

摩擦奈米發電機之應用：彈琴手部 運動訊號之偵測與分析

Detection and Analysis of the Hand Movement in Piano Playing with Triboelectric Nanogenerators

專題領域：系統組

組別：A213

指導教授：劉奕汶 教授

組員姓名：王亮凱、盧柏彥

Abstract

隨著資訊科技的發展，音樂家的合奏已不再局限於空間或時間的限制。近年來，發展出許多自動伴奏軟體，讓個人音樂的演奏也能透過軟體的協助，模擬出整個樂團的盛況。而除了對於演奏的音樂分析之外，我們更希望能加入音樂家在演奏時的手部運動資訊，增進伴奏軟體對於演奏情況的判斷。因此本專題的目標在於實作能收集手部運動資訊的手套，並透過 Arduino 和 Python 的整合與 MIDI 鍵盤的輸入，製作出一套能同時收集手部運動和鍵盤輸入的系統。

基於上述的目標，我們最初選擇使用現成的姿態感測晶片，裝於各個手指的上方，收集手部的加速度資料。然而由於大部分的姿態感測晶片相對於手指的大小都過於龐大，音樂家在演奏時容易產生不適感，加上單一手指的加速度資訊容易受整個手臂的運動影響。因此我們選擇和生物醫學工程研究所的林宗宏教授合作，在林宗宏老師的實驗室學習製作摩擦奈米發電機(Triboelectric Nanogenerator, TENG)，並將 TENG 實作在手套上。之後便運用 Arduino 接收 TENG 產生的類比電訊號，透過 Serial 的方式傳送至電腦，並且在電腦端使用 Python 即時收集 Arduino 和 MIDI 鍵盤的輸入並作圖分析。

在實作手套的過程中，我們也解決了許多 TENG 和 Arduino 間整合的難題。例如使用單一 TENG 量測手指擺動之訊號時，我們透過電阻-電容的電路形成低通濾波器，有效的去除 60 赫茲的交流電雜訊。而在多個感測器的測試中，我們也發想出「偵測各感測器電壓前均先接地」的方法，有效的解決各個通道之間的干擾問題。在專題的後段我們也實驗了「摩擦奈米發電機」和 MIDI 鍵盤的整合。我們發現中指的實驗結果與預期不同，透過觀察 TENG 形變的樣態與原理的分析，得出「TENG 彎曲的難易程度」會對此實驗結果造成的影響。

儘管實作中有許多非理想性，但由於 TENG 對於手指彈奏與運動時產生的

異物感較小，並且能根據電壓明顯判斷出手指運動，因此我們認為運用此 TENG 技術和想法實作的手套搭配 MIDI 鍵盤的整合架構是可行的。

Introduction

一、前言

隨著科技的演進，自動伴奏已成為科技和音樂結合的一大領域。許多的自動伴奏軟體都透過分析樂手彈奏的音高、節拍及音色等資訊，產生自動合奏的旋律。而我們希望除了利用上述的資訊外，也能夠加入樂手演奏時手部的運動資訊，進而增加自動伴奏軟體的分析結果。因此本專題的目標著重於實作能收集手部運動資訊的手套，並透過 Arduino 和 Python 的整合與 MIDI 鍵盤的輸入，製作出一套能同時收集手部運動和鍵盤輸入的系統。在專題中，我們學習設計與製作「摩擦奈米發電機」(Triboelectric Nanogenerator, TENG)，並將其用於測量手部運動的資訊。接著透過 Arduino 量測感測器的類比電訊號輸出，其中我們也解決了 Arduino 讀取輸入時的 noise 及通道干擾等問題。最後再透過 Python 整合 MIDI 鍵盤及 Arduino，將手部運動及鍵盤輸入加入時間軸的資訊，用於分析鋼琴彈奏與手部運動的關係。

二、原理分析與系統設計

本專題所製作的手部及鍵盤資料收集系統架構圖如圖 1。手部的運動會擠壓到 TENG 進而產生類比的電訊號，接著再使用 Arduino 內部的 ADC 將電訊號轉為數位的資訊，並透過 Serial 的傳輸方式將資料彙集至電腦端。MIDI 鍵盤會將鍵盤彈奏的音符資訊，利用 MIDI 通訊協定傳輸至電腦端。最後電腦端再使用 Python 將手部及鍵盤資料彙整。

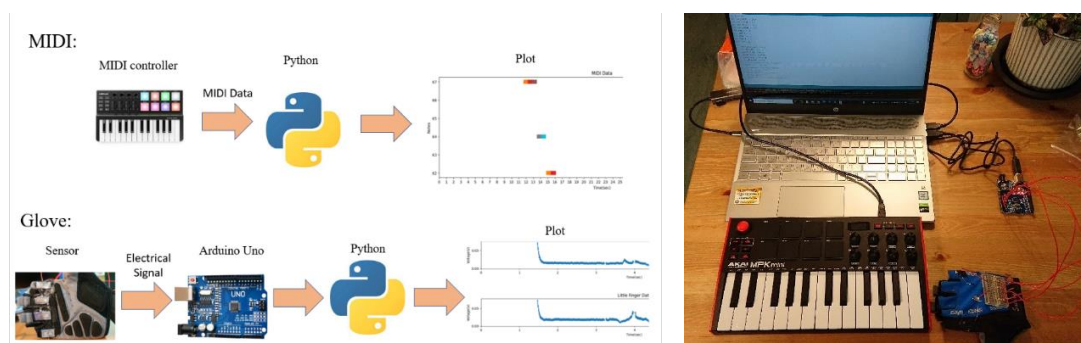


圖 1.系統架構圖（左：以圖示表示系統架構 右：實際系統架構圖）

2.1 手套的製作及原理

由於鋼琴家在演奏時，指尖和琴鍵的接觸往往是影響音色變化的原因之一，因此在設計手套的初期，我們就希望手套能盡量減少演奏時產生的不適感，並且在指尖的部分能保留原本彈鋼琴時和琴鍵的接觸。因此我們便以指尖簍空的半截式手套為原型，並在盡量不影響彈奏時的舒適度為前提，加入感測器測量手部的運動。而由於現成的姿態感測晶片大小大多都超過手指的寬度，因此我們選擇學習並自行製作林宗宏老師實驗室開發的 TENG，作為手部資訊的感測器。

2.1.1 TENG 的原理

液態金屬與周圍矽膠外殼因摩擦起電而產生電荷分布，因此，若快速按壓感測器，則會造成大量摩擦起電，而導致電壓快速上升。靜止時金屬和外殼之間有電位差，由電場 E 為定值得知，若外殼形變導致金屬與外殼距離縮小，則由於距離縮小，因此電位差 $V = E \times d$ 減少；反之若外殼形變導致金屬與外殼距離增大，則由於距離增大，因此電位差增加。總而言之，外殼的形變會造成輸出電壓變化，但若發生大量摩擦起電，則會有顯著的電壓增加。[1]

2.1.2 手套製作

由於 TENG 的外框是由矽膠製作而成，且內部使用的金屬在常溫下成液態，因此 TENG 的可塑性與其實作在手套上產生的不適感，是明顯優於使用現成的感測晶片。而在設計實際使用的 TENG 之大小和形狀前，我們有先嘗試在手背和手指的關節處、手指的側面、以及手指和手掌的交界處放上感測器，以觀察感測器最好的測量手指運動的位置。而經由測量的結果發現，將感測器放在手指和手掌的交界處，透過手指彎曲擠壓到感測器所產生的電訊號最為明顯。因此我們設計長條型的壓克力模具，並將感測器透過矽膠，黏貼在手套上手指和手掌的交界處。由於彈鋼琴時，大拇指的動作通常是運用手腕旋轉的力量彈奏，而非手指的彎曲，因此無法透過大拇指和手掌之間的感測器，測量手指是否彎曲，來判斷是否有使用大拇指彈奏。所以我們選擇先將測量的目標著重在另外四隻手指上。

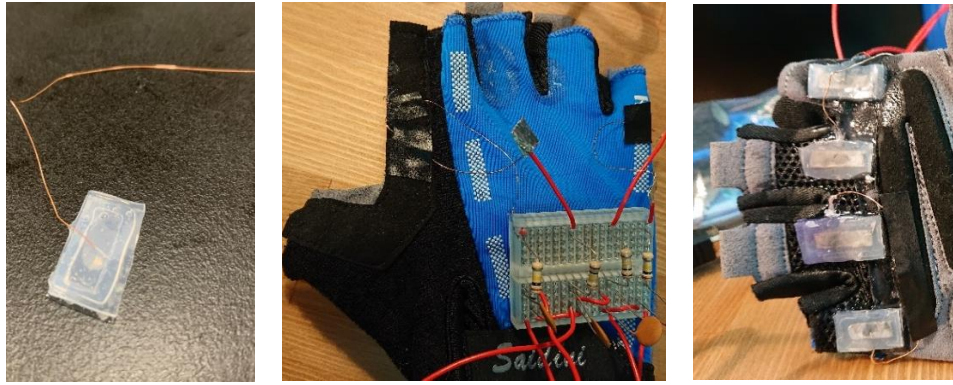


圖 2.手套以及 TENG 的樣貌 (左：TENG 的樣貌 中：手套正面
右：手套背面)

2.2 電訊號的接收

在本專題中，我們使用 Arduino UNO 開發板作為 TENG 產生的類比電訊號與電腦端的橋樑。我們透過簡單的電路，將電訊號的大小降低至 5V 以內，並用 Arduino 內的 ADC 將類比訊號轉換成 0 ~ 1023 的範圍輸出至電腦端。

2.2.1 讀取單一感測器訊號

在感測器製作完後，我們首先嘗試用 Arduino 讀取單一感測器的訊號。測量時直接將感測器的漆包線連接至 Arduino，然而我們發現輸入端測量到的訊號被 noise 干擾得非常嚴重。而透過測量後發現，noise 的週期為 60Hz，因此可推測是交流電所造成的干擾。我們將感測器的訊號通過簡單的電阻-電容低通濾波器，即可有效的降低 noise 的影響。而由於 TENG 本身無法提供太多的電荷，若使用過大的電容，雖然能使 noise 的干擾降低，卻容易導致 Arduino 測量的訊號太小，因此我們選擇用較小的電容，增加輸入端的訊號大小。

2.2.2 讀取多個感測器訊號

雖然在 Arduino UNO 開發板上有 A0~A5 共 6 個 pin 可讀取外界的類比訊號，但在開發板中實際上只有一個 ADC。若將所有感測器連接至 Arduino，並用掃描的方式一一讀取感測器的輸入，就會導致各個通道之間的相互干擾。我們推測可能的原因為 TENG 的輸入訊號無法快速地對 ADC 中，sample and hold 使用的電容進行充放電，因此導致下一個感測器的讀值受到前一個的干擾。經過實驗和嘗試後我們發現，若在讀取每一個感測器前，先讓 sample and hold 使用的電容對地放電，就

能消除通道之間的干擾。因此我們在 Arduino 上將 GND 和 A5 互相連接，並在每一次讀取新的感測器前，都先透過程式讀取 A5。經過上述的改進後，通道之間就不容易出現干擾的情況。然而由於每次讀取新的感測器前 sample and hold 的電容都為 0V，加上感測器的輸入訊號無法快速地對 ADC 進行充放電，因此上述的改進也會導致輸入訊號的 DC 值下降。

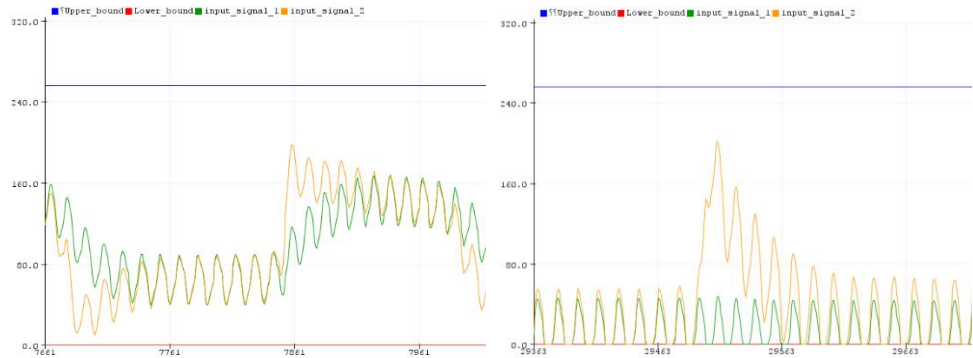


圖 3. 是否有接地之比較 (左：沒接地 右：有接地)

2.3 電腦端與 MIDI 鍵盤

在電腦端我們使用 Python 作為手部資訊和鍵盤輸入的彙整程式。Arduino 透過 Serial 的方式將輸入的訊號傳輸至電腦，鍵盤的輸入則以 MIDI 的通訊協定傳輸，並用 Python 中的 Pygame.midi 模組進行解讀。為了能將輸入的資訊匯出以便未來做分析使用，我們在程式中加入除了收集資料外，也對每一筆的輸入加上時間的資訊，之後便可在同個時間軸上分析鍵盤輸入是否有對應的手部運動資訊。

三、實驗結果

3.1 多手指訊號接收

在手套實作完成後，我們嘗試將手套戴上並測試感測器在手指上下運動時，是否能獨立的測量到各個手指的運動資訊。下圖為四個手指感測器透過 Arduino 測量後的作圖。由於四個感測器的輸入 DC 值相近，因此我們在做圖時，將四個感測器的輸入加上不同的 DC offset，方便我們觀察個別手指的訊號是否有明顯的區隔。

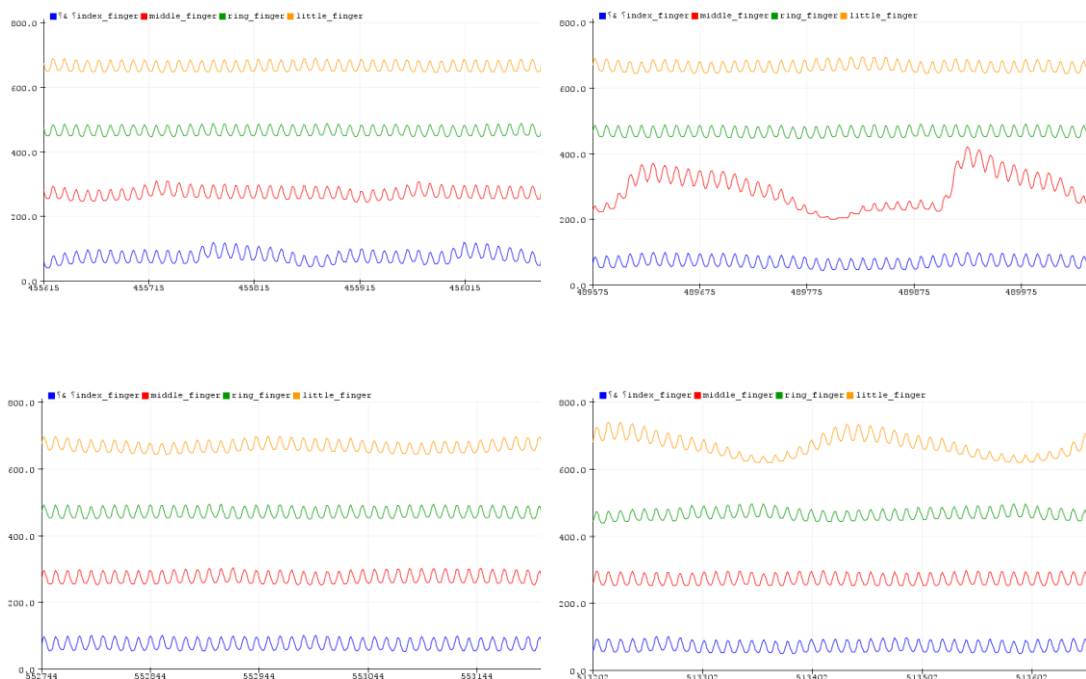


圖 4. 四指運動之訊號（左上、右上、左下、右下分別為：
食指、中指、無名指、小指）

從圖中可以發現中指和小指的測量結果最為清楚，可明顯的分辨出該手指運動時產生的電訊號。而我們也可以觀察到食指的訊號振幅，相較於中指和小指來的小，且測量食指的運動時，中指的訊號也會有類似的起伏。我們推測可能的原因為食指在運動時，手套食指部分的彎曲也會牽動到中指的感測器，因此中指測量到的訊號才會受到食指運動的干擾。而根據測量結果也可以發現，無名指單獨運動時的訊號非常小，向較之下，中指和小指受到牽動產生的訊號反而更為明顯。經過測試後，我們發現無名指使用的感測器在受到相同的按壓力道下，產生的訊號振幅較其他三個手指使用的感測器更為不明顯，因此造成無名指的彎曲無法產生有效的訊號用於區分手指的運動。

3.2 鍵盤與手指訊號整合

另外為了驗證我們製作的架構能達到當初專題設定的目標，因此我們也實驗了同時收集手套及鍵盤彈奏資訊的結果。我們用訊號較為明顯的中指和小指測量其彈奏鍵盤的訊號，而圖 5 為使用中指與小指輪流按壓 E4 和 G4 產生的波型。從中指彈奏 E4 時測量的波型，我們可以發現中指彈奏的訊號波峰出現在手指放開琴鍵的時刻。而相反的，使用小指彈奏 G4 時測量的波型，訊號波峰則是出現在手指按下琴鍵的時刻。從觀察感測器的變化發現，小指的感測器於手指彎曲時外殼會鼓起來，因此由原理可知小指彎曲造成訊號增加，反觀中指的感測器，當初製作此感測器時將其外殼做得稍微有些厚

度，因此不易以中指的指節將其折彎，導致中指向下彎曲時只產生些許向內縮的凹洞，訊號沒有明顯的波動，反而當中指抬起時，感測器由凹洞回復到平衡狀態，其界面的距離增加，根據原理其電位差也增加，因此導致中指抬起時產生訊號增加。

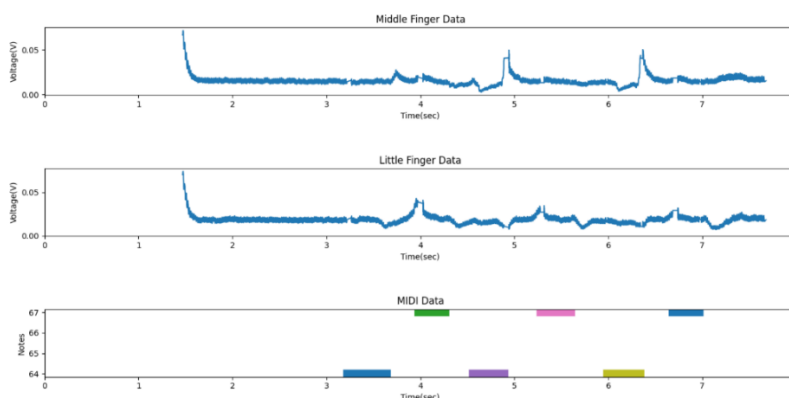


圖 5. 中指與小指輪流按壓 E4 和 G4 (上：中指 E4 訊號 中：小指 G4 訊號 下：MIDI 結果)

四、結論

由於現成的姿態感測器 MPU6050 對手指彈奏時產生的不適感過大，並且想減少手部對於手指的影響，因此使用生物醫學工程研究所的林宗宏教授開發的「摩擦奈米發電機」(TENG)，利用摩擦生電和外殼的形變能產生電位差變化，並將 4 個 TENG 放置於手套指節下方，得以透過偵測此電位差之差異，分辨出那一個手指有動作。

於單一感測器的測試中發現有 60 赫茲的雜訊，因此使用電阻-電容形成低通濾波器以去除雜訊，經過測試，低通濾波器能有效減小此雜訊。由於較好的雜訊濾波會導致較差的輸入振幅，因此低通濾波電路需具備適當的電阻和電容值，選用適當的電阻和電容值，則能看到電壓隨著手指擺動有明顯變化。於多個感測器實驗中，發現多個感測器的波形會相互干擾，推測是因為所有感測器都經過線路連接到 Arduino 上的同一個 ADC，因此在偵測各感測器電壓前均先接地，便能有效解決這個問題。

於整合 TENG 和 MIDI 鍵盤實驗中，小指的波形與其 MIDI 訊號相符合，而中指訊號與其 MIDI 訊號不符合，根據運作原理和實驗觀察，發現兩個手指指節彎曲時其 TENG 的樣態不同，造成結果有所差異，故雖然能透過整合 TENG 和 MIDI 鍵盤得到手部運動訊號及鍵盤輸入關係，但 TENG 彎曲的樣態會對此結果造成影響。

雖然從實驗中發現許多非理想性，但由於 TENG 對於手指彈奏與運動時產生的異物感較小，並且能根據電壓明顯看出手指運動，因此有潛力將此技術和想

法實作成偵測彈鋼琴手部姿態的手套。

五、參考文獻

[1] Che-Min Chiu, Shuo-Wen Chen, Yu-Ping Pao, Ming-Zheng Huang, Shuen-Wen Chan, and Zong-Hong Lin, "A smart glove with integrated triboelectric nanogenerator for self-powered gesture recognition and language expression," *Science and Technology of Advanced Materials*, Vol. 20, Sep 2019, pp.964-971

心得

專題初期，我們十分期待此專題結果，想像能將此專題透過運用機器學習等技術應用於日常生活中，並且能運用此專題來協助需要的人。但是由於這個題目是我們在專題初期所發想的，加上實驗室以前並沒有學長姊研究果有關收集手部運動相關的主題，因此從手套發想、設計到製作都是由我們從頭摸索，而在製作手套時也時常不如我們預期的順遂。整個專題就是於實作中一直碰到問題並學習如何解決問題，以製作 TENG 為例，一開始我們花了很多時間學習製作第一顆 TENG，從矽膠製備塗抹到用雷射切割機製作模具，最後學習灌入液態金屬，種種複雜的步驟都花費了許多時間。然而，成果並不如我們的預期，初期製作的 TENG 常常出現破損或是沒有密封的情形，而我們也在一次一次的製作與嘗試中，漸漸了解到製作 TENG 的技巧與方法，最終才能在眾多的失敗後，製作出能正常運作與感測的 TENG。因此我們非常感謝林宗宏教授與魏伯翰學長的幫忙，在製作 TENG 時不厭其煩的教導我們製作的步驟，並回答我們關於 TENG 的種種問題。若沒有老師與學長的幫助，我們也無法在有限的研究時間內，學會製作與使用 TENG。

雖然沒有達到當初訂定的成果，但是從中學習到許多課外的知識以及技能，因為這個專題，接觸了 Arduino 和 Python 等工具，參與每周指導教授指導主持的會議，從他人的研究中汲取重點知識以運用於專題中，甚至因為需要製作 TENG 而前去林宗宏教授的實驗室學習。就算專題實作上一路坎坷，但過程中所接觸、學習到的課外知識卻豐富了我們各自的經歷，並且使我們不再害怕未來的挑戰。