensors all contained an AD5933 impedance measurement chip individually. They also provided wireless telemetry and multiplexers. The Atmega128 MCU based nodes had limited storage memory and low clock speed. That has constraints in collection of the response signal in multiple PZT and processing data in sensor node. In addition, the Imote2 may be a powerful and promising smart wireless sensor platform for SHM. It consists of a 32 bit XScale processor with 32 MB RAM and a flash memory of 32 MB. However, the Imote2-based sensor node is more expensive relatively compared to the other platforms. For these key points, a low cost and large enough storage memory platform for impedance-based SHM is presented in this work.

This study presented a novel impedance-based wireless sensor SHM system for detecting structural local damage. A low cost wireless impedance sensor node based on Jennic platform, called JN-IMP, was developed. The Jennic microprocessor offers an enhanced 32-bit RISC processor and a fully compliant 2.4GHz IEEE802.15.4 transceiver (SoC) with a RAM of 128 KB and a flash memory of 512 KB. JN-IMP also integrated an AD5933 impedance chip as well as two multiplexers. It is designed with the properties of cost-efficient, low power requirements, small size, and simple deployment. The feasibility of the proposed wireless impedance-based sensing system was assessed using a 1/8-scale three-storey steel-frame model with various damage scenarios. It was confirmed experimentally that good sensing quality can be achieved via proposed system and locations of structure local damages can be identified effectively.

## **2. ELECTROMECHANICAL IMPEDANCE-BASED METHOD**

The Impedance-based damage detection approach utilizes the electromechanical coupling effect between active surface-bonded piezoelectric patches and host structural. Liang et al. (1994) first proposed an analytical model of this method. The electromechanical is related to the mechanical impedance of a host structure, thus allowing monitoring the properties of the host structure using the measured electrical impedance. When damage occurred to structure, the mechanical impedance of structure will be changed. Therefore, if the mechanical impedances of the piezoelectric patch remain undamaged, any changes in the EMI signal correlates with the damage in structure. A piezoelectric patch-structure bonded system can be

modeled as a circuit system (Park et al. 2007), shown in Fig.1.

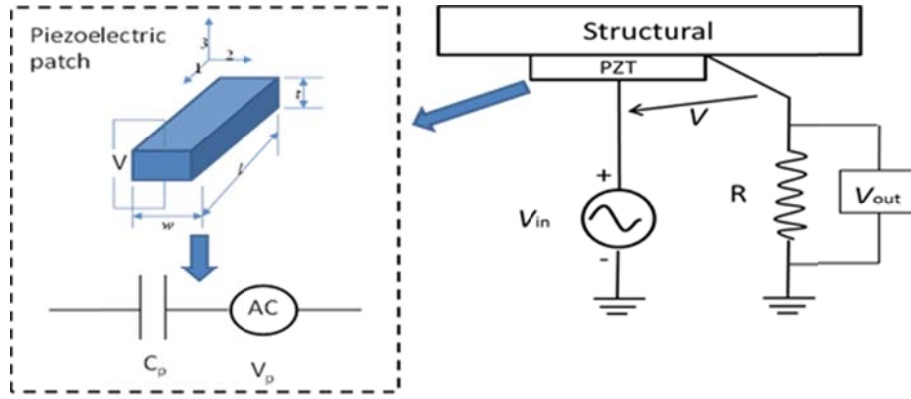


Fig. 1 Diagram of PZT-structure bonded system

Herein, piezoelectric patch is modeled as a capacitor ( $C_p$ ) and a self sensing-actuation voltage source ( $V_p$ ) caused by input voltage ( $V_{in}$ ). The output voltage, couple with  $V_p$  and  $V_{in}$ , can be expressed as

$$V_{out}(\omega) = \frac{Z_R(\omega)}{Z_R(\omega) + Z_p(\omega)} (V_{in}(\omega) + V_p(\omega)) \quad (1)$$

Where  $Z_R$  is the electrical impedance of the resistor and  $Z_p$  is electrical impedance of piezoelectric patch. Subsequently, the electrical impedance of piezoelectric patch can be written as

$$Z_p(\omega) = Z_R(\omega) \left\{ \frac{V_{in}(\omega) + V_p(\omega)}{V_{out}(\omega)} - 1 \right\} \quad (2)$$

Since the self sensing-actuation voltage source ( $V_p$ ) is related to structural mass, as confirmed by numerous researchers (Liang et al. 1994). Equation (2) indicates that the  $Z_p$  has significant response to structural damage. A piezoelectric patch-structure bonded system can be further modeled as an electro mechanical admittance (EMA) model (Inverse of EMI). The electro mechanical admittance model can be expressed as

$$Y(\omega) = j\omega \frac{wl}{t} \left\{ (\bar{\epsilon}_{33}^T - d_{31}^2 \hat{Y}^E) + \frac{Z_p(\omega)}{Z_p(\omega) + Z_s(\omega)} d_{31}^2 \hat{Y}^E \left( \frac{\tan(kl)}{kl} \right) \right\} \quad (3)$$

where  $w$ ,  $l$ , and  $t$  are the width, length, and thickness of the piezoelectric patch;  $\hat{Y}^E$  is the complex Young's modulus of the piezoelectric patch at zero electric field;  $\bar{\epsilon}_{33}^T$  is the complex dielectric constant of piezoelectric patch;  $d_{31}^2$  is the coupling piezoelectric constant in the x direction at zero stress;  $k = \omega \sqrt{\rho / \hat{Y}^E}$  is the wave number that is related to mass density  $\rho$ ,  $\hat{Y}^E$ ; and excitation frequency  $\omega$ , respectively;  $Z_p$  and  $Z_s$  are the mechanical impedances of the piezoelectric patch and the host structure, respectively.

Although the EMI provides a qualitative method for detecting structural damage,

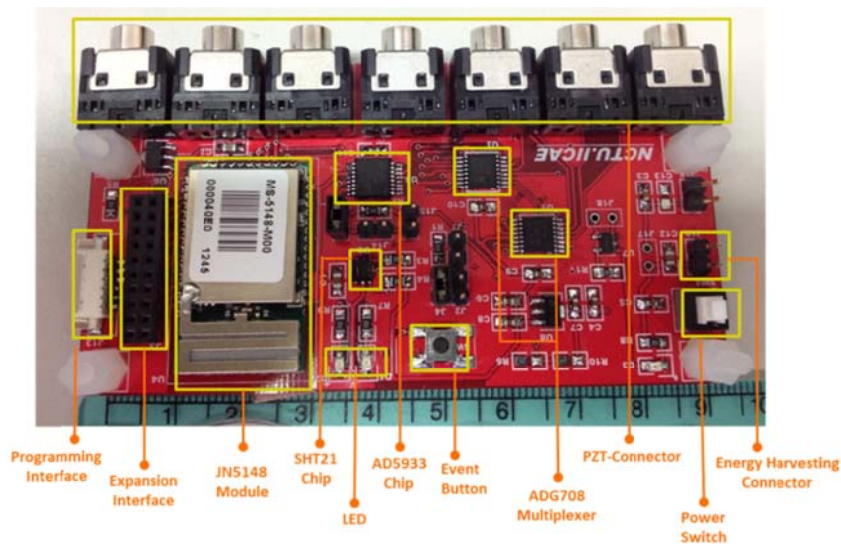
the quantification approach need be established. A simple statistical algorithm, which is based on frequency-by-frequency comparisons, referred to Root Mean Square Deviation (RMSD), was used to develop the quantitative assessment of damage in previous research (Yang et. al. 2008). The RMSD is defined as

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=a}^b (I_i^D - I_i^U)^2}{\sum_{i=a}^b (I_i^U)^2}} \times 100 \quad (4)$$

Where  $I_i^U$  and  $I_i^D$  are the real part of impedance of piezoelectric patch at the  $I^{th}$  frequency point in undamaged and damaged structures, respectively. In a RMSD damage metric chart, the greater numerical value of the metric, the larger the difference between the baseline reading and the subsequent reading indicates the presence of damage in a structure.

### 3. DESIGN OF LOW COST WIRELESS IMPEDANCE SENSOR NODE

This section expressions all hardware and software design of proposed novel wireless sensor system. The wireless impedance sensor is consists of a Jennic microprocessor, a SHT21 temperature/humidity integrated chip, and an AD5933 impedance chip as well as two multiplexers (ADG708). Jennic offers an enhanced 32-bit RISC processor and a fully compliant 2.4GHz IEEE802.15.4 transceiver (SoC) with a RAM of 128 KB and a flash memory of 512 KB. The Photo and block diagram of sensing node is illustrated in Fig. 2



**Fig. 2** Photo of wireless impedance sensor(JN-IMP).

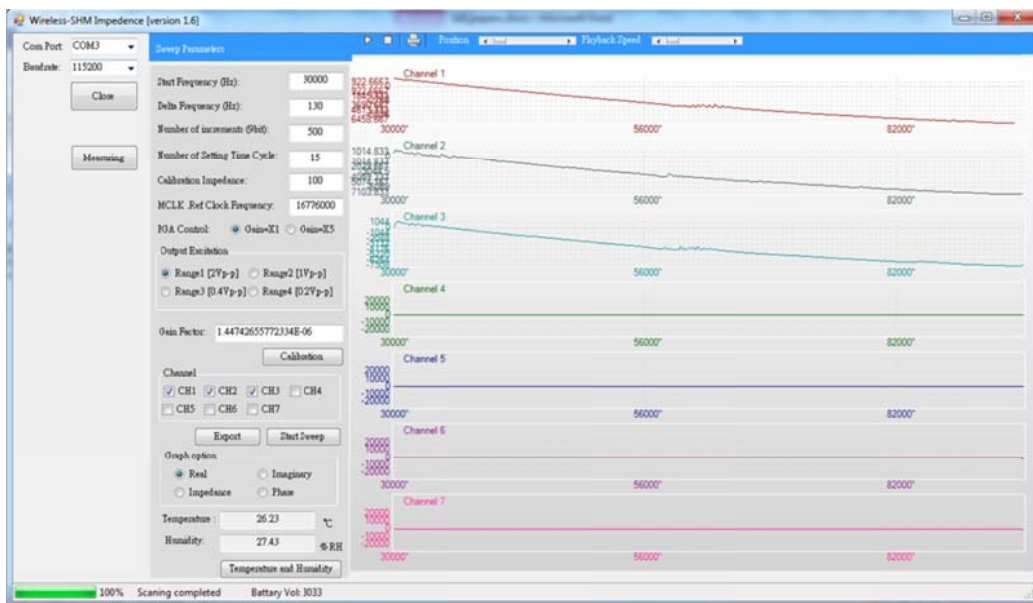
The AD5933 was first proposed for measuring EMI impedance signatures by Mascarenas et al. (2007). The impedance chip can be programmed to take a measurement from 1-100 kHz. The AD5933 consists of an on-board frequency generator, a Digital-to-Analog (D/A) converter, A/D converter. Furthermore, a discrete Fourier transform (DFT) is processed by an on-board DSP engine. The AD5933 is the most important component to interact with the piezoelectric material.

There are several important points to contribute to the flexibility of the JN-AD5933. First, the ability to wirelessly transfer allows the sensor node to be placed in non-reachable locations, without the constraints of a cable-based DAQ system. Second, the ability to quickly change the system setting of sweep parameters, through the self-made wireless transfer instructions. Finally, the ability to efficiently change the firmware on the microcontroller, through the on-board FTDI chip, allows the sensing node to further extend. The features are described in Table 1.

**Table. 1** Features of the proposed JN-IMP

Model	AD5933
Impedance Range	1 k $\Omega$ –10 k $\Omega$
Frequency Range	1 kHz–100 kHz
Excitation Voltage	1.98 V <sub>p-p</sub>
Temperature Resolution	> 0.03 °C
Temperature Range	-40 ~ +125°C (-40 ~ +257°F)
Wireless function	2.4 GHz IEEE 802.15.4 / Zigbee
Transmission Range	Standard Power (20 m) / High power (up to 1km)
Power Supply Options	Commercial batteries (3.6-7.2V) 2AA Ni-MH rechargeable battery with Solar Panels (3V)
Dimensions	91.6 x 48 x 7 (mm)
Weight	45(g)
Cost	\$US 50

A host computer is employed to transmit command parameters and receives the data from JN-IMP wirelessly. A .NET C# based user interface was designed to convenience handling the raw and processed data as shown in Fig. 3. The sweep parameters panel let the user define the system setting with the required frequency ranges, number of frequency points and increased of delta frequency. The user interface combines the ability to measure data and analyse the data for damage indicators and display the results.

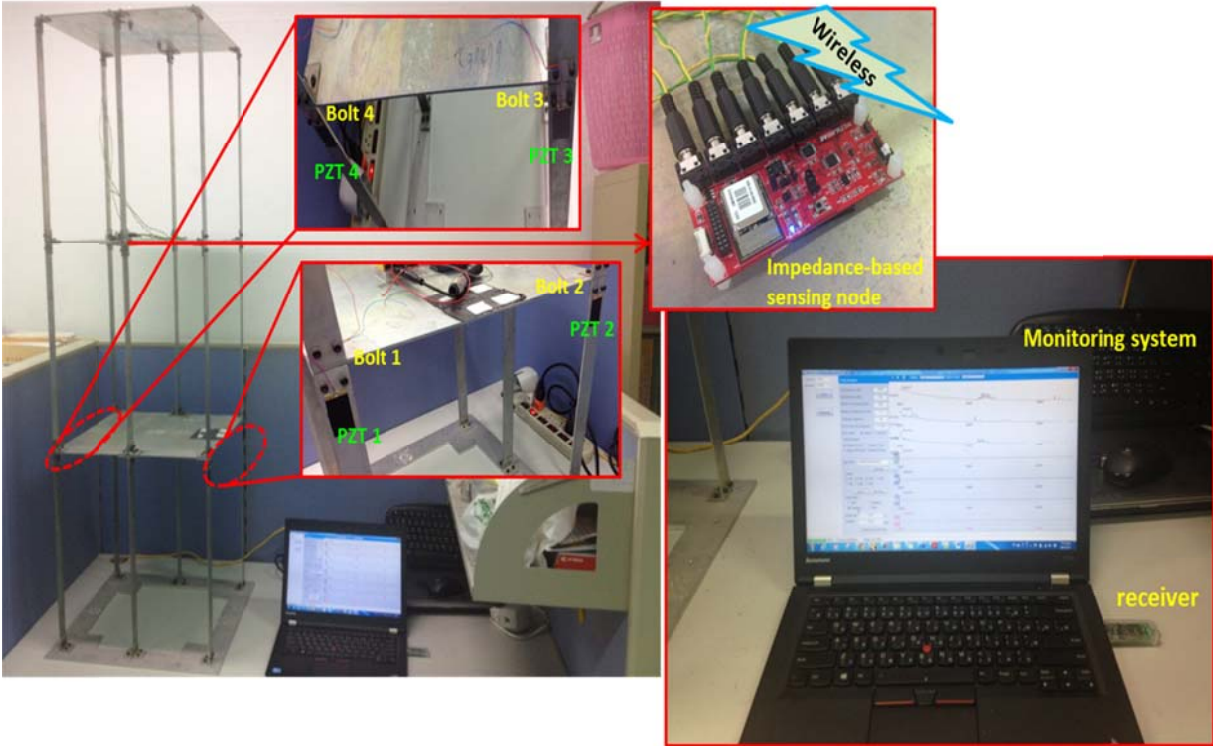


**Fig. 3** The user interface of Wireless-SHM Impedance system

### 4. EXPERIMENTAL VERIFICATION

#### 4.1. Experimental Study in bolted loosen

A 1/8-scale three-storey steel frame model, shown in Fig. 4, was utilized to evaluate the performance of the JN-AD5933 and local damage detection schemes. Each floor weighed about 3.8 kg and each column had a cross-sectional area of 80 mm and was 440 mm in height. Four PZT patches are respectively close bonded to the joint of the columns in 1st floor. A series of damage scenarios were listed in Table 2. First, all bolts were fastened in C1. Then, the bolt 1 was loosened in C2. Subsequently, bolt 2 and bolt 3 were loosened in the next scenarios in C3 and C4, respectively. Finally, the bolt1 were refastened in C5.



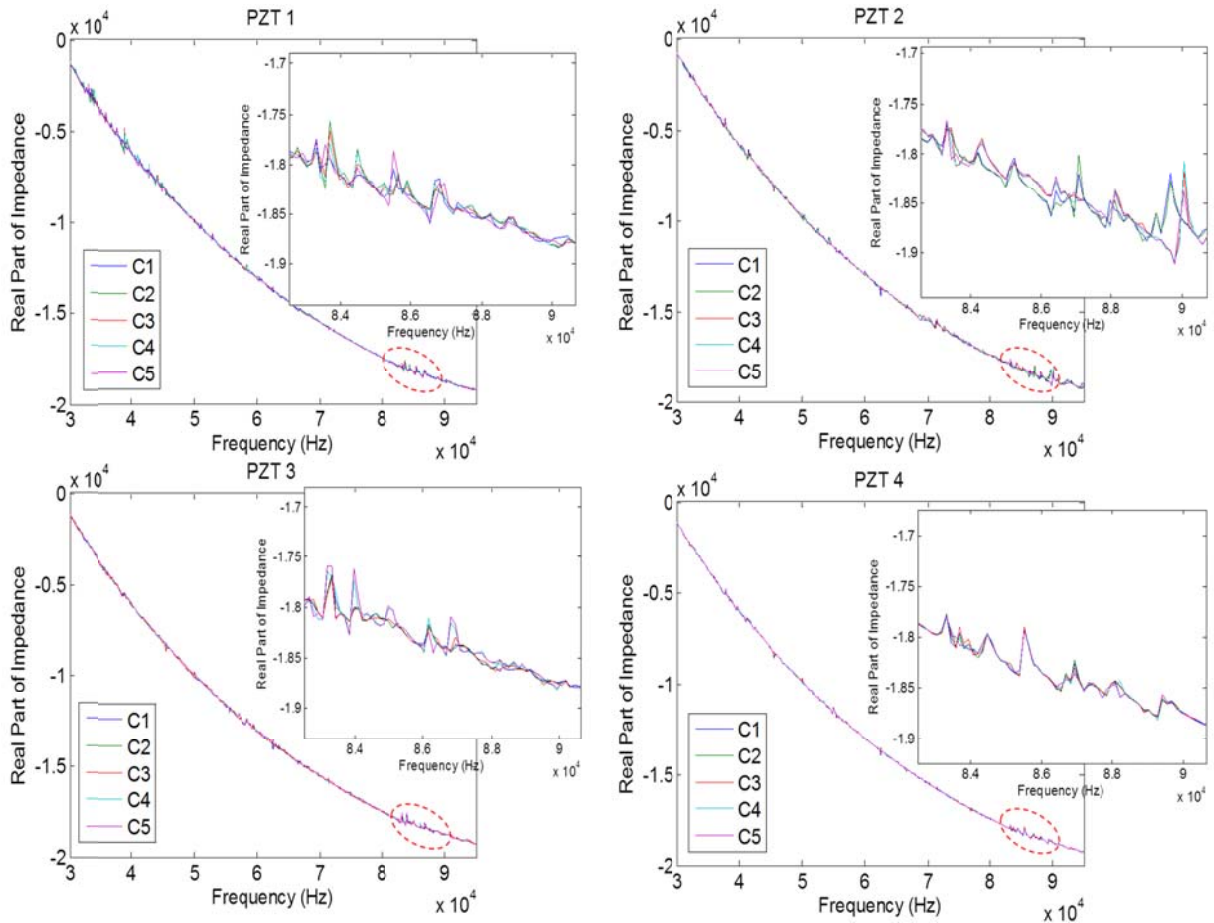
**Fig. 4** Experimental setup for wireless impedance measurement device in a 1/8-scaled three-storey steel frame model.

**Table. 2** Damage scenarios for detecting bolt loosen on a 1st floor.

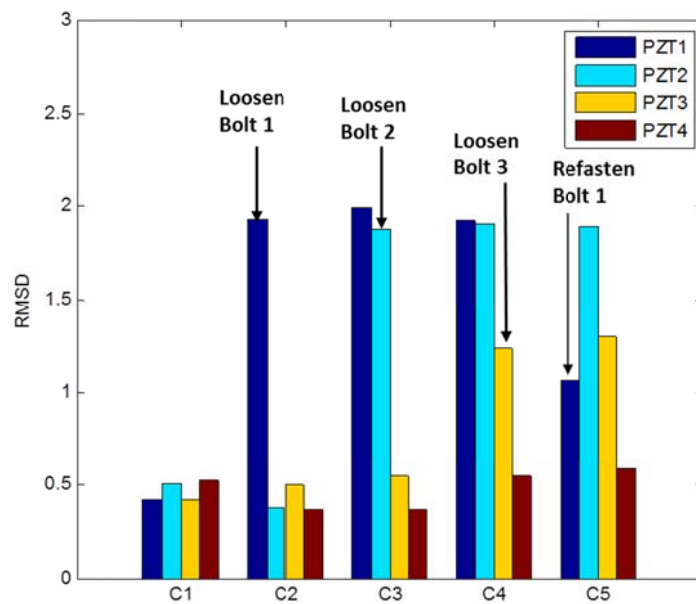
Case	Damage Description	Loosened Bolts
1	No damages	None
2	Loosen bolt 1	1
3	Loosen bolt 2 (Bolt 1 & 2 are loosened)	1,2
4	Loosen bolt 3 (Bolt 1 ,2 & 3 are loosened)	1,2,3
5	Bolt1 refastened	2,3

The system was programmed to monitor the impedance of the PZT in the frequency range of 30-95 kHz. Figure 5 illustrates a impedance signatures at various damage cases from four PZT. A very distinct bandwidth was measured in the frequency range of 83-89 kHz, so special attention was heeded to this area so as to monitoring this feature would change for bolted joints loosen (in this case). The

damage metric chart based on RMSD is constructed to identify the local damage. As shown in Fig. 6, the highest value identifies the damage of loosen bolt significantly.



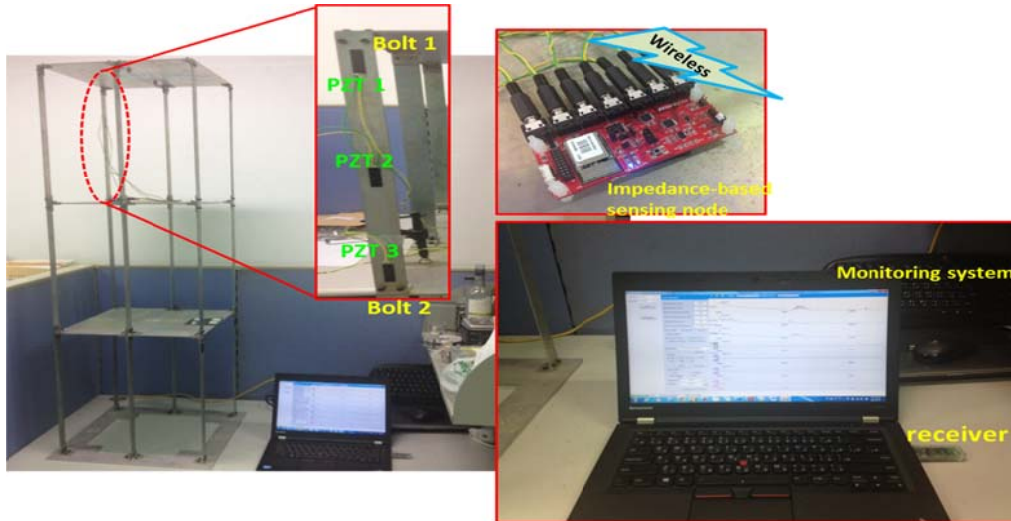
**Fig. 5** Measured impedance signatures at various damage cases from four PZT patches.



**Fig. 6** RMSD index for damage cases.

#### 4.2. Experimental Study in damage location

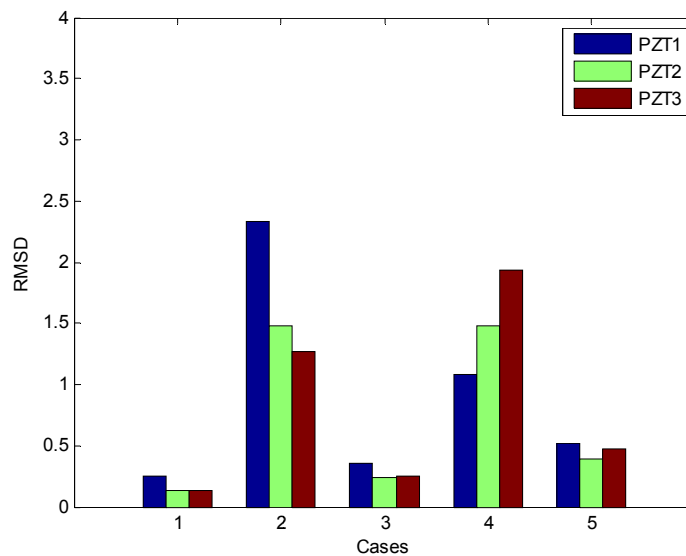
Three PZT patches are respectively bonded to columns at upper, middle and lower point in 3rd floor as shown in Fig. 7. A series of damage scenarios were listed in Table 3. First, all bolts were fastened in Case 1. Then, the bolt 1 was loosened in Case 2. Next the bolt 1 were refastened in Case 3. Subsequently, bolt 2 were loosened in the next scenarios in Case 4 and refastened in Case 5 once again.



**Fig. 7** Experimental setup for local damage detection in a 1/8-scaled three-storey steel frame model.

**Table. 3** Damage scenarios for detecting damage location on a 3rd floor.

Case	Damage Description	Loosened Bolts
1	All fastened	None
2	Loosen bolt 1	1
3	Bolt1 refastened	None
4	Loosen bolt 2	2
5	Bolt2 refastened	None



**Fig. 8** RMSD index for damage cases.



Figure 8 expressions a impedance signatures at various damage cases from three PZT. The highest RMSD value identifies the damage of joint by nearest PZT. Otherwise, from the furthest PZT get the lowest RMSD value. This characteristic can be used to detect the location of the damage.

## 5. CONCLUSIONS

In this study, a local structural damage is detected using an EMI-based method by low-cost wireless impedance sensor was presented. Firstly, the low-cost wireless impedance sensor based on Jennic platform, with the properties of cost-efficient, low power requirements, small size, and simple deployment. Secondly, this system combines the ability to measure data and analyze the data for damage indicators and display the results through the user interface created by .NET C#. Finally, performance of all system was verified experimentally using a 1/8-scale three-storey steel-frame model. It was confirmed experimentally that good sensing quality can be achieved via proposed system and locations of structure local damages can be identified effectively. The next generation of JN-IMP is planned for the future. Firstly, the ability of wireless trigger for the device is planned. Secondly, temperature compensation model will be considered. Finally, an automatically spectrum scanning mechanism will be designed.

## ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank the National Science Council of the Republic of China, Taiwan, for financially supporting this research under Contract No. NSC 99-2221-E-009-055 and NSC 101-2625-M-009-006.

## REFERENCES

- Park, G., Sohn, H., Farrar, C.R., and Inman, D.J.(2003). Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward. *Shock and Vibration Digest*, **35(6)**: 451-464.
- Park, G. and Inman, D.(2007). Structural health monitoring using piezoelectric impedance measurements. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. **365(1851)**: 373-392.
- Liang, C., Sun, F., and Rogers, C.(1994). Coupled electro-mechanical analysis of adaptive material systems – determination of the actuator power consumption and system energy transfer. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **5(1)**: 12.
- Sun, F., Rogers, C.A., and Liang, C.( 1995). Structural frequency response function acquisition via electric impedance measurement of surface-bonded piezoelectric sensor/actuator. *Proceeding of Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*.
- Bhalla, S., Soh, C.K.,(2004). High Frequency Piezoelectric Signatures for Diagnosis of Seismic/Blast Induced Structural Damages, *NDT&E International*, **37**, 23-33.
- Mascarenas, D. L., Park, G., Farinholt, K. M., Todd, M. D.(2009). A low-power wireless sensing device for remote inspection of bolted joints. *Journal of Aerospace Engineering*. **vol. 223**, no. 5 565-575.

- Nguyen, K. D., Park, J. H., Kim, J.T.(2011). Imote2-based multi-channel wireless impedance sensor nodes for local SHM of structural connections. *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*. **Vol:7981**, doi:10.1117/12.879613.
- Park, J.H., Kim, J.T., Hong, D.S., Mascarenas, D. and Lynch, J.P.(2010). Autonomous smart sensor nodes for global and local damage detection of prestressed concrete bridges based on accelerations and impedance measurements. *Smart Structures and Systems*. **6**, 711-730
- Park, G., Kabeya, K., Cudney, H.H., and Inman, D.J.( 1999). Impedance-based structural health monitoring for temperature varying applications. *JSME international journal. Series A, Solid mechanics and material engineering*. **42(2)**: 249-258.
- Park, G., Cudney, H.H., and Inman, D.J.(2000). Impedance-based health monitoring of civil structural components. *Journal of Infrastructure Systems*. **6(4)**: 153-160.
- Yang, Y., Hu, Y., and Lu, Y.(2008). Sensitivity of PZT impedance sensors for damage detection of concrete structures. *Sensors*, **8(1)**: 327-346.
- Ho, D., Nguyen, K., Yoon, H., Kim, J.(2012). Multiscale Acceleration-Dynamic Strain-Impedance Sensor System for Structural HealthMonitoring. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, doi:10.1155/2012/709208.
- Mascarenas, D. L., Todd, M.D., Park, G., and Farrar, C.R. (2007). Development of an Impedance-based Wireless Sensor Node for Structural Health Monitoring, *Smart Materials and Structures* **16**, 2137-214

## 國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現（簡要敘述成果是否有嚴重損及公共利益之發現）或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文： 已發表  未發表之文稿  撰寫中  無

專利： 已獲得  申請中  無

技轉： 已技轉  洽談中  無

其他：（國際研討會）

[1] S. L. Hung and C. T. Ding (2013), "Development of a wireless-based multi-channel impedance sensing system for structure local damage detection", ASEM13, Jeju Korea.

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性），如已有嚴重損及公共利益之發現，請簡述可能損及之相關程度（以 500 字為限）

本計畫主要發展一個無線壓電式結構局部損傷偵測器，應用於結構局部健康監測上，所發展之感測器整合先進的訊號處理晶片、微處理器與低功耗 IEEE 80215.4 標準之射頻模組(SoC)平台所組成。感測器具有傳統無線感測網路的優點，可透過無線的所帶來的優勢在遠端主動檢測結構物健康狀態，在平時亦可對於結構局部之健康監測自動分析與損壞偵測，改善目前透過阻抗分析儀器之體積龐大與實體線路布設的缺憾。另外，本研究輔以特殊的螺栓墊圈形狀控制壓電材料與監測之結構的機械耦合邊界條件，可大幅增加阻抗頻譜分析結構特徵的敏感度，未來可充分運用在機械或是土木領域的結構局部健康監測應用。而相關的衍生應用包括飛機的機翼或是重要的機械結構局部監測，甚至是生醫應用中的血液阻抗測量，均有非常前瞻與廣泛的應用前景。



# 國科會補助專題研究計畫出席國際學術會議心得報告

日期：103年9月15日

計畫編號	NSC 101 — 2625 — M — 009 — 006		
計畫名稱	智慧型無線感測監控系統平臺建構與其在土木結構診斷應用之研究-子計畫:無線壓電式結構局部損傷偵測監測器之研發(I)		
出國人員姓名	洪士林	服務機構及職稱	國立交通大學土木工程學系/教授
會議時間	102年9月8日至 102年9月12日	會議地點	韓國 濟州島
會議名稱	(中文) 2013 先進結構工程與力學會議 (英文) The 2013 World Congress on Advances In Structural Engineering and Mechanics		
發表題目	(中文) 無線壓電式結構局部損傷偵測器之研製 (英文) Development of a wireless-based multi-channel impedance sensing system for structure local damage detection		

## 一、參加會議經過

2013結構工程與力學進展世界大會(The 2013 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM13))於2013年9月8至12日在韓國濟州島的濟州國際會議中心(International Convention Center Jeju, Jeju, Korea)舉行，筆者之碩士班學生丁君廷亦由本計畫之【出席國際會議】經費補助共同參與此次研討會，研討會中有發表一篇論文”Development of a wireless-based multi-channel impedance sensing system for structure local damage detection。”此論文乃本年度國科會補助計畫之研究成果。雖然濟州與台北已有直航航線，但因出發當日無直飛班次，所以於9月7日搭乘韓國釜山航空的班機先達釜山後，再轉機至濟州島。時程雖較長，但因台灣離韓國僅2小時時程，轉機之等候時間尚可接受。會議結束後於12日以原

路線返國。

結構工程與力學進展世界大會於2011年於韓國首爾舉辦過第一屆大會，今年的大會則整合了七個相關的國際研討會共同舉行，讓與會者更有機會接觸相關領域的研究議題與成果，藉由發表論文與討論亦能增廣研究範疇與尋求未來研究方向。今年有近三百多位來自世界40多個國家的學者專家參加此次會議，算是一極成功的國際研討會。此次大會共有415篇論文被收集於論文集，並於大會中分9個研討室平行報告討論。期間亦安排了10位Keynotes進行精彩的專題報告。誠如上述，因此次大會係整合七個與結構工程及工程力學相關領域之國際大會，所以Keynotes的報告議題涵蓋相當廣，單就這10場精闢且深入的專題報告就已值得。其中，筆者在由Prof. Casciati所報告的Sensor placement driven by model order reduction (MOR) reasoning及Prof. Takewaki所報告的Smart system identification of super high-rise buildings using limited vibration data during 2011Tohoku earthquake兩場專題演講收益頗多。筆者之論文安排在研討會的最後一天的場次中的最後一篇論文發表。為訓練研究生之英文發表與回覆問題能力，本次所發表的論文由參與本計畫之研究生發表，整體表現優異，對與會學者發問的問題亦能提出簡短適確的回應。報告後Park, G.教授亦提出一些問題共同討論。Prof. Park, G.是目前在piezoelectric impedance-based health monitoring研究領域重要的學者之一。本次大會為結構工程與力學領域重的世界大會，所以國內亦有多位教授學者(台大、成大等)參加。藉此次盛會，難得聚在韓國彼此分享研究經驗與成果，亦是本次會議的收穫之一。

## 二、與會心得

此次有機會參與2013結構工程與力學進展之重要的國際會議，藉由聯合七個相關的

國際研討會之大型會議，聆聽多篇精闢的專題報告。其中結構安全監測系統(Structural health monitoring)是筆者近年來著重的研究領域，能與國際學者友人討論交換意見，受益良多。同時亦感受世界各國學者專家無不日以繼夜埋首鑽研，並期望在學術界有更高層次的突破發展，以獲最佳成果來增進科技進步與個人學術地位。此次研討會中結交不少同道，交換彼此研究心得，增進不少見聞，相信對今後不論教學與學術研究將有頗多助益。

韓國濟州島位於韓國南端，是一由火山噴發所成之島。島上的高山與四周蔚藍海洋使它成為韓國重要的觀光景點。島上有所謂三多，風多、石頭多，還有女人多。其柱狀火山岩已列入聯合國世界自然遺產中。為了讓與會者有機會遊覽濟州的自然景觀，大會亦安排了一個半日遊。因時間許可，筆者亦趁機遊覽濟州的美景，也算是此次會議的另一收穫。四天來，發覺濟州真是一個極有特色的島嶼，且其在發展觀光的努力與用心！

### 三、建議

此次藉由國科會補助參加此次國際研討會，與各國學者專家聚集一堂，藉論文發表、溝通理念、介紹新知、並進可敦睦國民外交，收穫良多。建議應盡可能同時補助學生同時參與國際研討會，也可真正落實所謂的”國際化”。並希望國科會能更積極鼓勵研究人員鑽精研究，政府亦盡可能多方資助國內學者及研究生出席國際性會議，藉由學術論文發表，促進科技交流，並而提昇個人以及國家學術水準及形象。

### 四、發表論文全文或摘要

附至本附錄章節最後。

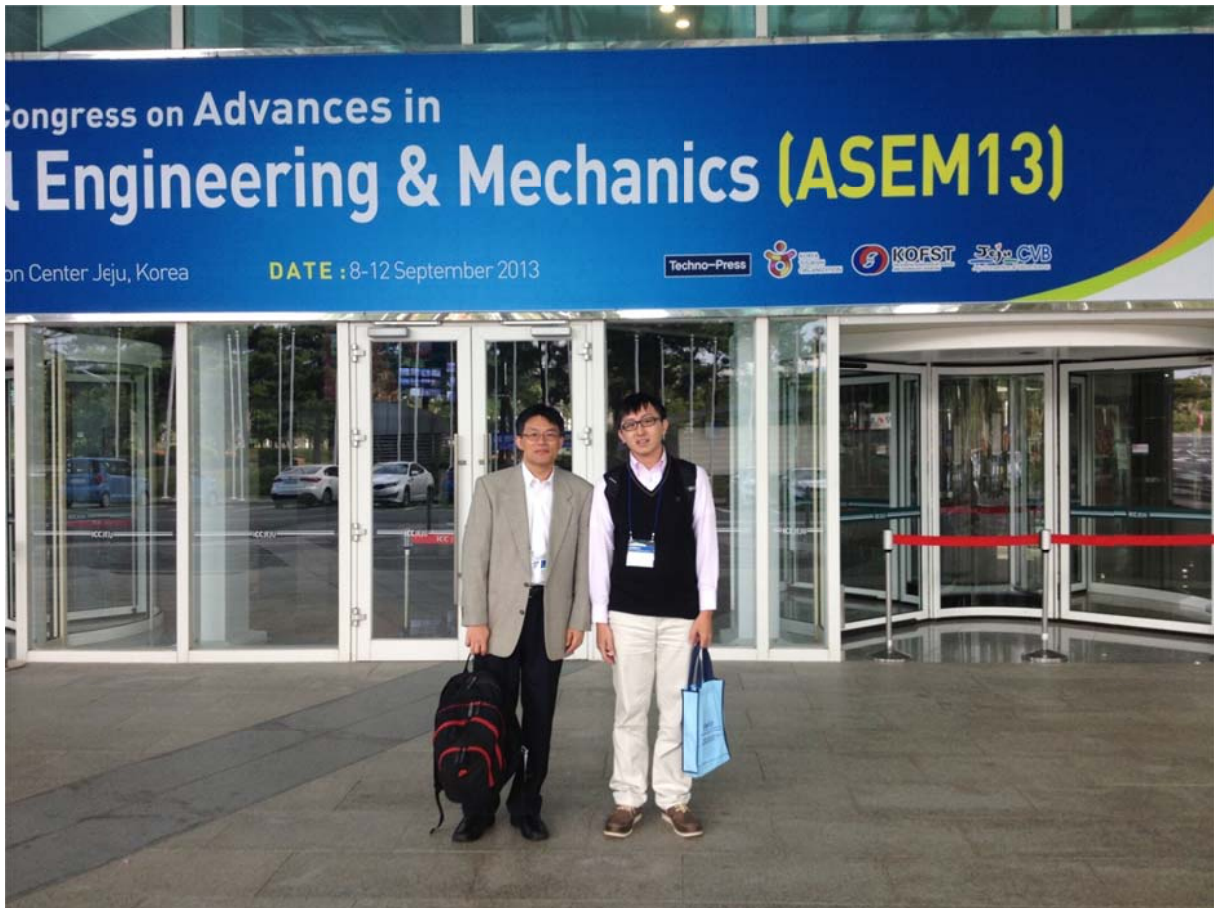
### 五、攜回資料

- 論文摘要全集

- 會議議程
- 論文摘要及全文電子檔(光碟)

## 五、附件

會場與學生之照片及投稿於本次研討會的論文乙篇。





# 國科會補助專題研究計畫出席國際學術會議心得報告

日期：103 年 9 月 15 日

計畫編號	NSC 101 — 2625 — M — 009 — 006		
計畫名稱	智慧型無線感測監控系統平臺建構與其在土木結構診斷應用之研究-子計畫:無線壓電式結構局部損傷偵測監測器之研發(I)		
出國人員姓名	丁君廷	服務機構及職稱	國立交通大學/土木工程謝/碩士生
會議時間	102 年 9 月 8 日至 102 年 9 月 12 日	會議地點	韓國 濟州島
會議名稱	(中文) 2013 先進結構工程與力學會議 (英文) The 2013 World Congress on Advances In Structural Engineering and Mechanics		
發表題目	(中文) 無線壓電式結構局部損傷偵測器之研製 (英文) Development of a wireless-based multi-channel impedance sensing system for structure local damage detection		

## 一、參加會議經過

2013 年先進結構工程與力學會議在韓國濟州島舉行，會議期間為民國 2013 年 9 月 8-12 日。世界各國，共有上百人的學術界與業界人士參加。第一天晚上主要是註冊與茶會，認識了一些與會先進與學生，第二天開始就是正式的會議發表，本人報告是排在第三天。由於我是第一次出國以英文報告論文，因此還蠻緊張的，到了韓國時每晚在飯店還是持續練習簡報。在研討會議中可以看到各國的學生或是教授們報告，各有優缺點。在我報告的過程還算順利，大部分的問題也回答出來，但是對於自己的簡報穩定度和英文表達還不是很滿意，我想自己還有很多進步的空間，期待未來能更加提昇自己的英語相關能力並能更加精進，尤其是在發音與熟習外國口音

的部分，還需要多加強。這次研討會也觀察到了許多相關壓電材料方面的研究成果，吸取了許多寶貴的資訊。希望未來可有更多機會出國參加國際研討會為台灣發並努力與加油。

## 二、與會心得

這次參加這個會議，是我第一於國外參加的會議，有蠻多心得的。在會議中你可以看到各國所做的研究，可以看到有比你差有也比你好的研究。且許多亞洲國家的英文簡報能力普遍來說都不錯。雖然自己的表現的不是非常完美，但是對於英文口頭報告有了一定的體驗，對於爾後的自信度有了相當的提昇。這次出國大大增加了國際觀，也給自己相當多的刺激，除了英文要加強之外，更加深了我要更加用功與努力的動力。這次的經驗讓我對研究更加充滿鬥志與熱情，在國際化時代，有機會一定要常常踏出去，讓自己的視野更加的開闊，也可以讓研究與世界接軌。

## 三、發表論文全文或摘要

附至本附錄章節最後。

## 四、建議

這次能夠參加這次的研討會，很感謝國科會的經費補助，讓我能夠到國外去發表，相信對未來一定有相當的幫助。

## 五、攜回資料名稱及內容

- 論文摘要全集
- 會議議程
- 論文摘要及全文電子檔(光碟)

# Development of a wireless-based multi-channel impedance sensing system for structure local damage detection

\*Shih-Lin Hung<sup>1)</sup> and Chun-Ting Ding<sup>2)</sup>

<sup>1), 2)</sup> *Department of Civil Engineering, National Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan*

<sup>1)</sup> [slhung@mail.nctu.edu.tw](mailto:slhung@mail.nctu.edu.tw)

## ABSTRACT

This work presents development of a wireless-based multi-channel impedance sensing system for detecting location of structure local damage. The system is composed of a wireless impedance sensor, application software, and local damage detection schemes. The wireless impedance sensor consists of a microprocessor, wireless communication module, and an AD5933 impedance chip as well as two multiplexers. The sensor not only has the properties of cost-efficient, low power requirements, small size, and simple deployment, but also has the multi-channel function that allows the user to monitor seven-channel PZT patch from a single device. Users can communicate with these sensors through the dongle with computer wirelessly. Through the application software we developed, the measurement parameters and sampling period can be set and record the measured impedance data on the computer. When the sensor is in idle state, it can be switched into sleep mode to reduce power consumption. Herein, local damage detection schemes include root-mean-square deviation (RMSD) index to locate the local damages of the structure. The feasibility of the proposed wireless impedance-based sensing system was assessed using a 1/8-scale three-storey steel-frame model with various damage scenarios. It was confirmed experimentally that good sensing quality can be achieved via proposed system and locations of structure local damages can be identified effectively.

## 1. INTRODUCTION

The approaches of structural health monitoring (SHM) can be classified as global and local monitoring. The global structural monitoring methods are conventionally adopted vibration-based (acceleration-based) schemes. These methods identify damage by detecting modal property change, such as natural frequencies, modal damping, or mode shape. However, vibration-based methods are not very effective in detecting tiny or incipient damage locality.

---

<sup>1)</sup> Professor

<sup>2)</sup> Graduate Student

Therefore, the electro-mechanical-impedance (EMI)-based damage detection method has been studied extensively as a powerful technique at localizing damage (Liang et al.1994; Sun et al. 1995; Park et al. 2000; Bhalla et al, 2004).

When many sensors and diagnostic methods are implemented, wireless communication appears to be an attractive approach as conventional wired sensor systems can only deploy limited numbers of sensors because of cost constraints or excessive complexity. Wireless sensors are expected to diminish these problems by simplifying the installation of wired sensors. Smart wireless sensor networks (WSNs) are an attractive sensing technology for SHM applications because of their low manufacture costs, low power requirements, small size, and simple deployment (i.e., lack of cables) (Lin et al. 2012).

The development of wireless impedance sensor node has been investigated by several studies in literature. Mascarenas et al.(2009) and Park et al. (2010) designed the sensing node based on an Atmega128 microcontroller. Nguyen et al. (2011) proposed wireless impedance sensor node based on an Imote2 platform. The aforementioned sensors all contained an AD5933 impedance measurement chip individually. They also provided wireless telemetry and multiplexers. The Atmega128 MCU based nodes had limited storage memory and low clock speed. That has constraints in collection of the response signal in multiple PZT and processing data in sensor node. In addition, the Imote2 may be a powerful and promising smart wireless sensor platform for SHM. It consists of a 32 bit XScale processor with 32 MB RAM and a flash memory of 32 MB. However, the Imote2-based sensor node is more expensive relatively compared to the other platforms. For these key points, a low cost and large enough storage memory platform for impedance-based SHM is presented in this work.

This study presented a novel impedance-based wireless sensor SHM system for detecting structural local damage. A low cost wireless impedance sensor node based on Jennic platform, called JN-IMP, was developed. The Jennic microprocessor offers an enhanced 32-bit RISC processor and a fully compliant 2.4GHz IEEE802.15.4 transceiver (SoC) with a RAM of 128 KB and a flash memory of 512 KB. JN-IMP also integrated an AD5933 impedance chip as well as two multiplexers. It is designed with the properties of cost-efficient, low power requirements, small size, and simple deployment. The feasibility of the proposed wireless impedance-based sensing system was assessed using a 1/8-scale three-storey steel-frame model with various damage scenarios. It was confirmed experimentally that good sensing quality can be achieved via proposed system and locations of structure local damages can be identified effectively.

## **2. ELECTROMECHANICAL IMPEDANCE-BASED METHOD**

The Impedance-based damage detection approach utilizes the

electromechanical coupling effect between active surface-bonded piezoelectric patches and host structural. Liang et al. (1994) first proposed an analytical model of this method. The electromechanical is related to the mechanical impedance of a host structure, thus allowing monitoring the properties of the host structure using the measured electrical impedance. When damage occurred to structure, the mechanical impedance of structure will be changed. Therefore, if the mechanical impedances of the piezoelectric patch remain undamaged, any changes in the EMI signal correlates with the damage in structure. A piezoelectric patch-structure bonded system can be modeled as a circuit system (Park et al. 2007), shown in Fig.1.

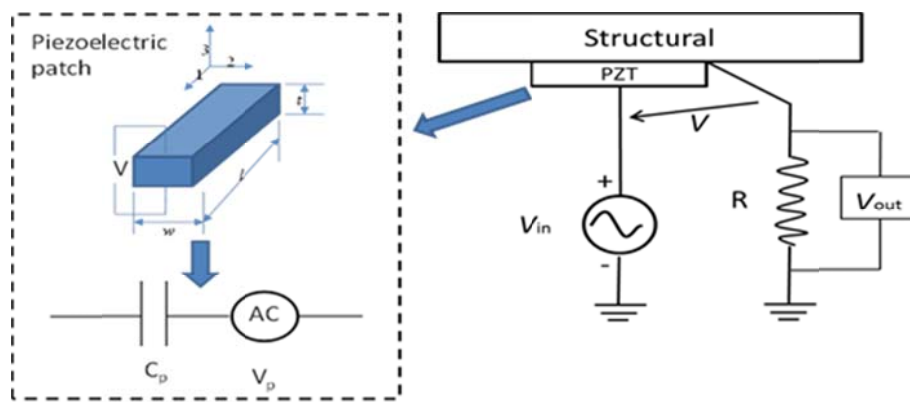


Fig. 1 Diagram of PZT-structure bonded system

Herein, piezoelectric patch is modeled as a capacitor ( $C_p$ ) and a self sensing-actuation voltage source ( $V_p$ ) caused by input voltage ( $V_{in}$ ). The output voltage, couple with  $V_p$  and  $V_{in}$ , can be expressed as

$$V_{out}(\omega) = \frac{Z_R(\omega)}{Z_R(\omega) + Z_P(\omega)} (V_{in}(\omega) + V_p(\omega)) \quad (1)$$

Where  $Z_R$  is the electrical impedance of the resistor and  $Z_P$  is electrical impedance of piezoelectric patch. Subsequently, the electrical impedance of piezoelectric patch can be written as

$$Z_P(\omega) = Z_R(\omega) \left\{ \frac{V_{in}(\omega) + V_p(\omega)}{V_{out}(\omega)} - 1 \right\} \quad (2)$$

Since the self sensing-actuation voltage source ( $V_p$ ) is related to

structural mass, as confirmed by numerous researchers (Liang et al. 1994). Equation (2) indicates that the  $Z_p$  has significant response to structural damage. A piezoelectric patch-structure bonded system can be further modeled as an electro mechanical admittance (EMA) model (Inverse of EMI). The electro mechanical admittance model can be expressed as

$$Y(\omega) = j\omega \frac{wl}{t} \left\{ (\bar{\epsilon}_{33}^T - d_{31}^2 \hat{Y}^E) + \frac{Z_p(\omega)}{Z_p(\omega) + Z_s(\omega)} d_{31}^2 \hat{Y}^E \left( \frac{\tan(kl)}{kl} \right) \right\} \quad (3)$$

where  $w$ ,  $l$ , and  $t$  are the width, length, and thickness of the piezoelectric patch;  $\hat{Y}^E$  is the complex Young's modulus of the piezoelectric patch at zero electric field;  $\bar{\epsilon}_{33}^T$  is the complex dielectric constant of piezoelectric patch;  $d_{31}^2$  is the coupling piezoelectric constant in the x direction at zero stress;  $k = \omega \sqrt{\rho / \hat{Y}^E}$  is the wave number that is related to mass density  $\rho$ ,  $\hat{Y}^E$ ; and excitation frequency  $\omega$ , respectively;  $Z_p$  and  $Z_s$  are the mechanical impedances of the piezoelectric patch and the host structure, respectively.

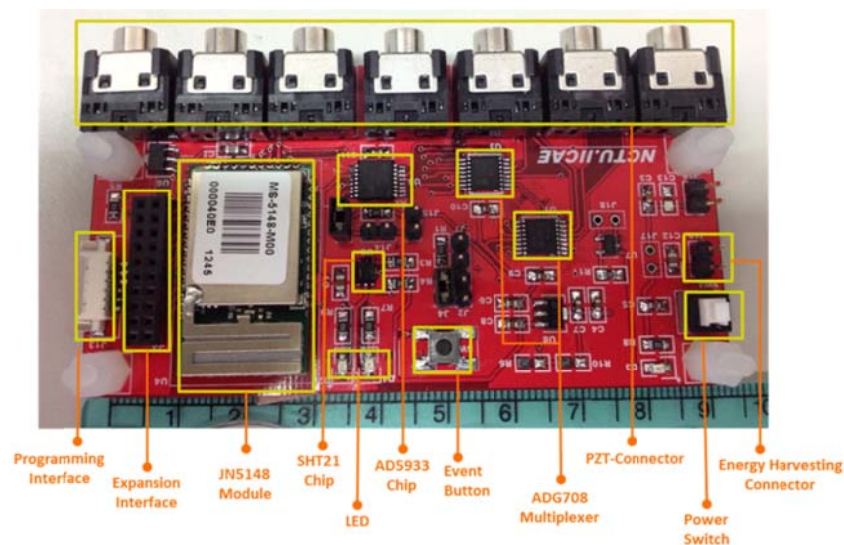
Although the EMI provides a qualitative method for detecting structural damage, the quantification approach need be established. A simple statistical algorithm, which is based on frequency-by-frequency comparisons, referred to Root Mean Square Deviation (RMSD), was used to develop the quantitative assessment of damage in previous research (Yang et. al. 2008). The RMSD is defined as

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=a}^b (I_i^D - I_i^U)^2}{\sum_{i=a}^b (I_i^U)^2}} \times 100 \quad (4)$$

Where  $I_i^U$  and  $I_i^D$  are the real part of impedance of piezoelectric patch at the  $I^{th}$  frequency point in undamaged and damaged structures, respectively. In a RMSD damage metric chart, the greater numerical value of the metric, the larger the difference between the baseline reading and the subsequent reading indicates the presence of damage in a structure.

### 3. DESIGN OF LOW COST WIRELESS IMPEDANCE SENSOR NODE

This section expressions all hardware and software design of proposed novel wireless sensor system. The wireless impedance sensor is consists of a Jennic microprocessor, a SHT21 temperature/humidity integrated chip, and an AD5933 impedance chip as well as two multiplexers (ADG708). Jennic offers an enhanced 32-bit RISC processor and a fully compliant 2.4GHz IEEE802.15.4 transceiver (SoC) with a RAM of 128 KB and a flash memory of 512 KB. The Photo and block diagram of sensing node is illustrated in Fig. 2



**Fig. 2** Photo of wireless impedance sensor(JN-IMP).

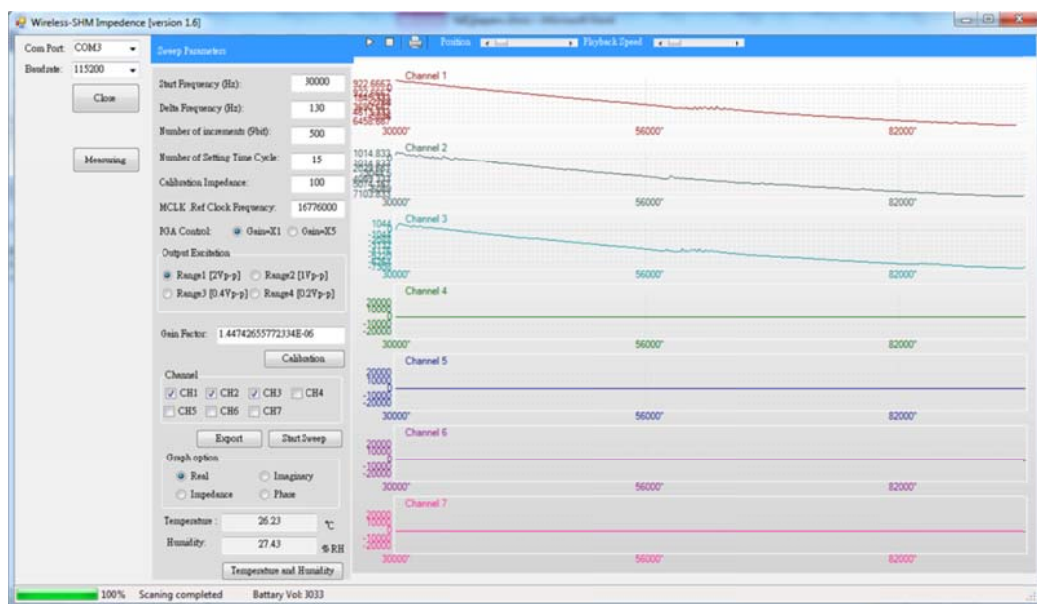
The AD5933 was first proposed for measuring EMI impedance signatures by Mascarenas et al. (2007). The impedance chip can be programmed to take a measurement from 1-100 kHz. The AD5933 consists of an on-board frequency generator, a Digital-to-Analog (D/A) converter, A/D converter. Furthermore, a discrete Fourier transform (DFT) is processed by an on-board DSP engine. The AD5933 is the most important component to interact with the piezoelectric material.

There are several important points to contribute to the flexibility of the JN-AD5933. First, the ability to wirelessly transfer allows the sensor node to be placed in non-reachable locations, without the constraints of a cable-based DAQ system. Second, the ability to quickly change the system setting of sweep parameters, through the self-made wireless transfer instructions. Finally, the ability to efficiently change the firmware on the microcontroller, through the on-board FTDI chip, allows the sensing node to further extend. The features are described in Table 1.

**Table. 1** Features of the proposed JN-IMP

Model	AD5933
Impedance Range	1 k $\Omega$ –10 k $\Omega$
Frequency Range	1 kHz–100 kHz
Excitation Voltage	1.98 V <sub>p-p</sub>
Temperature Resolution	> 0.03 °C
Temperature Range	-40 ~ +125°C (-40 ~ +257°F)
Wireless function	2.4 GHz IEEE 802.15.4 / Zigbee
Transmission Range	Standard Power (20 m) / High power (up to 1km)
Power Supply Options	Commercial batteries (3.6-7.2V) 2AA Ni-MH rechargeable battery with Solar Panels (3V)
Dimensions	91.6 x 48 x 7 (mm)
Weight	45(g)
Cost	\$US 50

A host computer is employed to transmit command parameters and receives the data from JN-IMP wirelessly. A .NET C# based user interface was designed to convenience handling the raw and processed data as shown in Fig. 3. The sweep parameters panel let the user define the system setting with the required frequency ranges, number of frequency points and increased of delta frequency. The user interface combines the ability to measure data and analyse the data for damage indicators and display the results.



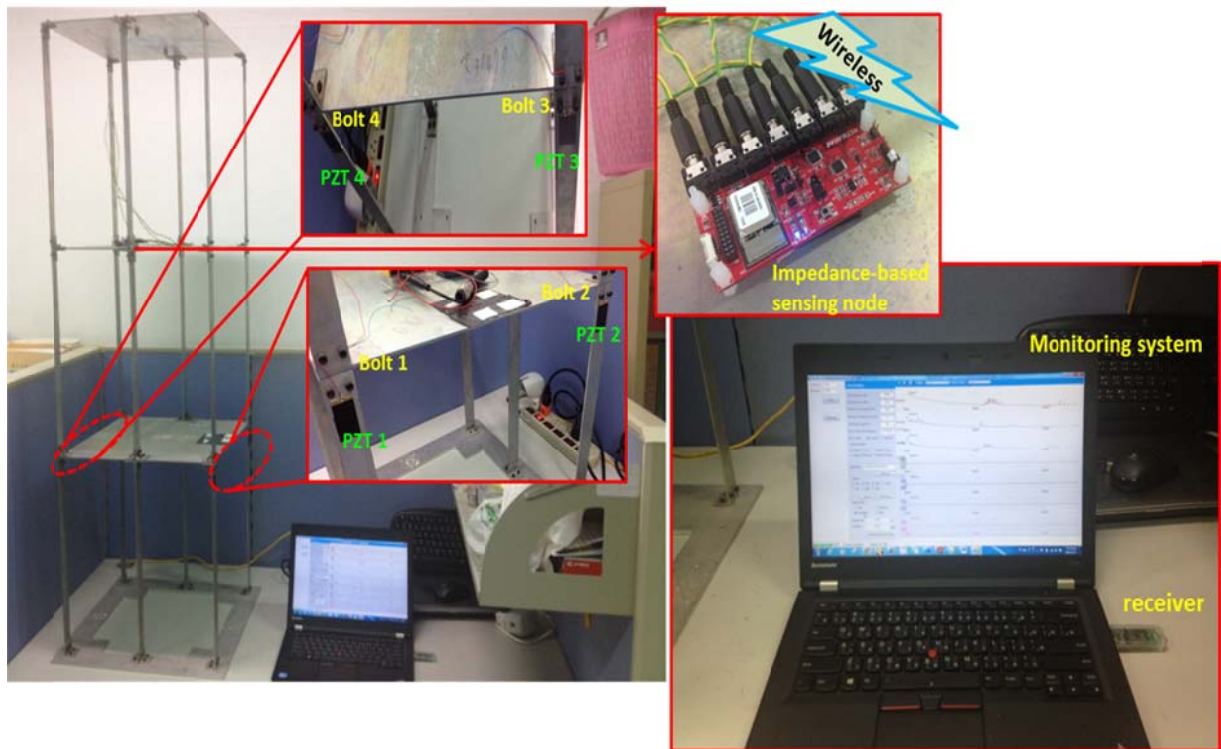


**Fig. 3** The user interface of Wireless-SHM Impedance system

#### 4. EXPERIMENTAL VERIFICATION

##### 4.1. Experimental Study in bolted loosen

A 1/8-scale three-storey steel frame model, shown in Fig. 4, was utilized to evaluate the performance of the JN-AD5933 and local damage detection schemes. Each floor weighed about 3.8 kg and each column had a cross-sectional area of 80 mm and was 440 mm in height. Four PZT patches are respectively close bonded to the joint of the columns in 1st floor. A series of damage scenarios were listed in Table 2. First, all bolts were fastened in C1. Then, the bolt 1 was loosened in C2. Subsequently, bolt 2 and bolt 3 were loosened in the next scenarios in C3 and C4, respectively. Finally, the bolt1 were refastened in C5.



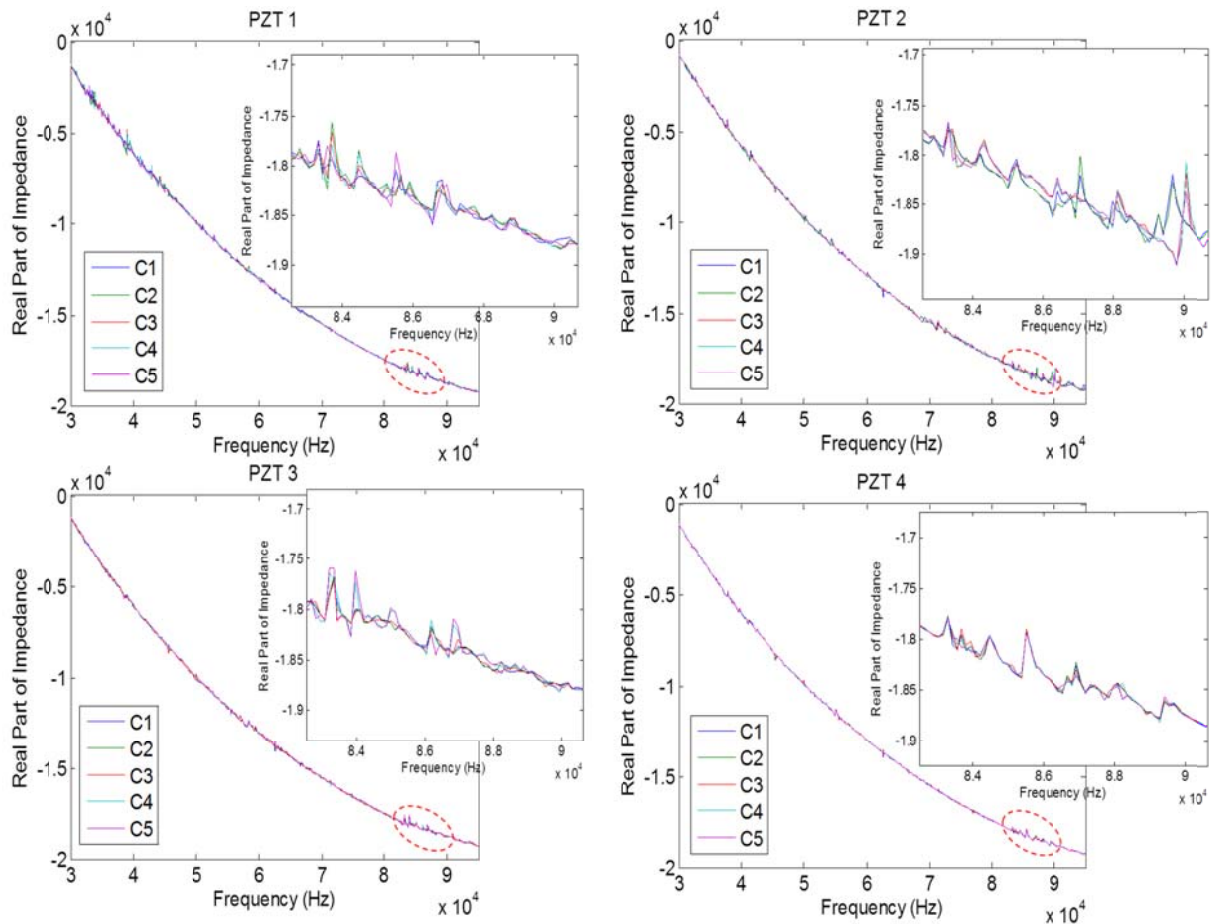
**Fig. 4** Experimental setup for wireless impedance measurement device in a 1/8-scaled three-storey steel frame model.

**Table. 2** Damage scenarios for detecting bolt loosen on a 1st floor.

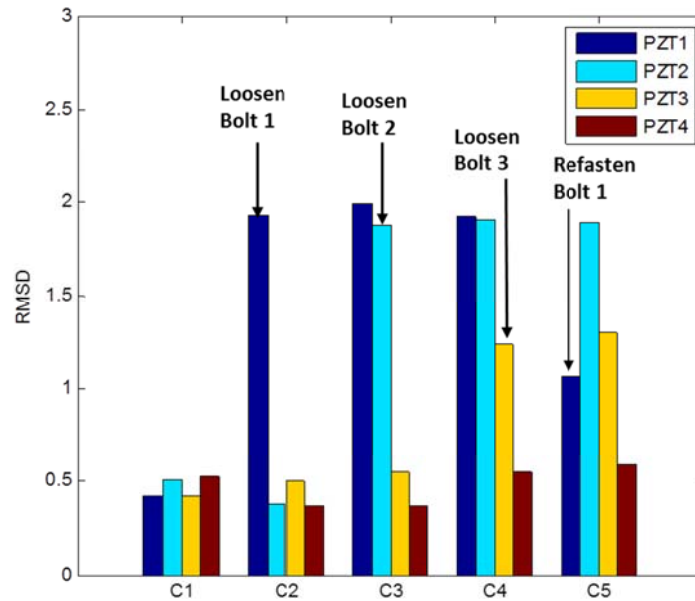
Case	Damage Description	Loosened Bolts
1	No damages	None

2	Loosen bolt 1	1
3	Loosen bolt 2 (Bolt 1 & 2 are loosened)	1,2
4	Loosen bolt 3 (Bolt 1 ,2 & 3 are loosened)	1,2,3
5	Bolt1 refastened	2,3

The system was programmed to monitor the impedance of the PZT in the frequency range of 30-95 kHz. Figure 5 illustrates a impedance signatures at various damage cases from four PZT. A very distinct bandwidth was measured in the frequency range of 83-89 kHz, so special attention was heeded to this area so as to monitoring this feature would change for bolted joints loosen (in this case). The damage metric chart based on RMSD is constructed to identify the local damage. As shown in Fig. 6, the highest value identifies the damage of loosen bolt significantly.



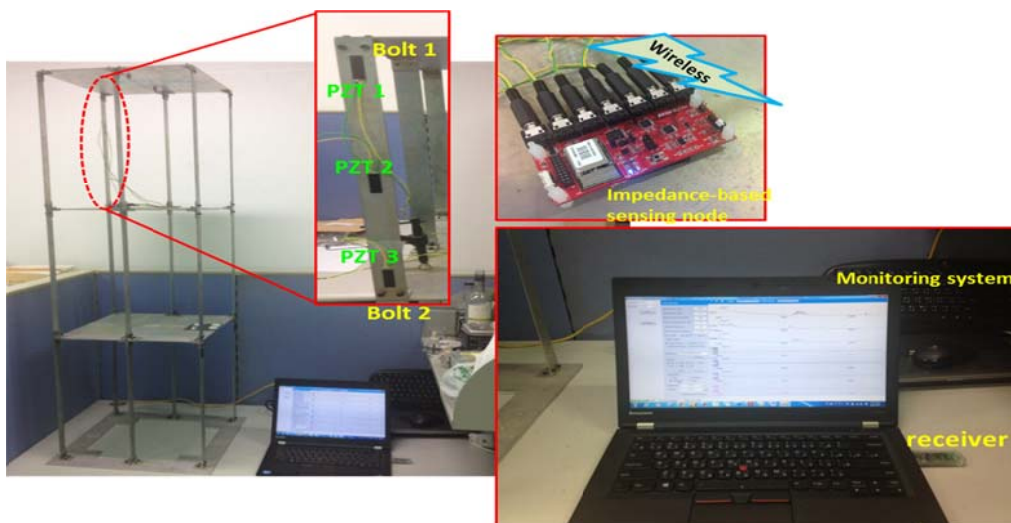
**Fig. 5** Measured impedance signatures at various damage cases from four PZT patches.



**Fig. 6** RMSD index for damage cases.

#### 4.2. Experimental Study in damage location

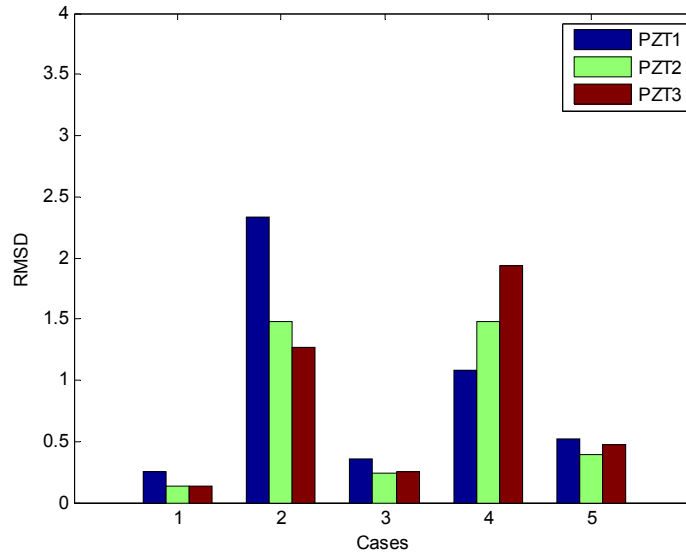
Three PZT patches are respectively bonded to columns at upper, middle and lower point in 3rd floor as shown in Fig. 7. A series of damage scenarios were listed in Table 3. First, all bolts were fastened in Case 1. Then, the bolt 1 was loosened in Case 2. Next the bolt 1 were refastened in Case 3. Subsequently, bolt 2 were loosened in the next scenarios in Case 4 and refastened in Case 5 once again.



**Fig. 7** Experimental setup for local damage detection in a 1/8-scaled three-storey steel frame model.

**Table. 3** Damage scenarios for detecting damage location on a 3st floor.

Case	Damage Description	Loosened Bolts
1	All fastened	None
2	Loosen bolt 1	1
3	Bolt1 refastened	None
4	Loosen bolt 2	2
5	Bolt2 refastened	None



**Fig. 8** RMSD index for damage cases.

Figure 8 expressions a impedance signatures at various damage cases from three PZT. The highest RMSD value identifies the damage of joint by nearest PZT. Otherwise, from the furthest PZT get the lowest RMSD value. This characteristic can be used to detect the location of the damage.

## 5. CONCLUSIONS

In this study, a local structural damage is detected using an EMI-based method by low-cost wireless impedance sensor was presented. Firstly, the low-cost wireless impedance sensor based on Jennic platform, with the properties of cost-efficient, low power requirements, small size, and simple deployment. Secondly, this system combines the ability to measure data and analyze the data for damage indicators and display the results through the user interface created by .NET C#. Finally, performance of all system was verified experimentally using a 1/8-scale three-storey steel-frame model. It was

confirmed experimentally that good sensing quality can be achieved via proposed system and locations of structure local damages can be identified effectively. The next generation of JN-IMP is planned for the future. Firstly, the ability of wireless trigger for the device is planned. Secondly, temperature compensation model will be considered. Finally, an automatically spectrum scanning mechanism will be designed.

## **ACKNOWLEDGEMENT**

The authors would like to thank the National Science Council of the Republic of China, Taiwan, for financially supporting this research under Contract No. NSC 99-2221-E-009-055 and NSC 101-2625-M-009-006.

## **REFERENCES**

- Park, G., Sohn, H., Farrar, C.R., and Inman, D.J.(2003). Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward. *Shock and Vibration Digest*, **35(6)**: 451-464.
- Park, G. and Inman, D.(2007). Structural health monitoring using piezoelectric impedance measurements. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. **365(1851)**: 373-392.
- Liang, C., Sun, F., and Rogers, C.(1994). Coupled electro-mechanical analysis of adaptive material systems —determination of the actuator power consumption and system energy transfer. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **5(1)**: 12.
- Sun, F., Rogers, C.A., and Liang, C.( 1995). Structural frequency response function acquisition via electric impedance measurement of surface-bonded piezoelectric sensor/actuator. *Proceeding of Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*.
- Bhalla, S., Soh, C.K.,(2004). High Frequency Piezoelectric Signatures for Diagnosis of Seismic/Blast Induced Structural Damages, *NDT&E International*, **37**, 23-33.
- Mascarenas, D. L., Park, G., Farinholt, K. M., Todd, M. D.(2009). A low-power wireless sensing device for remote inspection of bolted joints. *Journal of Aerospace Engineering*. **vol. 223**, no. 5 565-575.
- Nguyen, K. D., Park, J. H., Kim, J.T.(2011). Imote2-based multi-channel

- wireless impedance sensor nodes for local SHM of structural connections. *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*. **Vol:7981**, doi:10.1117/12.879613.
- Park, J.H., Kim, J.T., Hong, D.S., Mascarenas, D. and Lynch, J.P.(2010). Autonomous smart sensor nodes for global and local damage detection of prestressed concrete bridges based on accelerations and impedance measurements. *Smart Structures and Systems*. **6**, 711-730
- Park, G., Kabeya, K., Cudney, H.H., and Inman, D.J.( 1999). Impedance-based structural health monitoring for temperature varying applications. *JSME international journal. Series A, Solid mechanics and material engineering*. **42(2)**: 249-258.
- Park, G., Cudney, H.H., and Inman, D.J.(2000). Impedance-based health monitoring of civil structural components. *Journal of Infrastructure Systems*. **6(4)**: 153-160.
- Yang, Y., Hu, Y., and Lu, Y.(2008). Sensitivity of PZT impedance sensors for damage detection of concrete structures. *Sensors*, **8(1)**: 327-346.
- Ho, D., Nguyen, K., Yoon, H., Kim, J.(2012). Multiscale Acceleration-Dynamic Strain-Impedance Sensor System for Structural HealthMonitoring. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, doi:10.1155/2012/709208.
- Mascarenas, D. L., Todd, M.D., Park, G., and Farrar, C.R. (2007). Development of an Impedance-based Wireless Sensor Node for Structural Health Monitoring, *Smart Materials and Structures* 16, 2137-214

# 國科會補助計畫衍生研發成果推廣資料表

日期:2014/01/13

國科會補助計畫	計畫名稱: 子計畫:無線壓電式結構局部損傷偵測監測器之研發(I)
	計畫主持人: 洪士林
	計畫編號: 101-2625-M-009-006- 學門領域: 永續發展研究-工程技術
無研發成果推廣資料	

101 年度專題研究計畫研究成果彙整表

計畫主持人：洪士林		計畫編號：101-2625-M-009-006-					
計畫名稱：智慧型無線感測監控系統平臺建構與其在土木結構診斷應用之研究--子計畫：無線壓電式結構局部損傷偵測監測器之研發(I)							
成果項目		量化			單位	備註(質化說明：如數個計畫共同成果、成果列為該期刊之封面故事...等)	
		實際已達成數(被接受或已發表)	預期總達成數(含實際已達成數)	本計畫實際貢獻百分比			
國內	論文著作	期刊論文	0	0	0%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	0%		
		研討會論文	0	0	0%		
		專書	0	0	0%		
	專利	申請中件數	0	0	0%	件	
		已獲得件數	0	0	0%		
	技術移轉	件數	0	0	0%	件	
		權利金	0	0	0%	千元	
	參與計畫人力 (本國籍)	碩士生	5	5	100%	人次	
		博士生	0	0	0%		
		博士後研究員	0	0	0%		
		專任助理	0	0	0%		
國外	論文著作	期刊論文	0	0	0%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	0%		
		研討會論文	1	0	100%		
		專書	0	0	0%		章/本
	專利	申請中件數	0	0	0%	件	
		已獲得件數	0	0	0%		
	技術移轉	件數	0	0	0%	件	
		權利金	0	0	0%	千元	
	參與計畫人力 (外國籍)	碩士生	0	0	0%	人次	
		博士生	0	0	0%		
		博士後研究員	0	0	0%		



		專任助理	0	0	0%		
其他成果 (無法以量化表達之 成果如辦理學術活 動、獲得獎項、重要 國際合作、研究成果 國際影響力及其他 協助產業技術發展 之具體效益事項 等，請以文字敘述填 列。)		無					

	成果項目	量化	名稱或內容性質簡述
科 教 處 計 畫 加 填 項 目	測驗工具(含質性與量性)	0	
	課程/模組	0	
	電腦及網路系統或工具	0	
	教材	0	
	舉辦之活動/競賽	0	
	研討會/工作坊	0	
	電子報、網站	0	
	計畫成果推廣之參與(閱聽)人數	0	

# 國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文： 已發表  未發表之文稿  撰寫中  無

專利： 已獲得  申請中  無

技轉： 已技轉  洽談中  無

其他：（以 100 字為限）

國際研討會

[1] S. L. Hung and C. T. Ding (2013), 'Development of a wireless-based multi-channel impedance sensing system for structure local damage detection', ASEM13, Jeju Korea.

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

本計畫主要發展一個無線壓電式結構局部損傷偵測器，應用於結構局部健康監測上，所發展之感測器整合先進的訊號處理晶片、微處理器與低功耗 IEEE 80215.4 標準之射頻模組 (SoC) 平台所組成。感測器具有傳統無線感測網路的優點，可透過無線的所帶來的優勢在遠端主動檢測結構物健康狀態，在平時亦可對於結構局部之健康監測自動分析與損壞偵測，改善目前透過阻抗分析儀器之體積龐大與實體線路布設的缺憾。另外，本研究輔以特殊的螺栓墊圈形狀控制壓電材料與監測之結構的機械耦合邊界條件，可大幅增加阻抗頻譜分析結構特徵的敏感度，未來可充分運用在機械或是土木領域的結構局部健康監測應用。而相關的衍生應用包括飛機的機翼或是重要的機械結構局部監測，甚至是生醫應用中的血液阻抗測量，均有非常前瞻與廣泛的應用前景。