

中華民國第 57 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 生活與應用科學科

最佳團隊合作獎

030807

磁懸浮

學校名稱：新北市立中山國民中學

作者： 國二 王 勻 國二 李承晟	指導老師： 蘇彥學
---------------------------------	------------------

關鍵詞：濾波法、Arduino、電磁鐵

摘要

本研究探討如何讓磁鐵穩定懸浮，分別藉由光二極體與霍爾感測器偵測懸浮體位置變化，由 Arduino 內部計時器計時並計算懸浮體移動速度，藉由位置偏移量與移動速度來動態調整電磁鐵輸出的磁力大小。實驗中我們發現，使用光二極體來偵測懸浮體位置變化較使用霍爾感測器時訊號的穩定性較高可達穩定懸浮，但可偵測之間距較窄，僅在雷射光的直徑(約 3mm)間；使用霍爾感應器時可藉由運算放大器將訊號放大，並藉由濾波法處理訊號達到穩定懸浮，其調整間距較寬可達 5mm 以上；其中我們發現算術平均濾波法的雜訊抑制效果較中位數濾波法的效果更適合磁懸浮。

壹、 研究動機

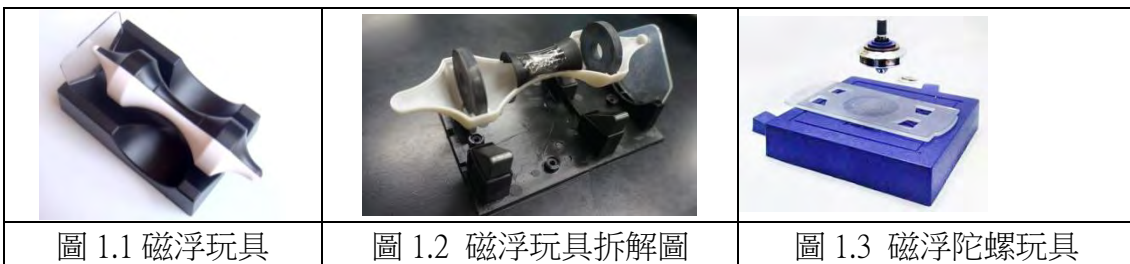
由於磁浮系統的幾項特性，諸如低噪音、低功率消耗（無摩擦）、高速、潤滑問題的減少等，所以常常被廣泛運用在生活中。例如近代發明的磁浮列車，就是利用磁鐵同極相斥的原理，將摩擦力降到最低，創造目前最穩、速度最快的列車。為了探討磁浮系統如何運作，我們實際拿兩個相同大小的圓形永久磁鐵 A 與 B：

實驗一：把磁鐵 A 固定在桌上，使 N 極朝上，再拿磁鐵 B(N 極朝下)置於磁鐵 A 之上方，發現無論如何小心擺放，磁鐵 B 仍然會翻面吸合在一起。

實驗二：把磁鐵 A 懸吊起來(S 極朝下)，再拿磁鐵 B(N 極朝上)置於磁鐵 A 的下方，發現無論如何小心放置，磁鐵 B 不是向上吸合，就是直接落下墜地。

於是我們上網搜尋，發現市面上有很多磁懸浮的科學玩具，像圖一這個科學玩具，雖然能保持懸浮，但仍然需與垂直豎立的透明壓克力片保持接觸，以維持穩定懸浮，若移開壓克力片懸浮體無法保持懸浮，會立即與下方磁台吸合。

拆開這個磁懸浮玩具，如圖 1.2，發現構造很簡單，由永久磁鐵之斥力達成懸浮。



另外，也有陀螺型的磁懸浮玩具，如圖 1.3，要讓陀螺達成懸浮，首先要調整磁台基座的水平，再調整陀螺的配重，然後手擰陀螺使陀螺在壓克力片上旋轉，再輕輕的抬高壓克力片達到約 3 公分的高度，陀螺就有機會滯空懸浮，但是一旦陀螺自旋漸慢，轉動慣量無法維持轉軸方向，陀螺即墜落。

若拆開底部的磁台基座，發現其構造為一大環形永久磁鐵，小陀螺則為一小型的圓形永久磁鐵。若想要達成磁懸浮，除了要維持陀螺旋轉之外，還需要巧妙的前置作業。經過我們多次試驗，要讓永久磁鐵透過斥力懸浮，無論如何仔細小心地放置，結果都以失敗收場，就像要讓鐵釘尖端立於桌面上相當困難。最後我們認為如果要讓磁鐵懸浮，勢必要加上一個不斷調整偏移位置的力量。這個調整的力量，必須因應磁鐵的位置而作大小的調整。因此我們必須能快速偵測磁鐵的位置，經由運算之後能立即調整磁力的大小來控制平衡。

本研究內容與課程相關的有：


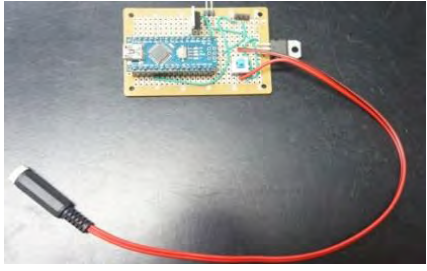
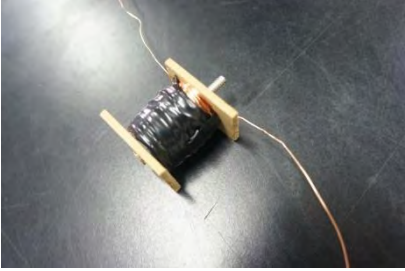

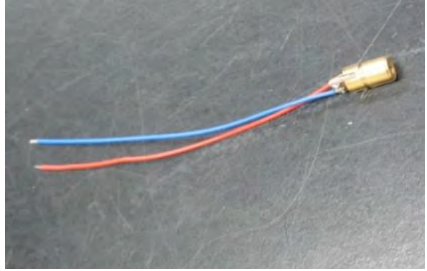






- 一、九下自然第二章，磁場與電磁鐵(安培定律)
- 二、九上自然第一章，位移與平均速度(偵測懸浮體的位移與平均速度的算法)
- 三、八上自然第三章，光的直進性(光學原理偵測懸浮體的位置)
- 四、九上自然第四章，電路設計(感測器連結原理)
- 五、九下數學第三單元，算術平均數與中位數(濾波法時應用)

貳、 研究目的

- 一、探討以位置誤差量決定電磁鐵調整力時是否能穩定懸浮
- 二、同時考慮懸浮物位置誤差值與移動速度來調整是否可達到平衡
- 三、探討穩定懸浮與 PWM 輸出(電流)之間的關係
- 四、討論懸浮物重量與穩定懸浮度與工作電流的關係
- 五、探討霍爾感應磁懸浮是否能沿用光感測程式碼
- 六、探討不同濾波法對於磁懸浮濾波效果的影響
- 七、探討算術平均數的組數 x 對於磁懸浮濾波效果的影響

參、 研究設備及器材

表 3.1 研究器材一覽

智高積木	Arduino 主機板	電磁鐵
		
感光器	雷射	電腦
		
釹鐵硼磁鐵	質量砝碼—螺絲	質量砝碼—螺帽
		
3503 霍爾感應器	高斯計	
		

肆、 研究過程或方法

根據安培定律，電流通過導線會產生磁場，且和導線上的電流大小成正比。也就是當電流越大，所產生的磁場越強，故可藉由電流大小改變磁場強弱，達到上述不斷調整的力量。因此我們使用圖六所示之電磁鐵達成穩定懸浮的目的。

圖 4.1 為我們測量本實驗所使用的電磁鐵所產生之磁場大小(毫特斯拉)和 Arduino PWM 輸出(0~255)所產生之電流的關係圖，而測量方法為將高斯計緊貼電磁鐵，再藉由改變 Arduino 的 PWM 輸出值(後文將提及)，觀察高斯計與 pwm 輸出值的關係，可看見兩者大致上成正比：

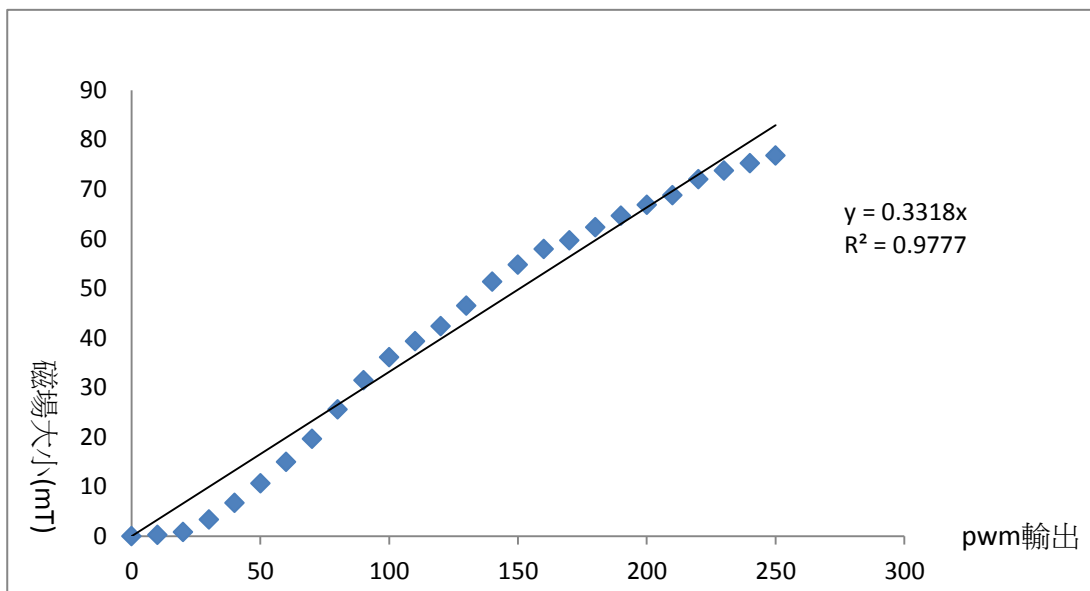


圖 4.1 大小與 pwm 輸入的關係

第一代：光感應磁懸浮

一、裝置設計概念與原理

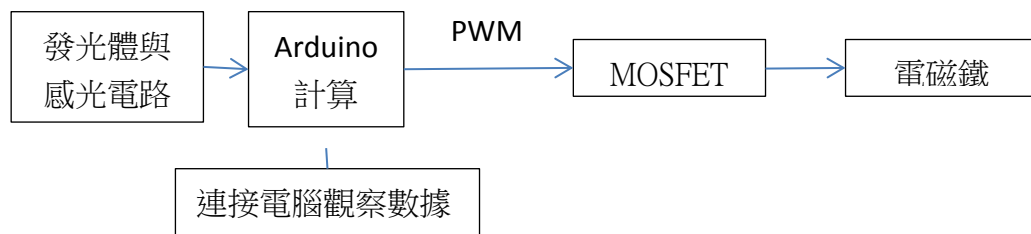


圖 4.2 光感應磁懸浮裝置設計概念圖

由於前述玩具皆缺乏可以讓磁鐵平衡的調整力，於是我們利用電磁鐵搭配 Arduino 的控制，藉此達到平衡的條件。先藉由發光電路向感測器照光，資料傳回 Arduino 後分析遮光程度，得知相對位置，再藉由 Arduino 運算出相對應的 pwm 輸入值，經 pwm 的數位輸出至 MOSFET，使電磁鐵產生相對應的磁場，達成穩定懸浮。

(一) 偵測懸浮體位置的方法

要使 Arduino 控制磁力的輸出，就必須有改變的依據(變數)。首先，我們以懸浮物的相對位置作為變數，所以我們使用雷射與感測器組成的光柵偵測磁鐵的相對位置。

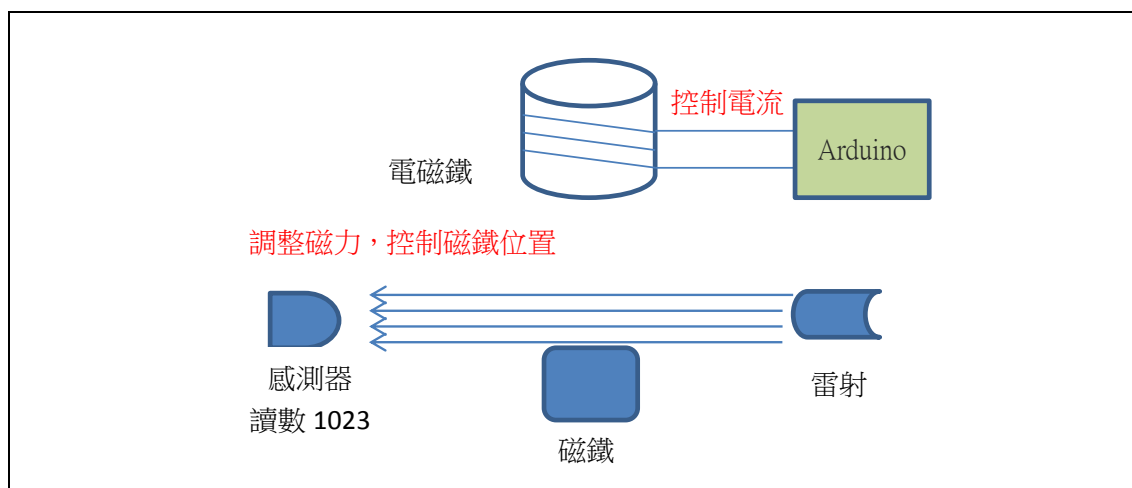


圖 4.3，以感測器讀數代表磁鐵的位置。當感測器完全無遮蔽時讀數是 1023。

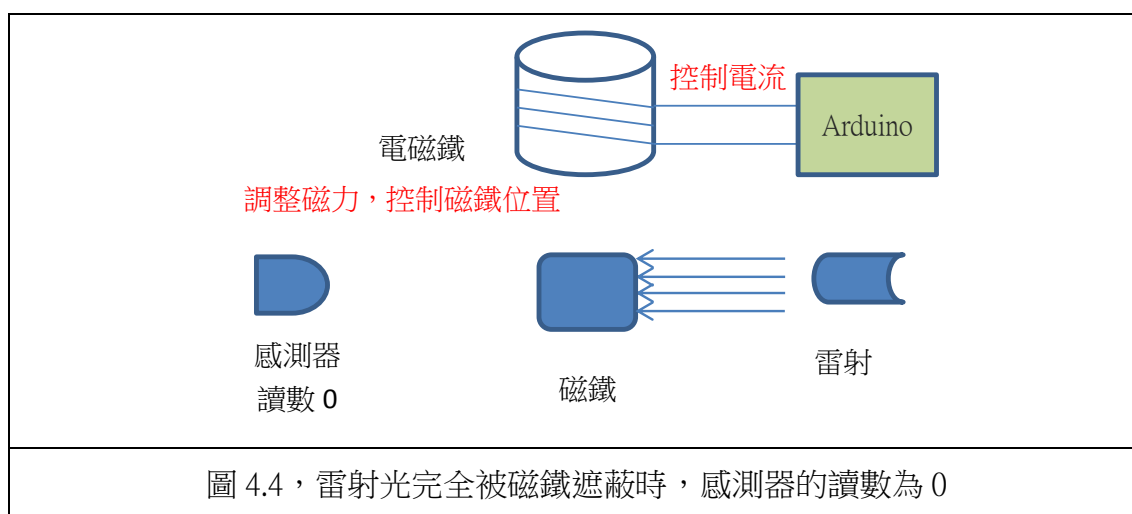
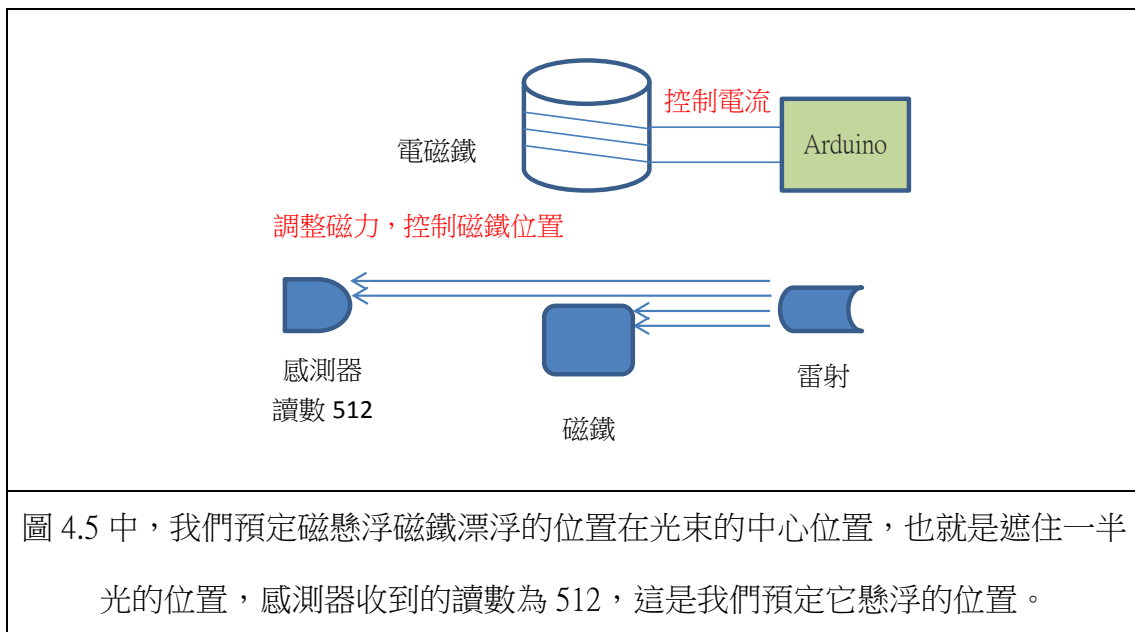


圖 4.4，雷射光完全被磁鐵遮蔽時，感測器的讀數為 0



(二) PWM(脈波寬度調變)

PWM 技術是一種對類比訊號電位的數位編碼方法，通過使用高解析度計數器（調變頻率）調變方波的占空比，從而實現對一個類比訊號的電位進行編碼。在 PWM 的轉換前後有兩種訊號，本實驗稱轉換前的類比訊號為 PWM 輸入，稱轉換後的數位訊號為 PWM 輸出。

(三) MOSFET(電晶體)

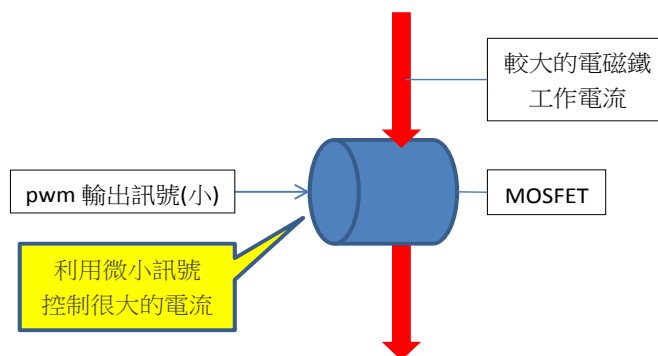


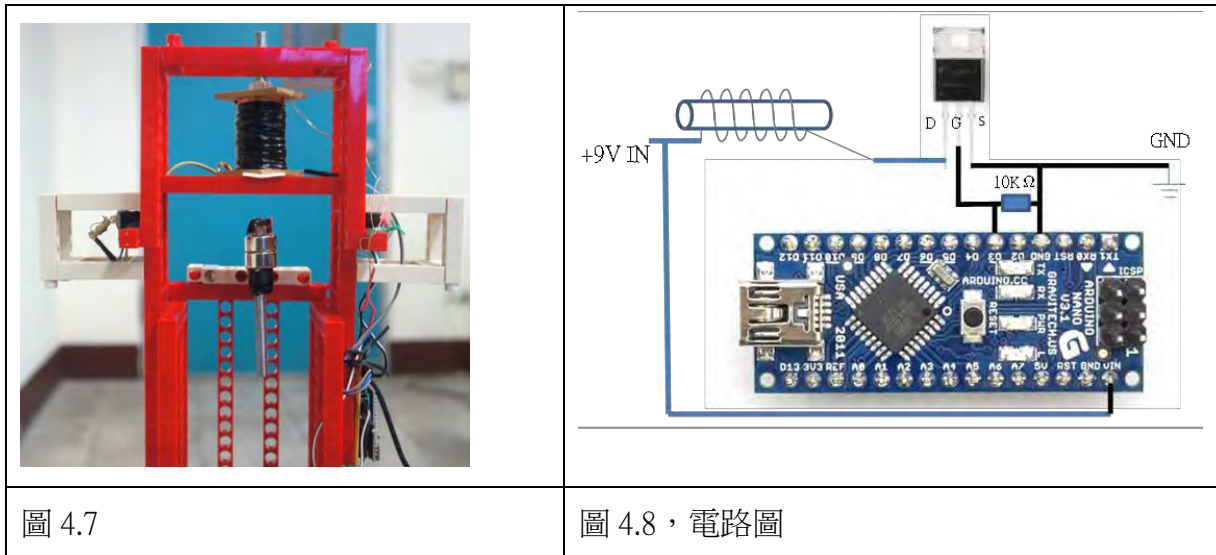
圖 4.6，MOSEF 示意圖

MOSEFT 利用較小的電訊號，控制較大的電流。

二、以懸浮物位置誤差值調整磁場大小是否可達到平衡

(一) 實驗裝置(圖 4.7)：

我們用智高積木拼了磁懸浮裝置的架子，在其上方放纏繞線圈的電磁鐵，並在左側放置 Arduino，上傳程式後使它自動調整磁力大小，藉此控制懸浮物。



(二) 程式碼設計重點(詳細程式碼請參見附錄一)：

我們將測到的讀數與預定位置相減，算出相對位置，在乘上適當的比值，得到向對應的 pwm 輸入值，並加以輸出。

1. $\text{error(誤差)} = \text{now(感光讀數)} - \text{setpoint(預定懸浮位置)}$

我們利用雷射與感測器測量出位置，上式中 now 為感測器接收到光的讀數，setpoint 為我們設定理想位置的感測讀數 512，error 為現在讀數與理想位置讀數的誤差。若以預定的懸浮位置為參考點，

2. $p(\text{pwm 輸入大小}) = k_p(\text{比值}) * \text{error(誤差)}$

我們利用 k_p 設定感測讀數與 pwm 輸入大小之間的比例。上式中 p 代表校正量(pwm 輸入大小)， $error$ 是誤差值， k_p 代表誤差值與校正量(輸出電流大小)對應的比例。

三、同時考慮懸浮物位置誤差值與移動速度來調整是否可達到平衡

(一) 實驗裝置如上，並未更動設計(如圖 4.7)：

(二) 新增程式碼設計重點(詳細程式碼請參見附錄二)：

由於只用磁鐵位置的偏差控制電力輸出，無法有效使磁鐵穩定的浮在半空中，因此，我們考慮加入新變數—速度。因為我們用的 Arduino 所測量之時間差單位可小至微秒，所以加入速度的變數，再找出速度變數與實際輸出的數學關係，即可以做更精細的微調，達到更穩定的懸浮。

$$d = k_d * (now - old) / (t - oldt)$$

上式中 d 為輸出大小， now 為現在(第 t 微秒)偵測到的讀數(末位置)， old 為上次(第 $oldt$ 微秒)偵測的讀數(初位置)， $(now - old) / (t - oldt)$ 代表磁鐵移動的平均速度，而速度與輸出大小間也需要乘上一個適當的比例，在這裡以 k_d 表示。

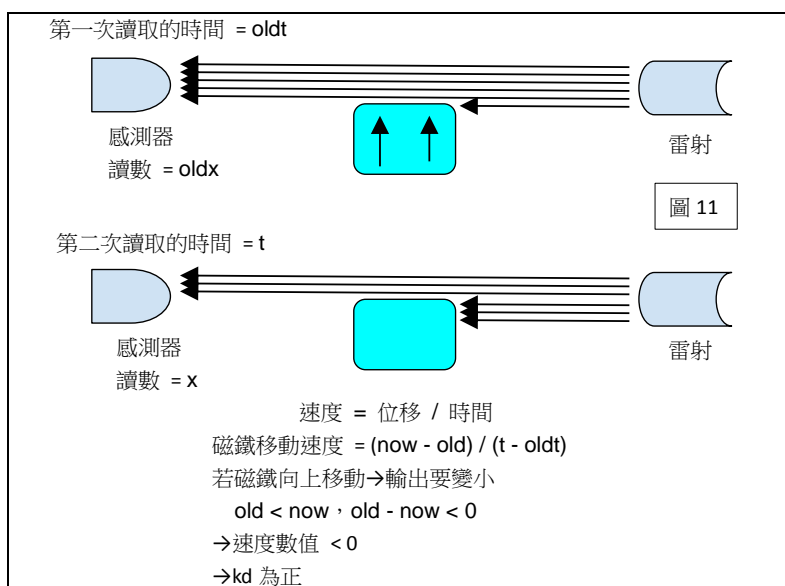


圖 4.9 懸浮子的平均速度概念示意圖

第二代：霍爾效應感應磁懸浮

一、裝置設計概念與原理

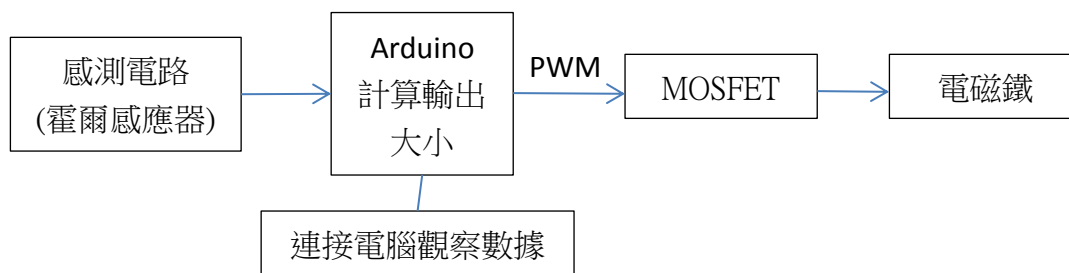


圖 4.10 裝置設計概念圖

(一) 感測電路(霍爾效應感測器)

這次我們使用霍爾效應感測器來偵測磁場大小，藉以代表磁鐵的位置。

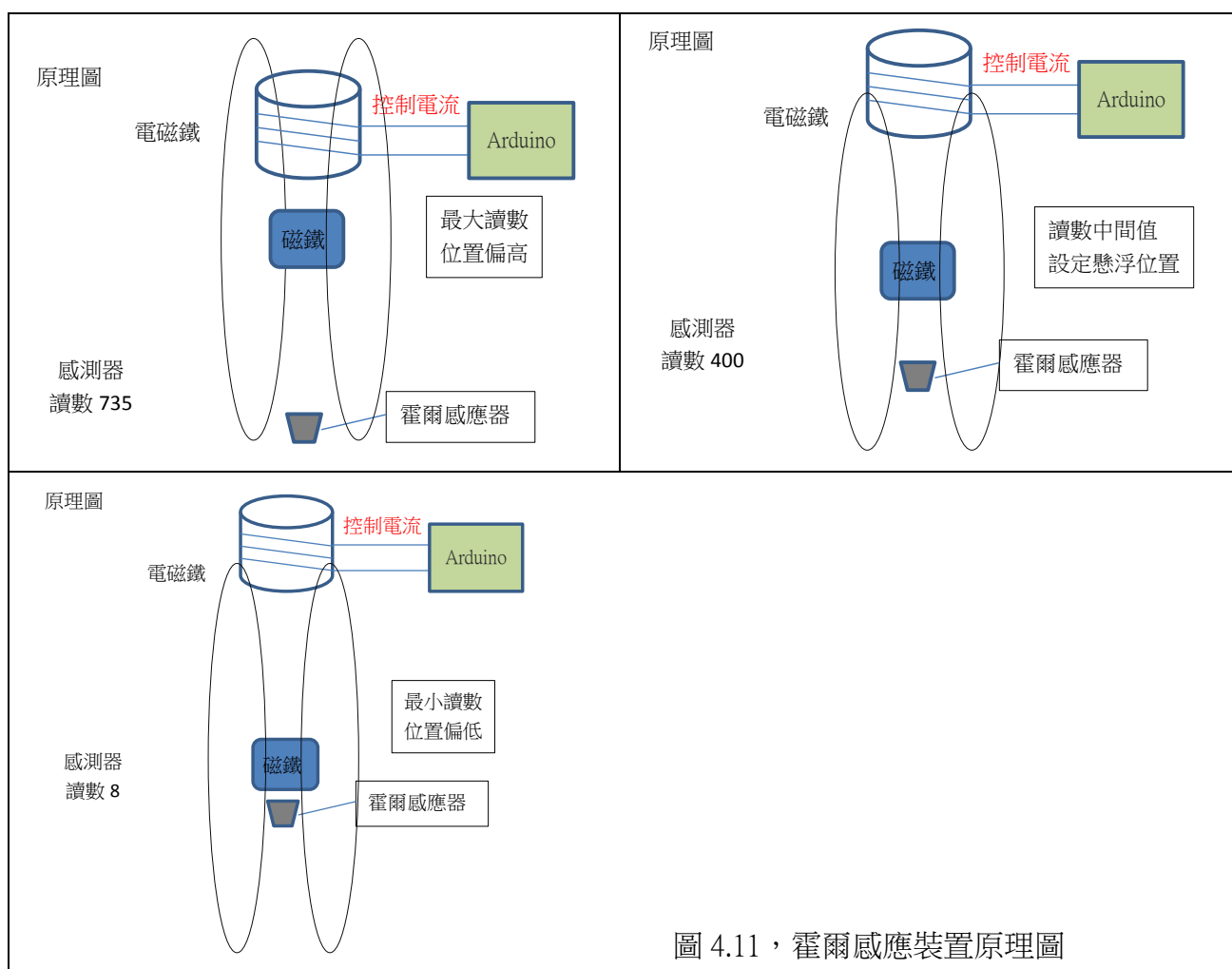


圖 4.11，霍爾感應裝置原理圖

不同於第一代光線感測裝置，第二代利用霍爾感測器感測之讀數來代表磁鐵漂浮物漂浮之位置，再將其數據處理後再用 PWM 輸出至 MOSFET，控制電磁鐵來調整懸浮物的運動狀態。

(二) 實驗裝置

我們利用智高積木拼出了放置設備的架子，在上方放置可調整磁力的電磁鐵來調整懸浮物的位置，下面則是霍爾感應器的裝置(由於空間的關係我們決定將感測器放置於下方)。

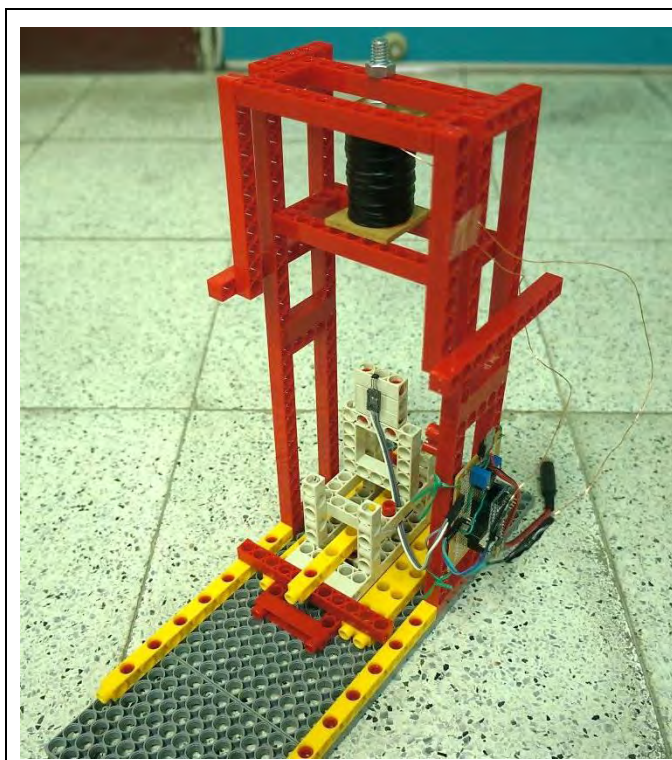


圖 4.12，實驗裝置



圖 4.13，懸浮物

二、濾波法之研究

由於霍爾感應器讀數穩定性不若光感測器那麼純淨，霍爾感應器位於磁鐵下方也會產生像單擺一樣的搖晃與電磁鐵些微的影響，因此我們需要對感測器的讀數作處理，把雜訊給過濾掉。我們使用九下數學所提及的算術平均數法與中位數法，試圖把干擾訊號去除。

(一) 算術平均數法

$$\text{算術平均數} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n}$$

其中 X 代表各資料數，n 代表資料個數

(二) 中位數法

先將資料由小到大排列，再挑選最中間的那項

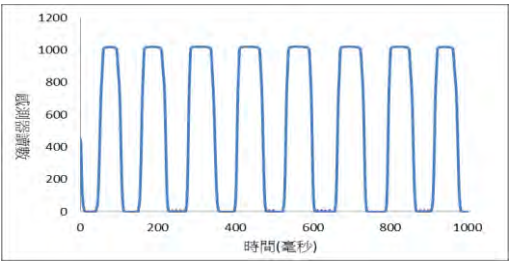
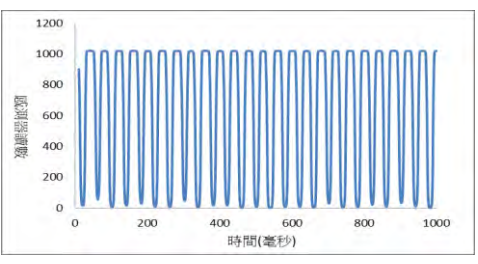
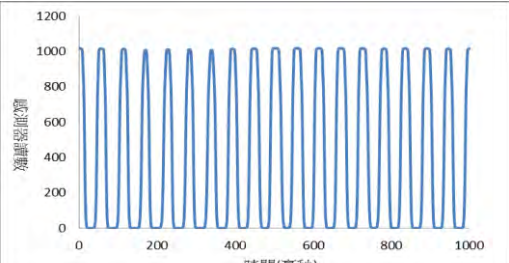
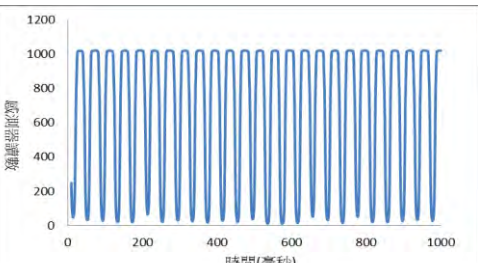
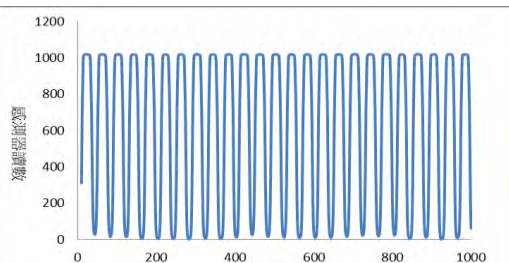
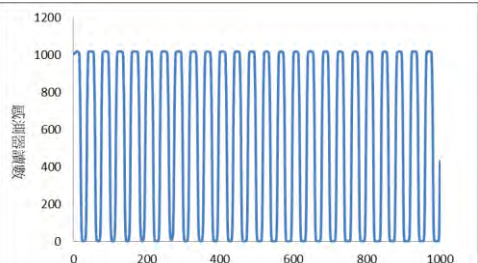
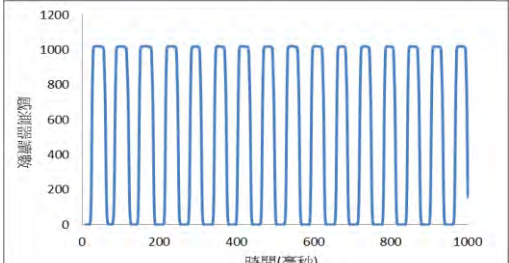
例如 1,2,3,4,5,6,7,8,9，其中 5 為中位數

伍、 研究結果與討論

本研究裝置有兩項：光感測磁懸浮與霍爾效應感應磁懸浮，其中在光感測磁懸浮的裝置中我們進行了如下的探討：

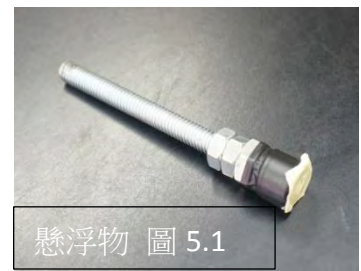
一、探討以位置誤差量決定電磁鐵調整力時是否能穩定懸浮

以下為我們針對 k_p 值進行實驗所得之結果：

表 5.1 調整 k_p 後，各 k_p 與懸浮體位置之關係			
k_p	x-t 圖	k_p	x-t 圖
0.1		1	
0.3		2	
0.5		5	
0.7			

結果分析與討論：

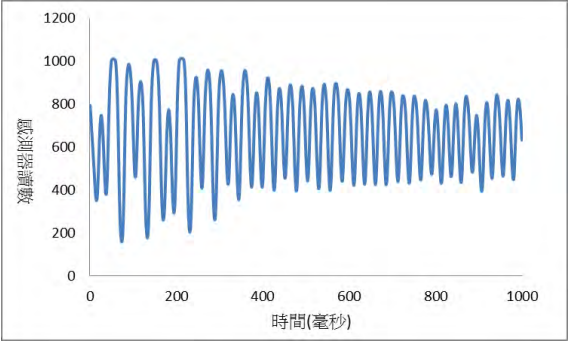
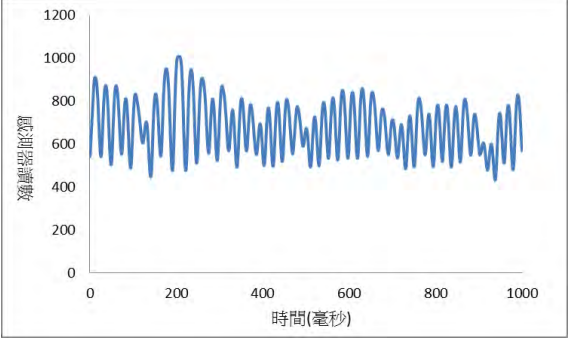
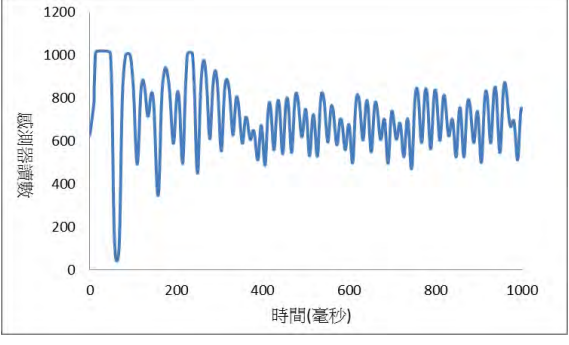
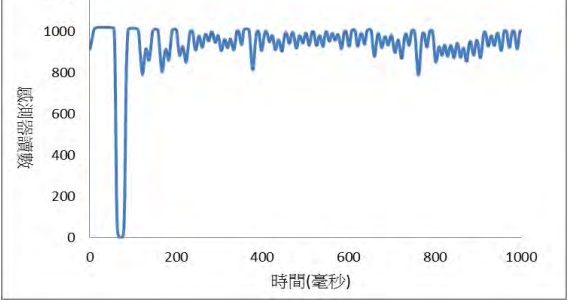
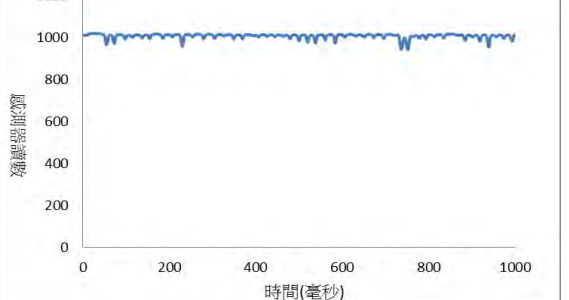
經過實驗後發現如果懸浮物放一個磁鐵很容易被吸上去，所以我們改變 k_p ，將 k_p 縮小，使輸出的電流變化變小。但最後發現在做調整的過程中，還是很不穩定(位置變動幅度大)，無法長時間懸浮。於是我們試著增加磁鐵的重量(吸附螺帽於



螺絲與磁鐵上，一次增一個)，並觀察螺帽數量與 k_p 的對應關係。可發現磁鐵重量越重， k_p 的值就要上升(增加磁力輸出改變幅度)，才能產生足夠的磁力控制磁鐵位置。但無論 k_p 與重量如何調整，依舊無法讓磁鐵位置收斂回設定值，反而越晃偏差越大，如圖，極不穩定，最終掉落。於是用位置來控制磁力輸出的實驗還需改正。

二、同時考慮懸浮物位置誤差值與移動速度來調整是否可達到平衡

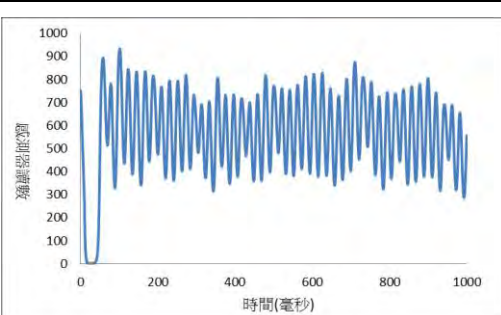
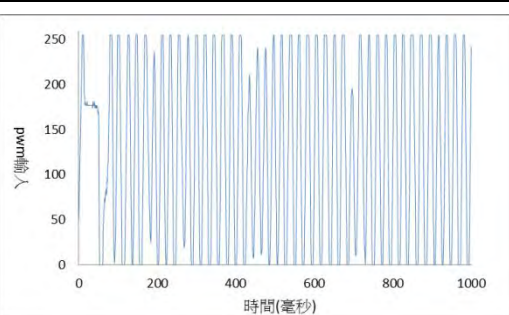
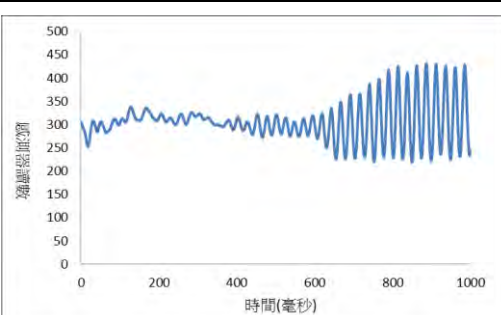
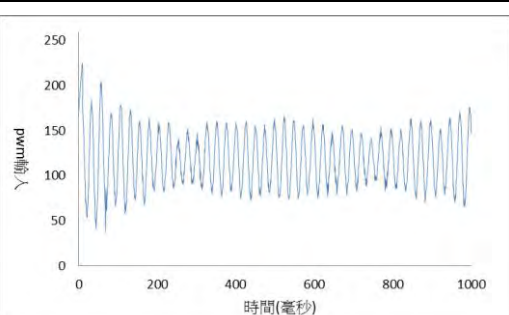
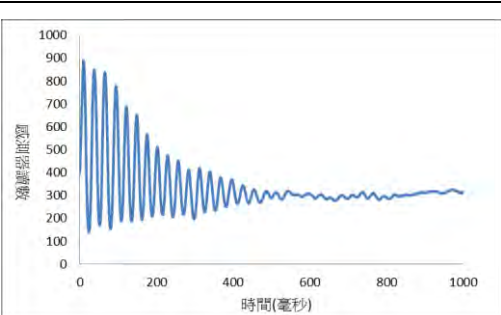
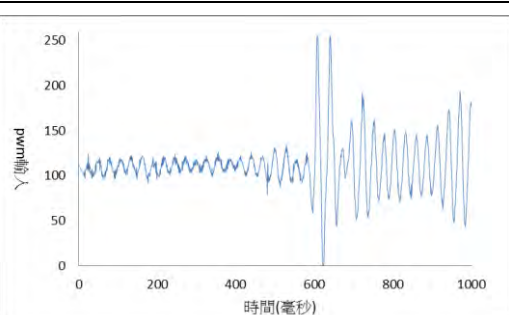
表 5.2 k_d 值與懸浮狀況關係圖		
k_d	x-t 圖	分析結果
1		位置偏差越來越大 無法穩定
2		與 $k_d=1$ 的狀況雷同

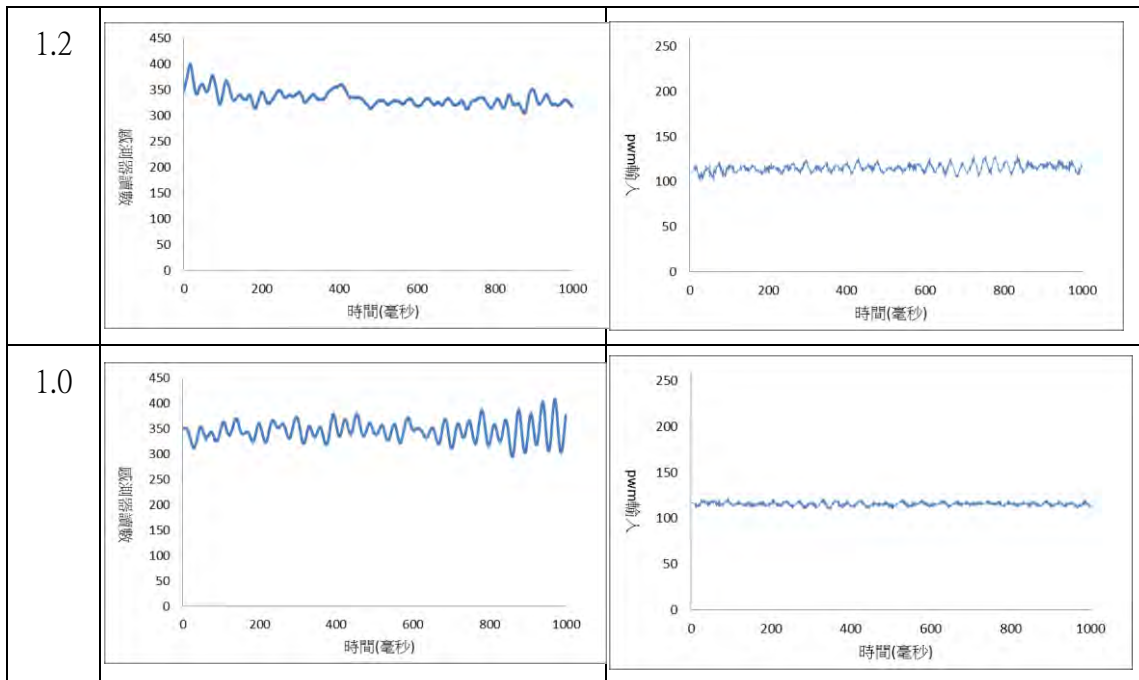
3		<p>一開始在理想位置能穩定懸浮，但如果一有晃動就容易掉落。</p>
4		<p>已達成穩定懸浮</p>
5		<p>形同於 $kd=4$ 的狀況</p>
100		<p>穩定懸浮</p>
1000		<p>穩定懸浮</p>

經過我們的測試後，發現 kd 只要大約大於 4 時，便能穩定懸浮，如上表 5.2。我們也觀察到，當磁鐵達穩定懸浮時，感測器的讀數仍然有微幅的波動，這些波動代表懸浮體小幅度的在空中振動，這些小幅度的波動很快速，肉眼也難以察覺，用手指碰觸時可感覺到酥麻的微幅調整力道；而當 Kd 值到達 1000 時，振動的幅度小很多。我們猜測可能是因為 $kd > 4$ 時，只要有些微的速度變化，輸出函數就會增加很多，甚至超過限制範圍 ± 127 ，因此 $kd > 4$ 時，輸出函數皆會瞬間達到極限，所以當 $kd > 4$ 時輸出的值都相同。

三、探討穩定懸浮與 pwm 輸出(電流)之間的關係

由上一項討論我們得知穩定懸浮時感測器的讀數應該趨近於直線，對於 PWM 的輸出又是如何影響呢？

表 5.3，kd 值與懸浮狀況關係圖跟其輸出情形		
kd	位置	Output
3		
2		
1.5		



由上表 5.3 知， $k_d=1000$ 時的懸浮狀況最佳，其 PWM 輸出也相當接近直線，約在 128 上下微幅振動，當懸浮狀況不再那麼穩定時，PWM 輸出則會更頻繁的大幅度變化其輸出值，這樣也會使通入的電流大幅度的變化。若以手指碰觸電磁鐵，也會發現穩定懸浮時線圈僅微溫，但若無法懸浮或不穩定懸浮時，電磁鐵線圈的溫度已達燙手的程度

四、討論懸浮物重量與穩定懸浮度與工作電流的關係

先前在光感磁懸浮實驗時，提到懸浮物的重量會影響懸浮情況。然而先前是先以固定的重量來調整 k_p 和 k_d （以 k_p 和 k_d 來配合重量），使之達成懸浮，而現在既然已調整出一組可穩定懸浮的數據，於是我們決定來探討能否藉由改變 k_p 和 k_d 的值，使懸浮物的重量得以隨意增減。

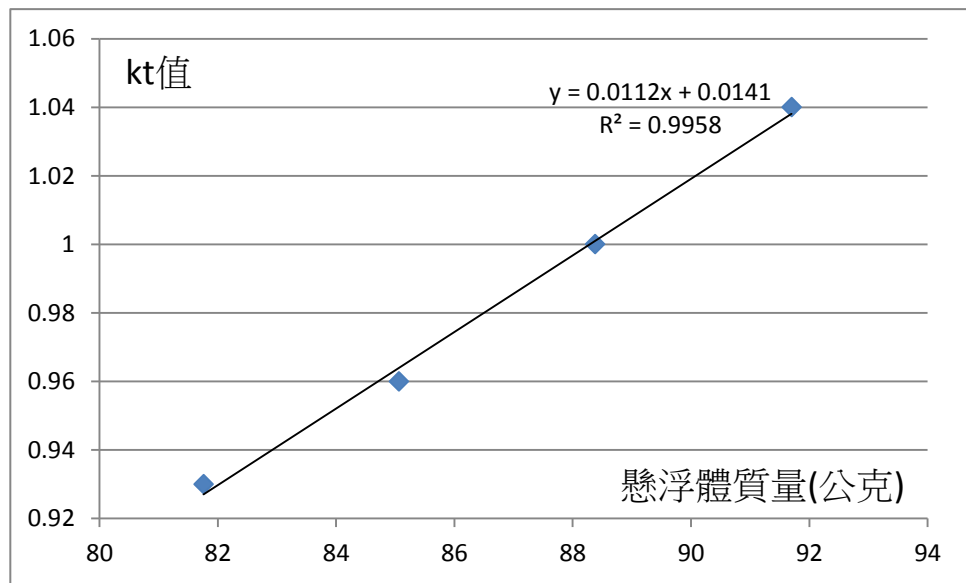
(一) $F = m * a$

假設懸浮調整機制假設調整模式的加速度是固定的，若根據牛頓第二運動定律，當加速度固定時，質量和作用力成正比。由此可見要懸浮不同重量的懸浮物時，隨著重量的增減，磁力也需成比例增減。在前述的實驗中也測量出電流和磁場大致上成正比且懸浮體與電磁鐵的距離大抵上是固定的，因此可得知重量、磁力和電流皆成正比，故電流隨比例增減理論上就能達到穩定懸浮。

(二) output *= kt

由於前述推論，砝碼質量與電磁鐵施力成正比且磁力又與電流成正比的緣故，我們嘗試將 output 乘上改變後重量和原重量的比值 kt。以下為實驗表格：

重量(g)	81.76	85.06	88.38(初始重量)	91.7
kt	0.93	0.96	1	1.04
穩定懸浮度	5000	3605	5356	2623



表格中懸浮穩定度是我們自定義對於比較是否穩定的量化值，其計算方法是將 100 組數據與此 100 組數據之平均值相差的絕對值總和(離均差絕對值之總和)。kt 為我們藉由調整所得到的最適比例，若對 kt 值與懸浮體質量作迴歸分析，將發現 kt 值確實與砝碼質量成高度正相關，R 平方值達 0.9958，由結果可知若增加砝碼重，維持穩定的電流確實會等比例增加。

為了解決光感測器僅能在雷射光徑與感測器受光直徑內(約 4mm)才能調整懸浮態，主要考量因列車行進間受陣風、乘客走動等外加因素影響，振動難以保持在 4mm 範圍中，因此我們思考利用霍爾效應感測器來偵測懸浮體位置，接下來的實驗項目為第二代霍爾效應感應磁懸浮來進行的實驗：

五、探討霍爾感應磁懸浮是否能沿用光感測程式碼

利用光感裝置實驗的程式碼來驅動這台裝置，因為霍爾效應感測器偵測懸浮體位置之讀數範圍(8~735)與光感測裝置的讀數範圍(0~1023)不同，因此我們重新調整 k_p 與 k_d 值，實驗結果如下：

表 5.4， k_p 與 k_d 所對應的懸浮情形					
	$k_d=700$	$k_d=300$	$k_d=100$	$k_d=50$	$k_d=25$
$k_p=0.25$	X	X	X	X	X
$k_p=0.45$	X	X	X	X	X
$k_p=0.65$	X	X	X	X	X
$k_p=0.85$	X	X	X	較為穩定	較為穩定
$k_p=1.0$	X	X	X	較為穩定	較為穩定

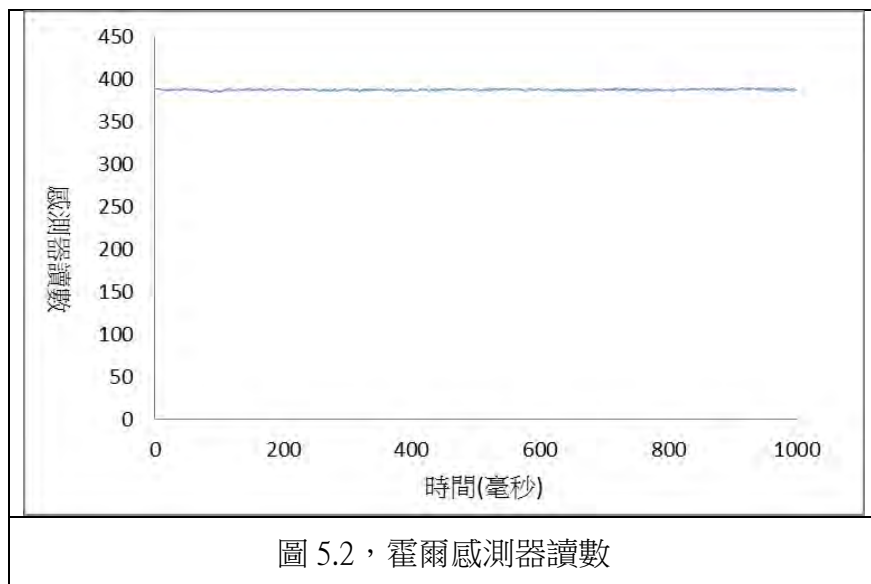


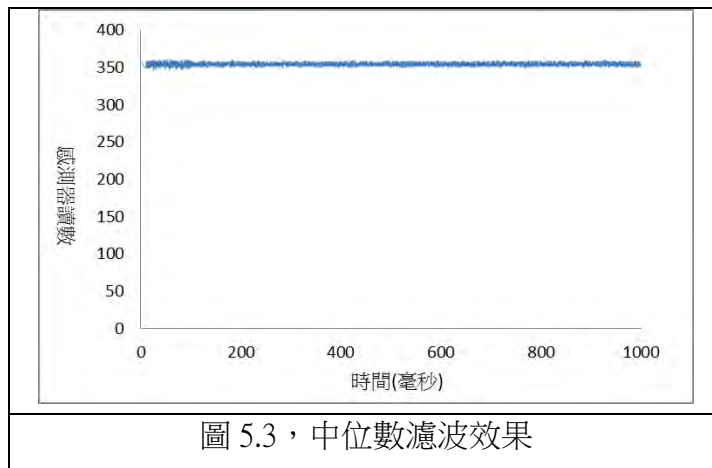
圖 5.2，霍爾感測器讀數

於是我們需要對讀數進行濾波。較常見的濾波方法分為中位數法及平均數法，以下我們分別對兩種濾波法進行實驗。(橫軸為時間軸，縱軸為 sensor 讀數)

六、探討不同濾波法對於磁懸浮濾波效果的影響

(一) 中位數濾波法(詳細程式碼請參見附錄三)

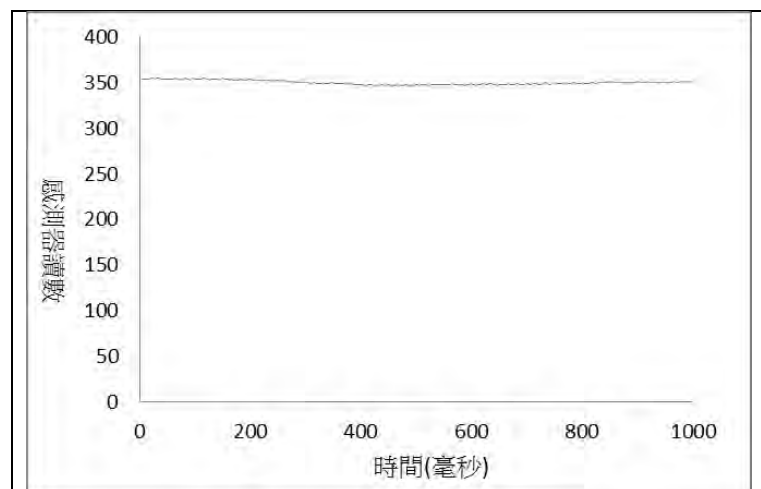
我們在程式碼裡面加入中位數濾波法，對感測器讀數每 21 組數據取中位數當作輸入值進行實驗，以下為位置固定時的讀數折線圖：(橫軸為時間軸，縱軸為 sensor 讀數)



由上圖 5.3 知同樣在最佳 k_p 、 k_d 值，達穩定懸浮的前提下，感測器讀數之震盪會在 350 ± 10 震盪。

(二) 平均數濾波法(詳細程式碼請參見附錄四)

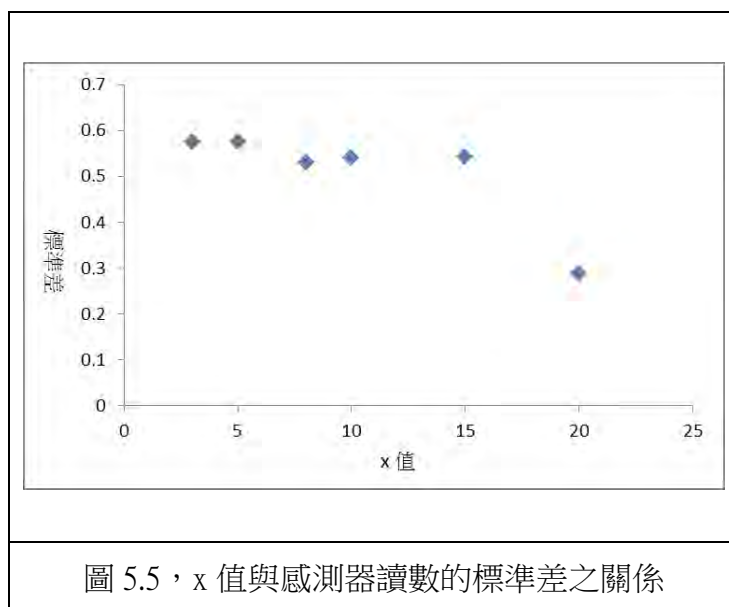
我們進行實驗，以下為位置固定時的讀數折線圖：(橫軸為時間軸，縱軸為 sensor 讀數)



由上圖 5.4 知同樣在最佳 k_p 、 k_d 值，達穩定懸浮的前提下，感測器讀數之震盪會在 585 ± 2 處震盪，。由圖 5.3 與圖 5.4 比較，發現平均數濾波法較為有效，震盪幅度較小僅 ± 2 ，因此我們選用平均數法。接著我們測試 x 的值，找到最能有效濾波的組距。另外我們也發現算術平均濾波法之懸浮位置較低在 585 附近。

七、探討算術平均數的組數 x 對於磁懸浮濾波效果的影響

本項研究探討當算術平均數的組數各為 3、5、8、10、15、20 時，感測器讀數的標準差(分別 3 組、5 組、8 組、10 組、15 組、20 組)間的比較

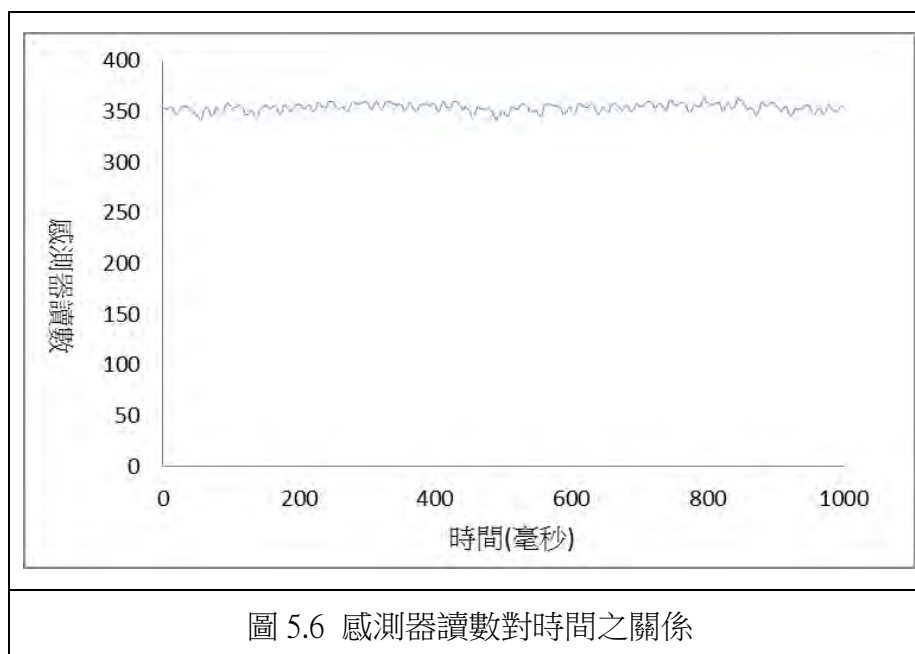


根據以上實驗結果，我們發現能讓懸浮物穩定漂浮之前提下，算術平均數之組數 x 值越大可讀到越穩定的波，標準差也愈小，但礙於 Arduino 處理器的運算性能所限，過大的 x 值($x=20$)會導致處理時間過長，影響懸浮狀況甚至無法穩定懸浮，故我們取 $x=15$ 為最終 x 值。

取完 x 後，我們將實驗過較為穩定的 k_p 和 k_d ，使其穩定懸浮，以下為實驗結果，塗色區域為穩定懸浮：(表格中數據為 100 組數據與此 100 組數據之平均值相差的絕對值總和(離均差絕對值之總和)，在此定義為懸浮穩定度)

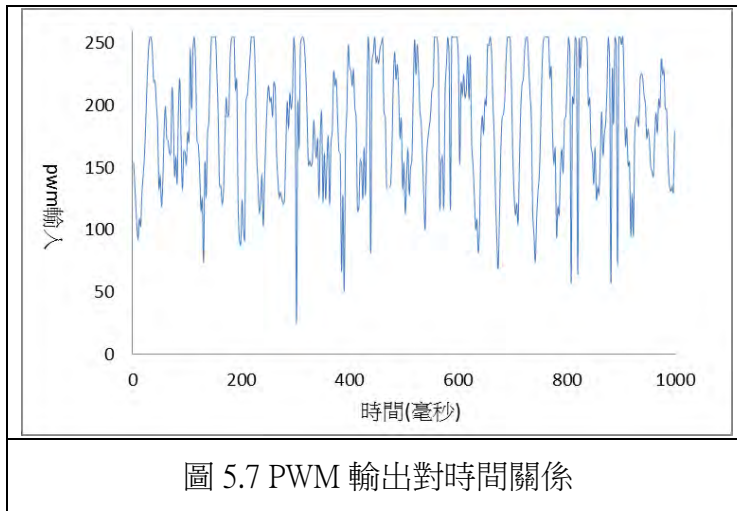
懸浮穩定度	kd=50	kd=40	kd=30	kd=20	kd=10
kp=-0.8	完全無法懸浮	1872	1608	310	無法長時間懸浮
kp=-0.85	2845	2346	2240	270	無法懸浮
kp=-0.95	2696	2253	1949	341	無法懸浮
kp=-1.0	2010	2553	2086	263	無法懸浮
kp=-1.5	無法長時間懸浮	無法長時間懸浮	2119	863	完全無法懸浮

我們發現在只要 $kd=20$ 、且 kp 大約在 0.9 附近時，懸浮狀況最佳。最後我們決定以 $x=15$ 作為最終的 x 值。以下為穩定懸浮的狀況：



八、探討穩定懸浮與 pwm 輸出(工作電流)之間的關係(霍爾感測裝置)

我們以 $k_d=20$ 和 $k_p=1$ 的懸浮狀況繪製輸出和時間的關係折線圖圖：



從這張圖可看出我們的輸出符合我們的理想狀況，為一穩定且起伏不大的波。但相較於光感測原理的懸浮方式，霍爾效應感測原理之調整需高電流的時間較多。

若綜合光感測器與霍爾效應感測器的效果，我們認為若作為磁浮列車的磁懸浮系統時，可以考慮將光感測器與霍爾效應感測器並行使用，利用霍爾效應感測器可避免瞬間陣風帶來的大幅振動，再由光感測器來加強穩定懸浮效果，應會是較佳解。

陸、 結論

由磁懸浮實驗中，我們可得知感測位置誤差的方式來作為磁懸浮調整的參數是無法達到穩定懸浮的，必須同時偵測懸浮體的速度與位置誤差量，才能達到穩定懸浮。並且我們發現穩定懸浮時，物體仍然會作微幅的震動，震動愈小，電流輸出變化也會愈小。另外，懸浮體愈重時，穩定懸浮時所需的電流也會等比例增加。因為光感測的磁懸浮裝置受限於光徑，因此我們再進行霍爾效應磁感測器來進行磁懸浮實驗，發現磁感測器需要藉由藉由濾波法來濾波才能穩定懸浮，我們也比較中位數濾波法與算術平均數濾波法，發現算術平均數濾波法的效果較好些，也發現算術平均數的組數取 15 組較能達到穩定懸浮的效果。綜合以上結果，我們也提出若能同時結合光感測器與霍爾效應感測器來穩定磁浮列車的懸浮系統，應該能獲得更佳的懸浮效果。

柒、 研究應用與展望

本研究探討磁懸浮原理，並對不同感應器：光學感應與霍爾感應器之懸浮效果做比較，未來可以研究對磁浮系統的感測同時採用光感測與霍爾效應磁感測器兩套方式來穩定車身，以因應陣風側風等外來因素的變化。另外實驗中我們也發現霍爾感測器擺在懸浮子下方時，調整過程中會造成懸浮體左右擺盪，會對讀數產生週期性的影響，影響收斂效果，因此我們未來也會比較霍爾感應器的擺放位置對懸浮效果之影響；本研究之研究結果可應用在磁浮系統，例如磁浮列車、飛輪電池等需要幾乎零接觸摩擦力的狀況。因為上拉式的磁懸浮較受到空間限制，因此希望將來能利用兩個雷射與感測器，偵測平面位置，在進行磁力的調整，藉此達到上推式(排斥力)的懸浮。

捌、 參考文獻

維基百科--磁懸浮 <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%A3%81%E6%82%AC%E6%B5%AE>

MOSFET <http://140.120.11.1/semicond/handout/chap4.pdf>

附錄一：光感磁懸浮相對位置程式碼

```
Ad1.ino §
1 int setpoint=512;           //設定setpoint為感光讀數的一半
2 int error,now,output;      //注一
3 float p,kp = 0.25;         //注二
4
5 void setup() {
6 //Serial.begin(9600);
7 }
8
9 void loop() {
10 now = analogRead(A0); //感測器接A0 //設now變數=現在所感測的讀數
11 error = now - setpoint ; //設誤差值(error)=現在感應的光度(now)-預設光度(setpoint)
12 p =kp*error;             //設函數(p)=誤差值*對應比例(kp)
13 output = constrain(p,-127,127); //注三
14 analogWrite(3,output+127); //注四
15 Serial.println(kp*error);
16 }
17
```

圖 8.1，光感磁懸浮相對位置程式碼

附錄二：光感磁懸浮相對位置+速度程式碼

```
Ad $
1 int setpoint=512; //設定setpoint為感光讀數的一半
2 int old,error,now,output; //注一
3 float p,d,kp = 0.25,kd =700; //注二
4 unsigned long t , oldt; //宣告無符號長整數t(現在時間),oldt(過去時間)
5
6 void setup() {
7 //Serial.begin(9600);
8 }
9
10 void loop() {
11 now = analogRead(A0); //感測器接A0 //設now變數=現在所感測的讀數
12 t = micros(); //紀錄時間(單位:微秒)
13 error = now - setpoint ; //設誤差值(error)=現在感應的光度(now)-預設光度(setpoint)
14 p =kp*error; //設函數(p)=誤差值*對應比例(kp)
15 d =kd*(now - old)*1000/ (t - oldt); //注三
16 output = constrain(p+d,-127,127); //注四
17 analogWrite(3,output+127); //注五
18 old = now; //更新過去感光讀數(old)
19 oldt = t; //更新過去時間(oldt)
20 Serial.println(kp*error);
21 }
```

圖 8.2，光感磁懸浮相對位置+速度程式碼

注一：宣告整數變數 old(過去感光讀數),error(誤差值),now(現在感光讀數),output(輸出函數)

注二：宣告浮點數變數 p(函數),d(函數),kp(位置與輸出的對應比例),kd(速度與輸出的對應比例)

注三：設函數(d)=(現在感光讀數(now)-過去感光讀數(old))*1000*對應比例(kd)/(現在時間(t)-過去時間(oldt))，乘以 1000 可將微秒的單位換算成毫秒

注四：設輸出函數(output)=函數 p + 函數 d，但如果高於 127，則取函數=127；如果低於-127，則取函數=-127

注五：在第三角位輸出函數(output)+127 的電流(因輸出電流的數值必須在 0~255 之間，所以把 output 函數設在-127~127 之間，加上 127 之後就會在 0~254 之間了)

附錄三：霍爾感應磁懸浮中位數程式碼

<pre> int x=21; int i,j,p1[100],p2[100]timer=0,temp; int now; int old; int error; int output; int setpoint = 400; int s=127; unsigned long t; unsigned long oldt; float p,d; float kp=1,kd=20; void setup() { Serial.begin(115200); } void loop() { timer =timer % x; old = now; p1[timer] = analogRead(A0); now = p1[timer]; for(i=0;i<x;i++) { p2[i] = p1[i]; } timer++; for(i=0;i<((x/2)+1);i++) </pre>	<pre> x=濾波取值個數 p1,p2 紀錄位置 now=現在感測讀數 old=上個感測讀數 error=位置偏差 output=輸出大小 setpoint=設定懸浮位置 s=輸出中間值 t=現在時間 oldt=上次感測時間 p=位置調整器 d=速度調整器 kp、kd=輸出與讀數之比值 timer 紀錄讀數順序 old 與 now 同步 讀取感測讀數 更新新的 now 值 迴圈 { p2 與 p1 同步 } 迴圈 </pre>
---	--

<pre> { for(j=i+1;j<x;j++) { if(p2[i] <= p2[j]) { temp = p2[i]; p2[i] = p2[j]; p2[j] = temp; } } } t = micros(); error = p2[(x/2)] - setpoint ; p = -1*kp*error; d = -1*kd*(now - old)*1000/ (t - oldt); output = constrain(p+s+d,0,255); analogWrite(3,output); } </pre>	<pre> { 由小排到大 } 更新時間 誤差=中位數-設定懸浮位置 p=比值*位置偏差 d=位移/時間 設定輸出 輸出到電磁鐵 </pre>
--	--

附錄四：霍爾感應磁懸浮算術平均數程式碼

int x=20;	x=濾波取值個數
int now;	now=現在感測讀數
int old;	old=上個感測讀數
int error;	error=位置偏差
int output;	output=輸出大小
int s=127;	s=輸出中間值
int setpoint=400,i;	setpoint=設定懸浮位置
unsigned long t;	t=現在時間
unsigned long oldt;	oldt=過去時間
float p,d;	p=位置調整器 d=速度調整器
float kp=0.7,kd=25;	kp、kd=輸出與讀數之比值
void setup() { Serial.begin(115200); }	
old=now;	old 與 now 同步
now=0;	把 now 設為 0
void loop() { for(i=0;i<x;i++) { now+=analogRead(A0) } now/=x; t = micros(); error = now - setpoint ;	{ 迴圈 將 now 設為 x 個讀數加總 } now=總和讀數/讀取個數(平均數) 更新時間 誤差=平均數-設定懸浮位置

<pre> p =-1*kp*error; d =-1*kd*(now - old)*1000/ (t - oldt); output = constrain(p+s+d,0,255); analogWrite(3,output); oldt = t; } </pre>	<p>p=-1*比值*位置偏差</p> <p>d=-1*位移/時間</p> <p>設定輸出</p> <p>輸出到電磁鐵</p> <p>更新時間</p>
---	---

【評語】 030807

1. 使用 Arduino 開發套件與樂高積木製作磁懸浮控制，使用光二極體與霍爾感測器偵測懸浮體位置變化，探討如何讓磁鐵穩定懸浮，實驗設計與程控的調整均有所本，也有不錯的結果。
2. 若能再把 kd 和 kp 兩個參數的物理意義闡述清楚會更好。
3. 實驗目的期望應用於為磁浮列車的磁懸浮系統，應用方向應該再更清楚一點。

作品海報

壹、研究動機

關於磁懸浮的運用許多人會聯想到磁浮列車及市面上常見的磁懸浮玩具，經我們不斷嘗試，想利用兩磁石間的排斥力或吸引力來達成懸浮，磁鐵一放手就吸合，無法穩定懸浮，必須依賴一個支撐點固定磁鐵來達到懸浮。為了想做一個無任何輔助也能夠穩定懸浮的裝置，我們想到自然課中所提到的電磁鐵，可以通過電流大小來調整磁場大小，進而控制磁鐵上浮的力量。

貳、研究目的

- 一、探討以位置誤差量決定電磁鐵調整力時是否能穩定懸浮
- 二、同時考慮懸浮物位置誤差值與移動速度來調整是否可達到平衡
- 三、探討穩定懸浮與PWM輸出(電流)之間的關係
- 四、討論懸浮物重量與穩定懸浮度與工作電流的關係
- 五、探討霍爾感應磁懸浮是否能沿用光感測程式碼
- 六、探討不同濾波法對於磁懸浮濾波效果的影響
- 七、探討算術平均數的組數對於磁懸浮濾波效果的影響

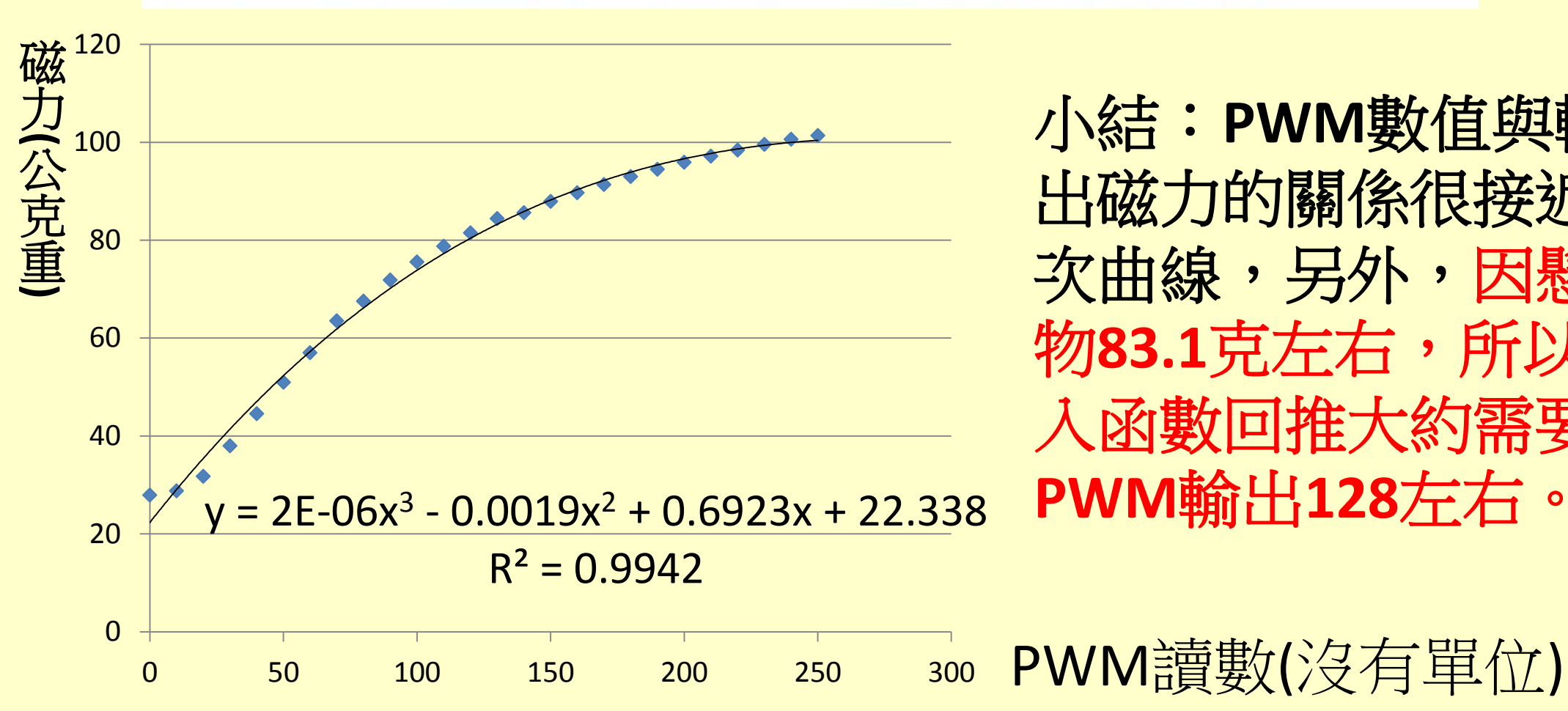
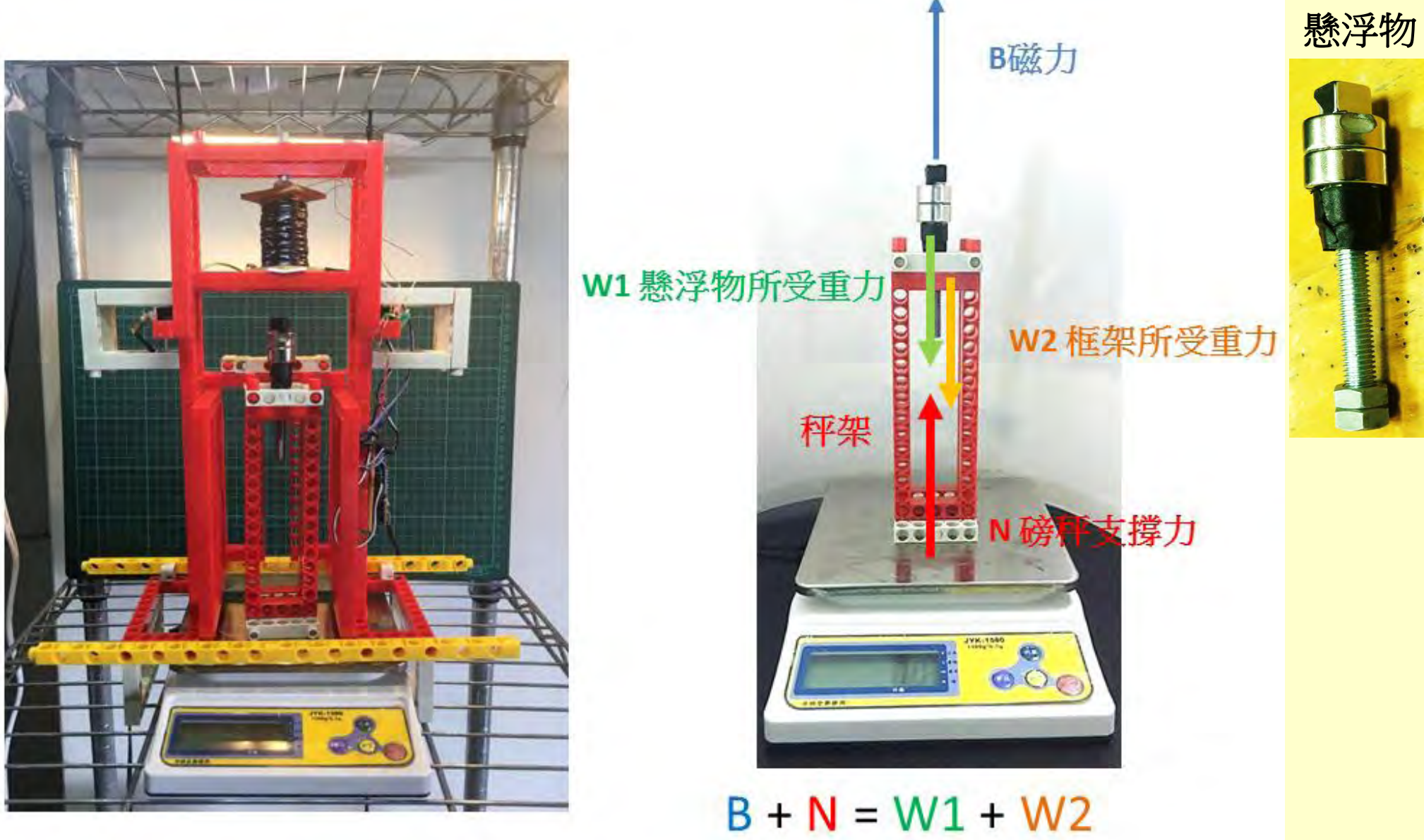
參、研究設備與器材

筆記型電腦、智高積木、USB傳輸線、Arduino、雷射二極體、光電二極體、電磁鐵裝置、磁鐵、螺帽、霍爾感應器、MOSFET

肆、研究過程及方法與結果討論

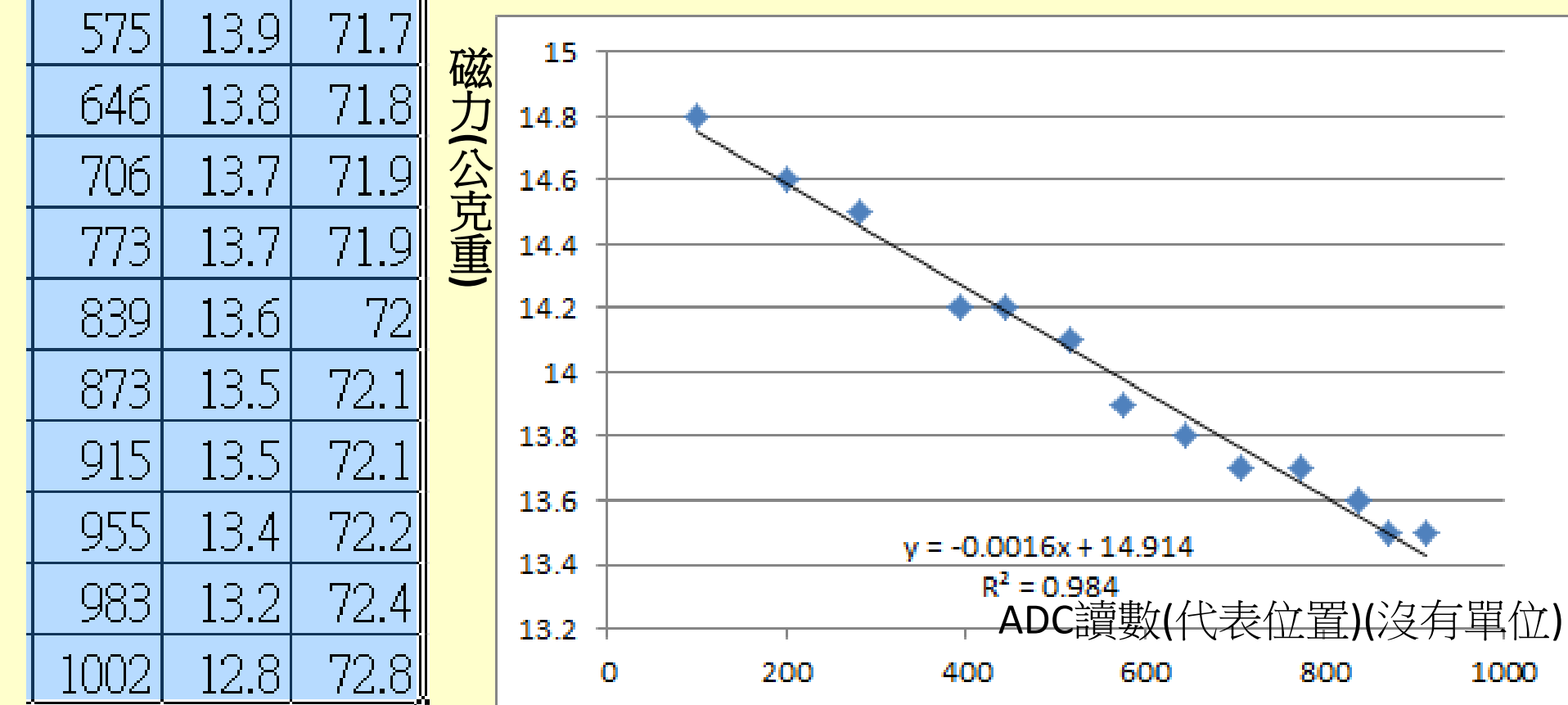
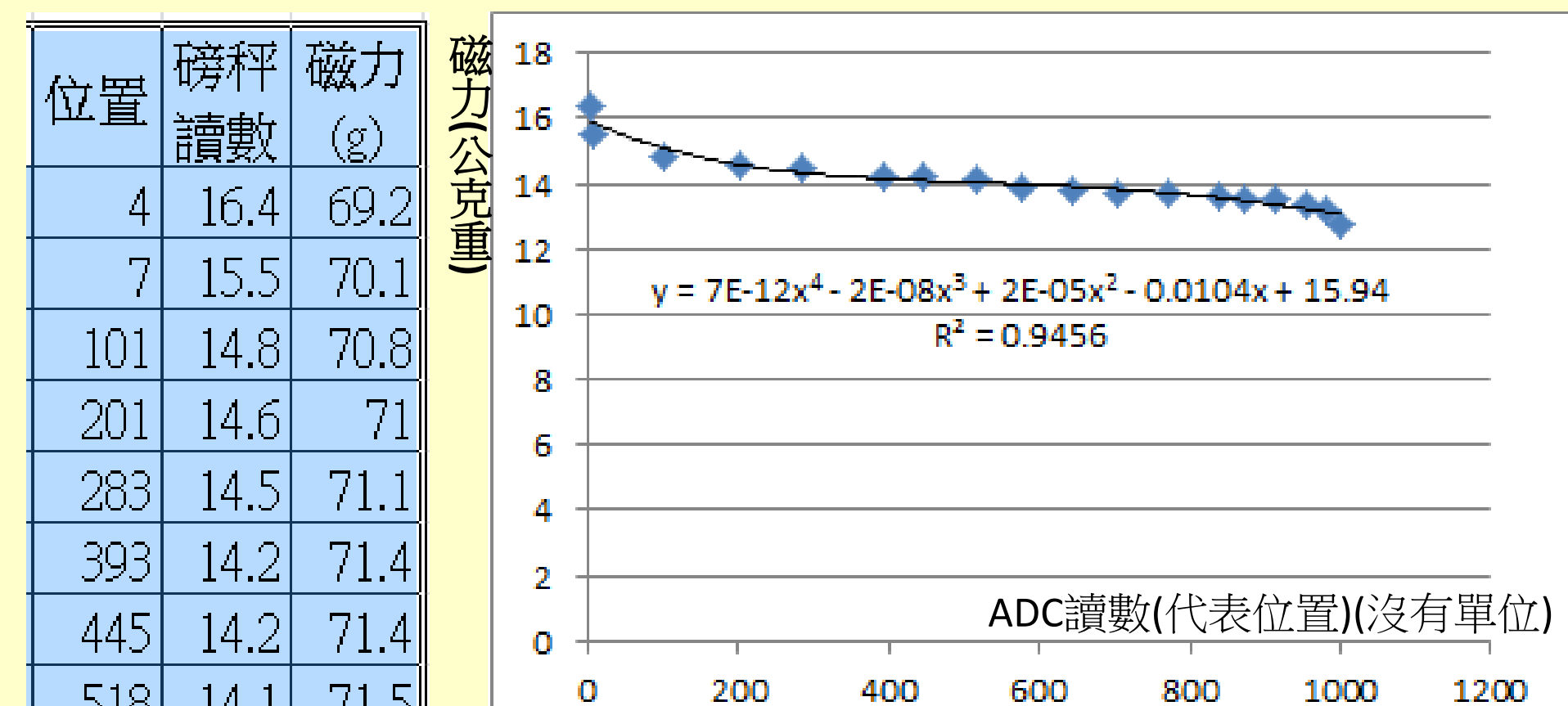
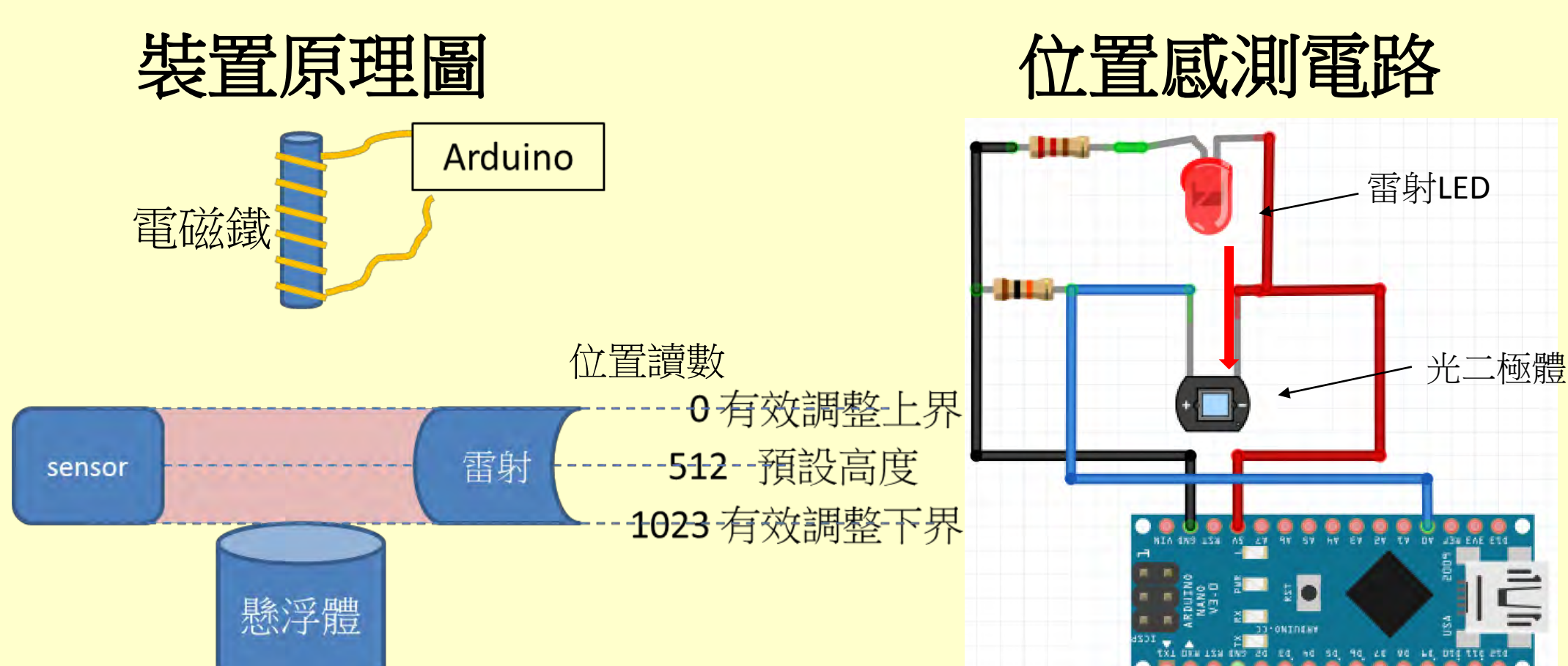


第一代 光感測位置磁懸浮裝置



小結：PWM數值與輸出磁力的關係很接近3次曲線，另外，因懸浮物83.1克左右，所以代入函數回推大約需要PWM輸出128左右。

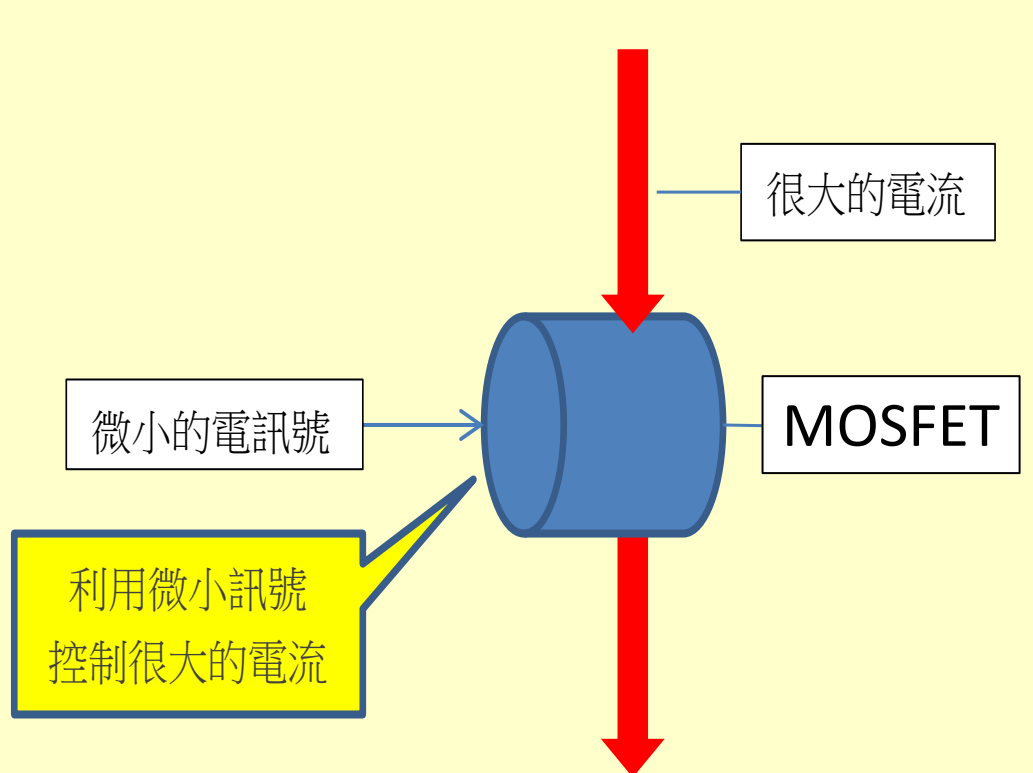
三、探討懸浮體位置與所受磁力的關係



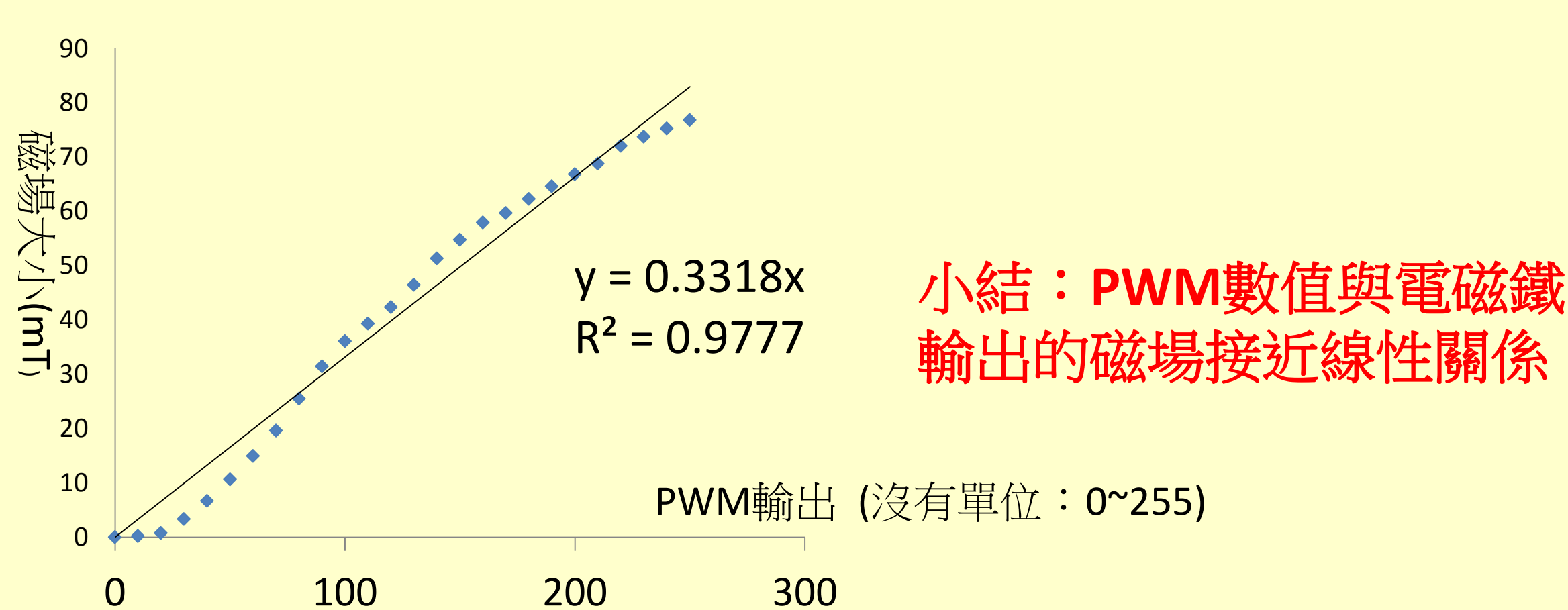
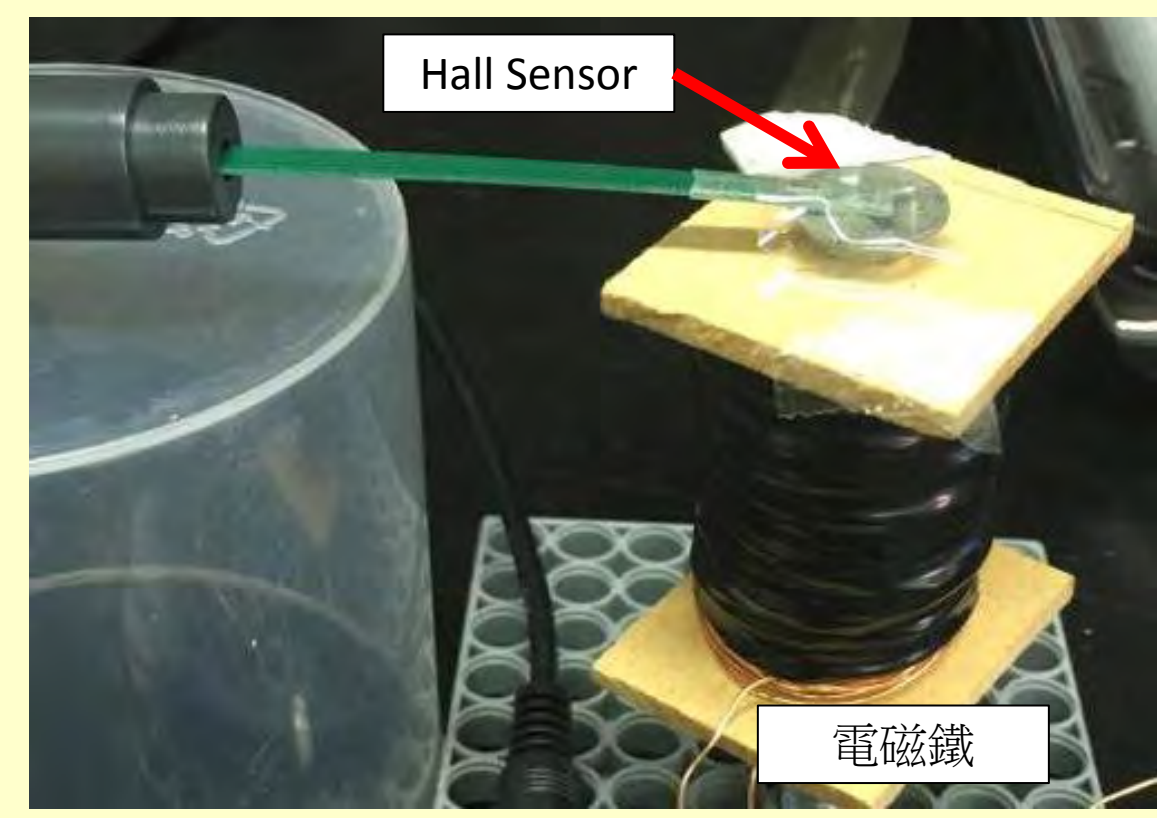
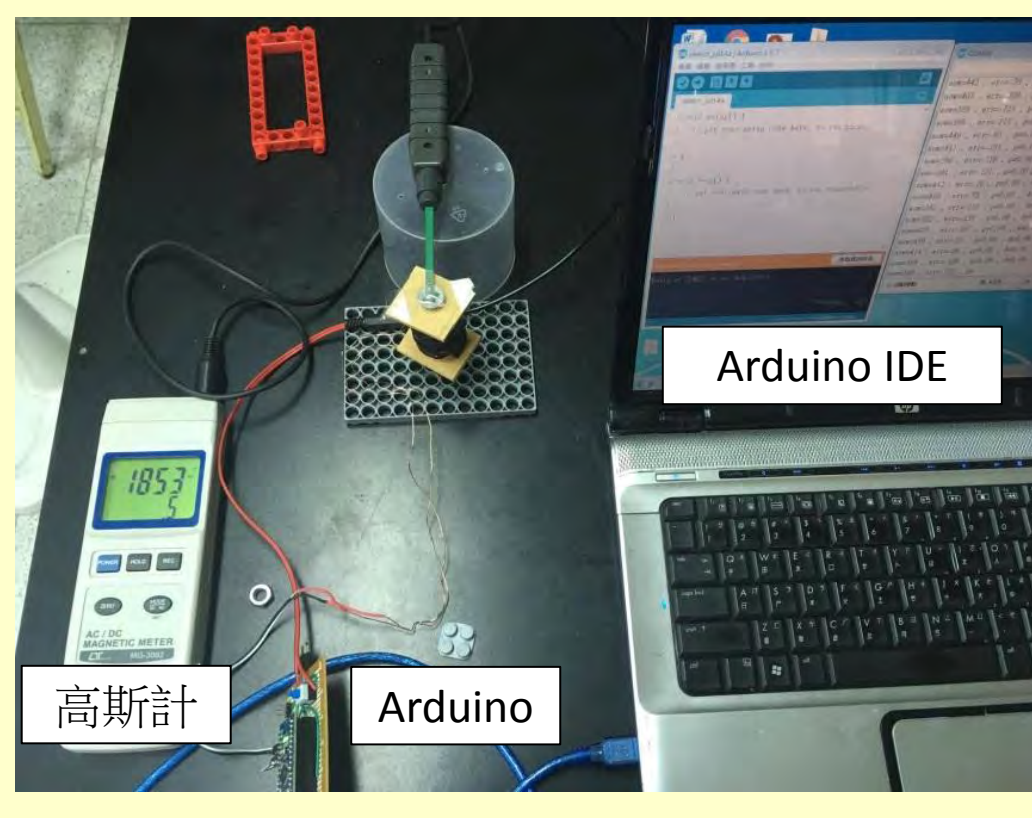
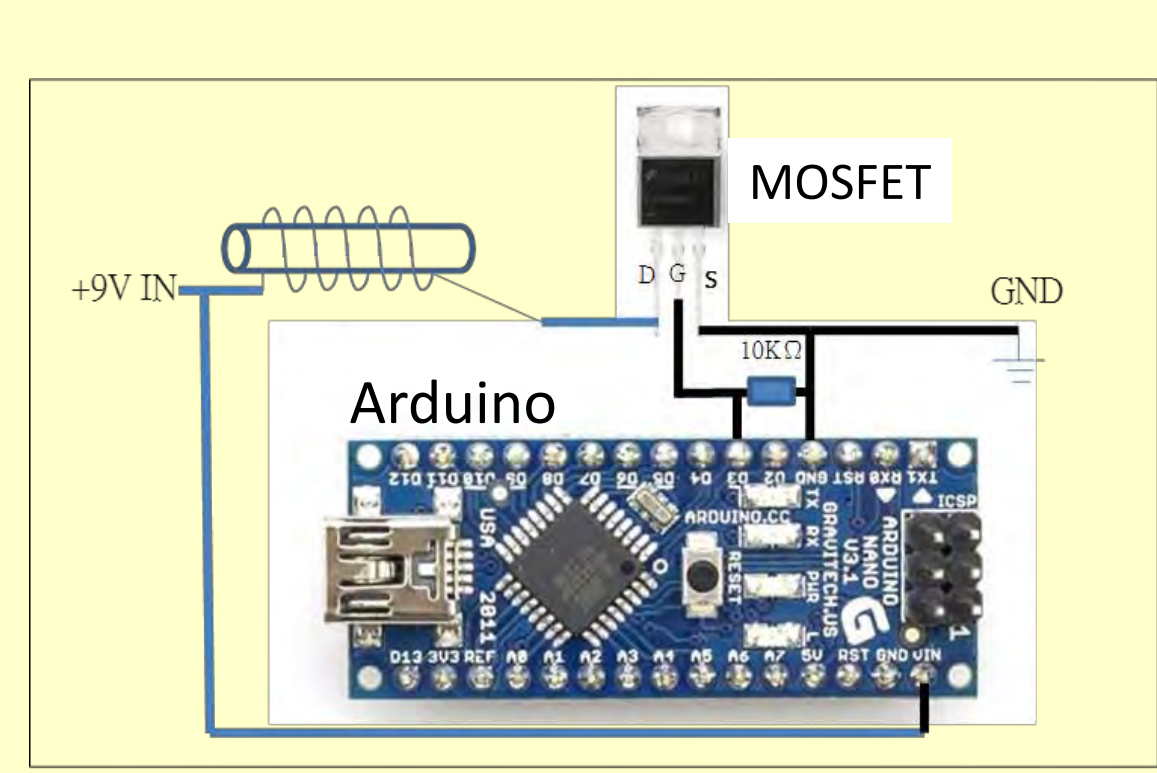
小結：去掉頭尾各三個數據位置與磁力很接近線性關係在很小的距離內，位置與磁力變化可視為線性

一、PWM數值對電磁鐵磁場關係

MOSFET工作概念圖：

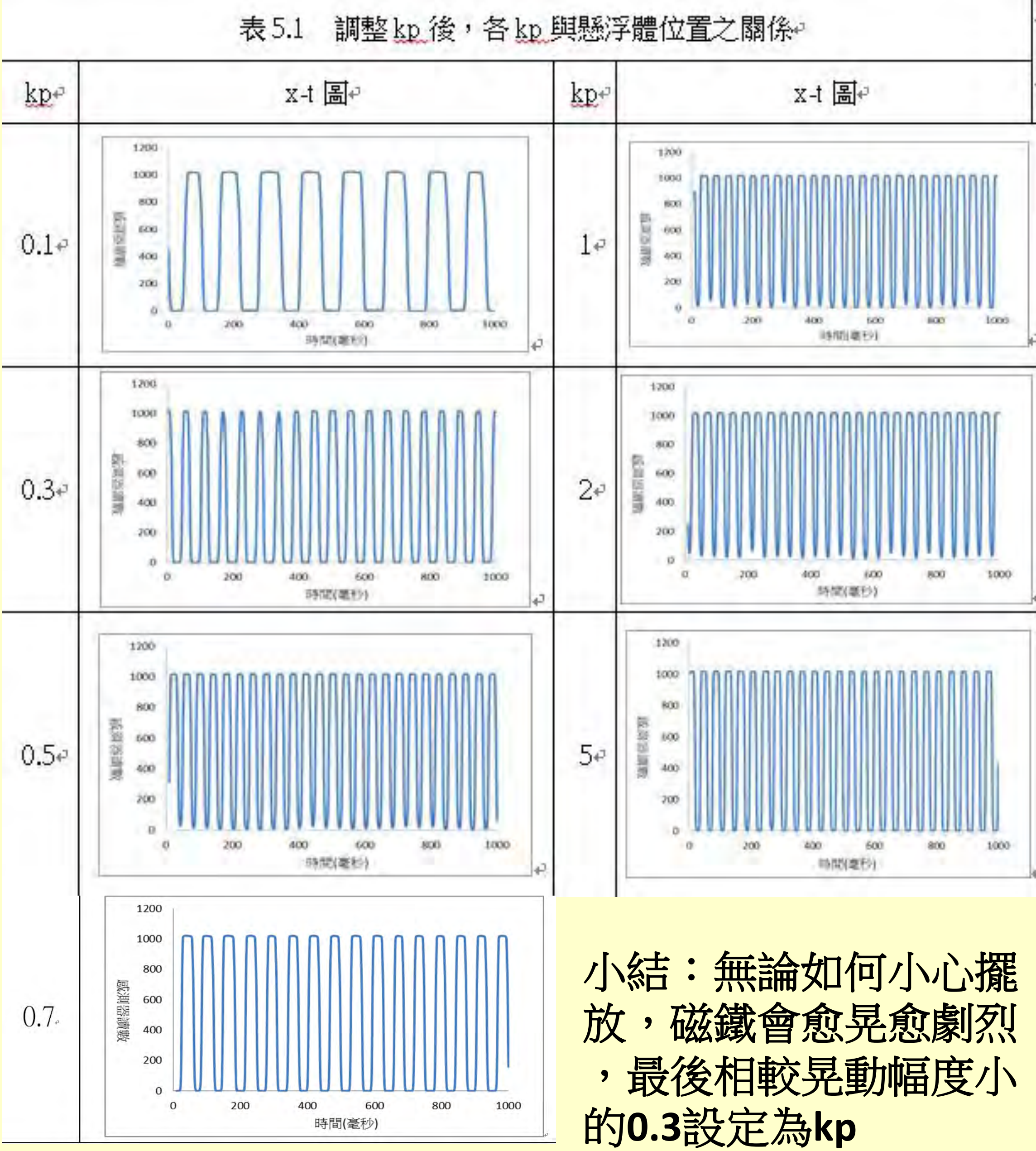
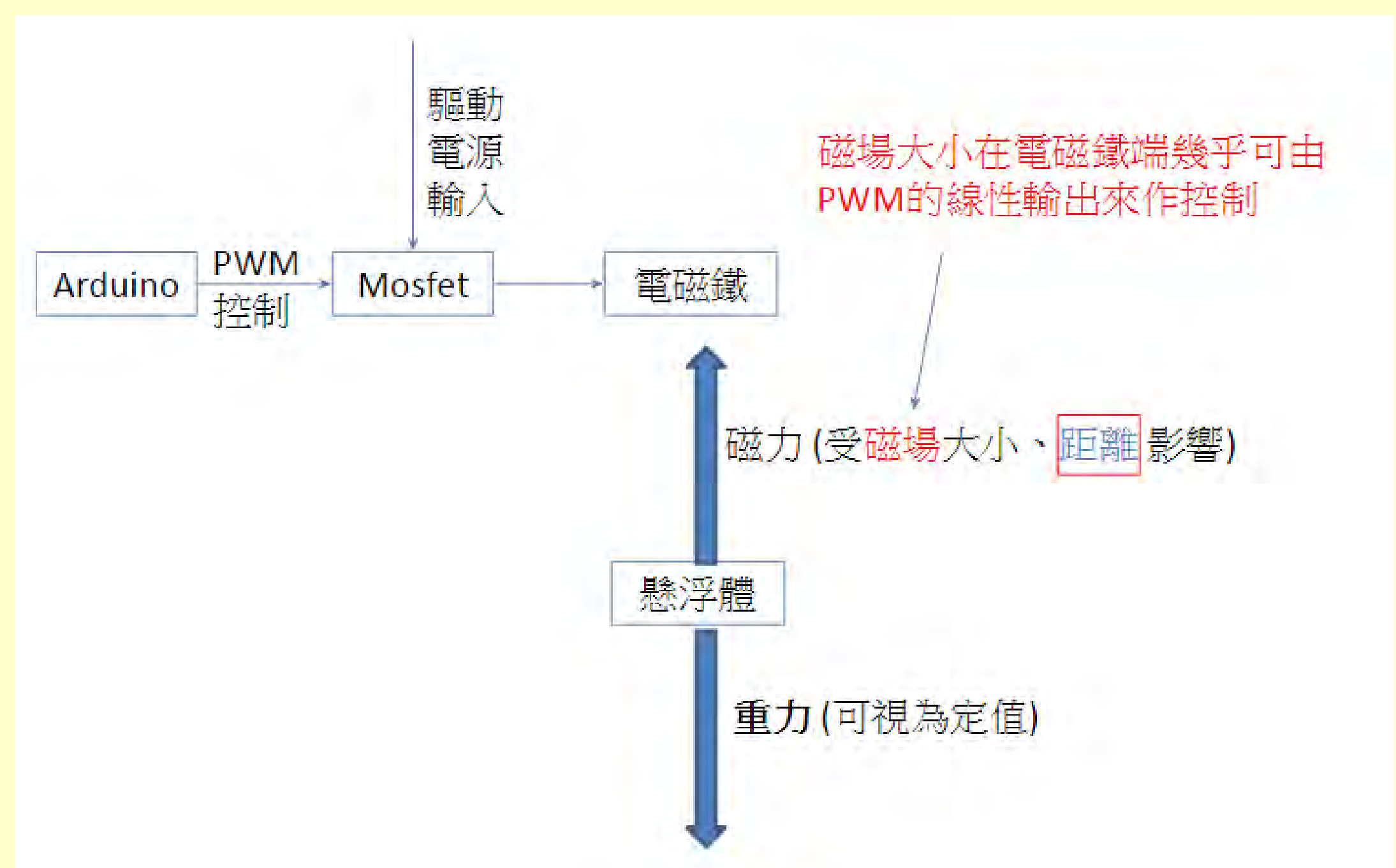


MOSFET 與Arduino電路：



小結：PWM數值與電磁鐵輸出的磁場接近線性關係

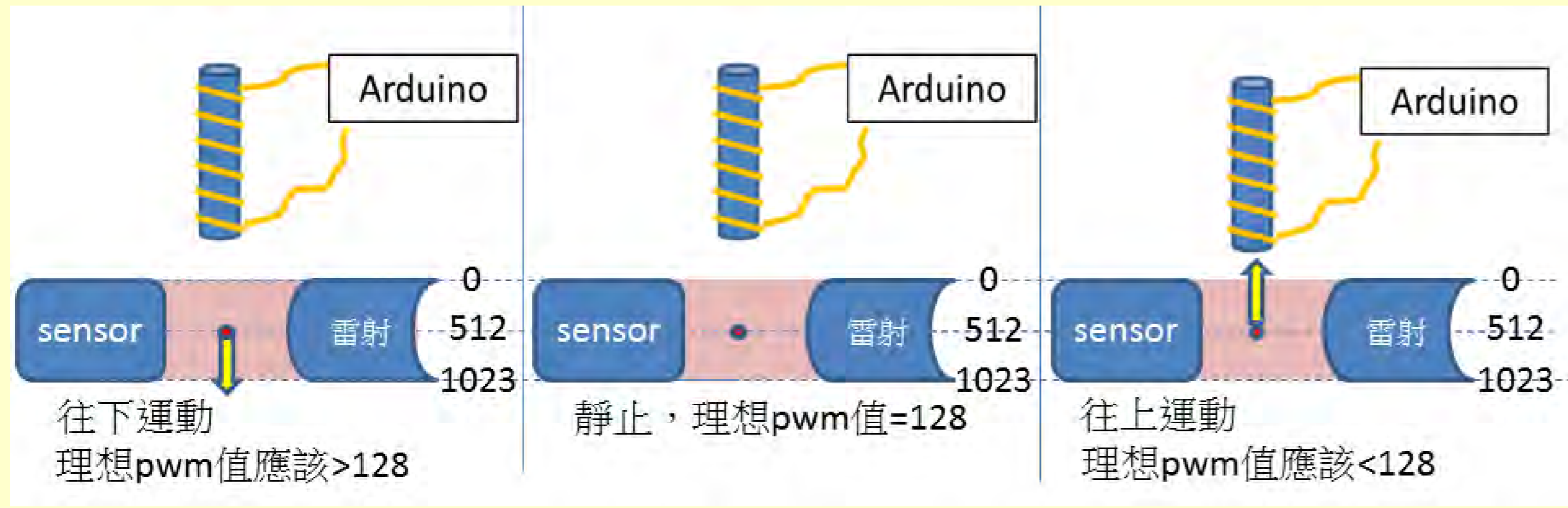
二、探討PWM數值大小對磁鐵所受磁力的關係



小結：無論如何小心擺放，磁鐵會愈晃愈劇烈，最後相較晃動幅度小的0.3設定為kp

五、修改調整函數，再進行實驗

經討論，我們認為PWM輸出應考慮懸浮物的速度，因此調整函數修改如下：



PWM輸出值 = 函數 (懸浮體位置, 懸浮體速度)

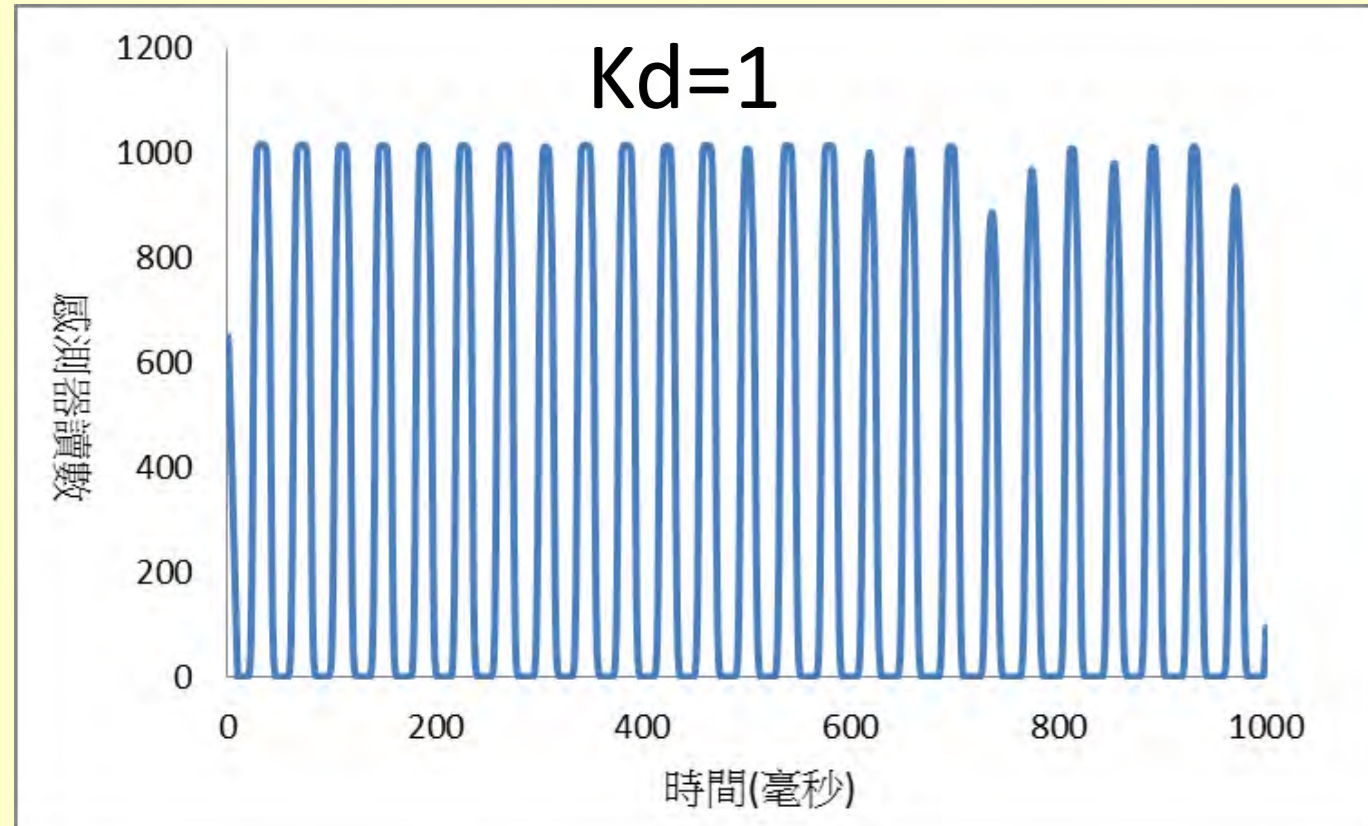
$error = now - setpoint$ (setpoint=512)

$p = kp * error$ (因為磁力與距離變化接近線性)

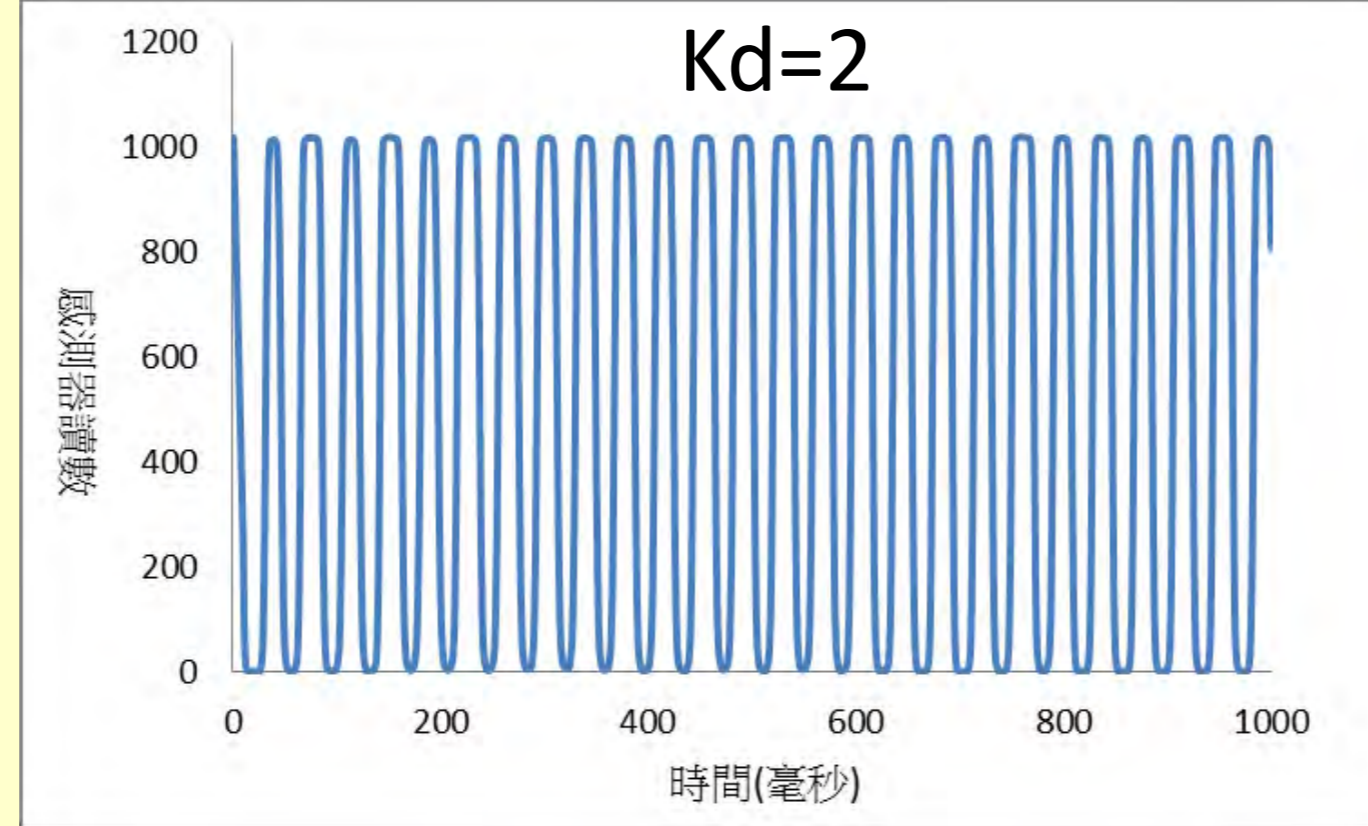
$d = kd * (now - old) / (t - oldt)$ (假設速度對PWM輸出影響為線性)

PWM輸出 = 128 + p + d (128由懸浮體重量換算得)

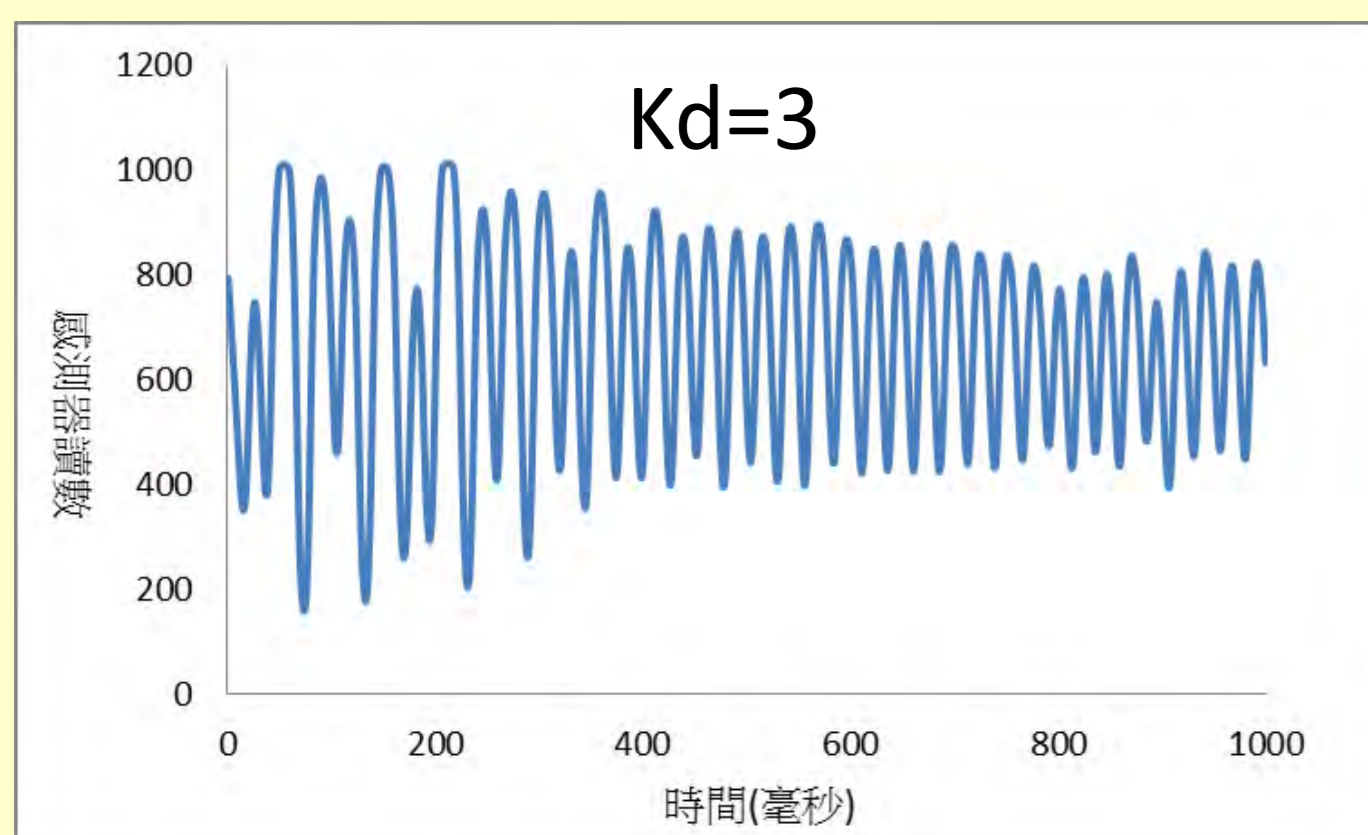
實驗結果：位置與時間作圖



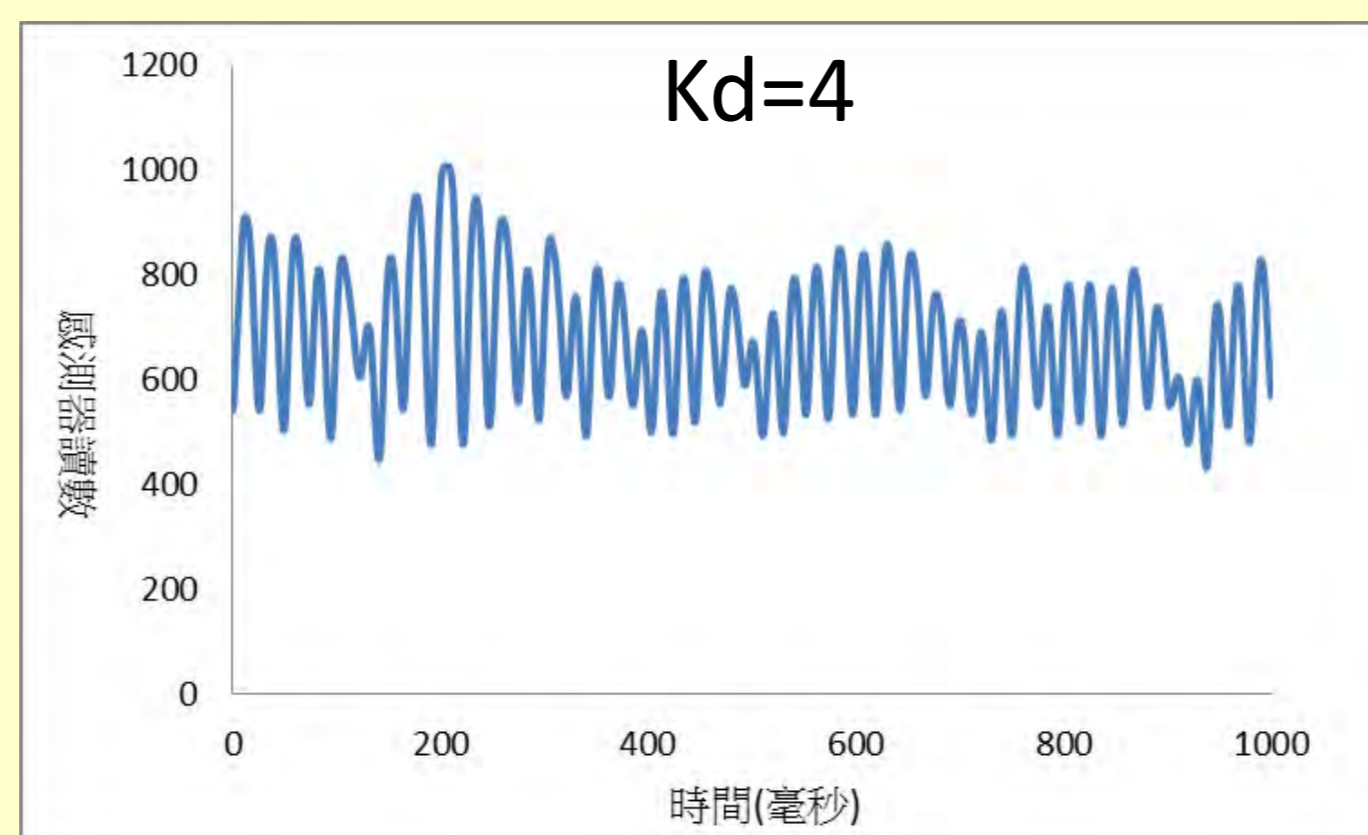
位置偏差越來越大無法穩定



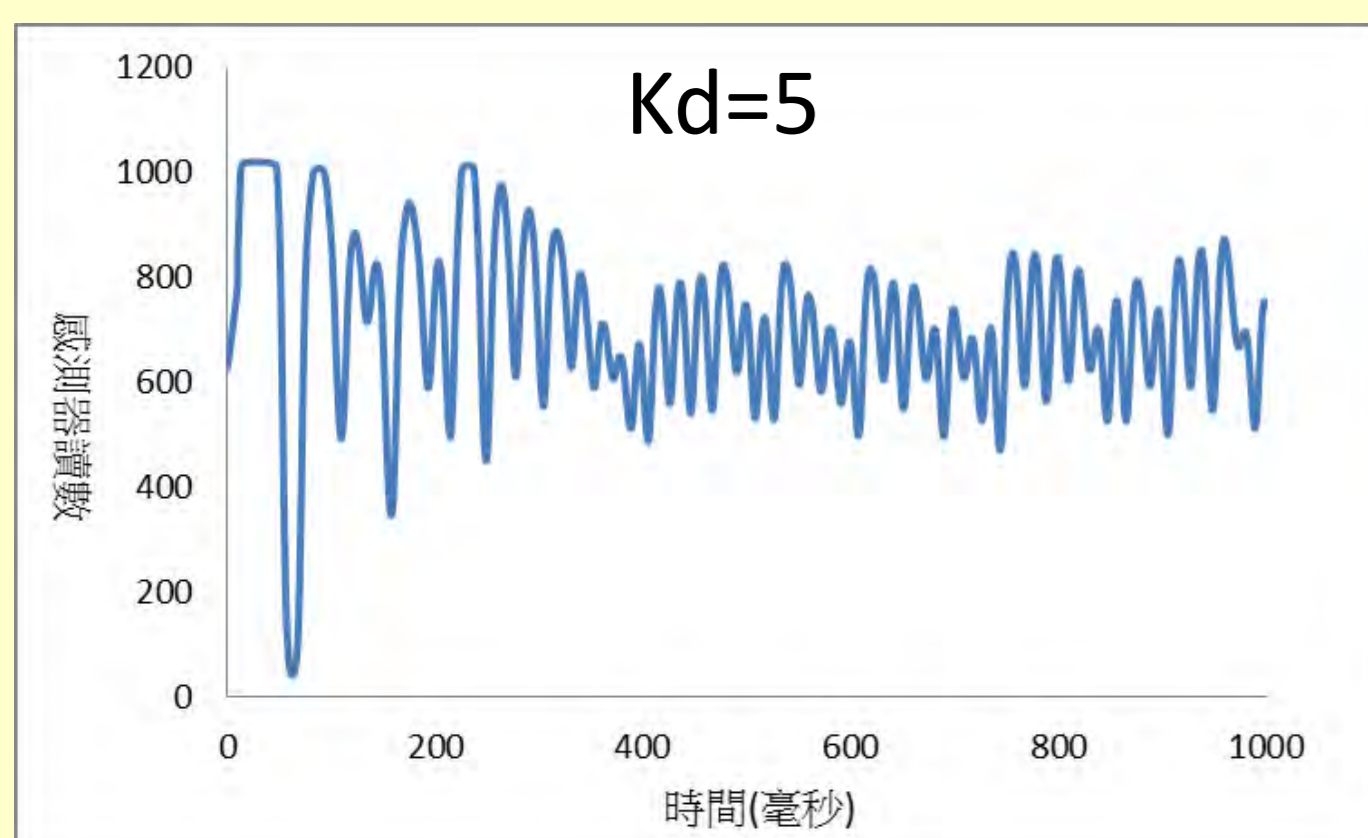
與kd=1的狀況雷同



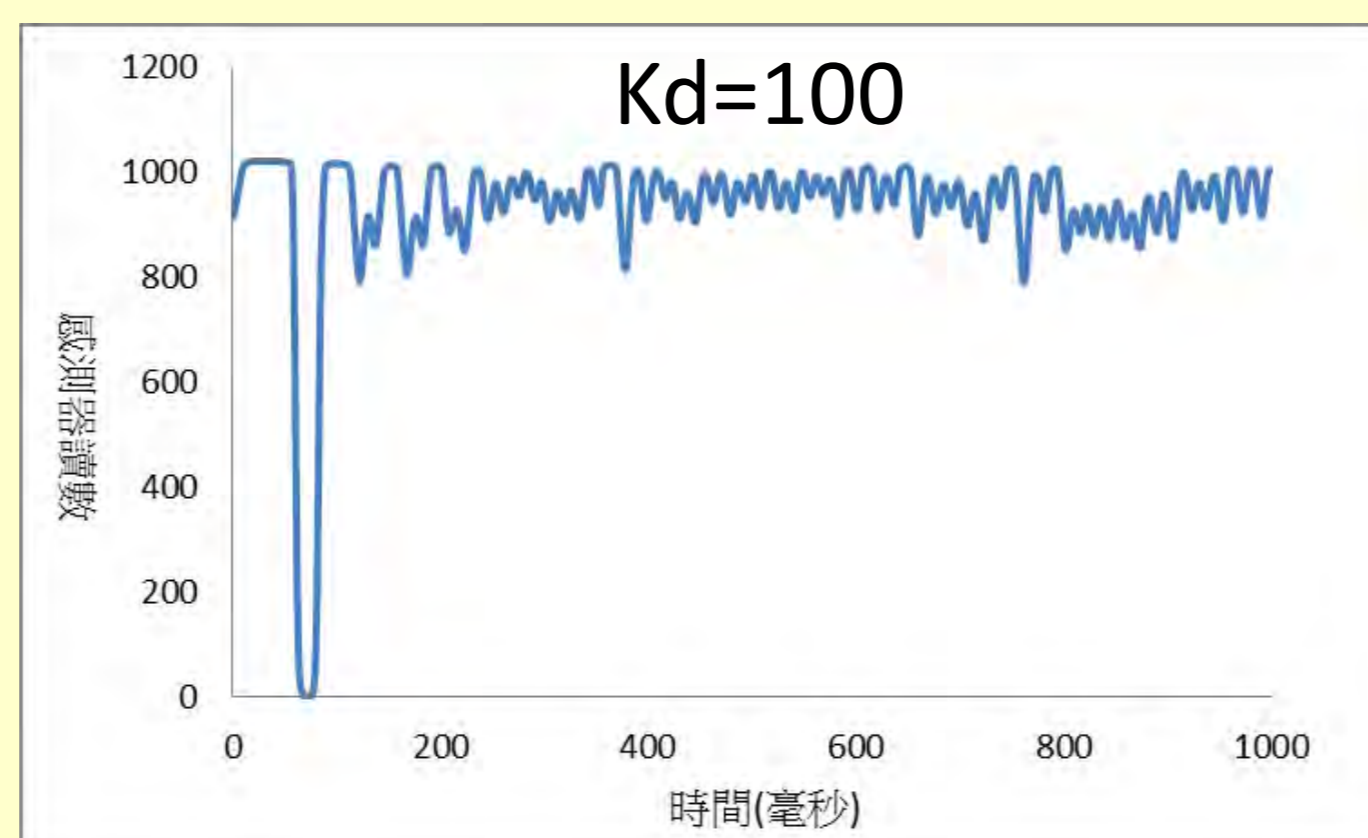
一開始在理想位置能穩定懸浮，但如果一有晃動就容易掉落。



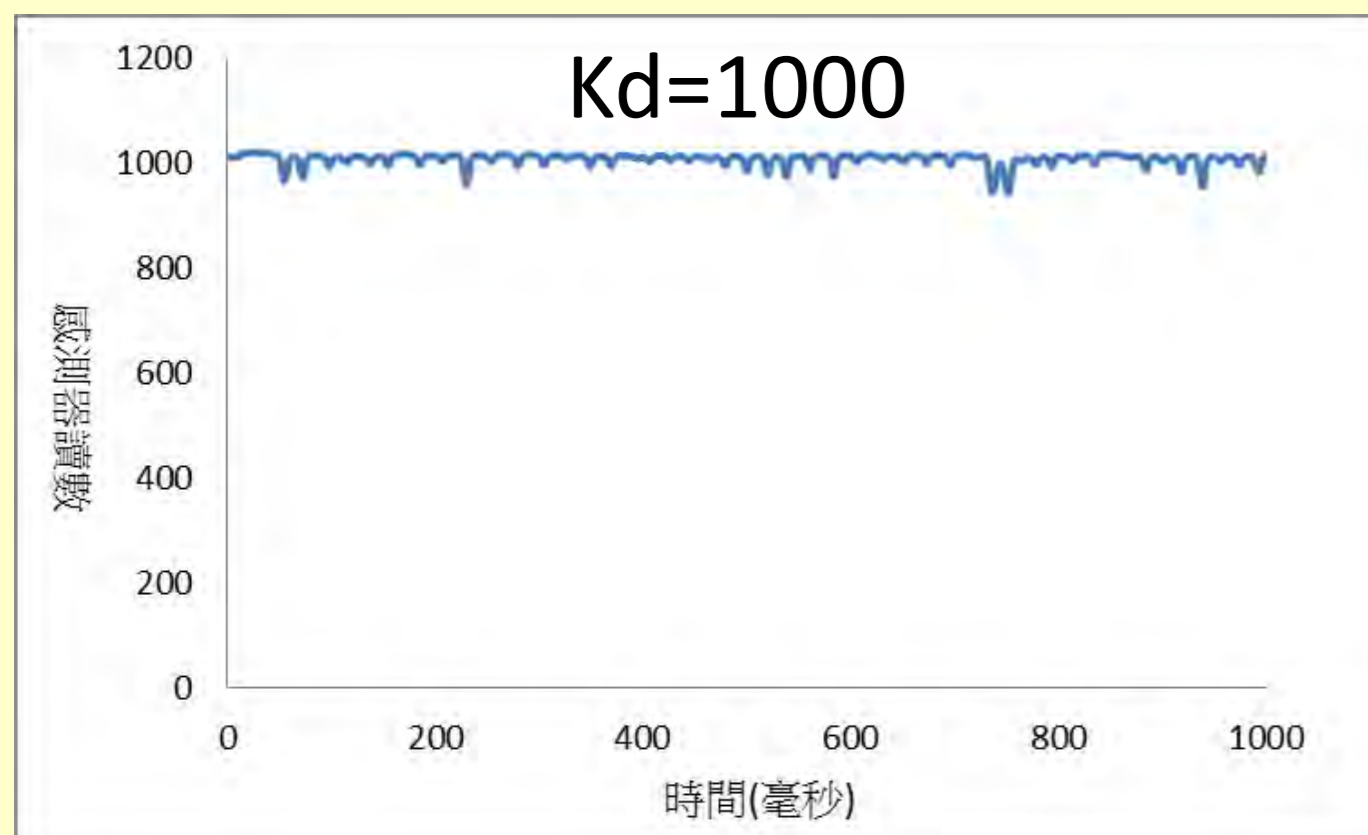
已達成穩定懸浮。



已達成穩定懸浮。



已達成穩定懸浮。



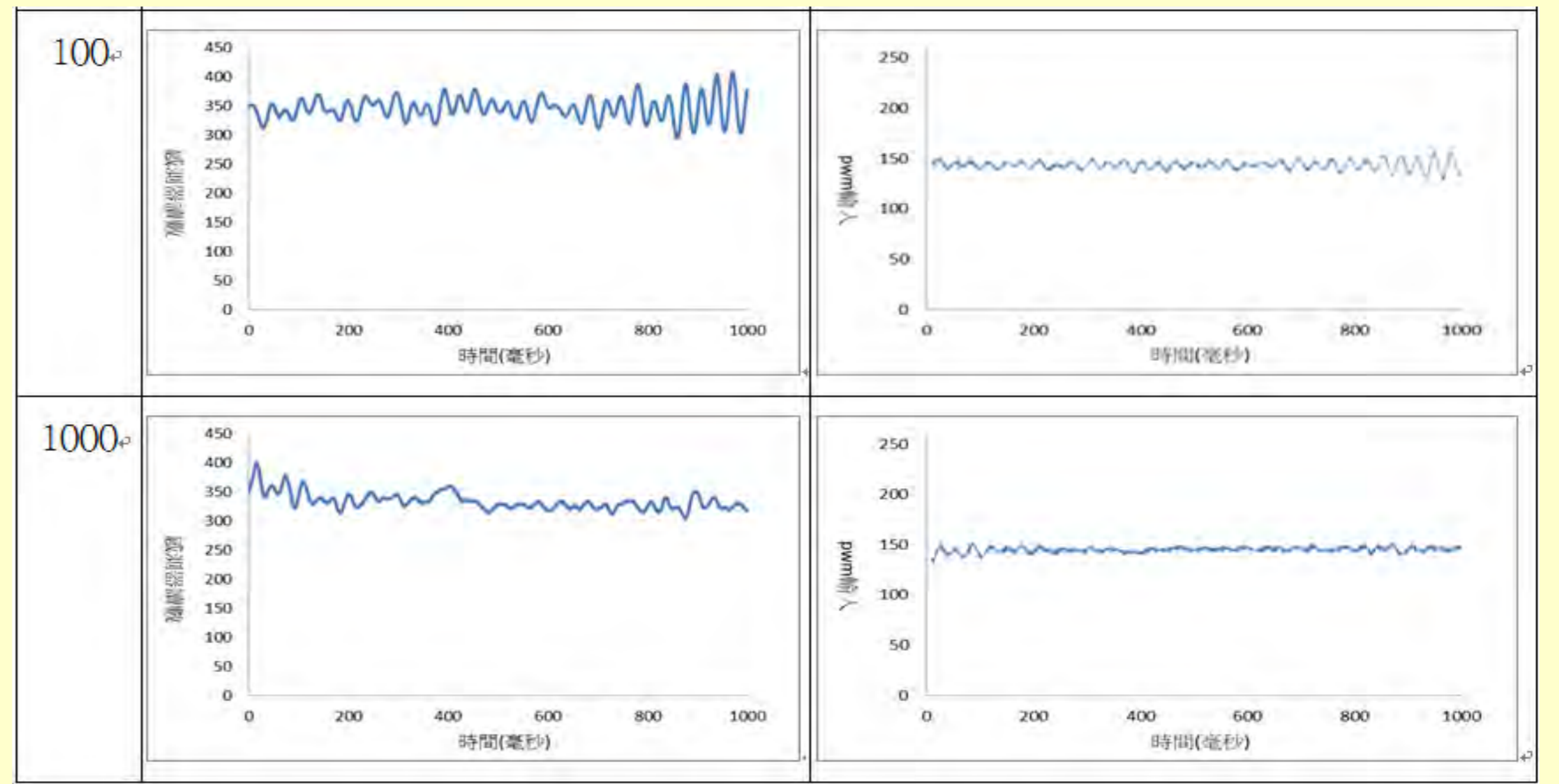
已達成穩定懸浮。

小結：當Kd=4 開始已經能達穩定懸浮，但一直到Kd=1000，可以發現懸浮體晃動的幅度變很小

六、探討穩定懸浮時與PWM輸出值與位置之間的關係

表 5.3, kd 值與懸浮狀況關係圖跟其輸出情形

kd	位置	PWM輸出
3		
4		
5		



小結：懸浮狀況未達穩定時，PWM輸出會頻繁地大幅度變化，這樣會使通入的電流大幅度的變化。若以手指碰觸電磁鐵，也會發現穩定懸浮時線圈僅微溫，但若無法懸浮或不穩定懸浮時，電磁鐵線圈的溫度已達燙手的程度

七、探討懸浮物重量與穩定懸浮度與工作電流的關係

由於F=ma，我們嘗試將原調整函數再乘上一個常數Kt，作為浮子重量參數，並把原調整函數擴展如下：

PWM輸出值 = Kt x 函數 (懸浮體位置, 懸浮體速度)

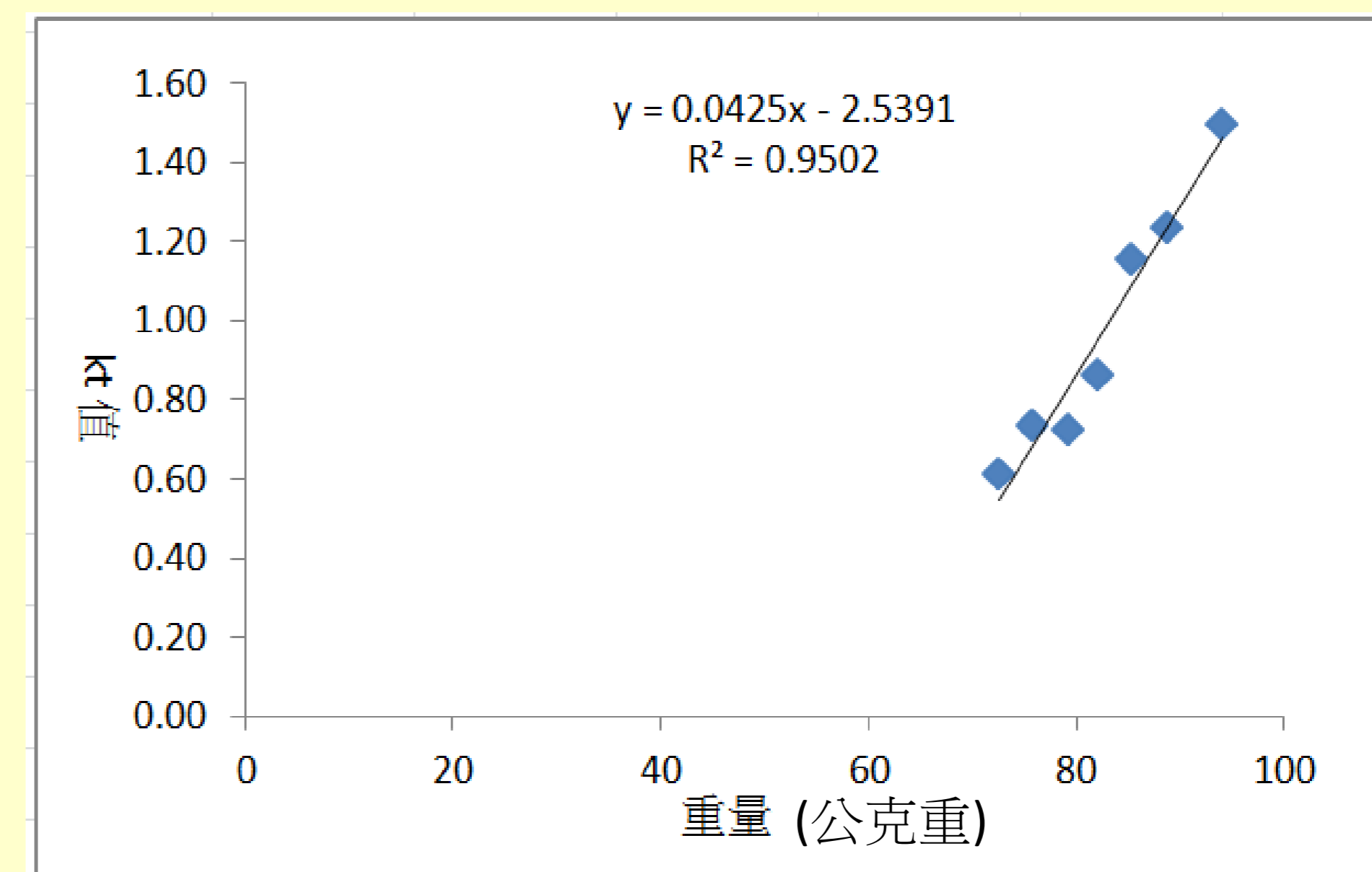
$error = now - setpoint$ (setpoint=512)

$p = kp * error$ (因為磁力與距離變化接近線性)

$d = kd * (now - old) / (t - oldt)$ (假設速度對PWM輸出影響為線性)

PWM輸出 = Kt x (128 + p + d) (128由懸浮體重量換算得)

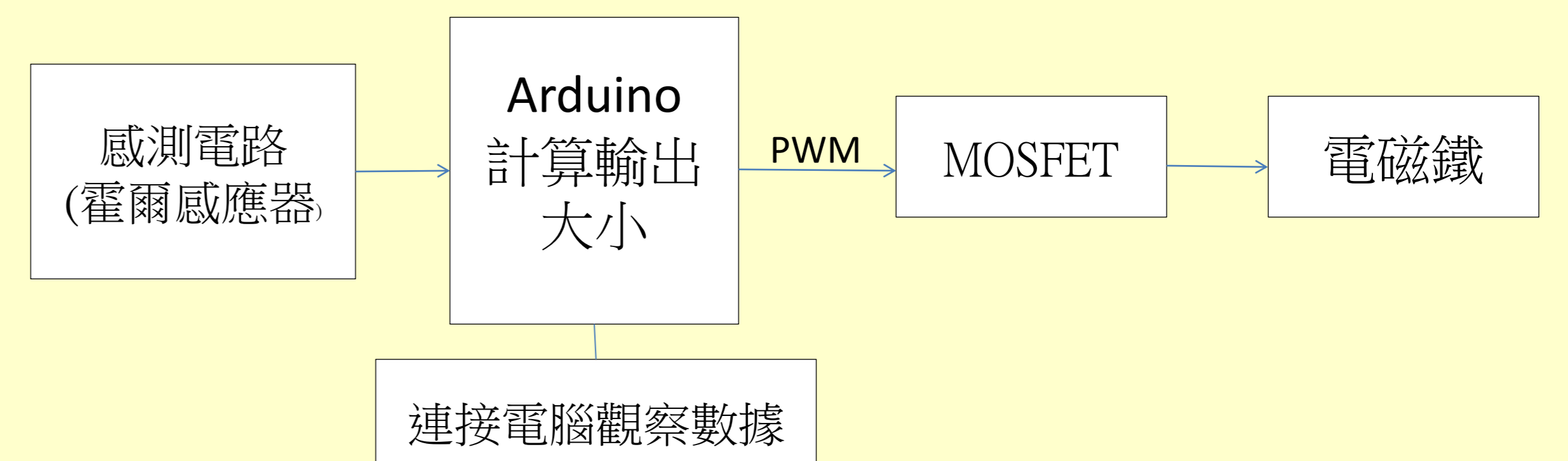
懸浮物重(g)	72.58	75.86	79.2	82.06	85.37	88.74	94.01
第一次Kt	0.6	0.74	0.7	0.9	1.16	1.12	1.38
第二次Kt	0.64	0.8	0.76	0.84	1.3	1.16	1.46
第三次Kt	0.6	0.66	0.7	0.84	1	1.42	1.64
Kt平均值	0.61	0.73	0.72	0.86	1.15	1.23	1.49



小結：將100組位置讀數取平均之後，再求離均差的絕對值總和，此總和我們稱之為懸浮穩定度，而上表與上圖是我們對不同的物重，在給定的範圍內，用for迴圈抓取懸浮穩定度最小的Kt值，每筆重量我們做四次實驗，並把四次Kt直取平均之後座迴歸分析，發現懸浮物愈重，的確會使PWM輸出值線性遞增。證明我們的假設是正確的。

第二代：霍爾感應磁懸浮

一、探討如何使磁鐵穩定懸浮在空中。

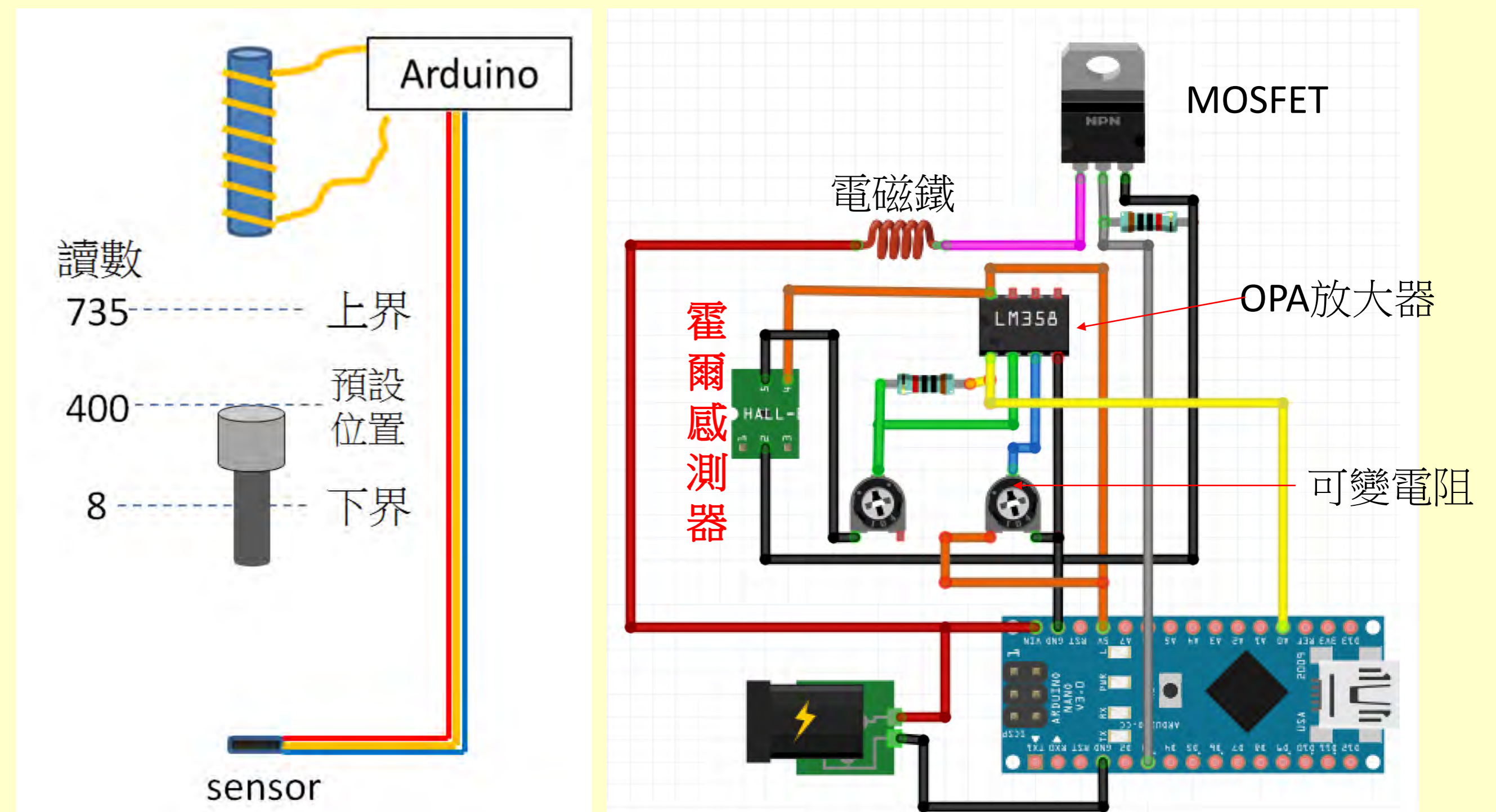


懸浮物位置偵測元件：霍爾磁感應器

使用霍爾感應器偵測磁場大小，換算出懸浮物的位置

裝置圖

電路設計圖



PWM輸出值 = 函數 (懸浮體位置, 懸浮體速度)

$error = now - setpoint$ (setpoint=400)

$p = kp * error$ (因為磁力與距離變化接近線性)

$d = kd * (now - old) / (t - oldt)$ (假設速度對PWM輸出影響為線性)

PWM輸出 = 121 + p + d (121由懸浮體重量換算得)

懸浮物



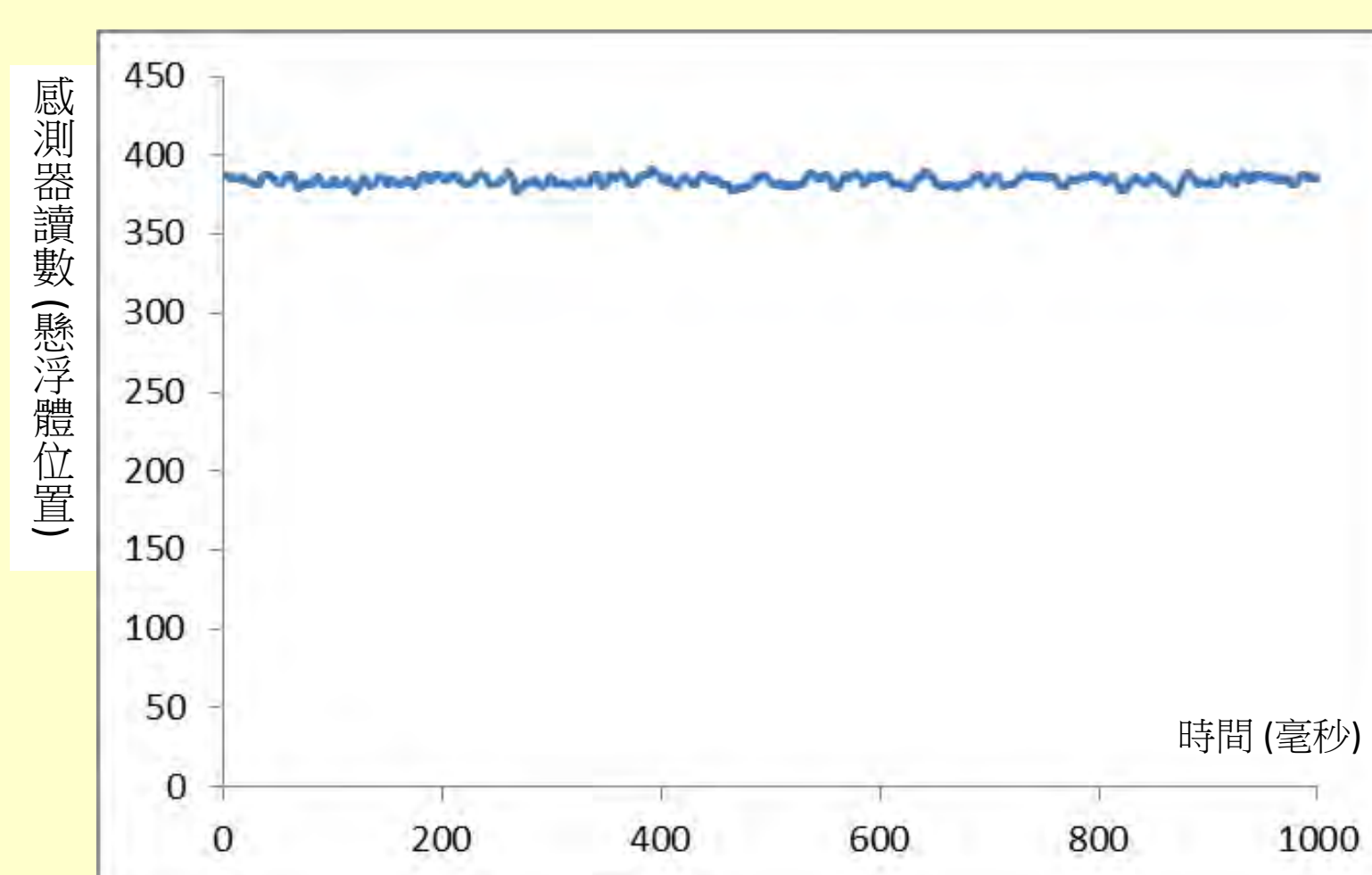
第二代磁懸浮裝置



因為霍爾效應感測器偵測懸浮體位置之讀數範圍(8~735)與光感測裝置的讀數範圍(0~1023)不同，因此我們重新調整kp與kd值，實驗結果如下：

表5.4，kp與kd所對應的懸浮情形

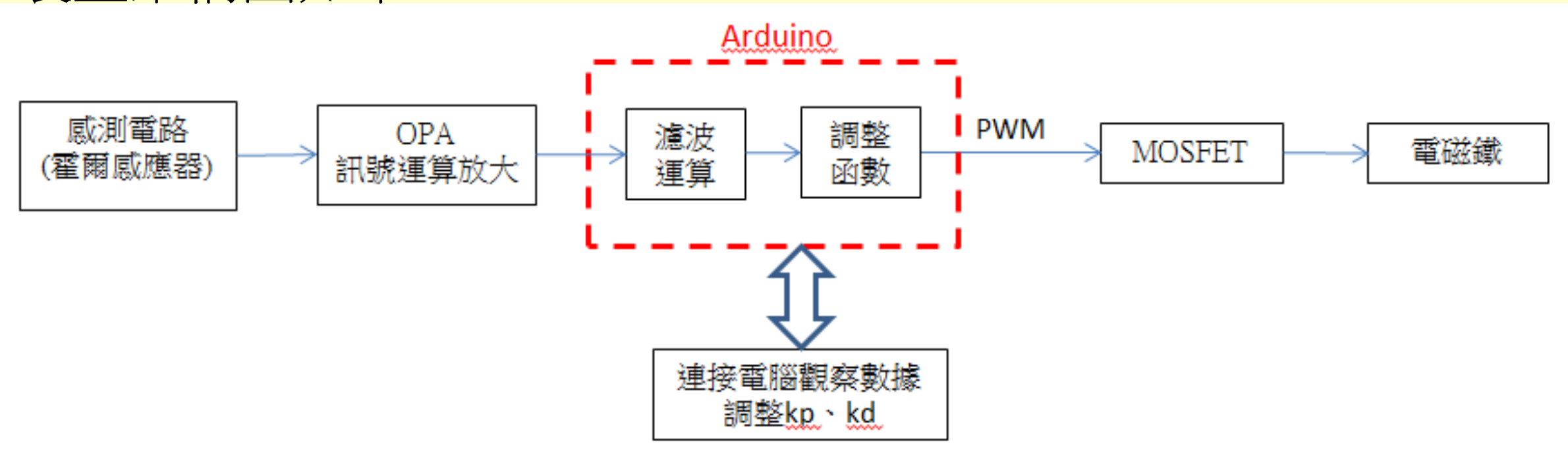
	kd=700	kd=300	kd=100	kd=50	kd=25
kp=0.25	X	X	X	X	X
kp=0.45	X	X	X	X	X
kp=0.65	X	X	X	X	X
kp=0.85	X	X	X	較為穩定	較為穩定
kp=1.0	X	X	X	較為穩定	較為穩定



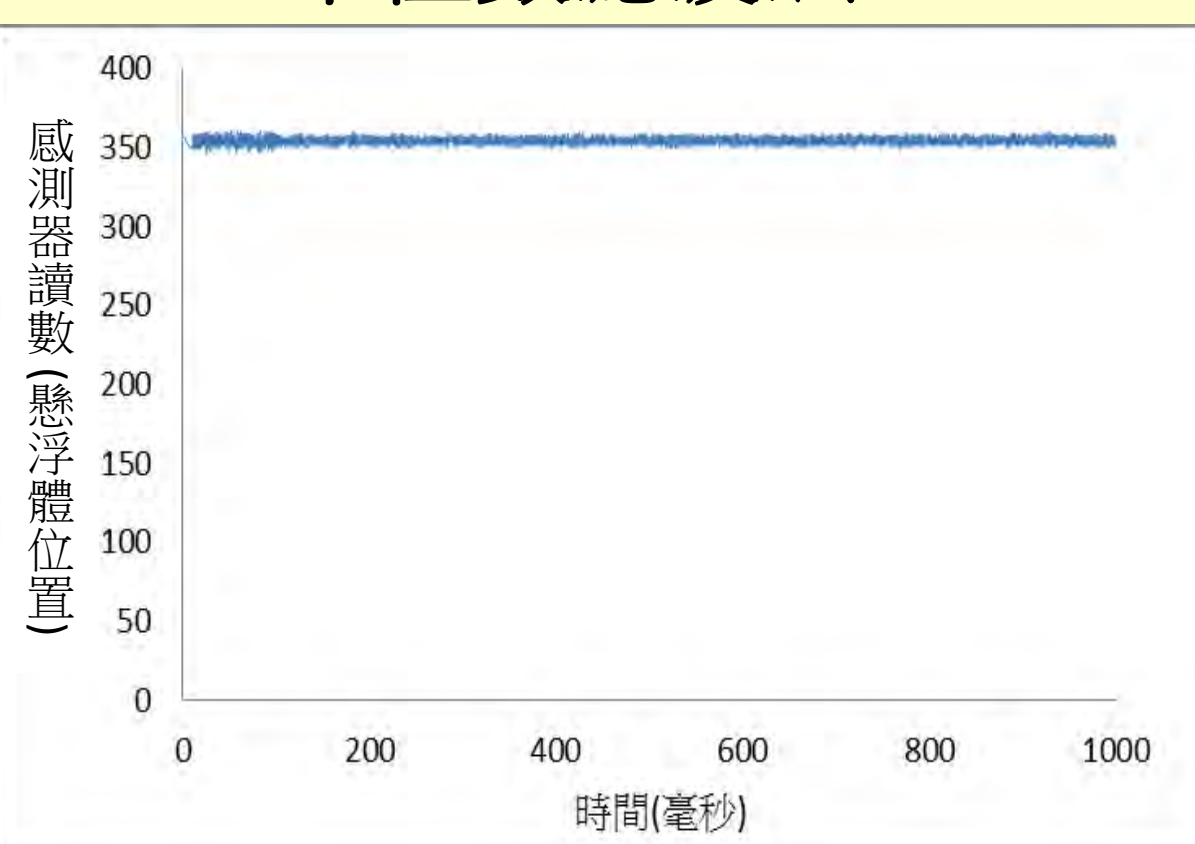
小結：實驗中發現無論如何調試Kp與Kd，懸浮物都只能相對穩定暫時停留個7~8秒，而且每次啟用都需要做微調才能達到相對穩定。

二、加入濾波法改進

裝置架構圖如下：

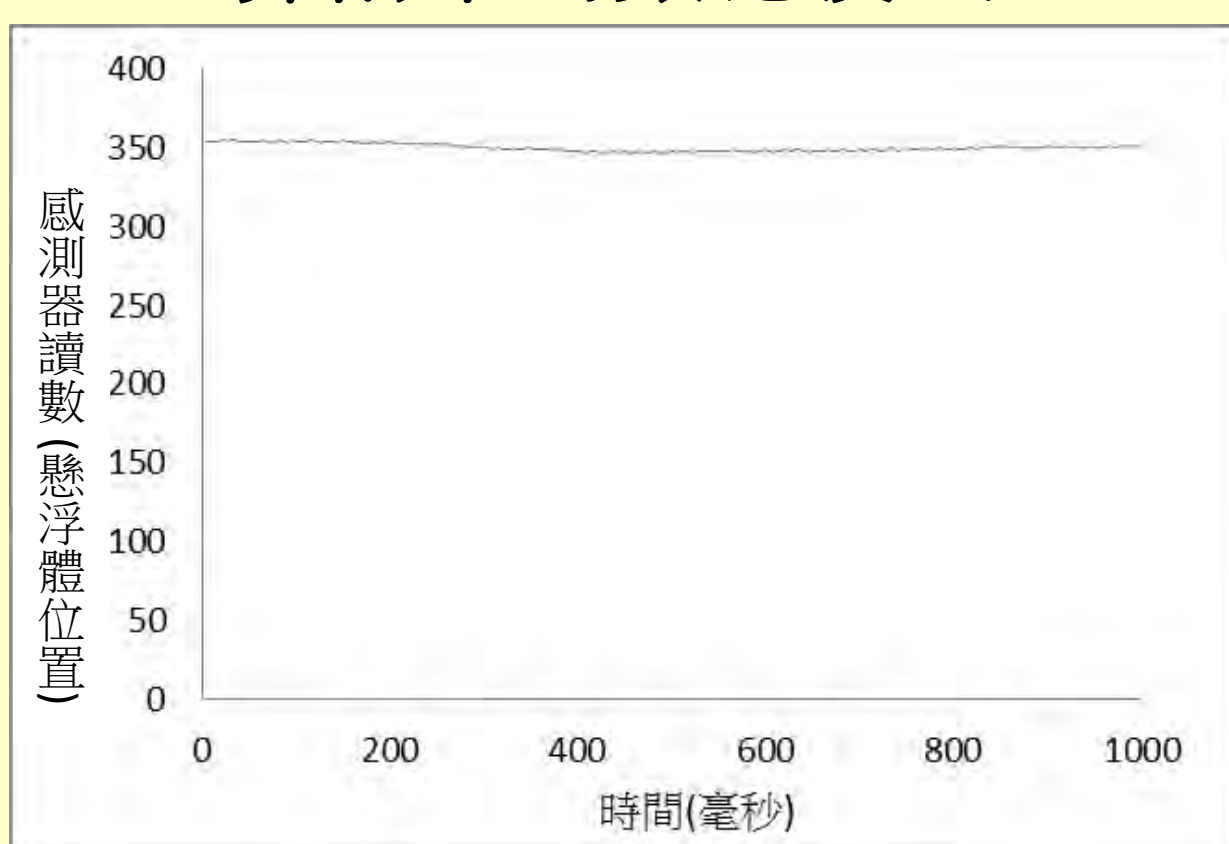


中位數濾波法



在最佳kp、kd值，達穩定懸浮的前提下，感測器讀數之震盪會在350±10震盪。

算術平均數濾波法



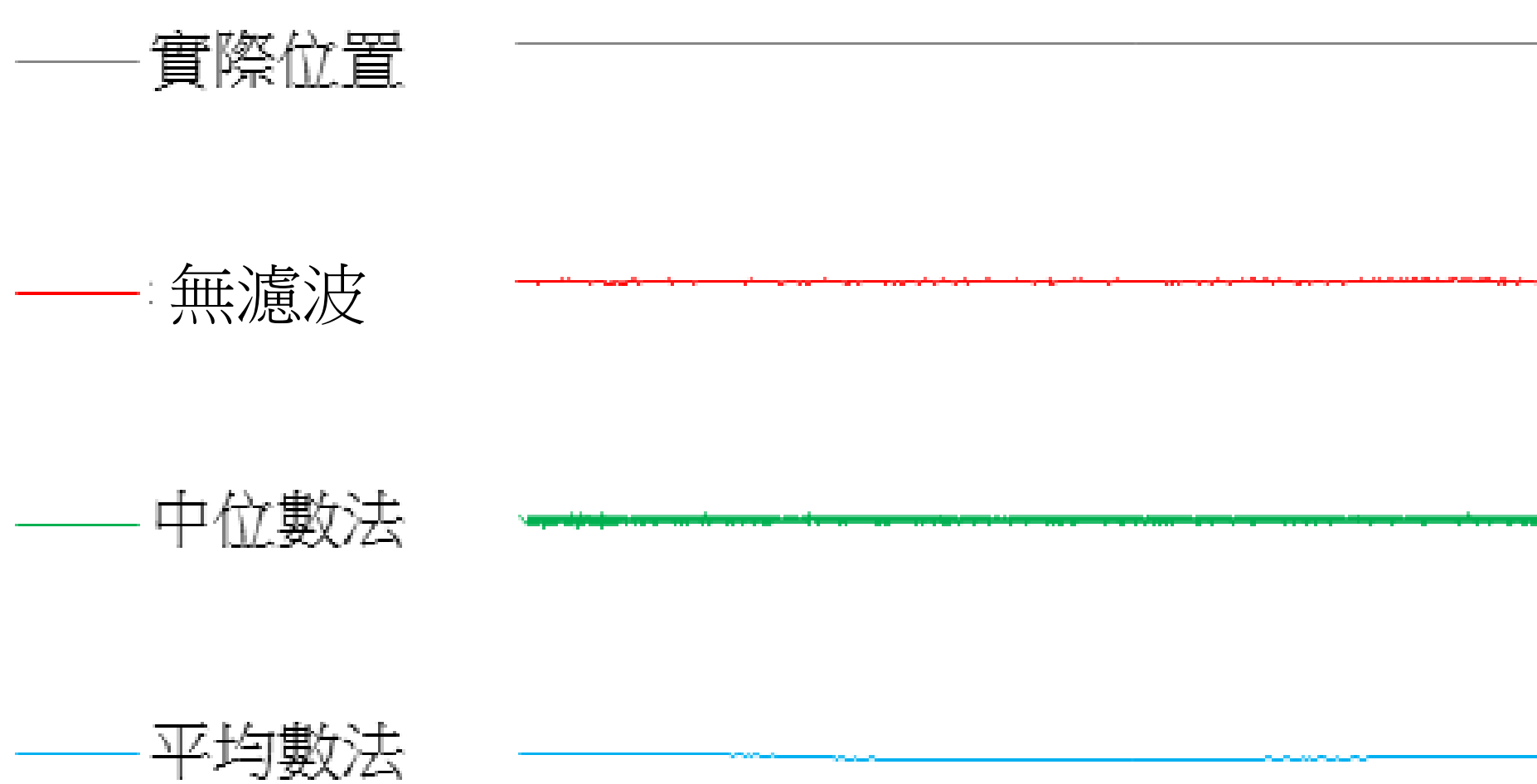
在最佳kp、kd值，達穩定懸浮的前提下，感測器讀數之震盪會在585±2處震盪

依據我們先前所訂定的穩定度=100組數據的Σ|離均差|我們找到最適合的kp值與kd值作為此懸浮系統的參數

表 5.6，kp 與 kd 所對應的懸浮情形

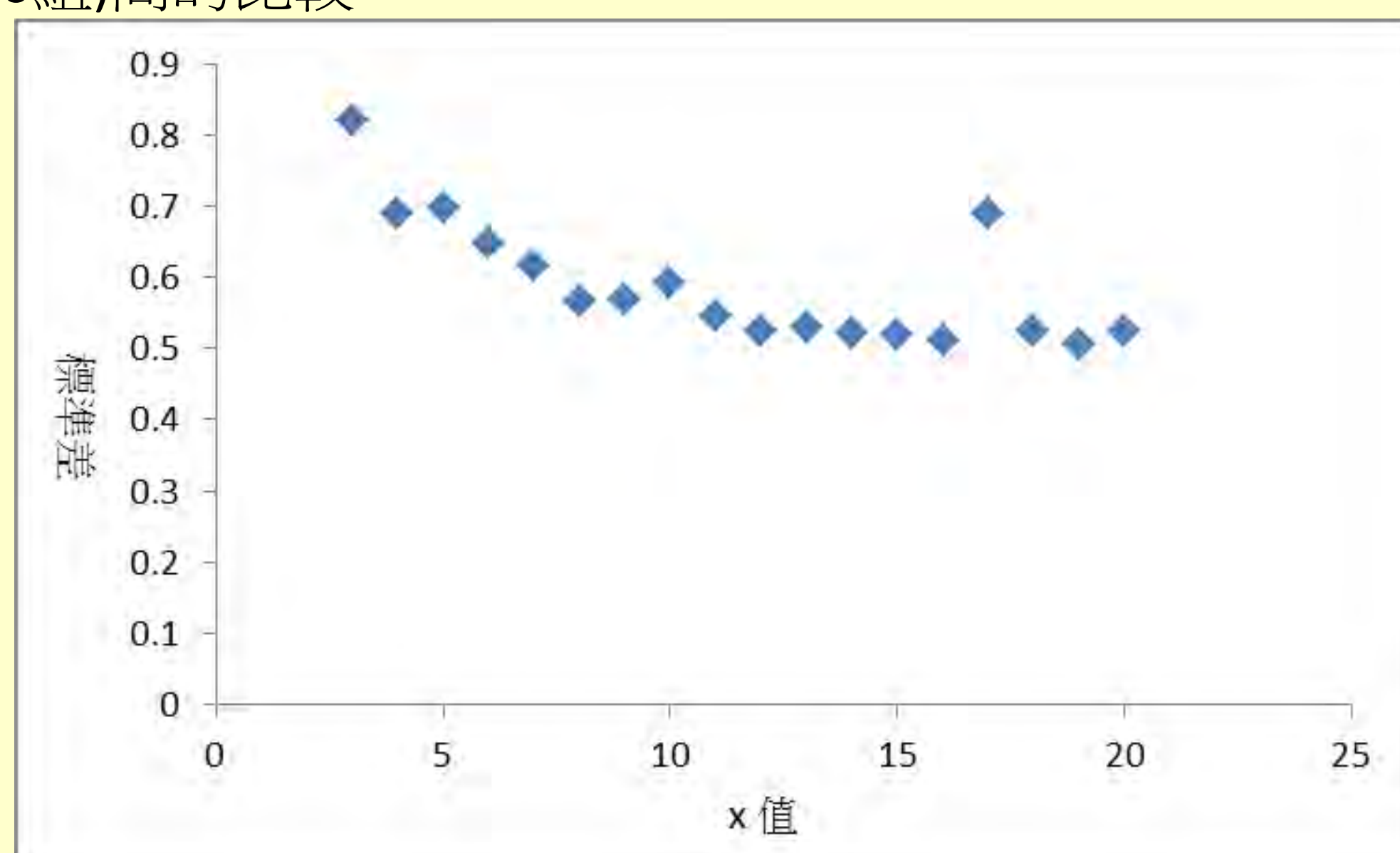
懸浮穩定度	kd=50	kd=40	kd=30	kd=20	kd=10
kp=0.8	完全無法懸浮	1872	1608	310	無法長時間懸浮
kp=0.85	2845	2346	2240	270	無法懸浮
kp=0.95	2696	2253	1949	341	無法懸浮
kp=1.0	2010	2553	2086	263	無法懸浮
kp= 1.5	無法長時間懸浮	無法長時間懸浮	2119	863	完全無法懸浮

小結：上表可看出，適當的Kd值將大幅影響懸浮穩定度，在kd=20下，懸浮物能更穩定的保持在某個位置



三、探討算術平均數的組數x對於磁懸浮濾波效果的影響

本項研究探討當算術平均數的組數各為3、5、8、10、15、20時，感測器讀數的標準差(分別3組、5組、8組、10組、15組、20組)間的比較



小結：我們發現能讓懸浮物穩定漂浮之前提下，算術平均數之組數x值越大可讀到越穩定的波，標準差也愈小，但礙於Arduino處理器的運算性能所限，過大的x值(x=20)會導致處理時間過長，影響懸浮狀況甚至無法穩定懸浮，故我們取x=15為最終x值，兼顧濾波效果與運算效能的妥協。

四、探討穩定懸浮與pwm輸出(工作電流)之間的關係(霍爾感測裝置)

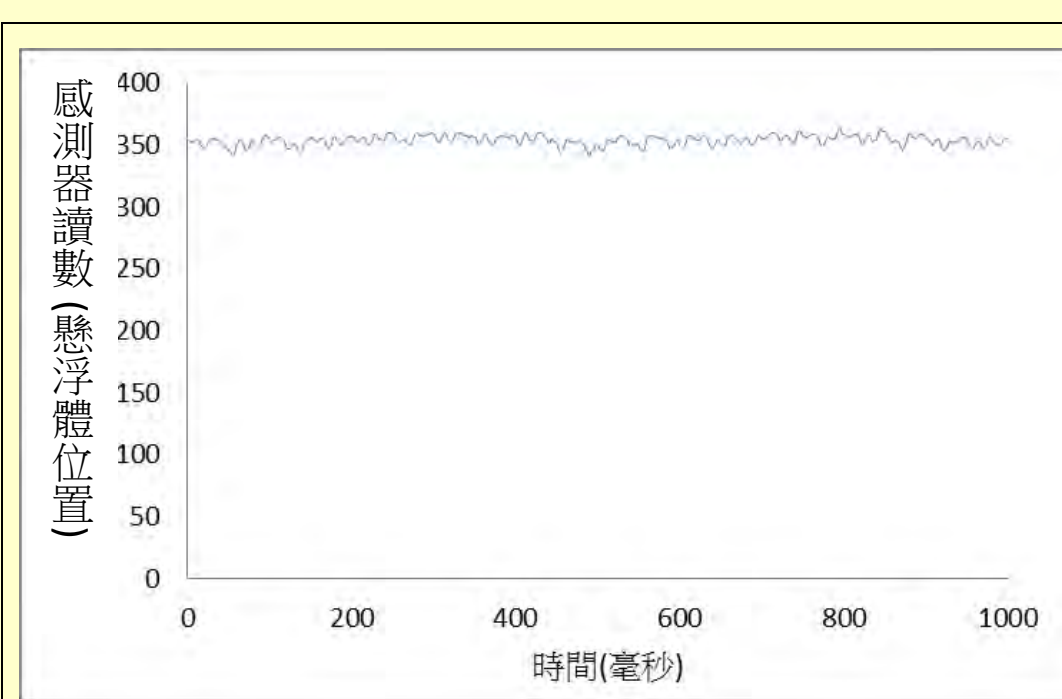


圖 5.6 感測器讀數對時間之關係

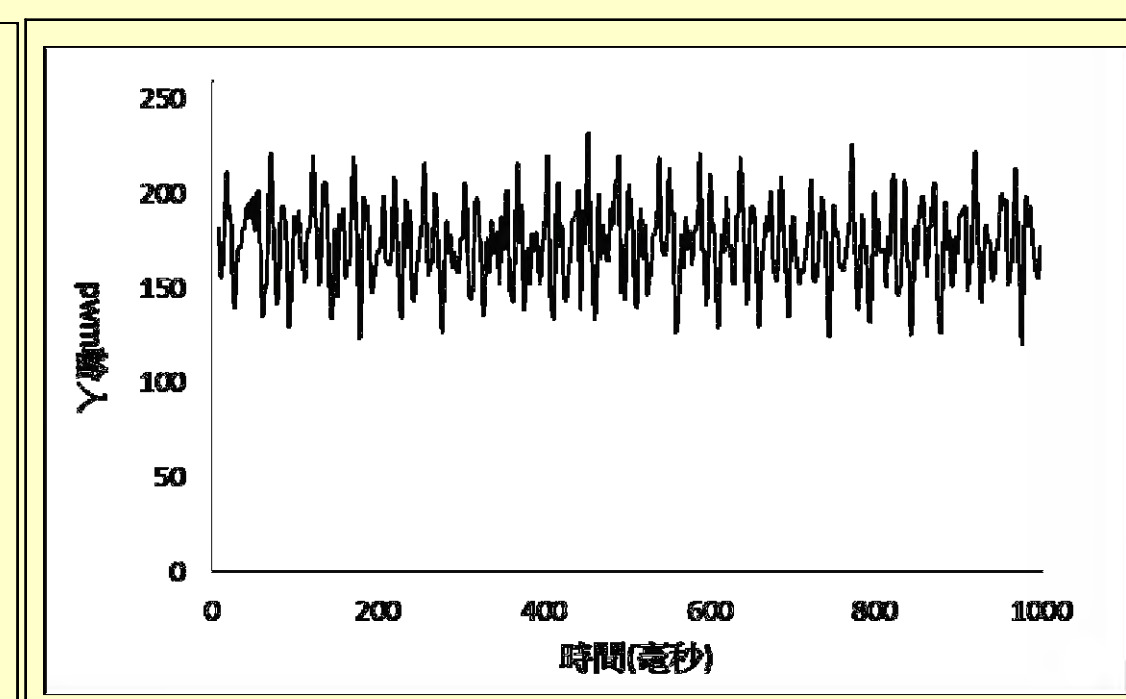


圖 5.7 PWM 輸出對時間關係

小結：從這張圖可看出輸出符合我們的理想狀況，為一穩定且起伏不大的波。但相較於光感測原理的懸浮方式，霍爾效應感測原理之調整文定度仍待再提升。

伍、結論

- PWM數值與電磁鐵輸出的磁場接近線性關係
- PWM數值與輸出磁力的關係很接近3次曲線
- 在很小的距離內，位置與磁力變化可視為線性
- 調整函數若只考慮位置偏差量，即：
PWM輸出值 = 函數(懸浮體位置)
無論如何小心擺放，磁鐵會愈晃愈劇烈。
- 當調整函數同時考慮位置偏移量與偏移速度，即：
PWM輸出值 = 函數(懸浮體位置, 懸浮體速度)
可以達穩定懸浮。
- 懸浮狀況達穩定時，輸出的PWM值也會趨於一定值，此時電磁鐵上的溫度微溫，若懸浮狀態不穩定，PWM輸出會大幅度波動，會造成電磁鐵溫度大幅上升。
- 懸浮物愈重，會使需要的pwm輸出值線性遞增，在不改變Kp與Kd的前提下，把原有的pwm輸出乘上某個比率Kt放大是可行的，能夠達到穩定平衡。
- 霍爾感測器偵測懸浮體位置若無濾波法輔助，穩定持續時間會很短，而且每次上電都需要再微調
- 需要加入濾波法才能穩定懸浮，其中又以算術平均數濾波法的效果較佳。
- 在算術平均濾波法中，又以組數15組是兼顧懸浮穩定性與運算效能的最佳值
- 本實驗中，比較光感測與霍爾感測偵測位置的方法，以光感測的穩定度較佳。

陸、研究應用與展望

- 可再改進霍爾感測器磁懸浮裝置的穩定效能
- 可研究改變霍爾感測器置放位置對磁懸浮的效果的影響
- 可研究高溫狀態時，磁懸浮系統的平衡調整函數模型
- 可開發自動尋找適當kp、kd值的人工智慧法(使用for迴圈)
- 結合霍爾感測器與光感測系統開發磁浮系統

柒、參考文獻或工具

維基百科--磁懸浮<https://zh.wikipedia.org/wiki/磁懸浮>
 Fritzing 電路設計工具 <http://fritzing.org/home/>
 超圖解Arduino互動設計入門第二版，趙英傑，台北市，2014，旗標出版社
 感測器應用與線路分析第三版，盧明智等人，新北市，2014，全華圖書
 Prototyping Lab，小林茂，台北市，2012，馥林文化
 Make:圖解電子實驗進階篇，Charles Platt,台北市，2017，馥林文化