

數位式 3D 震動感測模組設計探討

The Study on Design of Digital 3D Vibration Sensing Module

廖泰杉

Tai-Shan Liao

震動感測技術是智慧機械和環境震動監測等方面的一個基本應用。本文根據近期之數位式 3D 震動感測模組發展，本文解釋數位式 3D 震動感測模組的基本設計，採用電子諧振器，三個機械彈簧開關，嵌入式微處理器單元 (MCU) 和頻率至事件演算法的數位三維震動感測模組，並經實驗結果證明，電路取樣速率每秒可以有採樣 125 個樣本速率，合於設計，並經震動實驗室震動平台驗證此型數位式 3D 震動模組，對於 > 80 Gal 有明顯反應。這些表明數位式 3D 震動感測模組具有成本低，高震動效果好的優點，未來適用於環境劇烈震動監測的應用。

Vibration sensing technology is usually a basic application in smart machinery and environmental vibration monitoring. In this article, based on the recent development of digital 3D vibration sensing module, this article explains the basic design of digital 3D vibration sensing module, using electronic resonator, three mechanical spring switches, embedded microprocessor unit (MCU) and the event algorithm. And the experimental results show that there can be sampling 125 samples per second. These show that the digital 3D vibration sensing module has the advantages of low cost and high vibration effect, and is suitable for instrument and environmental vibration monitoring applications in the future

一、前言

人類的呼吸與心跳、物體撞擊、摩擦、撕裂或者氣體釋放壓力皆能產生震動，換句話說，震動是我們日常生活中最常見的現象之一，它可以分為自然和人造。風，雨，雷，地震，火山噴發，噪音等，這些都是自然界產生的震動的來源。相反，音樂，飛機爆音，發動機聲音，鑽孔聲音，火藥爆炸等等都屬於人造震動源。這種現象隨時隨地存在。無論如何，震動的來源有時令人討厭，但充

分利用它可以為人類帶來益處。因此，震動的檢測對於監測機器，橋樑和建築物的運行情況，安全保障，自然災害預測等都是非常重要和值得研究的⁽¹⁻³⁾。自上個世紀初以來，科學家們已經耗盡精力和智慧去研究和開發各種檢測方法和製造震動感測器。不可否認，近年來，隨著材料科學技術，半導體製造技術，電子積體電路設計和微機電技術的迅速發展，已開發出各種震動感測器的產品包括光纖感測器，電感感測器，化學感測器，電容感測器，壓電感測器，磁性感測器，光電感測器等⁽⁴⁻⁹⁾。一

傳統震動感測器
信號處理示意圖

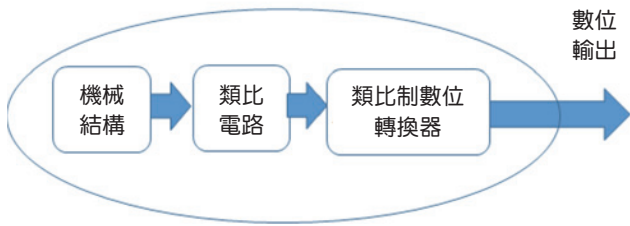


圖 1. 傳統震動感測器概念圖。

般來說，震動測量通常包括震動速度，位移，加速度等的測量，以使得那些設備能夠將弧形動態機械特性轉換成電信號被稱為震動感測器。但是沖刷環境劇烈震動監測如河床或海床沖刷監測，應用加速規來埋於河床底下 5 米深，監測河床之變化；這種方式對於沖刷環境劇烈挑戰，感測器其期限很短，因此需要不一樣感測模組；不管如何，實現震動感測器需要具有機械結構，電子前端放大和放大，類比轉換數位轉換器和如圖 1 所示。前置放大器需要處理類比微弱 mV 或 μV 的微弱類比信號，或者比 nV 準位更低。這些弱信號很容易受到外部噪聲干擾。眾所周知，數位信號具有數字信號為 0 或 1 狀態變化的巨大優勢。數位狀態的電壓差大於 $1V$ ，這是外部噪聲干擾較小，故不需要前置信號放大和類比至數位轉換器的震動感測器模組是很有吸引力的。本文介紹了一種全數位式震動感測器設計概念並展示了這些實驗結果。

二、方法

1. 數位式震動感測器的硬體設計

數位式三維震動感測器模組由三個機械彈簧震動開關，電子諧振器，嵌入式微電腦 (MCU) 和頻率到事件的演算法構成，如圖 2 所示⁽¹⁰⁾，數位式 3D 震動感測器模組的機械結構具有三個開關。每個開關主要由形成中心極的端子和圍繞中心極盤繞的非常柔軟的彈簧組成的第二端子組成。當有足夠的力傳遞到開關的彈簧，讓開關移動或震動時，由彈簧組成的端子移動並將兩端短路接在一起。因此，彈簧震動開關被移動，碰撞，旋轉或震動，開關的兩個端子引腳將像一個閉合的開關那樣工作。

數位式震動感測器
信號處理示意圖

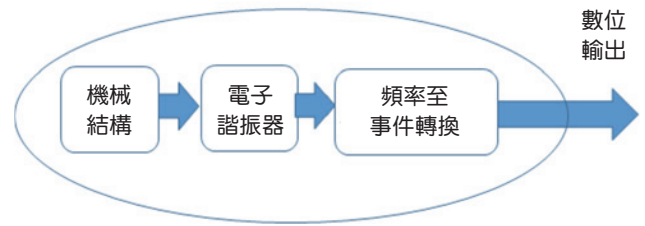


圖 2. 數位式震動感測器概念圖。

當開關的運動或震動停止並且靜止時，開關打開。因此，彈簧震動開關是高靈敏度的非定向震動觸發開關，其開關響應通常是電觸點閉合或接觸開口，如圖 3 所示。

數位式 3D 震動感測器模組的電子諧振器是震盪器。震盪器基本上具有正反饋放大器或再生反饋。通常，震盪器是一個使用正反饋的放大器，它可以在不使用始終自我維持的輸入信號的情況下產生輸出頻率。該震盪器具有通過其輸出端提供週期性交流電源而無需任何輸入的優點。震盪器產生的信號通常具有穩定的震幅和頻率。震盪器電路波形和震幅由選擇的元件值決定。根據震盪器的設計，震盪器輸出波的頻率可以是固定的或可變的。該震盪器有多種類型的震盪器，如 LC 震盪器，RC 震盪器，晶體震盪器 RC，張弛震盪器，掃描震盪器等⁽¹¹⁻¹⁶⁾。LC 震盪器組合是諧振電路中的電感器和電容器，能產生非常好的正弦波，並具有非常好的頻率穩定性。震盪器的頻率相對於直流電源電壓或環境溫度的變化沒有太大變化，並且通過使用可變

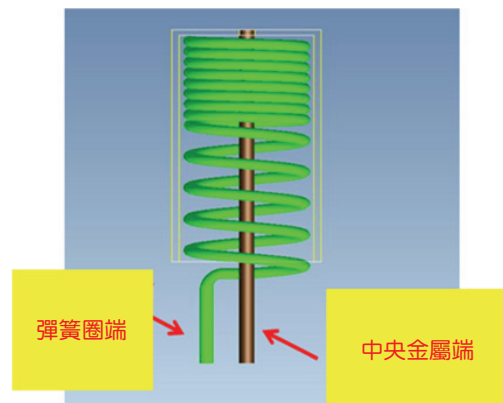


圖 3. 彈簧開關示意圖。

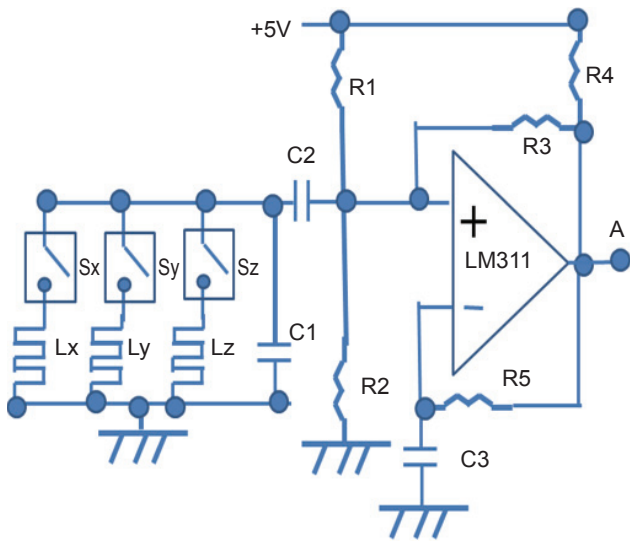


圖 4. LC 諧振器示意圖。

電感器或電容器來製造可變頻率震盪器是相對簡單的。LC 震盪器因其具有低相位雜訊而被廣泛使用。本文選擇 LC 震盪器的原因來實現數位式震動感測模組的諧振器，如圖 4 所示⁽¹⁷⁻¹⁸⁾。

圖 4 中，三個彈簧開關 (Sx, Sy, Sz) 沿 x, y, z 空間軸固定在 PCB 上。每個彈簧開關的一端連接在一起，另一端分別連接到單獨的電感器 Lx, Ly 和 Lz。電阻器 R1, R2 和 R3 作為偏置電壓電阻器。LM311 是由正反饋放大器作為 LC 諧振器的運算放大器。電容器 (C1) 和這些電感器的等效電感值 (獨立或並聯) 構成 LC 諧振迴路。諧振頻率如下方程式 (1)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

且 $C = C1$, $L = Lx, Ly$ and Lz 狀態組合等效電感，電感 Lx, Ly 和 Lz 分別為 $56 \mu\text{H}$, $100 \mu\text{H}$ 和 $220 \mu\text{H}$ 。電容器 (C1) 為 1 nF 。當發生震動時，這些彈簧開關將產生關閉或開路的交替開關狀態。當彈簧開關 (Sx) 關閉時，只有 X 軸方向的電感 (Lx) 和電容 (C1) 發生諧振，諧振頻率約為 672 kHz 。當彈簧開關 (Sy) 關閉時，只有 Y 軸方向上的電感 (Ly) 和電容 (C1) 發生諧振，並且諧振頻率約為 504 kHz 。當彈簧開關 (Sz) 關閉時，只有 Z 軸方向

的電感 (Lz) 和電容 (C1) 發生諧振，諧振頻率約為 339 kHz 。當彈簧開關 (Sx) 和彈簧開關 (Sy) 同時關閉時，電感器 Lx 和電感器 Ly 並聯，所得電感器 (L) 約為 $36 \mu\text{H}$ ，諧振頻率大約是 840 kHz 。當彈簧開關 (Sx) 和彈簧開關 (Sz) 同時關閉時，電感器 Lx 和電感器 Lz 並聯，所得電感器 (L) 約為 $44.6 \mu\text{H}$ ，諧振器頻率約為 720 kHz 。當彈簧開關 (Sy) 和彈簧開關 (Sz) 同時關閉時，電感器 Lz 和電感器 Ly 並聯，所得到的電感器 (L) 約為 $68.75 \mu\text{H}$ ，諧振器頻率約為 606 kHz 。

當彈簧開關 (Sx)，彈簧開關 (Sy) 和彈簧開關 (Sz) 同時關閉時，電感器 Lx, Ly 和電感器 Lz 成為並聯連接，並且所得到的電感器 (L) 約為 $30.9 \mu\text{H}$ ，諧振頻率約為 904 kHz 。表 1 顯示了這些彈簧開關，等效電感和諧振頻率的相互關係。

2. 頻率至事件轉換之演算法

如果在空間中佈置 N 個彈簧開關，並且每個彈簧開關具有兩個打開和關閉狀態，則 N 個開關具有 2^N 狀態，從而可以組合不同的等效電感值；換句話說，有不同的頻率 f_1, f_2, \dots, f_{n-1} 和一個沒有頻率輸出。嵌入式微電腦單元 (MCU) 具有用於不同頻率的微控制器計數並設置不同的相對計數值。如果 n 方向的隨機震動由 f_1, f_2, \dots, f_{n-1} 不同頻率和一個無頻率條件產生。這個輸入頻率可以設置已知的嵌入式微控制器單元 (MCU) 微控制器的計數值。如果輸入頻率小於最小設定計數值，則生成狀態標誌的輸出。相反，如果輸入頻率計數值將進入另一個下一個高位計數值比較；如果輸

表 1. 彈簧開關狀態，電感與諧振頻率關係。

彈簧開關狀態			等效電感 (μH)	諧振頻率 (kHz)
關	開	開	56	672
開	關	開	100	504
開	開	關	220	339
關	關	開	36	840
關	開	關	44.6	720
開	關	關	68.75	606
關	關	關	30.9	904
開	開	開	0	0

表 2. 參考頻率。

參考頻率符號	頻率 (kHz)
f_1	300
f_2	480
f_3	590
f_4	630
f_5	690
f_6	800
f_7	870

入頻率小於下一個更高的設置計數值，則會生成另一個狀態標誌的輸出。如果它也高於下一個高設定計數值。輸入頻率計數值將繼續進行比較；進一步執行序列操作，使得所有的映射輸入頻率消息可以對應於不同的事件狀態並且直到不同的事件狀態標記。在本文中，數位式震動感測器設計有 x ， y 和 z 方向上的三個彈簧開關，每個彈簧開關相互正交 90° 。當數位式震動感測器在空間位移或震動或傾斜時。因此，有 8 種不同的頻率狀態，包括無頻率。首先根據表 1 的諧振頻率，分別設定 7 種參考頻率 ($f_1, f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7$)，分別為 300 kHz，480 kHz，590 kHz，630 kHz，690 kHz，800 kHz 和 870 kHz。總結如下表 2 所示。

這個頻率間隔必須適當選擇以避免出錯。同時，事件標誌被設置為 no.1 至 no.8。MCU 由於震動而獲取這些開關的輸入頻率 (F)，然後比較輸入頻率進行變化以分類什麼樣的事件。如果 F 輸入頻率 (F) 小於參考頻率 (f_1) 或無輸入頻率，MCU 將發送事件編號為 0。當輸入頻率 (F) 介於 f_1 與 f_2 ，或等於 f_1 時，該 MCU 將輸入頻率分類為事件 1 號。當輸入頻率 (F) 介於 f_2 與 f_3 或等於 f_2 ，該 MCU 將輸入頻率 (F) 分類為事件 no.2；時當輸入頻率 (F) 介於 f_3 與 f_4 或等於 f_3 ，該 MCU 將輸入頻率 (F) 分類為事件 no.3。當輸入頻率 (F) 介於 f_4 與 f_5 或等於 f_4 ，則 MCU 將輸入頻率 (F) 分類為事件 no.4 時。當輸入頻率 (F) 介於 f_5 與 f_6 或等於 f_5 ，則 MCU 將輸入頻率 (F) 分類為事件 no.5 時。當輸入頻率 (F) 介於 f_6 與 f_7 或等於 f_6 ，則 MCU 將輸入頻率 (F) 分類為事件 no.6 時。當輸入頻率 (F) 大於 f_7 ，則 MCU 將輸入頻率 (F) 分類為事件 no.7 時。

各種不同的輸入頻率 (F) 和參考頻率比較結果如表 3 所示。

3. 信號傳輸設計

數位式 3D 震動感測模組可以在未來廣泛使用，不僅僅是單個模組應用⁽¹⁶⁾。尤其是物聯網和人工智能的興起，可能需要更多的空間來獲取足夠的數據，以便做出最準確的分析和判斷。在文章中，我們提出了一個如圖 5 所示的 10 個數位式 3D 震動感測模組成的系統，並驗證系統的信號傳輸是正確和可行的。這個建議系統可以分為管理控制器 (HOST) 和這些 3D 數位式震動感測模組。管理控制器 (HOST) 管理十個 3D 數位式震動感測模組的命令傳輸和震動狀態數據傳輸，採用 RS485 格式 RS485 格式，2 線傳輸為半雙工和多點通信標準格式，RS485 電氣特性和 RS-232 電氣特性為不一樣。傳輸電纜兩端的差異表示傳輸信號。傳輸線一端的電壓標識為邏輯 1，另一端標識為邏輯 0。

傳輸電纜上的最小電壓差為 0.2 V 或更高被認為是有效的。傳輸電纜的兩根導線之間的電壓差不超過 12 V 或不小於 -7 V 對於接收器來說被認為是正確的。RS485 非常適合遠距離數據傳輸。HOST 單元和數位式 3D 震動感測模組均使用名為 Nano 120 的 MCU。該 MCU 是具有 16 MHz 工作頻率的 ARM Cortex-M0 系列。MCU 也有 3 個定時器，分別為 Timer0，Timer1 和 Timer3。Timer0 用於計數輸入頻率 (F)。Timer1 用於產生波特率，以便與 MCU 的時分多址 (TDMA) 信號傳輸單元進行通信。定時器 2 每 4 毫秒具有最高優先級。每個 3D 數位式震動感測模組每秒執行 125 個空間狀態採樣

表 3. 輸入頻率 (F) 與事件關係表。

輸入頻率與參考頻率比較關係	事件編號
$f_1 \leq F < f_2$	1
$f_1 \leq F < f_3$	2
$f_3 \leq F < f_4$	3
$f_4 \leq F < f_5$	4
$f_5 \leq F < f_6$	5
$f_6 \leq F < f_7$	6
$F < f_7$	7
$F < f_1$ 或無輸入頻率	0

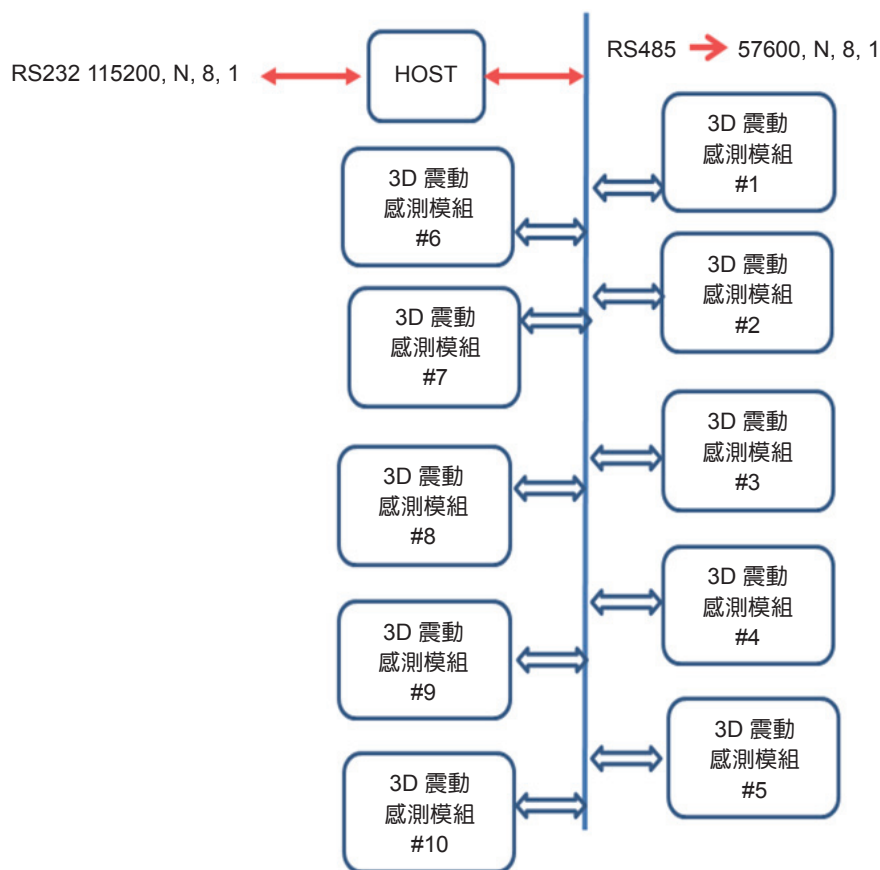


圖 5.10 顆數位震動感測模組系統示意圖。

數據，並將其存儲在自己的微控制器內的 125 字節 FIFO 存儲器中。每當 MCU 的 TDMA 信號傳輸單元需要數據時，3D 數位式震動感測模組就會將 FIFO 中的所有數據一次灌注到 MCU 的時分多址 (TDMA) 信號傳輸單元⁽¹⁷⁾。每個 3D 數位式震動感測模組和 HOST 單元相互傳輸，都使用共享總線 RS-485，以有效減少傳輸線路數量。但是，Tx 和 Rx 線路都在同一對雙絞線中，信號可能會發生衝突，因此請使用 TDMA 設計方法。三維震動感應模塊的 MCU 的時分多址 (TDMA) 信號發送單元被劃分為時隙，然後為了每個的 3D 數位式震動感測模組發送需求命令消息。接收到相應數量的 3D 數位式震動感測模組將立即返回上一秒內 XYZ 位置的測量狀態。換句話說，該方法必須給每個 3D 數位式震動感測模組一個數字，以便每個 3D 數位式震動感測模組可以區分消息是否發送給自己，以及是否應該響應需求命令消息。

由於有十個 3D 數位式震動感測模組，因此每次 Slot 為 100 ms，Timer2 具有最高優先級。如果 RS485 接收指令被切斷，可能導致指令不完整而無響應，並導致數據丟失。因此，3D 數位式震動感測模組和 TDMA 信號傳輸單元的波特率時間需要大於 3D 震動感測模塊中的微控制器的計數和狀態轉換數據處理和傳輸時間。由於本實施例需要進行 10 個 3D 數位式震動感測模組的信號處理轉換傳輸，因此 3D 數位式震動感測模組的每個 3 軸頻率計數和狀態轉換數據處理和傳輸時間約為 125 μ s；因此，三維震動和分時多路訪問 (TDMA) 信號傳輸單元的波特率要小於 57600 位/秒，這個包括發送文件的速率需要 190 μ s。這個時間大於頻率轉換數件之映射時間 125 μ s，可以避免發生 Timer2 中斷造成的損害，避免數據丟失。因此，3D 數位式震動感測模組與 HOST 之間通信速率 57600 bit/sec 以及 HOST 與所有 3D 數位式震動感測模組之間的

通信速率為 115200 bit/sec，設計合理，實現了符合有效數據傳輸的要求。

三、實驗結果討論

隨機選取兩個 3D 數位式震動感測模組 (編號為 3, 4)，置入國家地震中心震動測試平台測試，以 (2 Hz, 2 m/s²) 測試條件測試。

如果沒有震動發生，在圖 6 中所示的事件頻譜圖上所產生的 1 秒統計變化下將只有一個狀態事件。根據圖 6，x 軸被稱為事件狀態，y 軸被稱為事件發生強度的數量。綠色條形圖用為編號 4 的 3D 數位式震動感測模組資訊，藍色條形圖為編號 3 的 3D 數位式震動感測模組資訊。當震動平台以 (2 Hz, 2 m/s²) 測試時，測量之事件譜圖如圖 7 所示。從圖 7 可以清楚地看出，編號 3 的 3D 數位式震動感測模組有六個不同的事件，相同 (2 Hz, 2 m/s²) 測試條件下，編號 4 的 3D 數位式震動感測模組有七個不同的事件。這些實驗信息是隨震動而隨機。而這些隨機資訊之意義是未來另一項研究議題。

震動強度之分級可參考中央氣象局所提供如下表 4 所示若以 (2 Hz, 2 m/s²) 測試條件下，相當於地震 5 級強度。

四、結論

在這項研究中，我們提出了一個關鍵技術為頻率至事件轉換方法，可以提供數位式 3D 震動感測模組每秒 125 次數之取樣率。

表 4. 地震強度表 資料來源：中央氣象局。

震度分級		地動加速度範圍
0	無感	0.8 Gal 以下
1	微震	0.8—2.5 Gal
2	輕震	2.5—8 Gal
3	弱震	8—25 Gal
4	中震	25—80 Gal
5	強震	80—250 Gal
6	列震	250—400 Gal
7	劇震	400 Gal 以上

對應於 (2 Hz, 2 m/s²) 測試條件，上述實驗信息可以明顯感覺到衝擊震動。這是一個很好的事件狀態反應變化。河流沖刷劇烈，相當於 5 級或以上地震強度。因此，由於河流沖刷是一項劇烈運動，數位式 3D 震動感測模組可被安排用於監測台灣的河流侵蝕。這是一種新型的數位式侵蝕感測裝置和技術，它易於產生高的抗雜訊能力，克服了傳統複

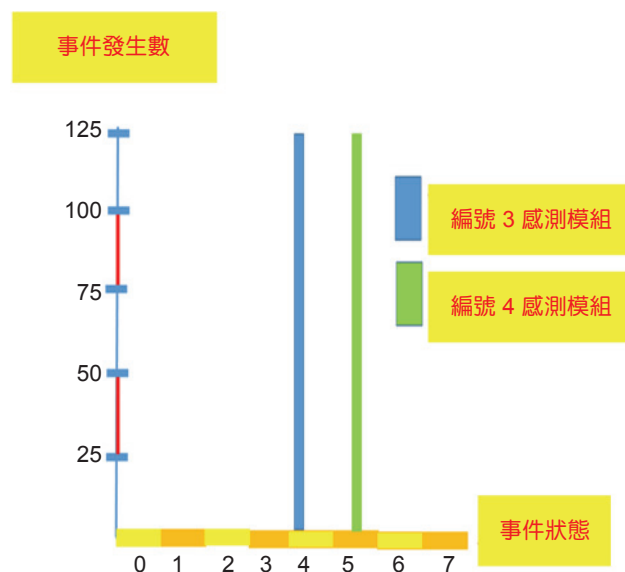


圖 6. 靜態時，事件頻譜圖。

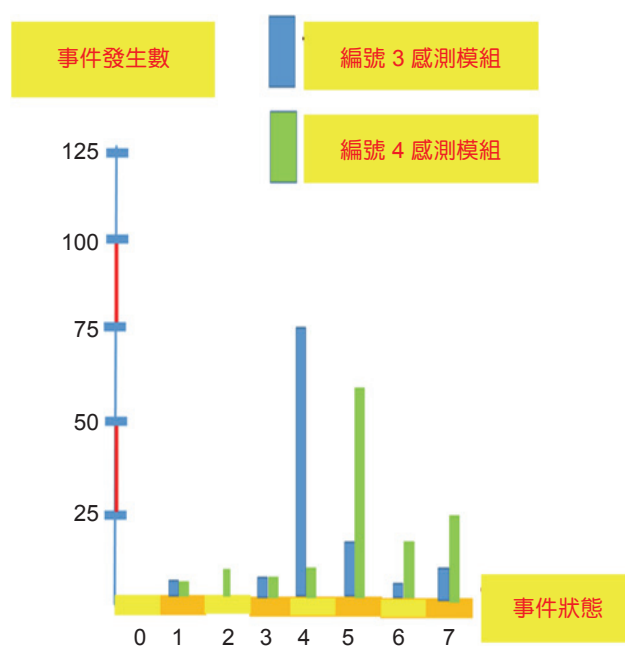


圖 7. (2 Hz, 2 m/s²) 測試條件下，事件譜圖。

雜的侵蝕感測裝置技術，或埋設磚等不易維護的複雜結構，加速信號處理多雜訊的缺點。3D 震動感測模組採用時分多址 (TDMA) 信號傳輸模式，接收每個數位式 3D 震動感測模組輸出的感測信號，每秒鐘有超過 100 個事件發生數據，未來可提供水文動態分析模式或未來的沖刷分析。儘管這種類型的數位式 3D 震動感測模組目前不能測量出 1 級地震強度。如果數位式 3D 震動感測模組中使用的彈簧開關可以用更靈敏的微機電開關代替。我們相信它可以用來測試微弱的震動，並且可以應用於也是可能的工具機震動監測，這是未來最大願景市場。

參考資料

1. M. A. Mannan and B. J. Stone, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **14** (12), 889 (1998).
2. Sudath C. Siriwardane, *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, **4**, 50 (2015).
3. B. Sherif, M. Shuichi, O. Toshiyuki, *J. Appl. Mech.*, **9**, 63 (2006).
4. Xu Fu-cheng, *Practical Electronics*, 13 (2008).
5. ChenJie, Huang Hong, *Sensors and Detective Technology*, Beijing: Higher Education Press, (2002).
6. Li Ming-guo, Sun Rong-xiang, Li Yong, *Colliery Mechanical & Electrical Technology*, **3**, 37 (2008).
7. Zhang BaiLi, *Journal of Xinzhou Teachers University*, **21** (2), 24 (2005).
8. Sun Sheng-he, *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, **23** (1), 1 (2009).
9. Zhang Yan, Zeng Guang-yu, *Sci-Tech Information Development & Economy*, **16** (13), 254 (2006).
10. Tai-Shan Liao, Yung-Bin Lin, Xiaoqin Liu and Chi-Hung Hwang, "Digital 3D vibrating module", *IEEE International Instrument and Measurement Technology Conference*, (2018).
11. Abuelma'atti, M. T. et al., *IEEE Transactions on Education*, **38** (4), 391 (1995).
12. Abuelma'atti, M. T. et al., *Practical Oscillator Hand book*, Newnes, New Delhi Singapor, (1997).
13. Graf, Rudolf F., *Oscillator Circuits*, Newnes, (1997).
14. Jung, Water G., *OP AMP Applications Handbook*, Linacre House, Jordan Hill, Oxford UK, (2005).
15. Guillermo Gonzalez, *Foundations of Oscillator Circuit Design*, Artech House Publishers, (2007).
16. Taylor, J. Clarke, C., *IEEE International Symposium on Circuit and Systems*, 1272 (2008).
17. Tai-Shan Liao et al., "Design and Discussion of Inductance Resonance Scour Sensor Module ", *Workshop on Consumer Electronics conference in Taiwan*, (2017).
18. G. Chakraborty, *IEEE Transactions on Communications*, **52** (5), 765 (2004).



廖泰杉先生為中原大學電子工程研究所博士，現為國家實驗研究院儀器科技研究中心研究員。

Tai-Shan Liao received his Ph.D. in electronic engineering from Chung Yuan Christian University. He is currently a research fellow at Instrument Technology Research Center, Narlabs.