中華民國第 57 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高級中等學校組　工程學科(一)科

052307

「虛擬」觸覺「真」回饋
—Arduino 與加速規的觸覺回饋應用

學校名稱：臺北市立中山女子高級中學

作者：	指導老師：
高二 陳昱彣 高二 呂愷寧	李今寧

關鍵詞：Arduino、加速規、觸覺回饋

摘要

觸覺回饋(haptic feedback)能讓使用者感受模擬的觸碰反應，可以在不接觸物體的情況下，模擬物體表面質感或紋理細節等細微的觸覺資訊。我們使用 arduino 與加速規為實驗器材，先驗證物體在水中的振盪為簡諧運動，以說明此器材的準確度，並熟悉加速規與 arduino 的使用。

接著將觸覺回饋的實驗分為兩類，其一，探討一維下不同材質粗糙面沿垂直軸的振盪，並由斜面實驗求得對應的摩擦係數；其二，探討二維角度改變對加速度與角加速度所造成的影響。最後使用上述分析之數據製造出一套器材，在虛擬中模擬接觸到物體表面與物體邊角的觸覺，達到觸覺回饋機制的效用。

壹、研究動機

時下「虛擬實境」科技大興，市面上有許多運用虛擬實境的 APP、遊戲，也有許多的工作可以透過虛擬實境提供視覺上的模擬，讓使用者身歷其境，可以及時、沒有限制地觀察三維空間內的事物，進一步達到在虛擬世界中就可以有仿真實世界的各式訓練。為了增加其更真實、更具體的感覺，就需要利用「力回饋」這項技術，例如手機觸碰螢幕鍵盤所產生的振動即是力回饋技術的一環，讓使用者有除了視覺以外的感官接觸。

由於在此項技術中鮮少看見關於觸覺在物體邊角上的回饋機制，所以我們以力回饋技術當中的「觸覺」回饋為發想，探討在各種粗糙面上物體的振盪，並歸結出一套機制，模擬人的手觸碰到物體的邊角。如此可以運用在日常生活中，搭配上虛擬實境的技術，使人們在虛擬中充滿真實感。

由於第一次接觸加速規與 arduino 裝置，於是先熟悉只有三軸（x、y、z 方向）的三軸加速規來驗證日常生活中常見的簡諧振盪，再進而應用加上三方向角度的六軸加速規來辨別不同材質之粗糙平面與真正進行我們有興趣的模擬觸覺的部分。

貳、研究目的

一、使用 arduino 與**三軸加速規**驗證生活中常見的簡諧運動

二、使用 arduino 與**六軸加速規**探討等速移動物體在各種水平粗糙面之特徵

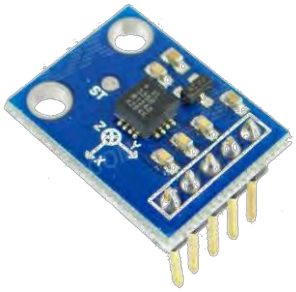
三、探討以加速規接收等速移動物體在不同材質的水平粗糙面之振動圖形與摩擦係數的關係

四、使用 arduino 與加速規探討直角下所造成的觸覺回饋機制差異

五、實際製造出一套器材模擬，並與虛擬實境結合

參、研究設備及器材

一、主要研究設備

Arduino UNO 開發板	三軸加速規 GY-61	六軸加速規 MPU-6050
		

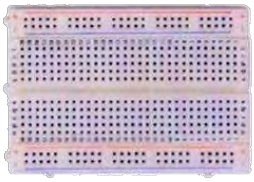
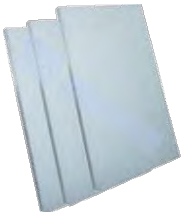
Arduino 是一種開放原始碼的單晶片微控制器，採用了開放原始碼的軟硬體平台，建構於簡易輸出/輸入介面板，本實驗用於接收加速規得到之訊號 A，並轉換成訊號 B 給內磁喇叭作為輸出。

加速規是透過將質量塊在振動時的位移量轉為電子訊號輸出的一種振動測量工具。由壓電材料作為電子訊號產生來源，透過質量位移促使壓電材料形變釋出電荷，再依據電荷釋出量來判斷振動大小，可直接將測量結果輸出。輸出之單位為每單位重力加速度多少毫伏特(mV/g),我們使用靈敏度±2g 故：

$$\text{數據}A(\mathrm{mV/g}) \div 16384 \times g(\mathrm{m/s^2}) = A^{\prime}\ (\mathrm{m/s^2})$$

而得到運動瞬間的加速度(公制單位)。

二、其他

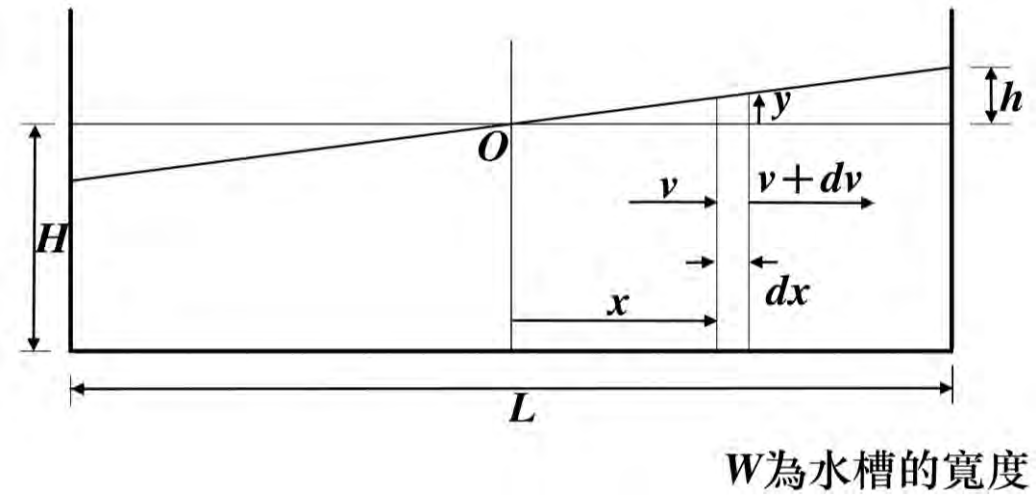
麵包板	杜邦線	實驗用工具	各式材質板
			
水盆	保麗龍	高頻內磁喇叭	文具
			

肆、研究過程與方法

一、實驗一：使用 arduino 與**三軸加速規**驗證物體在水中的振盪為簡諧運動。

（一）理論推導：推導水盆中的簡諧運動。

1.假設水盆長 L，寬 W，水深 H，水密度 ρ，重力加速度 g，搖晃時水上升最大距離 h，搖晃後水流流速 v，水體質心水平移動 x，水體質心垂直移動 y。



圖一、假設之水盆圖

2.計算位能

當水面呈水平時，水體的質心座標為$\left(0,\frac{1}{2}\mathrm{H}\right)$

$$\Rightarrow \mathrm{U_1} = \rho\,(\mathrm{HLW})\mathrm{g}\cdot\frac{1}{2}\mathrm{H} = \frac{1}{2}\,\rho\,\mathrm{H^2LWg}$$

當水面傾斜時，水體的質心座標為$(\mathrm{X_{cm}},\mathrm{Y_{cm}})$

$$\Rightarrow\ \mathrm{Y_{cm}} = \frac{\int \mathrm{ydm}}{\int \mathrm{dm}} = \frac{\int\frac{1}{2}(\mathrm{y+H})\cdot\rho\,\mathrm{W(y+H)dx}}{\rho\,\mathrm{LWh}}$$

水面方程式為

$$\mathrm{y} = \left(\frac{2h}{L}\right)x$$

$$\Rightarrow \mathrm{Y_{cm}} = \frac{\mathrm{H}}{2} + \frac{\mathrm{h^2}}{6\mathrm{H}}$$

$$\Rightarrow \mathrm{U_2} = (\rho\,\mathrm{HLW})\mathrm{g}\cdot\mathrm{Y_{cm}} = \frac{1}{2}\,\rho\,\mathrm{H^2LWg} + \frac{1}{6}\,\rho\,\mathrm{LWgh^2}$$

$$\Rightarrow \mathrm{U} = \mathrm{U_2} - \mathrm{U_1} = \frac{1}{6}\,\rho\,\mathrm{LWgh^2}$$

3.計算動能

由於h很小($\mathrm{h} \ll \mathrm{H}$)，因此水的流動主要沿著水平方向。

在x=0 時，流速v最大；在$\mathrm{x} = \pm\frac{\mathrm{L}}{2}$時，流速v為 0。

水為不可壓縮的液體，考慮斜線標示的體積元。

從左邊(x)處流入的水，減去從右邊(x+dx)處流出的水，其差值等於x與x+dx之間所增加的水量。

$$\Rightarrow \mathrm{vhw} - (\mathrm{v}+\mathrm{dv})\mathrm{hW} = (\mathrm{Wdx})\frac{\partial \mathrm{y}}{\partial \mathrm{t}}$$

但$\mathrm{y} = (\frac{2\mathrm{h}}{\mathrm{L}})\mathrm{x}$，得$\frac{\partial \mathrm{y}}{\partial \mathrm{t}} = (\frac{2\mathrm{x}}{\mathrm{L}})\frac{\partial \mathrm{h}}{\partial \mathrm{t}}$。將之代入上式，得

$$\Rightarrow \mathrm{dv} = -\frac{2}{\mathrm{LH}}(\frac{\partial \mathrm{h}}{\partial \mathrm{t}})\mathrm{xdx}$$

$$\Rightarrow \mathrm{v(x)} = \mathrm{v(0)} - \frac{1}{\mathrm{LH}}\mathrm{x^2}(\frac{\partial \mathrm{h}}{\partial \mathrm{t}})$$

當$\mathrm{x} = \pm\frac{\mathrm{L}}{2}$時，$\mathrm{v}\left(\pm\frac{\mathrm{L}}{2}\right) = 0$ $\quad\Rightarrow 0 = \mathrm{v(0)} - \frac{1}{\mathrm{LH}}\left(\pm\frac{\mathrm{L}}{2}\right)^2(\frac{\partial \mathrm{h}}{\partial \mathrm{t}})$ $\quad\Rightarrow \mathrm{v(0)} = \frac{\mathrm{L}}{4\mathrm{H}}(\frac{\partial \mathrm{h}}{\partial \mathrm{t}})$

$$K=\int\frac{1}{2}(dm)v^2(x)=\frac{1}{2}\int_{-L/2}^{L/2}\left[v(0)-\frac{1}{HL}x^2\left(\frac{\partial h}{\partial t}\right)\right]^2(HW\rho)dx=\frac{1}{60}\cdot\frac{\rho WL^3}{H}\cdot(\frac{\partial h}{\partial t})^2$$

4.計算總力學能

$$E=K+U=\frac{1}{60}(\frac{\rho WL^3}{H})\dot{h}^2+\frac{1}{6}\rho WgLh^2=\text{常數}$$

此為簡諧運動方程式，故其振動的角頻率為

$$\omega=\left(\frac{\frac{1}{6}\rho WgL}{\frac{1}{60}\cdot\frac{\rho WL^3}{H}}\right)^{1/2}=\sqrt{\frac{10gH}{L^2}}\qquad\Rightarrow T=\frac{2\pi}{\omega}=\frac{\pi L}{\sqrt{2.5gH}}$$

（二）製作實驗模組

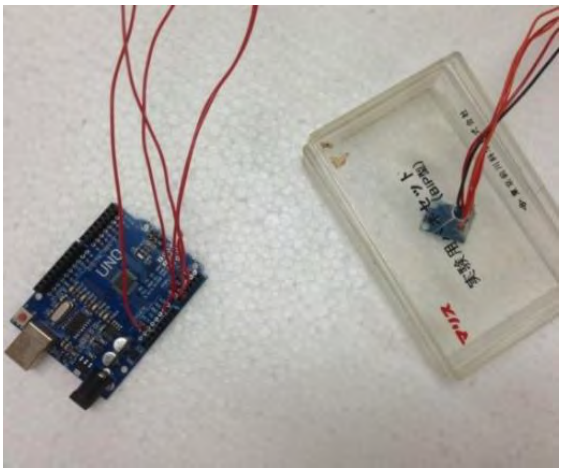
1.使用下列物品探討何項可以產生較為明顯且穩定的簡諧運動:

	裝水容器	漂浮物		結果	原因
1	大塑膠盆	2cm 保麗龍板		不適用	保麗龍板太薄及不穩定
2		2cm 保麗龍板	20g 砝碼*2	不適用	因浮力太大，吃水不夠深，無法清楚觀察，因此不適合當作載具。
3		4cm 保麗龍板	20g 砝碼*2	不適用	
4		塑膠盒	20g 砝碼*2	可行	反應明顯、漂浮穩定。
5	小塑膠盆	2cm 保麗龍板		不適用	保麗龍板太薄及不穩定，且易受影響。
6		2cm 保麗龍板	20g 砝碼*2	不適用	重量不夠，吃水不夠深，且小塑膠籃的水波容易受影響。
7		4cm 保麗龍板	20g 砝碼*2	不適用	
8		塑膠盒	20g 砝碼*2	不適用	
9	U 型管	保麗龍條		不適用	漂浮物會吸附在管壁上。解決方法有：使用食鹽水或洗手乳來減少附著力，但成效有限。
10		粗吸管	內置保麗龍	不適用	
11		細吸管	內置保麗龍	不適用	
12		細木條	吸管+保麗龍	可行	反應明顯。

表一、不同裝水容器與漂浮物之間的探討

由以上實驗得到實驗 4 與實驗 12 較有可能產生簡諧運動，但因為 U 型管無法搭載三軸加速規，故我們使用大塑膠盆+塑膠盒作為我們放置加速規的實驗器具。

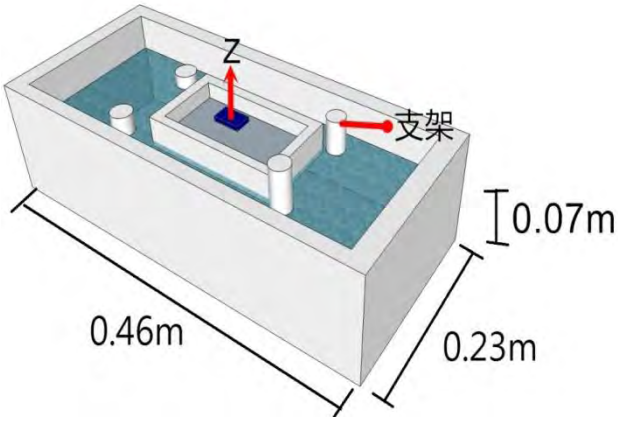
圖二、U 型管模組



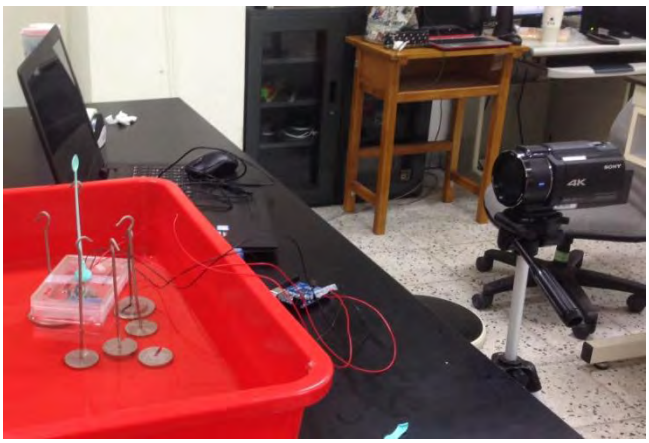
圖三、塑膠盒模組

（三）實驗流程

我們使用之大水盆長寬分別為 0.46 公尺、0.23 公尺，裝水的深度為 0.07 公尺



圖四、實驗過程示意圖

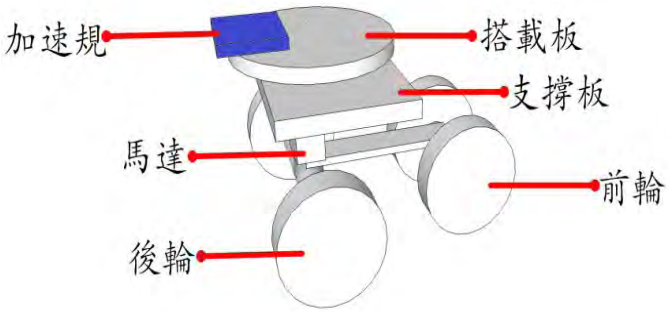


圖五、實際實驗過程圖

我們以輕輕的上下搖晃塑膠盆來產生如理論中所述的水面振盪，在塑膠盒內放置加速規，連接 arduino 板，並搭配錄影的方式，記錄其 z 軸的變化數值。以支架稍加固定塑膠盒，使裝有加速規的透明塑膠盒只做上下的簡諧振盪。

二、實驗二：使用 arduino 與**六軸加速規**探討等速移動物體在各種粗糙面之特徵。

（一）製作實驗模組



圖六、實驗工具示意圖　　圖七、實驗工具照片

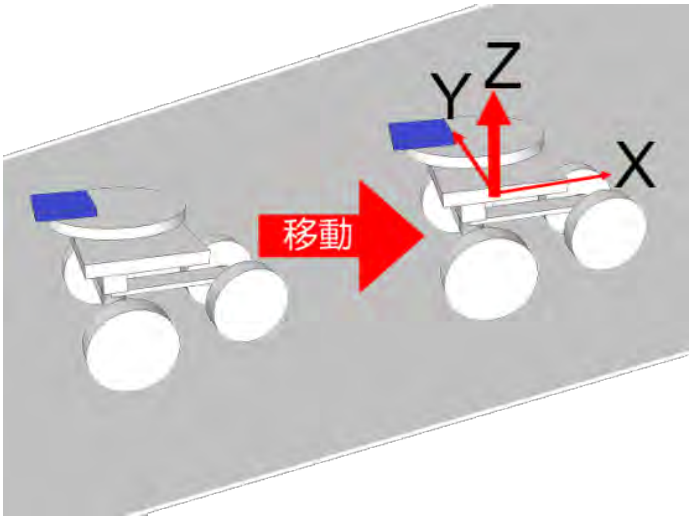
此實驗裝置為車體造型，方便於材質表面滑行以採集數據。

1.馬達：使用馬達給定一固定電壓使其維持等速度。

2.支撐板：保麗龍材質，用於穩定此車體，以防過度晃動。

3.搭載板：為提供加速規一個水平面，確保數據的準確以分析各式粗糙面材質。

（二）實驗流程



將實驗車放在各式水平粗糙板上，持續輸入一固定 1.5 伏特之電壓(0.01 安培)於馬達，使實驗車向前滑行，使用六軸加速規記錄其 z 軸的變化數值。

圖八、實驗過程示意圖

三、實驗三：探討以加速規接收等速移動物體在不同材質的水平粗糙面之振動圖形與摩擦係數的關係。

（一）實驗設計（如圖九、圖十所示）

我們以一物體置於斜面上力與角度的關係為發想。設靜摩擦係數 μ_s

$$N = mg\cos\theta$$

$$f_{靜摩擦} = mg\sin\theta$$

運用物體在粗糙斜面上恰要下滑時，

沿斜面向下的重力分量=沿斜面向上最大靜摩擦力

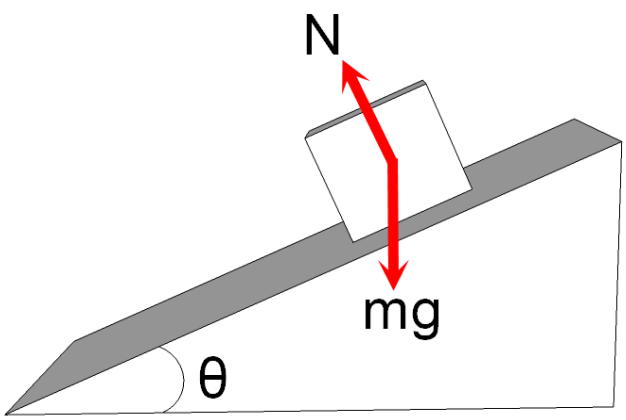
$$\Rightarrow mg\sin\theta = mg\cos\theta \cdot \mu_s$$

$$\Rightarrow \mu_s = \tan\theta$$

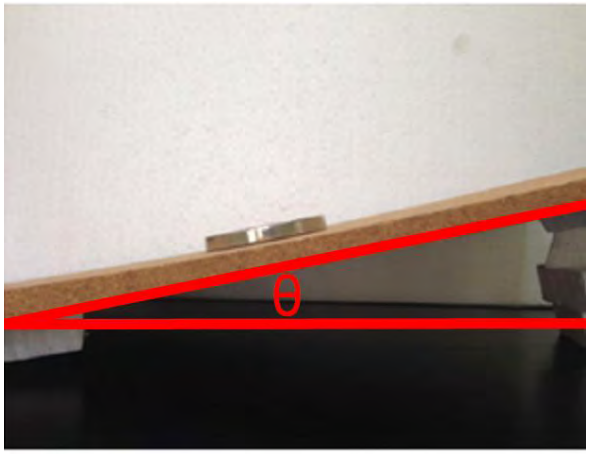
而推得各材質接觸面之靜摩擦係數。

（二）實驗流程

我們將不同材質水平面斜放，一端貼緊桌面（水平），另一端用棉線綁著，緩緩上提。斜面上放置一 20 公克之砝碼，以錄影的方式，測得該物體恰要下滑時的角度。每種材質測 5 次角度，取平均值。



圖九、物體於斜面上的力圖



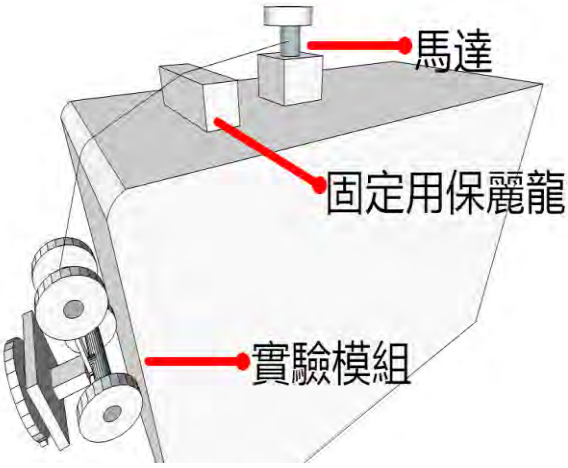
圖十、實驗裝置圖

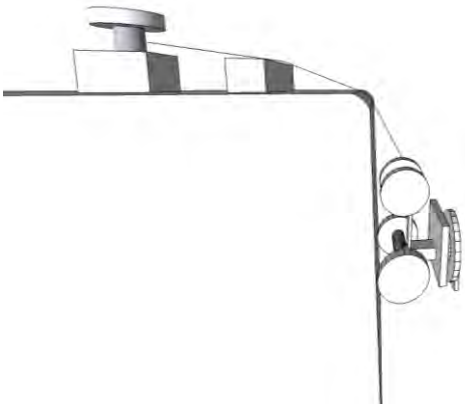
四、實驗四：探討在轉過直角（90˚）時六軸加速規的數值變化。

（一）製作實驗模組（圖十一、十二、十三）

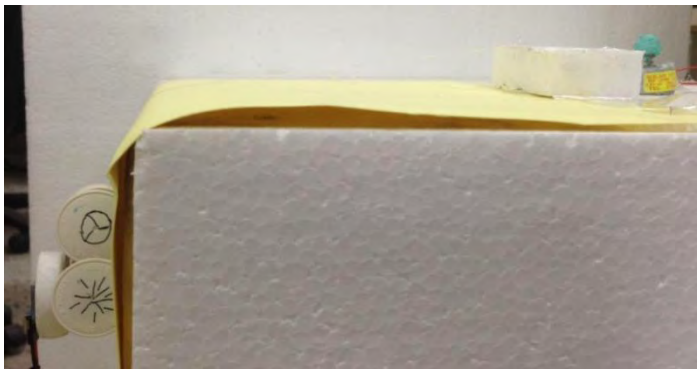
將實驗二之實驗模組拆去馬達接於另一頭，以減輕重量。將馬達與車體以棉線連接，使用 4.0V 之電壓驅動馬達，使馬達轉動將棉線收起。將模組由下而上拉起，車體將貼著轉角前進，如此可測得於轉角處的振盪數值。由於馬達本身具有高度，固定用保麗龍可以使馬達將棉線上拉時，車子的前輪在上升過程中不會翹起。

圖十一、實驗裝置示意圖





圖十二、實驗裝置側視圖



圖十三、實際裝置側視圖

五、實驗五: 觸覺回饋手套的製作

（一）製作實驗模組

首先先將內磁喇叭放入手套手指的末端，並將電線由前方抽出。使用串聯的方式串接五個內磁喇叭分別連接 arduino 板。並將加速規和搭載板黏貼在手套上手背的部分，經由編寫程式可以讓內磁喇叭因轉動角度不同而發出聲音與振動。

圖十四、觸覺回饋手套設計圖

（二）實驗的程式撰寫

1.驅動加速規 MPU6050

```
MPU6050 accelgyro;
Servo servo1;
int16_t ax, ay, az;
int16_t gx, gy, gz;
int val;
int prev;
const int tweeter=8;
void setup() {
Wire.begin();
Serial.begin(38400);
Serial.println("Initializing I2C devices...");
accelgyro.initialize();
servo1.attach(7);
Serial.println("Testing device connections...");
Serial.println(accelgyro.testConnection() ? "MPU6050 connection successful" : "MPU6050
connection failed");
}
void loop() {
accelgyro.getMotion6(&ax, &ay, &az, &gx, &gy, &gz);
Serial.print(az); Serial.print("\t");
delay(100);
```

2.宣告 val 為加速規測得的 az(Z 軸方向的加速度)

```
val = az;
```

3.如果 val 值小於 5000，不輸出電壓；

val 值介於 5000~6000，輸出 262HZ(低音 Do)；

val 值介於 6000~7000，輸出 294HZ(低音 Re)；

・・・

val 值介於 12000~13000，輸出 523HZ(中音 Do)；

val 值介於 13000~14000，輸出 587HZ(中音 Re)；

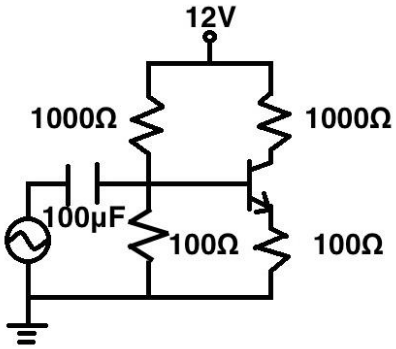
・・・

依此類推至 val 值大於 30000，輸出 1568HZ(高音 Mi)

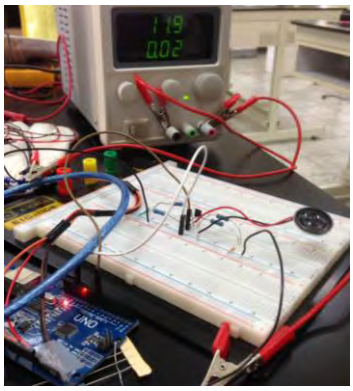
```
if (val    < 5000){tone(tweeter,0);}
else if (val    >= 5000,val <6000) {tone(tweeter, 262,16);}
else if (val    >= 6000,val <7000) {tone(tweeter, 294,16);}
・・・
else if (val >= 12000,val<13000) {tone(tweeter,523,16);}
else if (val >= 13000,val<14000) {tone(tweeter,587,16);}
・・・
else{tone(tweeter,1568,16);}
}
```

（三）放大訊號（音量）的電路

由於我們所製作的裝置中，五個內磁喇叭串聯，在實驗過後發現，其所產生的振動沒有預期來的明顯，所以我們以下列電路來將整個實驗的訊號放大，確實有聽到比未接電路時的聲音來的明顯變大了，得以產生明顯的回饋。



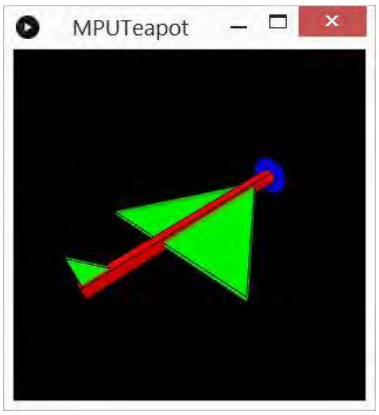
圖十五、放大訊號電路圖



圖十六、實際放大訊號圖

（四）與視覺結合

在有了觸覺的回饋後，我們進一步與視覺結合。利用加速規內建的 MPU Teapot demo 改寫，當手旋轉時，飛機也會跟著旋轉。



圖十七、MPU Teapot demo

（五）使用藍芽模板與手機結合

圖十八是使用 APP Inventor 所設計的畫面，以前面的材質砂紙、木板和保麗龍板進行輸出，點選後，會進入圖十九的畫面，按下開始以感受材質的觸覺。

圖十八、APP Inventor 設計畫面

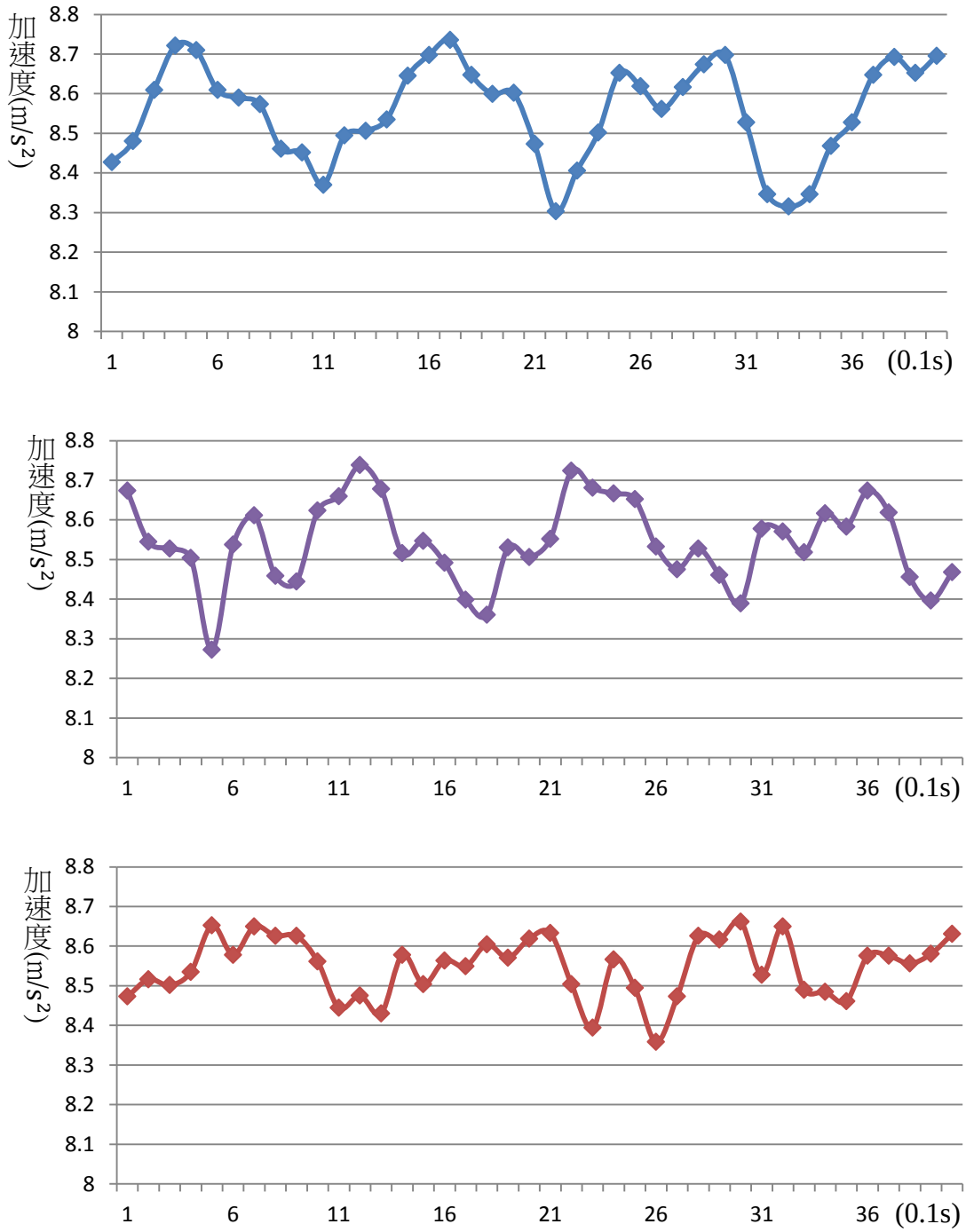
圖十九、材質設計畫面

伍、研究結果

一、實驗一：使用 arduino 與三軸加速規驗證水盆中水面的振盪為簡諧運動

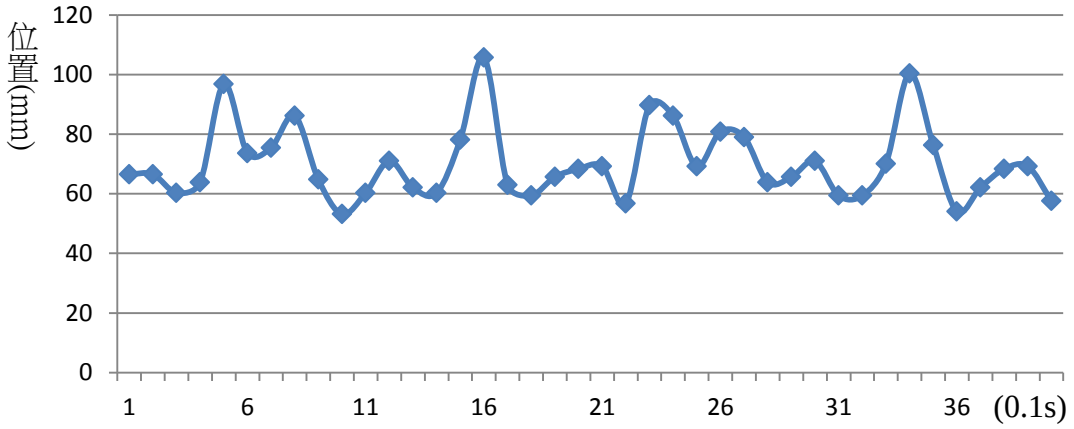
（一）實驗結果

以下我們所測得的實驗數據圖表，以每 0.1 秒輸出一組訊號。



圖二十、由加速規所測得的三次實驗數據圖

使用錄影的方式，並用 tracker 軟體分析水面標的位置與時間關係圖，所得的 Z 方向（鉛直方向）對時間的位置關係如下圖，位置量值以初靜止水面高度 70mm，水盆底部是 0 位置為參考位置。



圖二十一、由錄影所測得的實驗數據圖

（二）結果分析：

由上面四圖可看出用 arduino 與加速規裝置或錄影方式皆可看出水面的週期性，但又不是可以很精確地對應出週期的值，所以我們透過

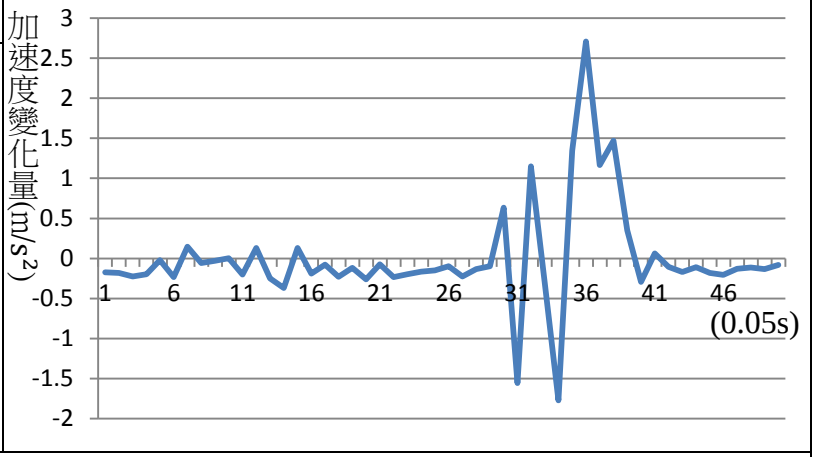
傅立葉轉換：

傅立葉原理指出任何連續測量的時序或信號，都可表示為不同頻率的正弦波信號的無限疊加。而根據傅立葉原理創立的傅立葉變換算法利用直接測量到的原始信號，以累加方式來計算該信號中不同正弦波信號的頻率、振幅和相位；幫助我們改變傳統的時間域分析信號的方法，進而轉到從頻率域分析問題，就可計算出較準確的週期範圍。（引用參考資料七）

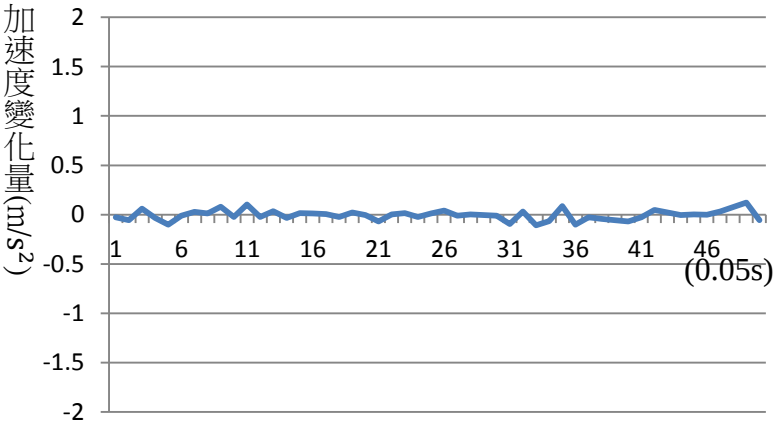
因此在第陸點的研究討論中我們會將上述圖形經傅立葉轉換出較精準的對應頻率推得週期範圍，並與理論值相比得到誤差範圍。

二、實驗二：使用 arduino 與加速規探討在不同粗糙水平面上移動物體之鉛直方向振動

（一）實驗結果

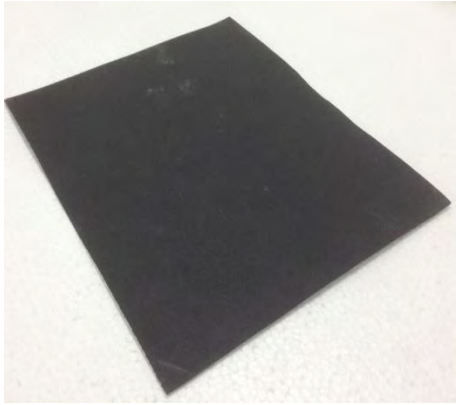
實驗桌面	
	

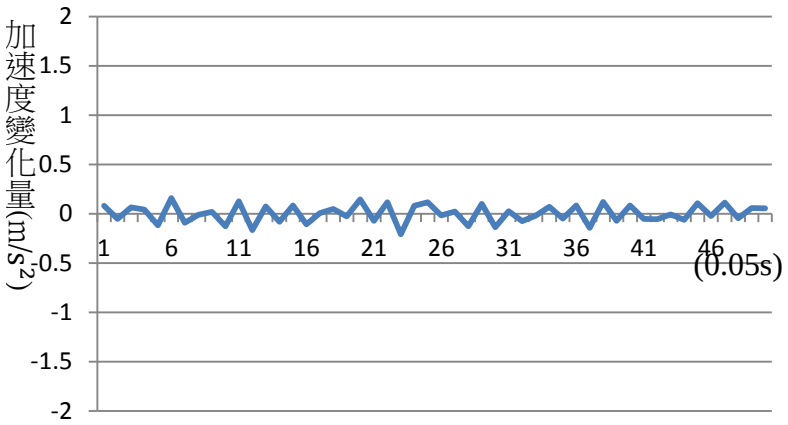
由振盪圖形中可以發現到，一般實驗桌面雖然大部分都接近光滑平面，加速度變化量多介於-0.5~0.5m/s²之間，但偶而會有大幅度的加速度變化。根據我們的推測，一般的實驗桌面因為長期使用，在不經意的情況下，可能出現刮痕或是有任何的突起物，使得實驗車滑過表面時，產生大幅度的加速度變化。由此可推知，實驗桌材質的表面較為平滑，雖然耐酸耐鹼，但容易產生刮痕，而影響到接觸表面的觸感。

保麗龍板	
	

由振盪圖形中可以發現到保麗龍板變化量加速度介於-0.1~0.1m/s²，振盪的幅度非常小。但由觀察而得，使用之保麗龍板由約直徑 0.6 公分的圓柱狀單體組合而成，雖然表面看似粗糙，但所量測的加速度變化量極小。推測保麗龍材質十分軟且具有彈性，當實驗車放於此材質板上，可能因重力而擠壓保麗龍。因保麗龍質軟，為良好的吸震材質，故當實驗車於保麗龍上滑行時，產生的振動大多被保麗龍吸收，因此得到的振盪數值趨於平均，振盪小。

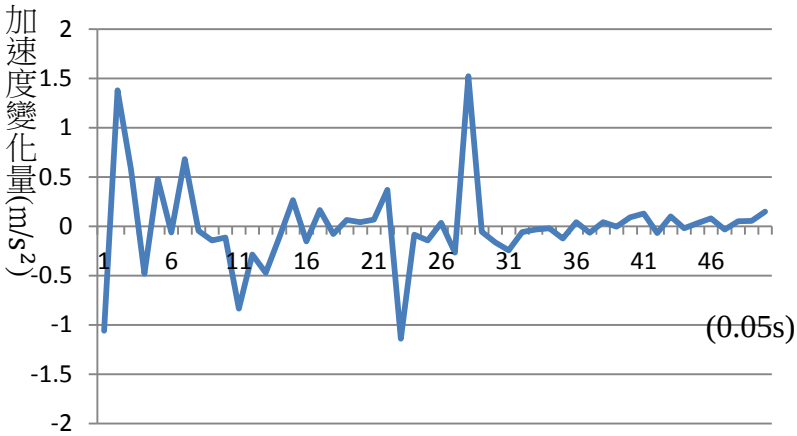
砂紙



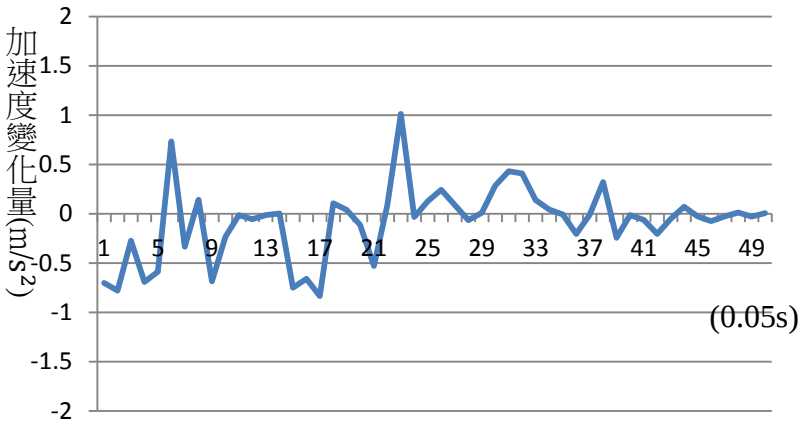


由振盪圖形中，可以發現到砂紙加速度介於-0.20~0.15 m/s^2，振盪值與保麗龍板相似，幅度也非常小。但由觀察可發現相較於保麗龍板，砂紙的振盪十分平均，推測砂紙為機器製造，粗糙質平均分布，故在時間內所測得的振盪，變化幅度小且平均。相較於保麗龍板，砂紙的振盪數值介於-0.20~0.15 m/s^2之間，而保麗龍板為-0.1~0.1 m/s^2之間，推測因為砂紙材質的硬度大於保麗龍，也因為前述保麗龍質吸震的原因，加速度較砂紙小。

軟木塞板



由振盪圖形中，可以發現到軟木塞板的振盪十分不均，有些產生大幅度的振盪，有些則產生幅度很小的振盪，振盪範圍介於-1.0~1.5 m/s^2之間。推測因為軟木塞板，因為與保麗龍板一樣，皆屬於質軟材料，故會產生幅度小的振盪，而因為軟木塞具有非常多的孔隙，而產生大幅度的振盪。但兩者的交替出現，仍是我們有待商榷的。

<table>
<tr><td>木板</td><td rowspan="2"> 
</td></tr>
<tr><td> </td></tr>
<tr><td colspan="2">由振盪圖形中，可以發現到木板的振盪數值介於-0.5~1.0 m/s^2，振盪沒有明顯的規律。推測使用的木頭紋路多樣，所造成的振盪並無規律可言，與其他材質有顯著的不同之處。</td></tr>
</table>

表二、五種材質粗糙面上物體的振盪圖與討論

（二）將桌面據烈幅度的振盪扣除後，計算五種材質之振盪圖中鉛直方向加速度變化量之平均值，可得平均加速度變化量： 保麗龍板<桌面<砂紙<木板<軟木塞板

材質	加速度變化量之平均值(cm/s^2)
保麗龍板	3.9382
桌面	8.4210
砂紙	11.4783
木板	25.2756
軟木塞板	25.5826

我們以幾種常見材質平板，使用 arduino 與加速規探討不同粗糙水平面之特性，從另一面向來分析各材質之特徵與辨別各材質之差異性。

三、實驗三：探討在各種粗糙面上物體的振盪對應之靜摩擦係數

（一）實驗結果

材質	角度平均值(°)
保麗龍	28.44
木板	32.50
軟木板	35.41
砂紙	41.37

表三、材質面恰下滑角度

材質	靜摩擦係數
保麗龍	0.5417
木板	0.6371
軟木板	0.7109
砂紙	0.8809

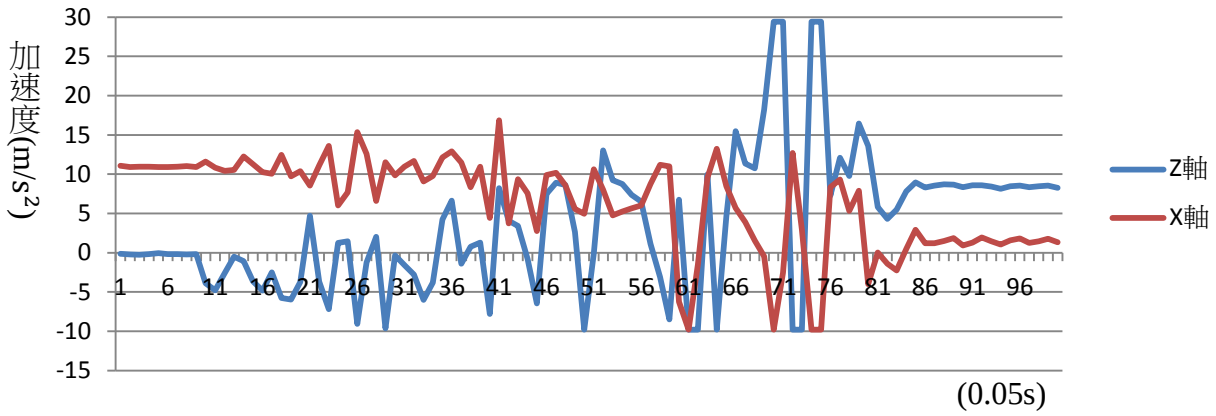
表四、角度對應之靜摩擦係數值

＊由於實驗桌面無法傾斜，故無法測量數據。

由實驗二、三結果相較來看，一般用摩擦係數主要是在辨別表面的粗糙程度；而透過 arduino 與加速規所得數值不僅可反映不同材質表面之差異，其材質的柔軟堅硬程度也可以有些區別出來，另外 arduino 與加速規所得數值是得到瞬間的即時變化，因此未來在分析上可依據各種需求情況來做調整。

四、實驗四：探討在轉過直角（90°）時六軸加速規的振盪變化

（一）實驗結果



圖二十二、X 軸（水平）與 Z 軸（鉛直）之振盪圖（m/s^2）

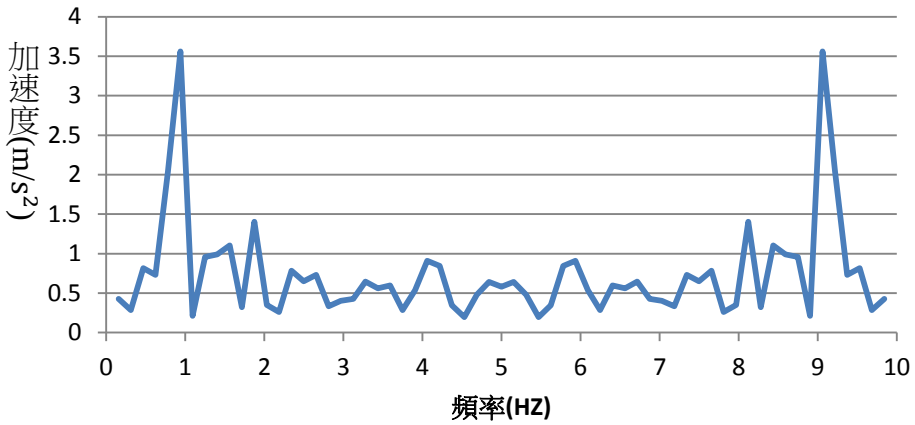
由圖形中，發現實驗數值在中間 X 軸（水平）與 Z 軸（鉛直）對稱，且位於中間（轉角處）的振盪圖形明顯較兩側（非轉角處）振盪劇烈。我們希望在未來可以利用此圖的振盪模式，若加速規感測到這樣的變化時，代表位於轉角處，而使用 arduino 將訊號輸出給內磁喇叭，產生振動。

陸、研究討論

一、實驗一：驗證物體在水中的振盪為簡諧運動之討論

（一）由實驗圖形中可直接觀察到於 2.1 秒約可含有二個全波，則$T \fallingdotseq 1.05s$，但是就如實驗結果那所述，直接看週期似乎不那麼準確，因此用 Excel 做以下傅立葉分析。

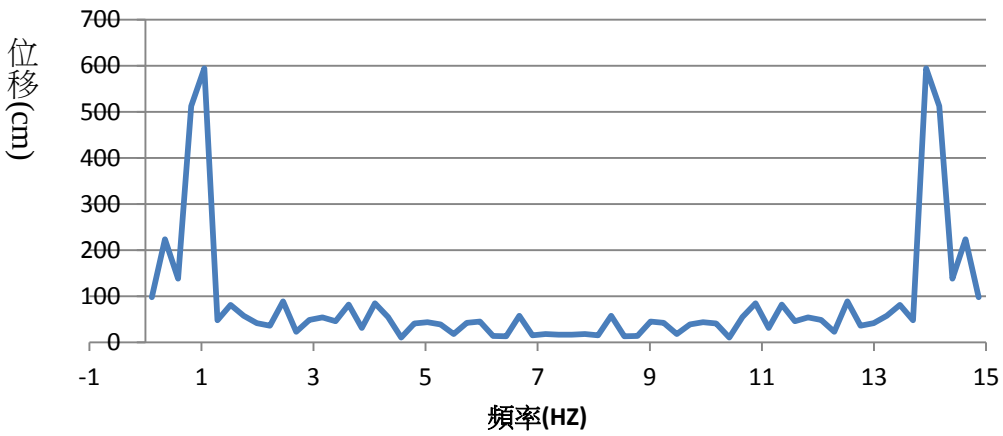
（二）由圖二十三，利用傅立葉分析，可以得到峰值所對到的頻率為 0.94±0.31HZ，所以得到的週期為 1.07±0.44 秒。



圖二十三、由加速規數據所得的傅立葉分析圖表

（三）並由理論可推得$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{\pi L}{\sqrt{2.5gH}}$，將我們之水盆數據帶入$T = \frac{\pi \times 0.46}{\sqrt{2.5 \times 9.787 \times 0.07}} \fallingdotseq 1.1s$。

（四）由圖二十四，使用錄影的方式，以傅立葉分析 Z 方向（鉛直方向）振盪。可以得到峰值所對到的頻率為 1.05±0.31HZ，週期約為 0.95±0.41 秒。



圖二十四、錄影所得數據之傅立葉分析圖表

（五）所得實驗誤差：使用加速規所得的週期誤差為-43.7%～37.3%。使用錄影所得的週期誤差為-51.0%～23.6%。由此實驗我們可以證明以加速規數據與錄影所得數據相似，皆可證明水波振盪屬於簡諧運動，而且此用加速規所得到的值離理論值較接近，所以確實可以使用 arduino 與加速規探測物體的小規模的振盪。

（六）由於我們的實驗中，為人為推動水盆使水體產生運動，可以推知因為施的力不相同，所產生的振幅會有大小的差異，但由理論知道週期是不受影響的。利用我們的理論得知，在方程式中$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{\pi L}{\sqrt{2.5gH}}$，並沒有振幅這項變因，所以可以證明週期與產生振動的力大小無關，故以人不固定的推力來產生水面振盪並不會影響我們的實驗結果分析。

二、使用 arduino 與加速規探討在各種粗糙面上物體的振盪之討論

計算各材質 z 軸振盪平均值，平均加速度變化量：保麗龍板<桌面<砂紙<木板<軟木塞板

三、實驗三之討論

（一）由我們的實驗結果可得知（未加入桌面）

1.平均加速度變化量：　保麗龍板<砂紙<木板<軟木塞板

2.靜摩擦係數值：　保麗龍板<木板<軟木塞板<砂紙

（二）使用加速規所測得的砂紙加速度變化量值較小：有關於該部分的原因，是我們日後有待商榷的，但目前可以確認保麗龍板所造成的振盪與靜摩擦係數皆為最小的，而可以得知整體而言較為光滑材質產生的振盪規模與靜摩擦係數皆小。

（三）由其餘三種材質板，可以推得我們能使用加速規所量測得的單位時間內振盪的加速度變化量，初步推斷該材質板的粗糙程度，進而判斷材質種類。

（四）由實驗二、三結果相較來看，一般用摩擦係數主要是在辨別表面的粗糙程度，而透過 arduino 與加速規所得數值不僅可反映不同材質表面之差異，其材質的柔軟堅硬程度也可以有些區別出來，另外 arduino 與加速規所得數值是得到瞬間的即時變化，因此未來在分析上可依據各種需求情況來做調整。

柒、結論

一、可使用加速規來驗證水波為簡諧運動，且加速規可驗證細微的振盪。

二、由加速規所測出的振動圖形可推論造成該振動的原因，並由我們所測得的五種材質可得平均加速度變化量 保麗龍板<桌面<砂紙<軟木塞板<木板。

三、由實驗三中可計算出靜摩擦係數：砂紙>軟木塞板>木板>保麗龍板，與實驗二比較可以發現到靜摩擦係數與振動圖形以下關係：

（一）整體而言較為光滑的材質振動規模與靜摩擦係數皆小

（二）軟性材質的靜摩擦係數較無法使用振動規模來表示

（三）我們可使用振動圖形來初步判斷材質的種類

四、使用六軸加速規測得的二維振動圖形， X 與 Z 軸會成會產生對稱的形式，**我們可把空間變化以數據量化方式呈現**。

捌、未來展望

一、利用其他實驗方法，找尋我們未完成推論之實驗原因。

二、將前述觸覺回饋手套四部分結合，並連接藍芽，和手機結合，實現二維平面下的觸覺回饋機制。

玖、參考資料

一、Thomas Harold Massie(1993)・*Design of a Three Degree of Freedom Force Reflecting Haptic Interface*・Massachusetts Institute of Technology

二、Kenji Inoue, Fuyuki Kato, and Suwoong Lee(2009)・*Haptic Device Using Flexible Sheet and Air Jet for Presenting Virtual Lumps under Skin*・IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems

三、Yvonne Jansen, Thorsten Karrer, Jan Borchers(2010)・*MudPad: Tactile Feedback and Haptic Texture Overlay for Touch Surfaces*・RWTH Aachen University

四、Nils Landin(KTH Royal Institute of Technology),Katherine J. Kuchenbecker, WilliamMcMahan, Joseph M. Romano(2010)・*Dimensional Reduction of High-Frequency Accelerations for Haptic Rendering*・University of Pennsylvania Scholarly Commons

五、Joseph M. Romano,(Student Member), and Katherine J. Kuchenbecker(Member)・ *Creating Realistic Virtual Textures from Contact Acceleration Data*・IEEE TRANSACTIONS ON HAPTICS, VOL. 5, NO. 2, APRIL-JUNE 2012

六、物理奧林匹亞國家代表隊選訓工作委員會(2008)・*2009 年國際物理奧林匹亞競賽 國家代表隊選訓教材 第一冊*・物理奧林匹亞國家代表隊選訓工作委員會

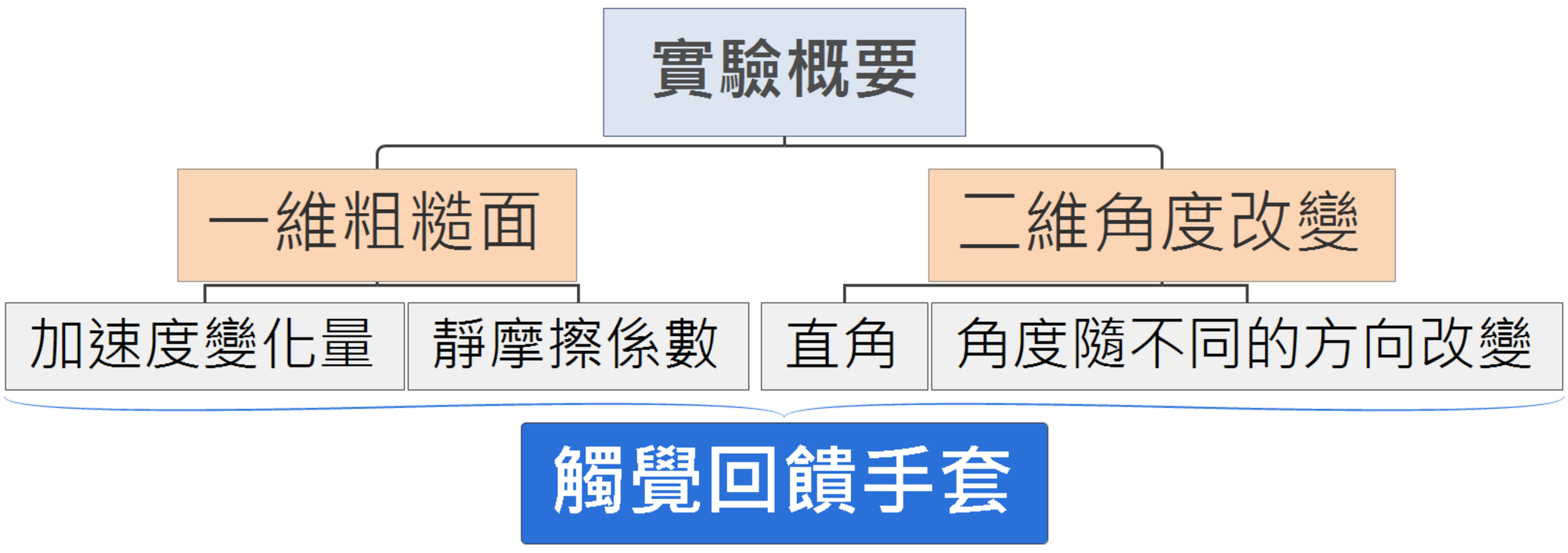
七、FFT 後的物理意義。2015 年 9 月 8 日。取自 https://read01.com/7DA3N4.html。

【評語】052307

1. 本作品主要進行觸覺回饋實驗。整套實驗系統應用 Arduino 微處理 UNO 板、三軸加速規、六軸加速規來完成。除外，本研究也實際進行多項實驗和討論，具完整性。
2. 此研究主題目前為熱門科技應用技術之一，具新穎性。
3. 以加速規取得力的回饋數據，作為觸覺模擬之依據，有實用價值。
4. 整體實驗結果與所謂真實觸覺，仍有些差異，未來尚有改進空間。

作品海報

摘要



※觸覺回饋，讓使用者感受模擬的觸碰反應結果，能在不接觸物體的情況下，模擬物體表面質感或紋理細節等細微的觸覺資訊。

壹、研究目的

一、用arduino與**六軸加速規**探討等速移動物體在各種水平粗糙面之特徵。

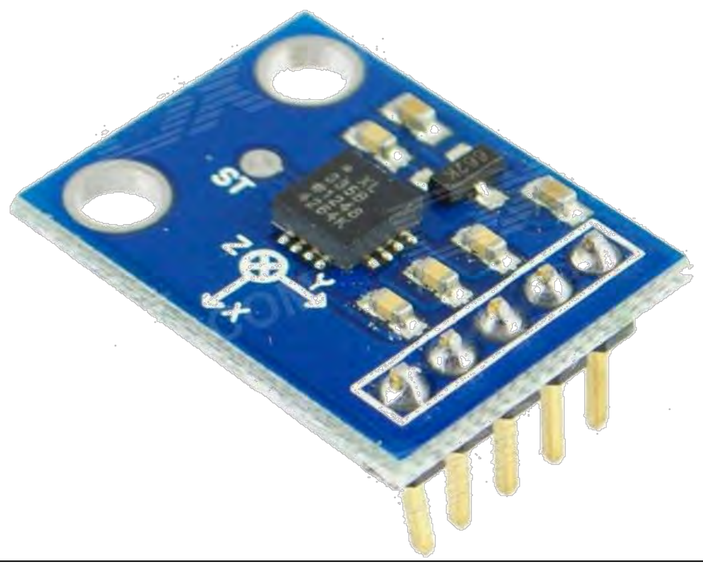
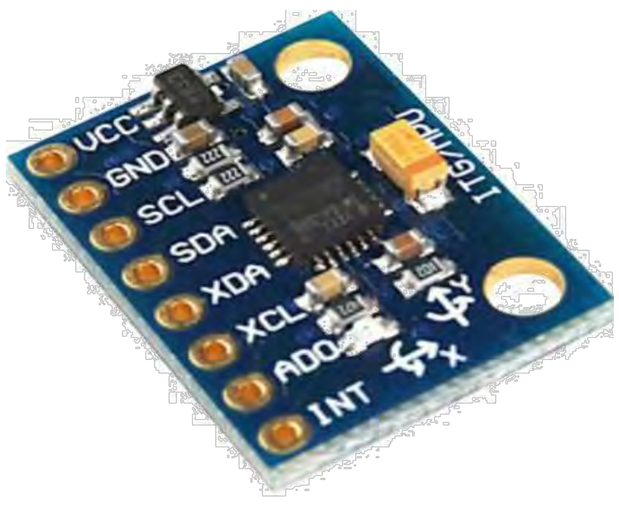
二、探討以加速規接收等速移動物體在不同材質的水平粗糙面之振動圖形與摩擦係數的關係。

三、使用arduino與加速規探討直角下所造成的觸覺回饋機制差異。

四、實際製造出一套器材模擬，並與虛擬實境結合。

貳、研究設備及器材

一、實驗器材

Arduino UNO開發板	三軸加速規GY-61	六軸加速規MPU-6050
		

Arduino是一種開放原始碼的單晶片微控制器，採用開放原始碼的軟硬體平台，建構於簡易輸出/輸入介面板，本實驗用於接收加速規得到之訊號A，並轉換成訊號B給內磁喇叭作為輸出。

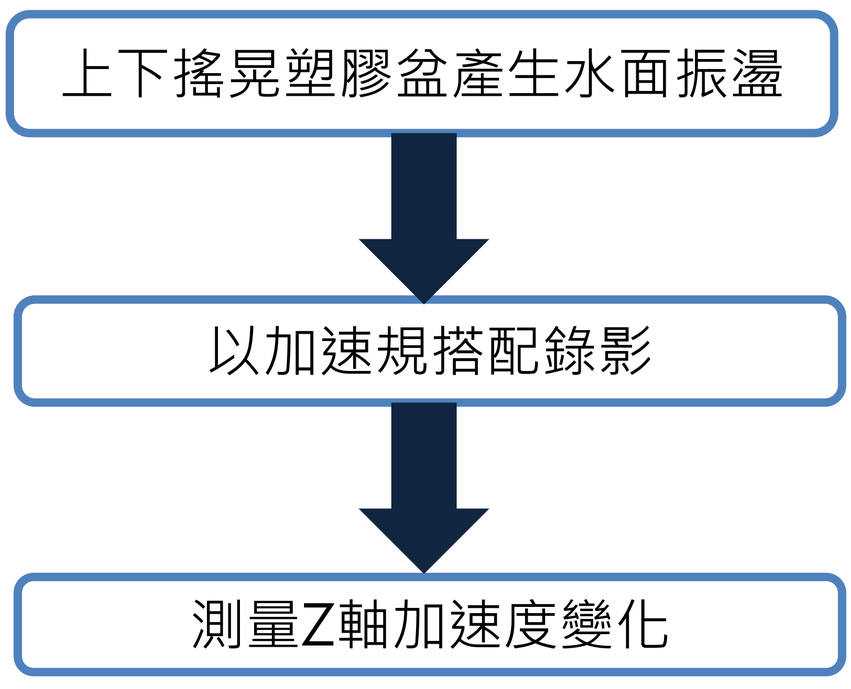
加速規是透過將質量塊在振動時的位移量轉為電子訊號輸出的一種振動測量工具。由壓電材料作為電子訊號產生來源,透過質量位移促使壓電材料形變釋出電荷，再依據電荷釋出量來判斷振動大小,可直接將測量結果輸出。輸出之單位為每一重力加速度每毫伏特(mV/g),我們使用靈敏度±2g故:

$$\text{數據}A(mV/g) \div 16384 \times g(m/s^2) = A'\ (m/s^2)$$

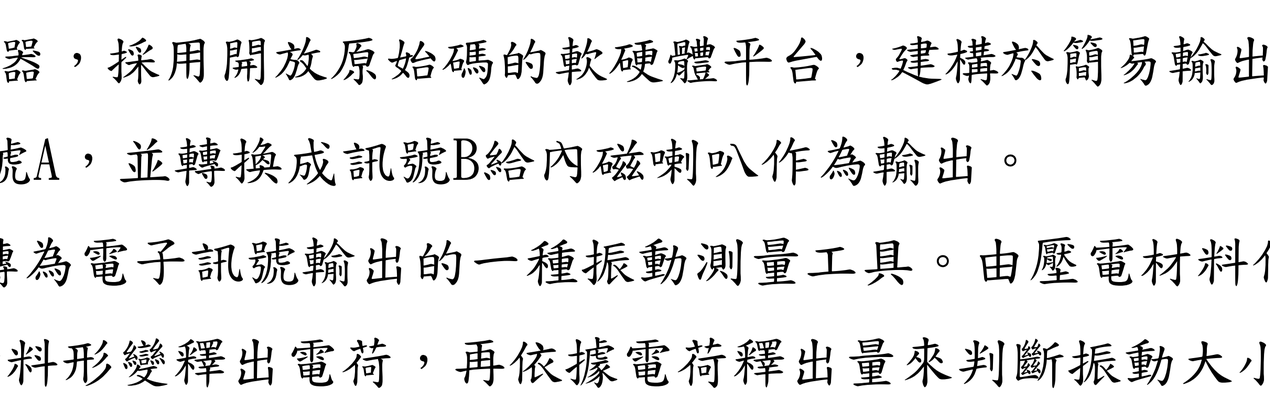
而得出加速度公制單位。

二、實驗器材測試

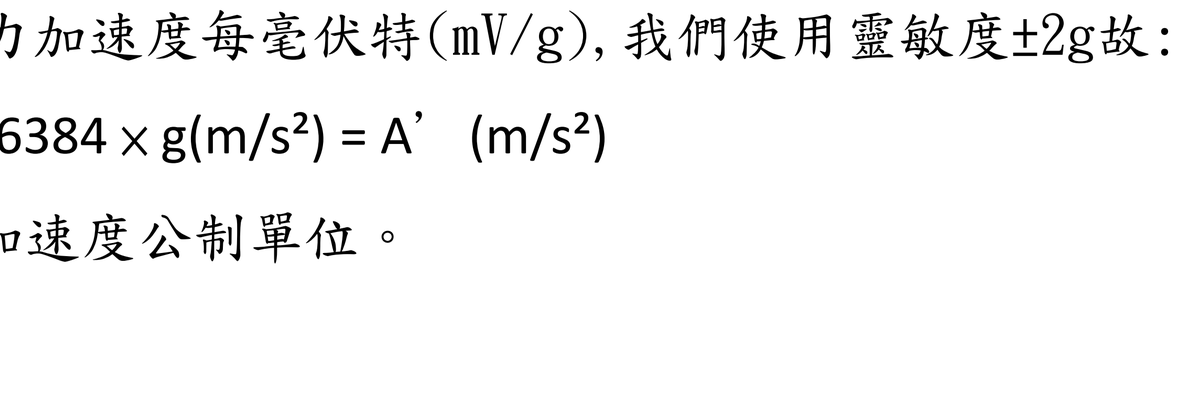
(一)實驗設計



(二)實驗結果



▲由加速規所測得的三次實驗數據圖



▲由錄影所測得的實驗數據圖

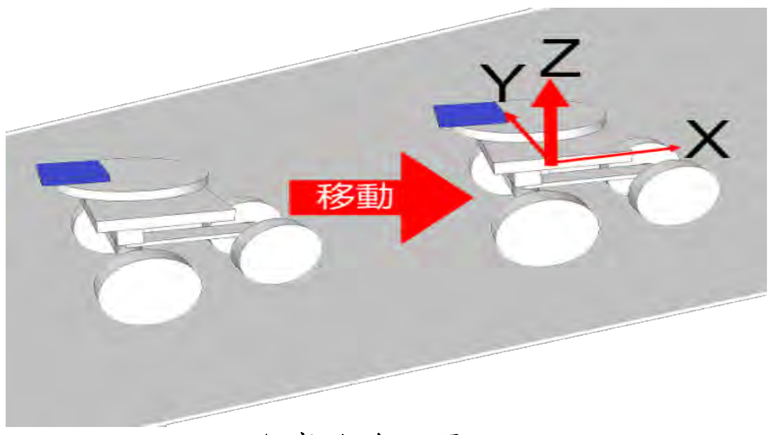
參、研究過程與結果討論

實驗一：以arduino與六軸加速規探討各種粗糙面上物體的振盪。

(一)實驗流程：

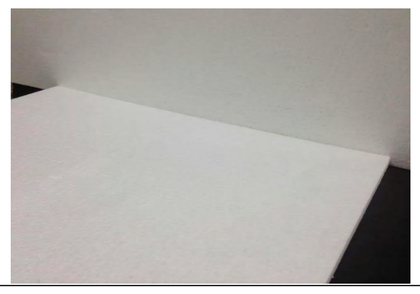
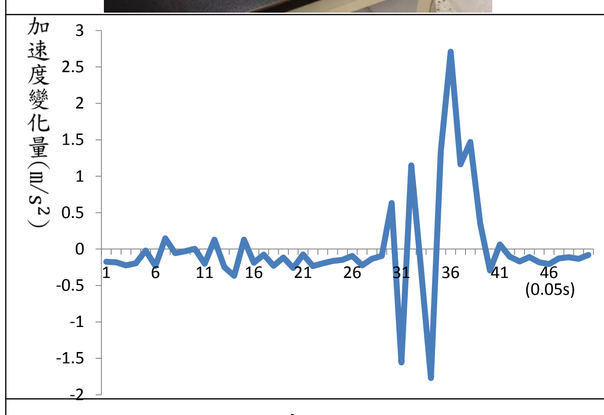
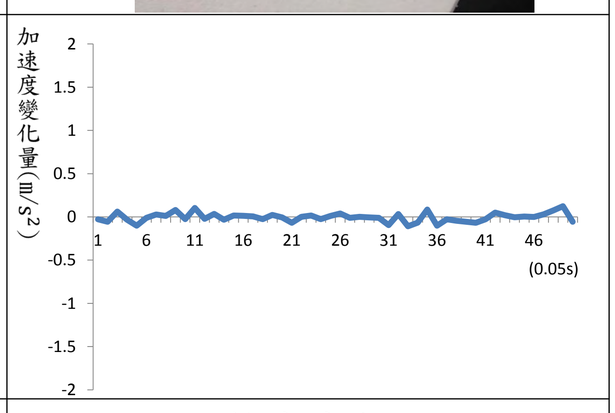
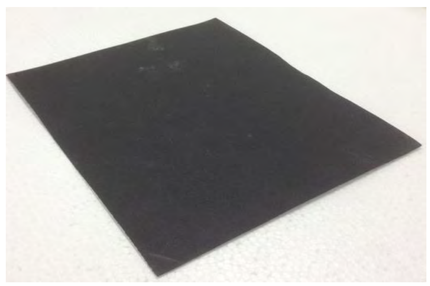
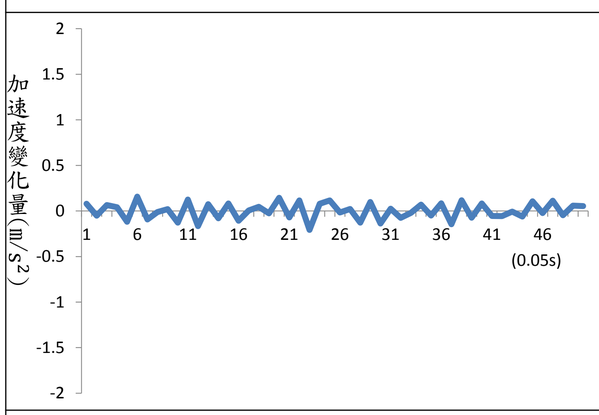
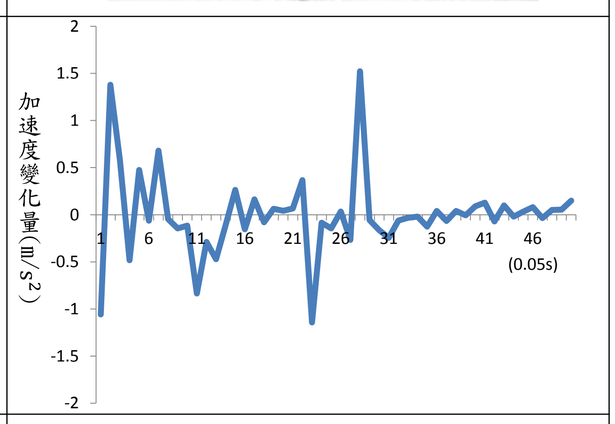
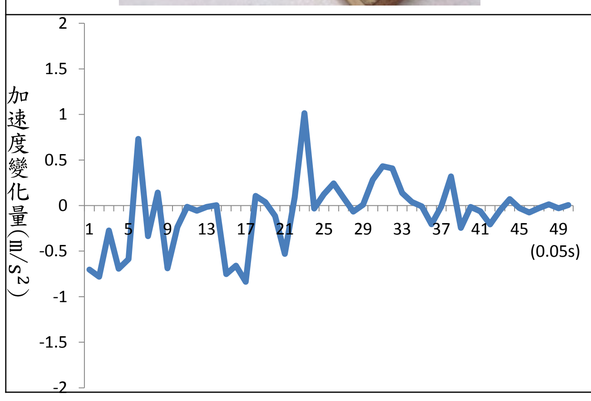
車體裝置放在水平粗糙板上 → 輸入1.5伏特之電壓於馬達，使實驗車向前滑行 → 測量Z軸加速度變化

▲實驗車



▲實驗流程圖

(二)實驗結果如下表：

實驗桌面	保麗龍板
	
	
砂紙	軟木塞板
	
	
木板	
	

(三)計算鉛直向加速度變化量之平均值，可得平均加速度變化量：**保麗龍板<桌面<砂紙<木板<軟木塞板**

▼各材質面地加速度變化量離均差

材質	加速度變化量離均差(cm/s²)
保麗龍板	3.9382
桌面	8.4210
砂紙	11.4783
木板	25.2756
軟木塞板	25.5826

我們以幾種常見材質平板，使用arduino與加速規探討不同粗糙水平面之特性，從另一面向來分析各材質之特徵與辨別各材質之差異性。

(四)實驗討論:

依圖形與加速度變化量離均差分為三類：

吸震材質	均勻材質	不規則材質
• 保麗龍板	• 實驗桌面 • 砂紙	• 軟木塞板 • 木板

分類標準: 變化幅度

實驗二：探討各種粗糙面上物體的振盪對應之靜摩擦係數。

(一)實驗流程：

將材質板斜放，一端貼緊桌面，另一端用棉線綁著，緩緩上提。 → 搭配錄影的方式，以tracker分析恰要下滑的角度

(二)實驗結果：

▼材質面恰下滑角度與對應之靜摩擦係數值

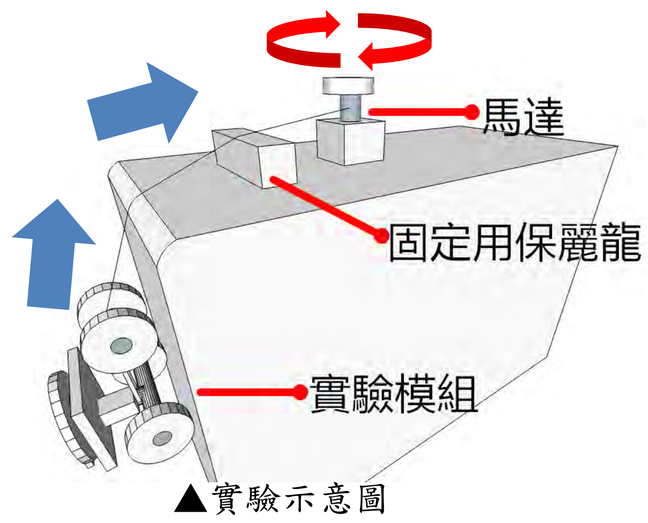
材質	角度平均值(°)	靜摩擦係數
保麗龍	28.44	0.5417
木板	32.50	0.6371
軟木板	35.41	0.7109
砂紙	41.37	0.8809

(三)實驗討論

由材質板中，可以推得我們能使用加速規所量測得的單位時間內振盪的加速度變化量，初步推斷該材質板的粗糙程度，進而判斷材質種類。

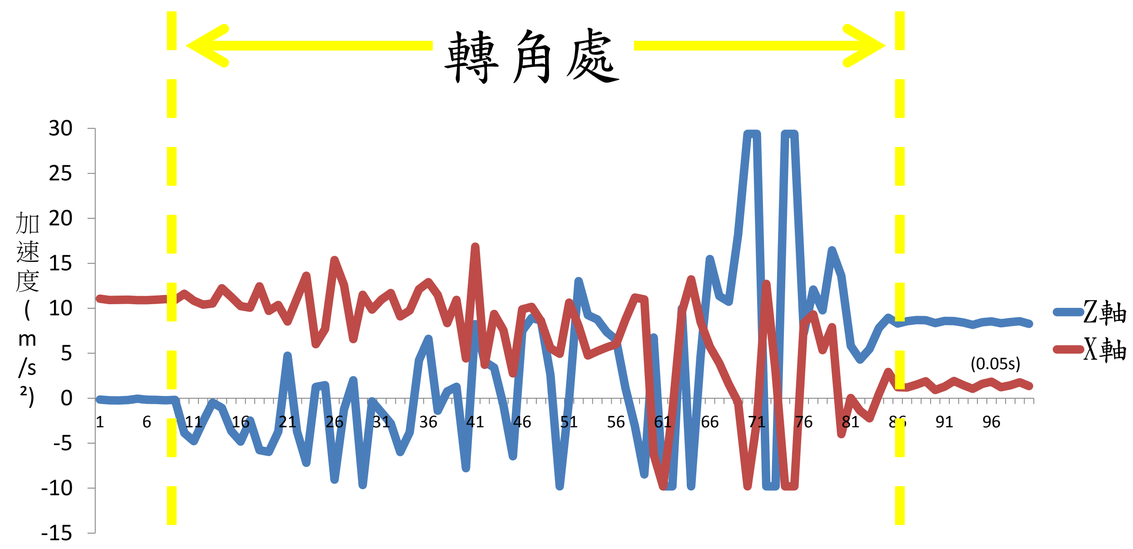
實驗三：探討在轉過直角(90°)時六軸加速規的振盪變化

(一)實驗流程：



▲實驗示意圖

(二)實驗結果：



▲二維振盪圖形

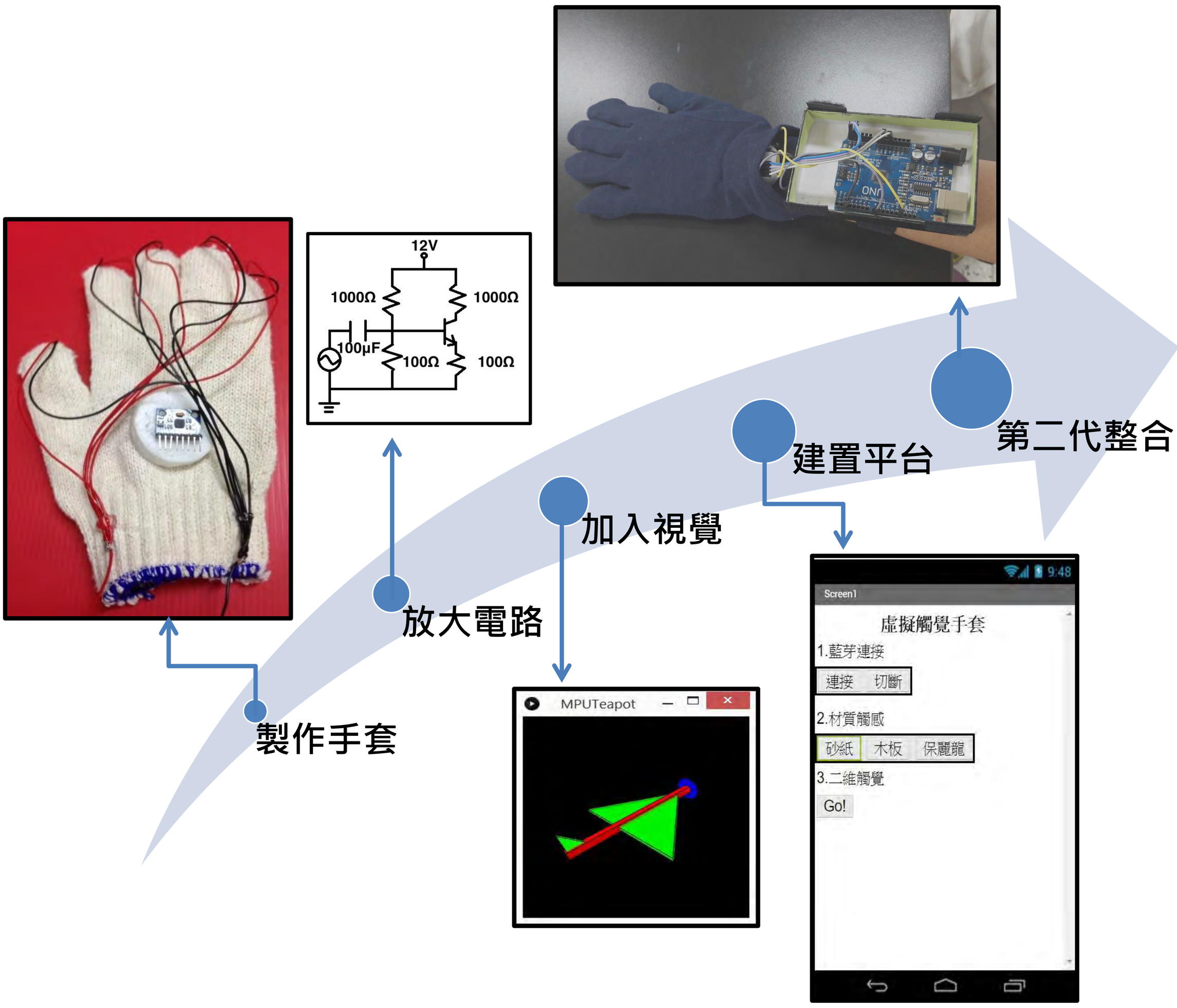
(三)實驗討論：

由圖形中，發現實驗數值在中間X軸（水平）與Z軸（鉛直）對稱，且位於中間（轉角處）的振盪圖形明顯較兩側（非轉角處）振盪劇烈。

實驗五：觸覺回饋手套的製作

（一）實驗流程：

1. 將內磁喇叭放入手套手指的末端，並將電線由前方抽出。以並聯的方式串接五個喇叭並分別連接arduino。將加速規和搭載板黏貼在手套上手背的部分。
3. 放大訊號（音量）的電路。
4. 與視覺結合。
5. 使用藍芽模板與手機結合。



肆、結論

一、由加速規所測出的振盪圖形可推論造成該振盪的原因，並由我們所測得的五種材質可得平均加速度變化量：保麗龍板<桌面<砂紙<木板<軟木塞板。

二、由實驗三中可計算出靜摩擦係數：保麗龍板<木板<軟木塞板<砂紙。

三、使用六軸加速規測得的二維振盪圖形， X與Z軸會成會產生對稱的形式。

伍、未來展望

一、找尋實驗二各種材質加速規圖形和實際表面粗糙度的相關性、我們未完成推論的實驗結果的原因，和找尋更有利的證據支持加速規的實驗結果。

二、將手套與手機透過藍芽結合，實現二維下的觸覺回饋機制。

陸、參考資料

一、Thomas Harold Massie(1993)．*Design of a Three Degree of Freedom Force Reflecting Haptic Interface*．Massachusetts Institute of Technology

二、Kenji Inoue, Fuyuki Kato, and Suwoong Lee(2009)．*Haptic Device Using Flexible Sheet and Air Jet for Presenting Virtual Lumps under Skin*．IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems

三、Yvonne Jansen, Thorsten Karrer, Jan Borchers(2010)．*MudPad: Tactile Feedback and Haptic Texture Overlay for Touch Surfaces*．RWTH Aachen University

四、Nils Landin(KTH Royal Institute of Technology),Katherine J. Kuchenbecker, WilliamMcMahan,Joseph M. Romano(2010)．*Dimensional Reduction of High-Frequencey Accelerations for Haptic Rendering*．University of Pennsylvania Scholarly Commons

五、Joseph M. Romano,(Student Member), and Katherine J. Kuchenbecker(Member)． *Creating Realistic Virtual Textures from Contact Acceleration Data*．IEEETRANSACTIONS ON HAPTICS, VOL. 5, NO. 2, APRIL-JUNE 2012

六、物理奧林匹亞國家代表隊選訓工作委員會(2008)．2009年國際物理奧林匹亞競賽 國家代表隊選訓教材 第一冊．物理奧林匹亞國家代表隊選訓工作委員會