

第十四屆旺宏科學獎

成果報告書

參賽編號：SA14-265

作品名稱：吊扇偏擺校正及應用研究

姓名：張奇恩

關鍵字：吊扇、重心偏移、擺動

作品名稱：吊扇偏擺校正及應用研究

摘要

本研究藉由光學原理的應用，希望建立以最低成本的方式，達到快速正確校正吊扇偏擺狀況。我們利用雷射光直線前進的特性，將吊扇偏擺的振幅顯示放大，並反射顯示於我們設計的同心圓盤上，再利用數位相機拍攝同心圓盤上光點的位置，這樣可以確認吊扇偏心的位置及大小，透過圓盤上光點的扇形軌跡角度大小，可以計算出吊扇的轉速，經過數學的推算後，就可以知道需要搭配的配重重量及位置。

經過相關研究及測試後，發現本研究結果對於較新吊扇可以準確調校，但是對於較為老舊的吊扇校正，改善效果有限，原因在於吊扇老舊時，其零件的間隙較大，同時各扇葉的變形量也較大，因此在這些因素影響下，偏擺就不是只有校正吊扇重心能解決的。因此對於老舊吊扇的調校仍需要更深入的研究。在研究過程中，我們也希望了解非接觸式測量回轉速度的可行性，例如測量風力發電機扇葉的回轉速度變化，不能使用接觸式轉速測量，會干擾機構的運轉速度，同時也必須量測轉速變化，所以我們利用研究中的雷射光反射方式，透過照相機的錄影功能，了解運轉過程中的轉速變化及這種方式的限制。

壹、研究動機

有一天坐在教室，同學們都很安靜的溫習功課，這時候只有吊扇聲音陪我們看書，抬頭一看，哇！有的吊扇晃的好嚴重，好像要掉下來似的，聲音也特別大，有的吊扇運轉就很順暢，也不會有搖晃的感覺，為什麼會這樣呢？這開啟了我們想要探討吊扇擺動的原因。觀察水電工的調整方式時，發現他們都是使用錯誤嘗試法，利用配重塊來調整重心，如果要調整到非常平衡的狀況，有時就要花費很長的時間，有沒有更快速簡便而且準確的方法呢？還有吊扇偏擺時，對耗能是否有影響，這些都是值得研究的地方。

貳、研究目的

- 一、了解吊扇偏擺的原因及相關因素的關係
- 二、如何測量吊扇偏擺的振幅
- 三、設計偵測吊扇重心偏擺位置
- 四、設計快速校正吊扇偏擺問題的方法
- 五、以非接觸方式記錄轉速變化

參、研究設備、器材

- | | |
|------------|------------|
| 一、電腦 | 五、自製萬向反光鏡組 |
| 二、數位相機 | 六、高速車床 |
| 三、同步轉速儀 | 七、瓦特計 |
| 四、自製雷射投射裝置 | 八、吊扇 |

肆、研究過程或方法

一、研究流程圖

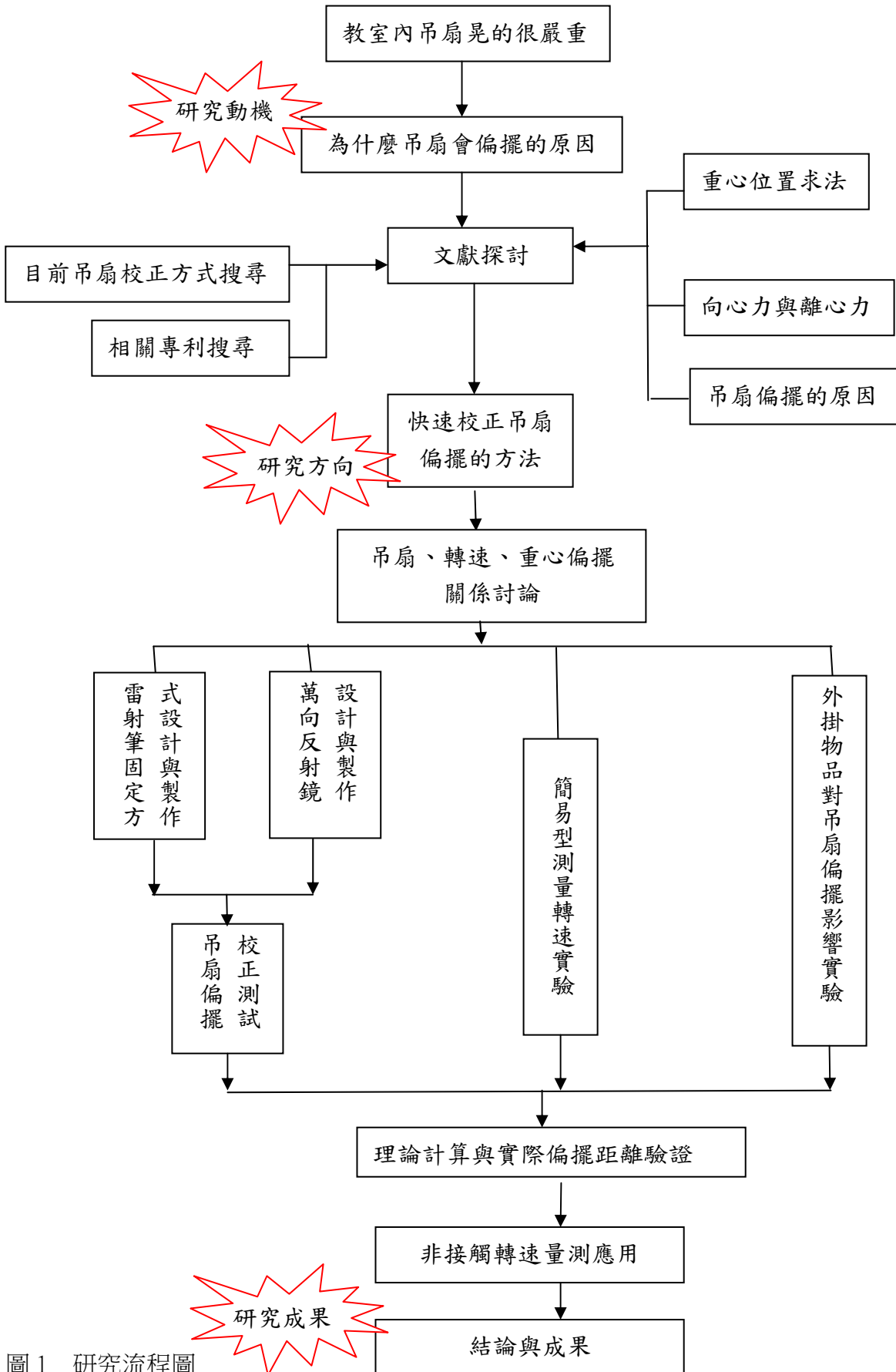


圖 1 研究流程圖

二、文獻探討

(一)吊扇偏擺原因

1. 馬達轉子沒有校正平衡或是吊扇馬達老舊導致機件間隙太大。

為了解吊扇的馬達運轉是否有偏擺，我們將吊扇扇葉拆下，只有吊扇主機馬達運轉，如圖 2 所示，經過雷射光源反射後，發現也有偏擺的現象，如圖 3 所示，其中藍色編號點為雷射光源，紅色編號點為反射後投影的軌跡，也有一些的偏擺現象。由於吊扇固定的方式是懸吊，因此一點點的不平衡就可能造成吊扇主機晃動。



圖 2 無扇葉吊扇試運轉

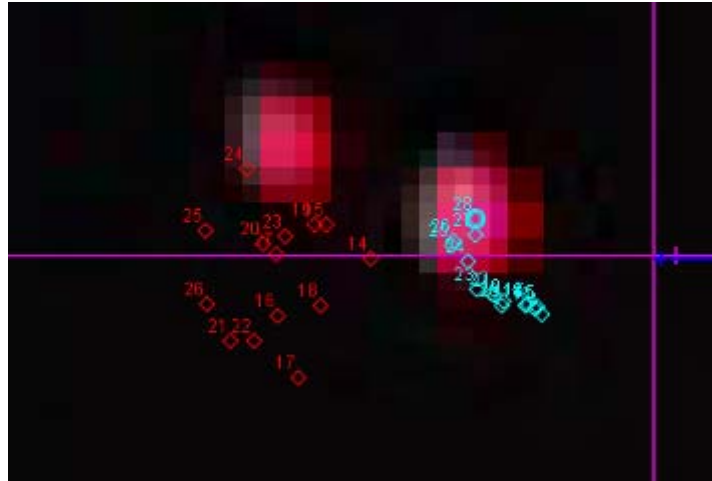


圖 3 無扇葉運轉雷射光點軌跡(藍色為光源，紅色反射光)

2. 各扇葉的扭轉角度不同

扇葉是由木質扇葉及金屬柄構成，目前常見為五片扇葉，若其中有一片扇葉的扭轉角度略有偏差，轉動時受力就不同，因此就可能造成偏擺，所以有人針對這點設計精確調整扇葉扭轉角度的調整法。

3. 各扇葉的材質不均勻，重量不均

我們將扇葉拆下後逐一編號秤重如圖 4，發現有三個扇葉重量為 445g、一個 446g、一個為 447g，重量差異性也會造成吊扇偏擺。



圖 4 扇葉秤重



圖 5 吊扇扇葉變形

4. 扇葉變形，形狀不同

扇葉變形部分如圖 5 所示，若扇葉材質不佳容易受潮就可能變形，這點也可能會造成吊扇晃動[1]。

5. 外力作用，如風吹、碰到物品等

6. 吊扇安裝錯誤

綜合上面幾點，這些吊扇偏擺的因素都會對扇葉造成某種程度的影響，這些因素會互相影響，有所謂的交互作用，在探討上就更複雜了，所以我們只針對組裝後的吊扇進行調整，希望以比較簡單的方式完成這項校正工作。

(二)專利搜尋

我們蒐尋中華民國專利資訊檢索系統後[2]，發現有兩種調教吊扇的專利，專利證號 141503 之吊扇偏擺不正之光電檢測法，如圖 6 所示，他的設計是利用光電感應的方式，將吊扇偏擺的位置顯示於地面上的靶紙上，檢測時需要將光電裝置固定在吊扇控制盒上，加上感應貼紙的黏貼，都增加作業的困難度，同時光電感應裝置偏移一側，應該對其偏擺有影響。另外一個為專利證號 178730 之吊扇旋轉不正之檢測器結構，如圖 7 所示，裝設方式較為複雜不便，同時驅動機構對吊扇也可能造成影響。

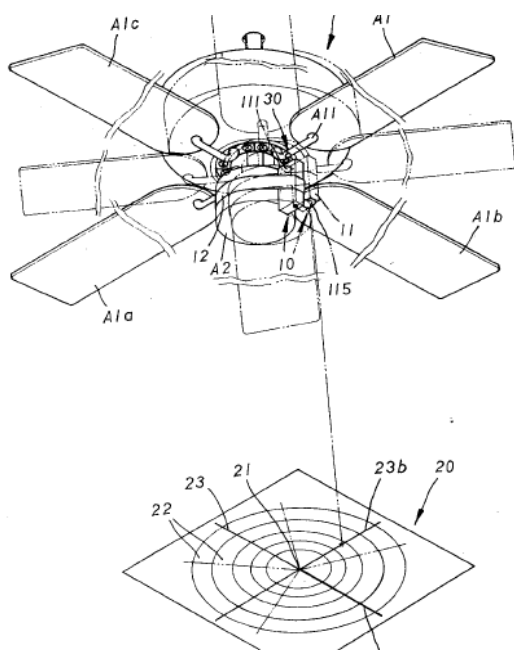


圖 6 吊扇偏擺不正之光電檢測法

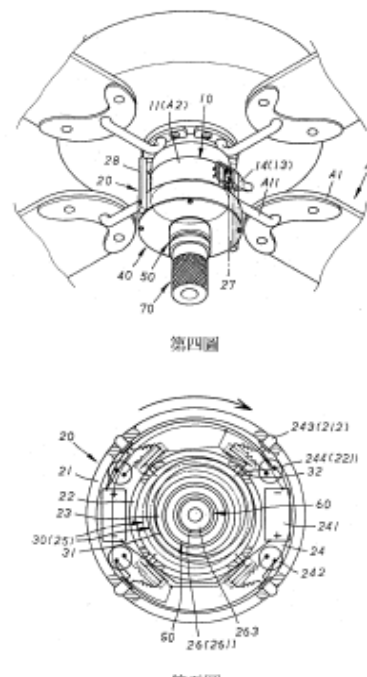


圖 7 吊扇旋轉不正之檢測器結構

(三)精確調整吊扇的方式

我們在資料蒐尋時也發現有『吊扇葉片晃動的終極解決法』[3]這個網頁，如圖 8 為測量各扇葉角度偏差，圖 9 為調整扇葉角度誤差的方法。

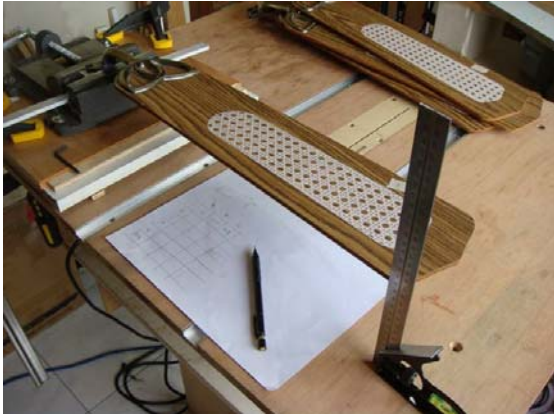


圖 8 吊扇測量扇葉歪斜程度

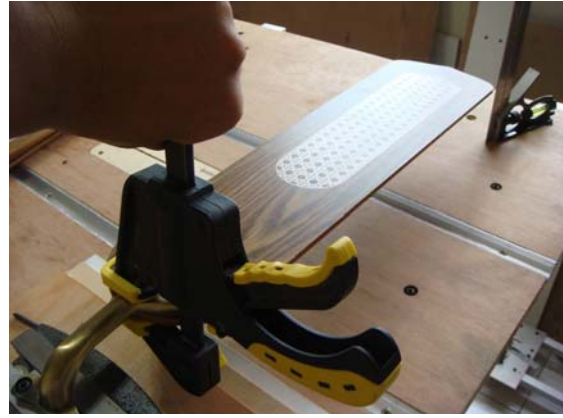


圖 9 扇葉角度調整

三、研究方法與過程

(一)物體重心的求法

所謂重心是指物體重量分布的中心點[4]，假設物體由無數個小質點構成，每一點質點都受重力影響，產生向下的平行力，這些平行力的合力就是物體的總重量，其作用位置就是重心，如圖 10 所示。要如何知道重心的位置？簡單幾何形狀的物體其重心可以用計算的方式求得，而較複雜的物品可以使用懸吊法求得重心位置。如圖 11 所示，台灣的圖形經過至少兩次不同位置的懸掛，就可以知道其重心位置為懸吊線延伸線交點處。

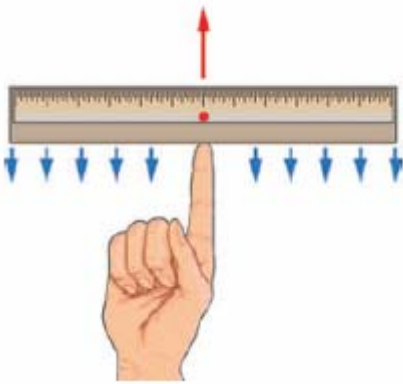


圖 10 重心的定義

摘錄自機械力學，台科大[4]

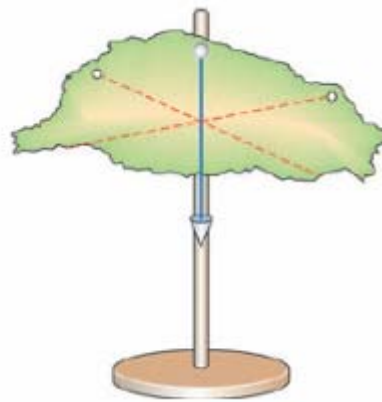


圖 11 懸吊法求物體重心

摘錄自機械力學，台科大[4]

(二)圓周運動

由於風扇旋轉是圓周運動的應用，因此我們也探討各種圓周運動的計算公式。

1.角速度

圓周運動之物體上的質點，其單位時間內的角位移稱為角速度（angular velocity），以 ω 為符號，最常用的單位為弧度/秒（rad/s）。

$$\omega = \frac{\theta}{t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f = \frac{2\pi N}{60}$$

圓周運動切線速度與角速度的關係如下：

$$V = r\omega$$

2.切線加速度

作曲線運動之物體，若其切線速度的大小隨時間變化而有改變者，表示在切線方向有加速度，此一加速度稱為切線加速度(tangential acceleration)，以 a_t 為符號。

$$a_t = r\alpha$$

3.法線加速度

此加速度係用來改變切線速度的方向，其方向恆指向圓心，所以稱為向心加速度，又稱為法線加速度 (normal acceleration)，或徑向加速度。以 a_n 為符號。

$$a_n = \frac{V^2}{r} = r\omega^2$$

合加速度

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2}$$

(三)向心力及離心力

產生向心加速度的力即稱為**向心力**(centripetal force)，以 F_n 來表示，其計算式為

$$F_n = ma_n$$

$$a_n = \frac{V^2}{r} = r\omega^2$$

離心力 (centrifugal force)，其大小與向心力相等，但方向相反。以 F_n' 表示，而 $F_n' = -F_n$ 。將物體以繩子綁緊，使其在水平面上作圓周運動，圖 12(a)所示為水平面圓周運動之俯視圖。圖 12(b)為汽車轉彎時會產生離心力的示意圖。

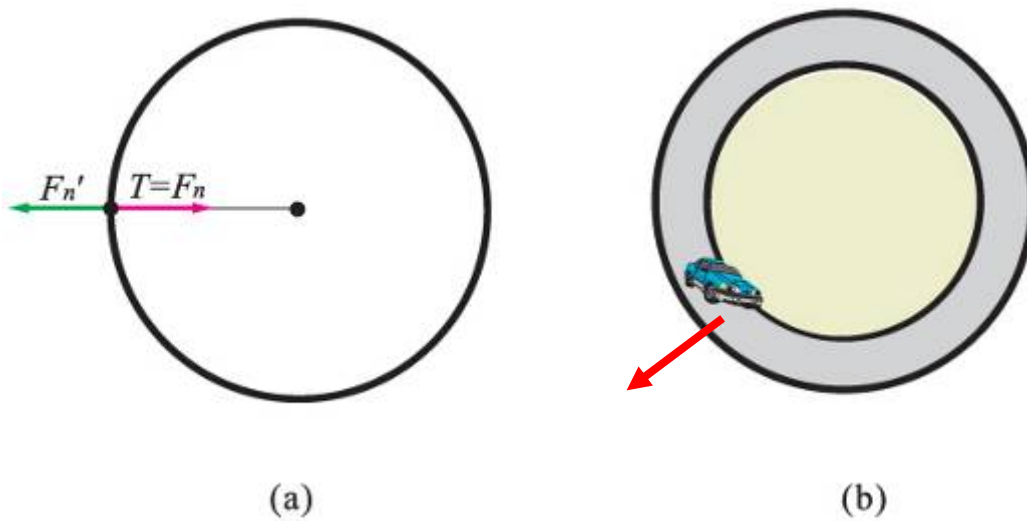


圖 12 平面圓周運動時，力的作用方式(摘錄自機械力學，台科大[4])

(四)吊扇偏擺理論計算

吊扇的運轉是迴轉運動，我們假設各扇葉是**平衡狀態**，當我們夾上一個 3g(m)的長尾夾如圖 13 所示，迴轉後長尾夾就會產生離心力 F_n 。離心力 F_n 會造成整個吊扇如錐擺般擺動。我們測量吊扇各部位尺寸繪出如圖 14~15，其中吊扇馬達重量 4.8Kg，雷射筆重量 200g，扇葉總重 2.228Kg，扇葉的迴轉半徑為 60cm，天花板至雷射筆裝置距離 28cm，扇葉以 200RPM 轉速迴轉。

先求出長尾夾造成的離心力 F_n

$$F_n = ma_n$$

其中 $m=3g=0.003Kg$ ， $N=200RPM$

$$F_n = 0.003 \times 0.6 \times \left(\frac{2\pi \cdot 200}{60}\right)^2$$

計算得 $F_n=0.789567N$ 同時 $\omega=20.943rad/sec$

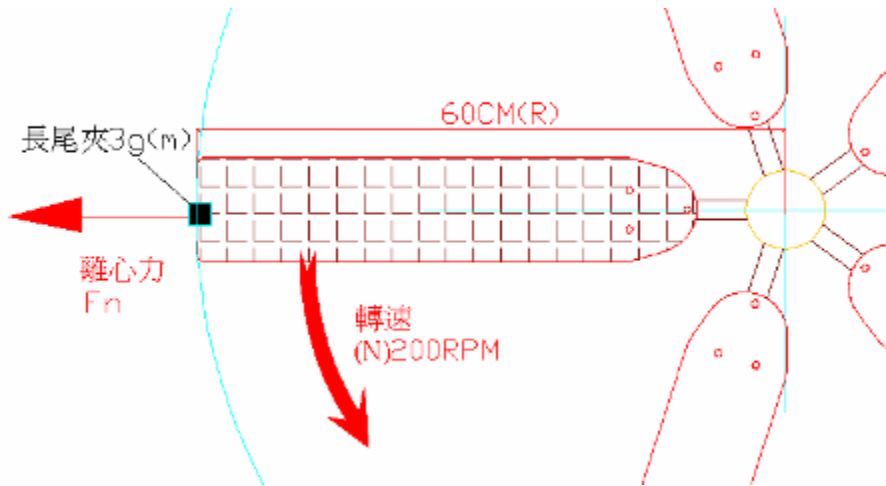


圖 13 吊扇迴轉平面圖

如圖 14 中，我們假設吊桿會承受一個拉力 T

則

$$T \times \frac{r}{0.28} = 7.228 \times (r \times \omega^2)$$

$$T \times \frac{r}{0.28} = 7.228 \times (r \times 20.943^2)$$

計算得 $T=887.754N$

根據同平面力系原理，吊桿的拉力的水平分力等於離心力

$$T \times \sin \theta = 0.789567$$

$$\sin \theta = \frac{0.789567}{887.754} = 0.000889398$$

計算得 $\theta=0.050958782$ 度，表示夾一個 3g 的長尾夾會造成吊扇產生這個角度的偏擺。

如圖 15 中實際量測雷射筆至反射鏡的距離為 2m

則

$$\tan \theta = \frac{X}{4}$$

$$X = 4 \times \tan \theta = 4 \times 0.000889398 = 0.003557595 \text{ m} = 3.557595 \text{ mm}$$

經過換算後可以知道一個 3g 長尾夾會造成半徑 3.5mm 的迴轉圓圈。

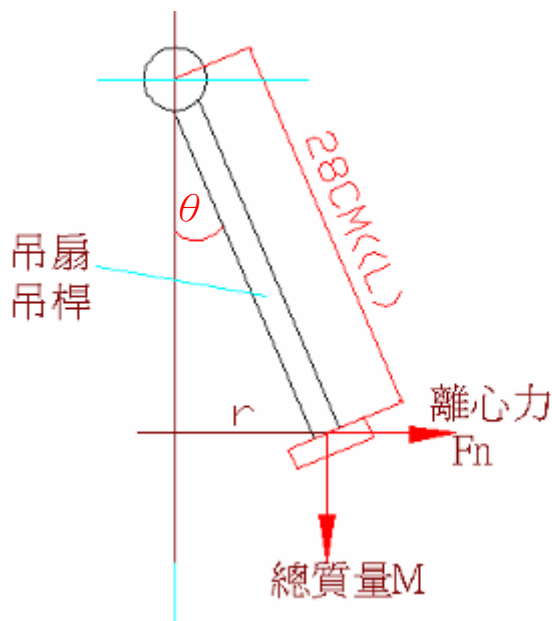


圖 14 吊扇擺動位置示意圖

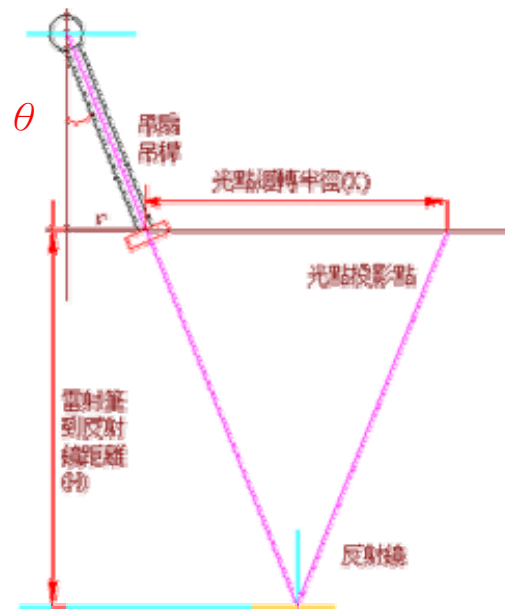


圖 15 雷射反射光路示意圖

(五)吊扇偏擺振幅測量的方式設計與測試

在討論過程中，我們初步構想的方式，是考慮離心力會使偏擺有一定的頻率與振幅，想辦法讓離心力造成的偏擺位置方向顯示出來，再利用非接觸式轉速計，來確認偏擺的扇葉編號與重心顯示的相對位置，再作配重調整。所以如何讓方向顯示出來？離心力偏擺顯示方式可利用鋼珠導電，可以知道方向，可是偏移位置不知，除非可以測量鋼珠對開關的壓力。其實好像直接用透明的盒子，加上有顏色的珠子，就可以了解離心力的影響及位置。

後來上物理課程時[5]，同學拿雷射筆在牆上繞圈圈時，發現雷射光點轉動的樣子，就好像吊扇在擺動的樣子，這個發現給我們一些靈感，老師說光線經過反射鏡時，入射角會等於反射角，加上距離與角度的關係，會有放大的效果，也就是說雷射光從吊扇下射出後，會在地面轉圈圈，同時會將晃動的情況放大。

可是我們必須知道吊扇重心是偏向那一個扇葉，我們討論後決定使用反射鏡讓雷射光反射回去，可以看到光點在吊扇下呈現，那如何偵測位置呢？這時我們使用數位相機來拍照時，竟然發現光點的位置都會固定在某一扇葉那一側，所以就有這樣的構想來設計快速光學校正吊扇偏擺的工具如圖 16 所示。

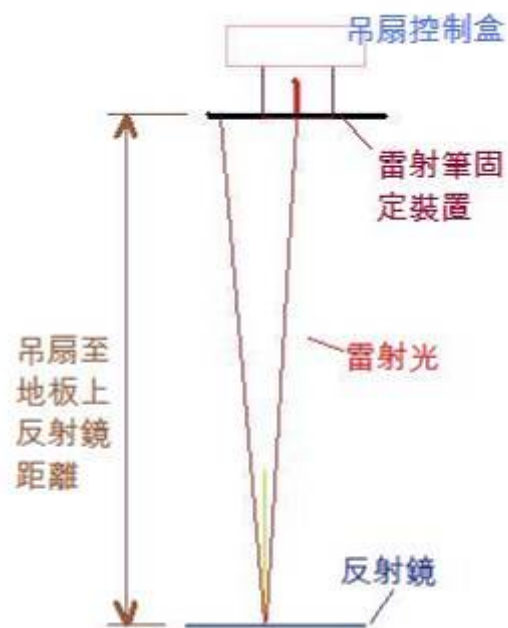


圖 16 雷射光反射路徑示意圖

我們起初設計的雷射筆盒如圖 17 所示，拆解雷射筆後將雷射頭固定在一塑膠盒內，再裝設電池盒及磁鐵，讓這個裝置可以吸附在吊扇下方的控制盒如圖 18。完成後我們就進行吊扇的振幅實驗，在地面上放置同心圓紙張，觀察吊扇偏擺與雷射紅點的可觀察性。假設偏擺越多，紅點會繞越大的圈圈，如圖 19 所示。



圖 17 初步製作的雷射筆固定盒



圖 18 雷射筆固定盒吸附在吊扇下方

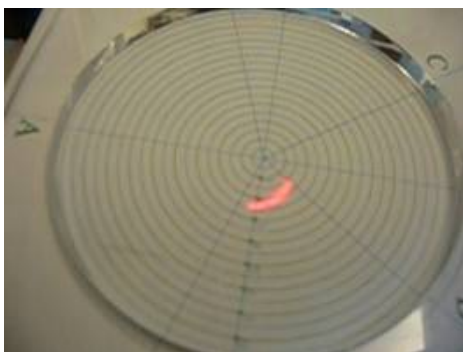


圖 19 雷射光點顯示在同心圓標靶紙上

1. 新設計雷射筆固定裝置

由於前面製作的雷射筆盒重量沒有對稱平均，加上反射後的光點需要容易觀察，因此我們重新設計雷射筆吸附裝置，利用雷射加工機加工壓克力板材，製作過程如圖 20，完成的雷射筆同心圓盤如圖 21，其中雷射從圓心處發射出來。



圖 20 雷射切割實驗設備

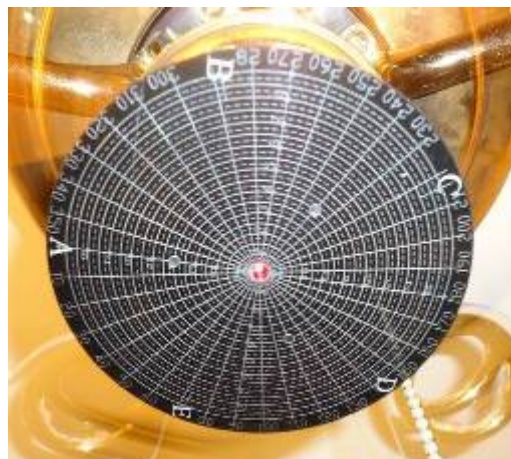


圖 21 雷射筆同心圓盤

雷射光部分直接使用書局購買的雷射筆，不再拆開，設計機構可以從外側開啟電源開關，設計製作時也考慮平衡對稱，拆裝如圖 22 所示。完成如圖 23 裝置，上面裝設 3 顆強力磁鐵，可以吸附在吊扇的控制盒上。



圖 22 雷射筆裝置組裝

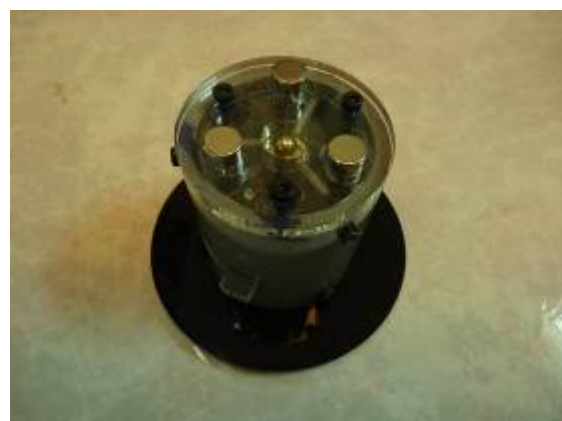


圖 23 雷射筆固定裝置使用磁鐵

2. 萬向反射鏡設計

在使用反射鏡時，需要調整其角度，因此原本考慮使用相機三腳架的雲台，可是在調整角度時不容易微細調整，因此我們設計互相垂直的兩軸，可以分別調整角度，這樣調整上就比較容易，完成的反射鏡組如圖 24 所示，有兩個旋轉螺絲，可以控制 X 軸及 Y 軸位置。這組反射鏡也可以安裝在三腳架上，更容易調整與觀察雷射光點，如圖 25 所示。



圖 24 反射鏡萬向調整設計



圖 25 萬向反射鏡安裝於相機腳架上

3. 雷射筆擺置位置對光點的影響(討論控制盒上的重心位置影響)

吊扇會偏擺不正的原因主要是重心位置偏移，因此外加物品對吊扇而言，會改變其重心位置，加上之前搜尋的專利設計構造是不是合理？也是我們想要探討的地方，因此我們也針對這個問題設計實驗。雷射裝置吸附不同位置時是否會影響偏擺(地面同心圓錄影或照相)，因為物理老師上課有介紹一套免費軟體 **Tracker**，Tracker 軟體是一個建立於 Open Source Physics (OSP) Java 架構下的免費影像分析與建模工具[6]，因此我們計畫使用 Tracker 來分析。

圖 26 是雷射投影幕上方影像，圖 27 是原本的實驗架構，讓數位相機在投影幕下方錄影，盡量讓螢幕在中間，可是實驗時調整不易，因此修改如圖 28 的錄影方式，只是需要將相機盡量垂直紙面，圖 29 為實驗過程。

A. **實驗設備：**雷射筆吸附裝置、同心圓標靶紙、數位相機及腳架。

B. **實驗步驟：**

- (1) 吊扇扇葉為沒有夾上任何長尾夾狀況
- (2) 將雷射筆裝置吸附於吊扇控制盒正中央。
- (3) 啟動吊扇最高轉速，運轉約 1 分鐘
- (4) 將同心圓標靶紙放置於地板上，調整紅點繞同一圓轉
- (5) 若紅點為近似橢圓或一直線移動，則將標靶紙的 X 軸轉向紅點長移動的中間位置
- (6) 使用數位相機及腳架錄影，盡量垂直紙張錄影，使用小便條紙說明實驗條件。
- (7) 移動雷射筆至 X 軸最外側，重複 3-6 動作。
- (8) 移動雷射筆至 Y 軸最外側，重複 3-6 動作。

將吊扇一個扇葉夾上 1 個長尾夾，重複實驗 1-8 步驟，並記錄

將吊扇一個扇葉夾上 2 個長尾夾，重複實驗 1-8 步驟，並記錄



圖 26 同心圓標靶紙投影幕



圖 27 原本設計錄影位置



圖 28 直接將標靶紙放於地面錄影



圖 29 實驗過程

4. 簡易量測物體轉速的方法

在理論分析時，我們發現吊扇轉速會影響離心力大小，要如何測量吊扇的轉速呢？我們有借到一組**同步轉速儀**，可以測量迴轉運動的轉速，可是其價格不低，是否有簡易的測速方式呢？經過幾次討論後，我們發現也許可以利用數位相機來測量，因為相機的快門速度可以讀出，經過換算後就可以得到轉速，精確度如何呢？我們針對這問題設計如下實驗。

將雷射筆裝置於迴轉物體上，並將雷射照射於一刻畫有同心圓及角度的圓盤，以設定的轉速迴轉，再利用數位相機拍照，經過換算以求得轉速。

A. 實驗設備：高速車床、數位相機(兩種牌子)、雷射筆裝置、自製同心圓盤、同步轉速儀

B. 實驗步驟

- (1) 安裝尾座同心圓盤及數位相機如圖 30。
- (2) 安裝雷射裝置於夾頭上，偏心圓約 40mm，如圖 31。
- (3) 設定轉速 120RPM，以同步轉速儀測試頻率實際轉速，如圖 32~34。
- (4) 以數位相機拍攝尾座上的雷射軌跡(有及無閃光燈拍攝)，SONY 及國際牌各拍 6 張。
- (5) 設定轉速 210RPM、350RPM 重複上述拍照動作。
- (6) 調整偏心 80mm，重複上述動作。



圖 30 簡易測量轉速實驗架構



圖 31 實驗過程



圖 32 同步轉速儀



圖 33 測量實際轉速



圖 34 轉速記錄

5. 光學快速調校吊扇偏擺方法設計

要調校吊扇的偏擺狀況，我們需要使用雷射筆吸附裝置、數位相機、萬向反射鏡、及一張小標籤，調整方式如下：

- (1) 將雷射筆吸附於吊扇下方的控制盒中央，並貼一張標籤於其中一個扇葉上。
- (2) 開啟雷射筆開關，使雷射朝地面射出雷射光。
- (3) 開啟吊扇開關，以最快轉速迴轉。
- (4) 將萬向反射鏡放置於雷射光照射區，使雷射光反射至天花板。
- (5) 調整萬向反射鏡方向，使繞圈圈的雷射光點投射到同心圓盤上。
- (6) 微調至雷射光點繞同一個同心圓迴轉。
- (7) 使用數位相機照相，需要開啟閃光燈(若軌跡不是全圓，將相機水平軸與光點長軸對應)。
- (8) 照相若干照片，可以直接從相機的檢視功能，觀察扇葉偏擺的相對位置及距離。
- (9) 計算及分析需要調整的扇葉及重量位置。

圖 35 為調整反射鏡實作照片，圖 36~38 為數位相機拍攝的結果，在相機上將相片放大，可以清楚發現吊扇偏擺扇葉的相對位置。我們測試其他吊扇結果如圖 39 及 40，也可以發現扇葉順序與偏擺相對位置。



圖 35 吊扇調正偏擺實作

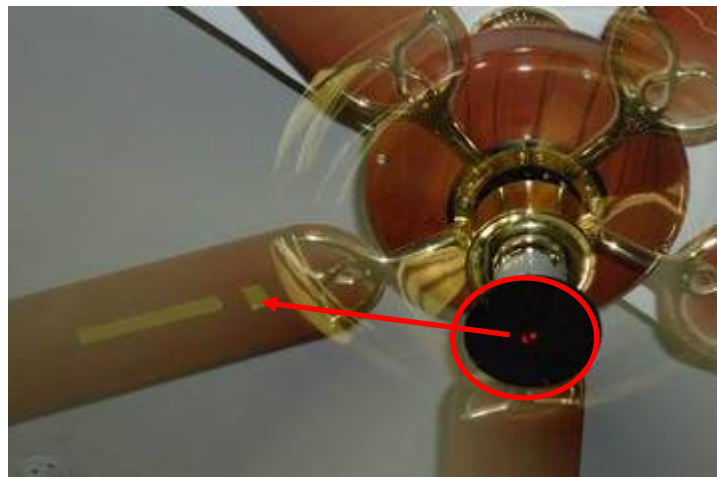


圖 36 以數位相機拍攝照片 1

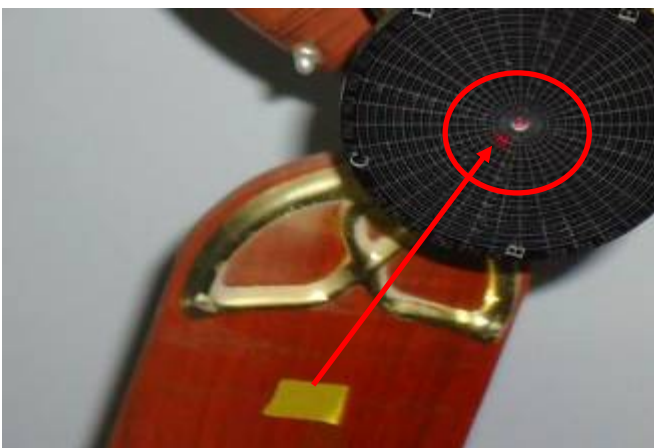


圖 37 以數位相機拍攝照片 2



圖 38 數位相機拍攝照片 3

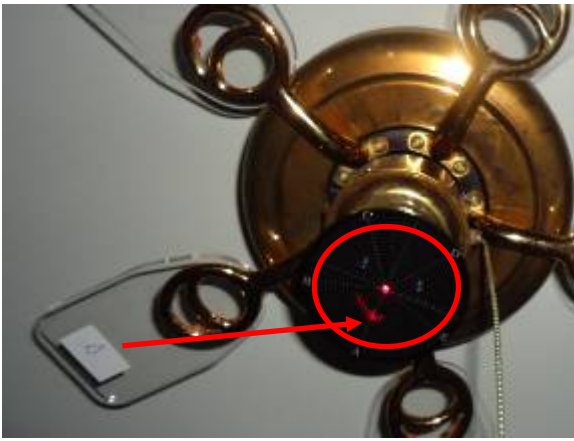


圖 39 不同吊扇偏擺位置照相 1

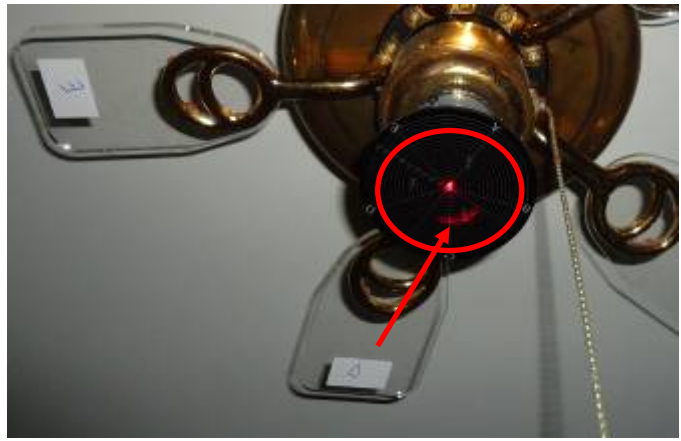


圖 40 不同吊扇偏擺位置照相 2

伍、研究結果

一、簡易測量轉速方式實驗結果

針對簡易測量轉速的實驗中，使用有 SONY 的 DSC-W530 相機及 Panasonic 的 DMC-FX7 相機，完成的實驗照片如附錄一所示。將實驗記錄完成製表如附錄二，將這些資料繪製圖表如圖 41~42，分別說明如下，圖中 S 表示 SONY 相機，P 表示 Panasonic 相機，數值表示偏心距離 4cm 及 8cm。

運用公式為 $[(\text{角度}/\text{快門速度})/360]*60=\text{轉速(RPM)}$

例如編號 S4120-1 照片，快門速度為 1/40、估計角度約 20 度，換算得約 133RPM 轉速。

- (一) 比較圖 41 後可以發現 SONY 的相機誤差較大，Panasonic 相機的誤差較低。
- (二) 圖 41 中，SONY 相機在雷射光點迴轉半徑較大時(S8)，量測值誤差跳動較大。
- (三) 如圖 42 在較高轉速時，兩台相機的標準差都較大，表示測量誤差較大，使用相機照相測量轉速時只適合於低轉速(約 200RPM 以下)。

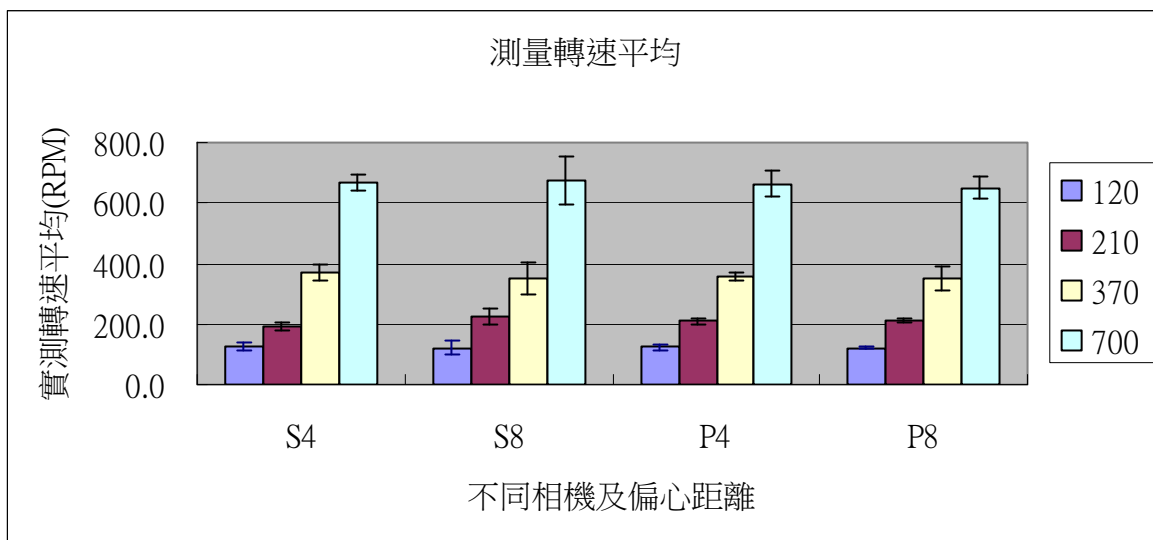


圖 41 相機測量轉速誤差比較圖

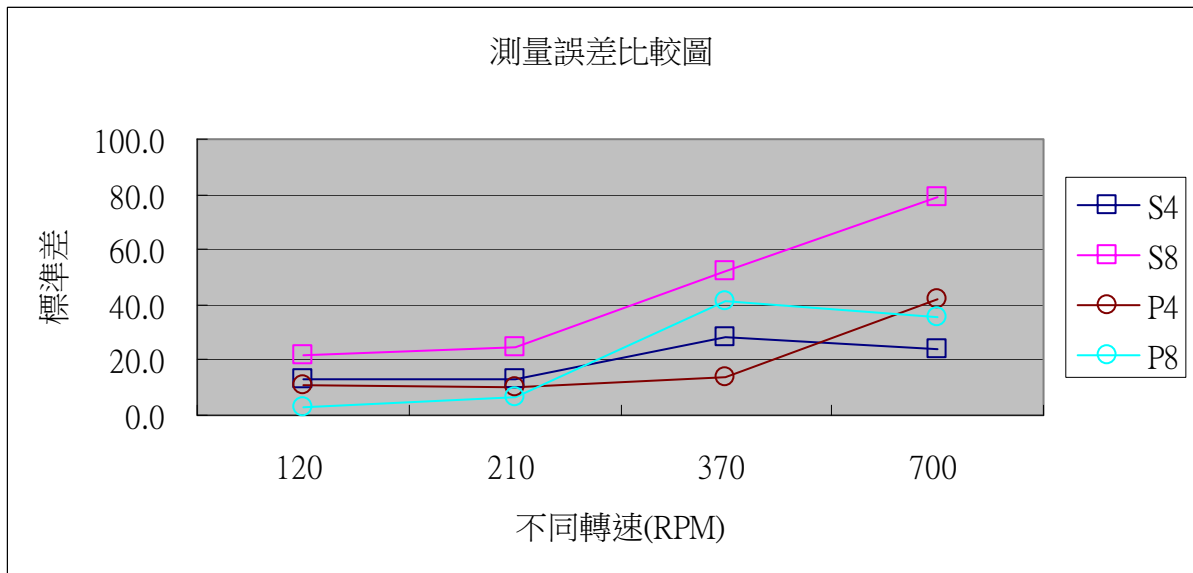


圖 42 相機量測不同轉速時的標準差比較

在研究過程中也發現吊扇擺動的軌跡，有時候並不是全圓，有可能是往復的運動軌跡，所以我們也利用 Tracker 來測量吊扇擺動的頻率，如圖 43 為吊扇偏擺的軌跡之一，很明顯為左右往復的運動軌跡，將往復的時間繪製如圖 44，取出重複位置的 A 點及 B 點資料，可以換算出其來回一次的週期。

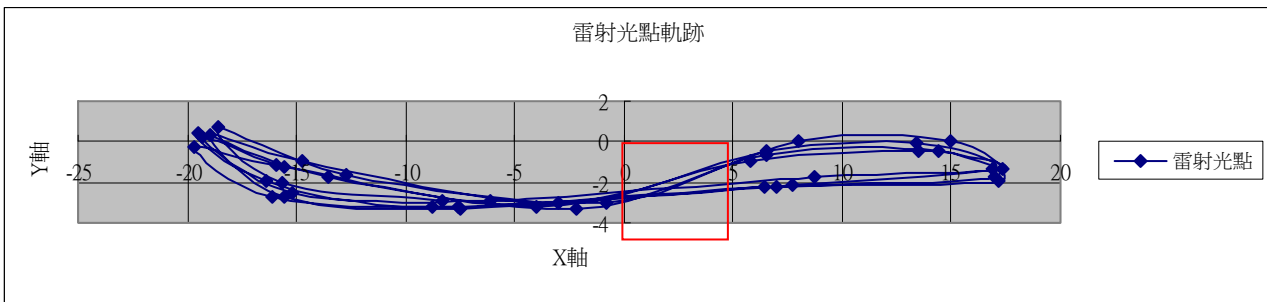


圖 43 接近往復運動的軌跡

A 點時間：0.133 秒

B 點時間：0.434 秒

時間差為 $0.434 - 0.133 = 0.301$ 秒

表示週期為 0.301 秒

頻率 = $1/0.301 = 3.3225913$ 轉/每秒

每分鐘 = $3.3225913 * 60 = 199.335546$ RPM

實際測量轉速約為 201.4RPM，誤差較小。

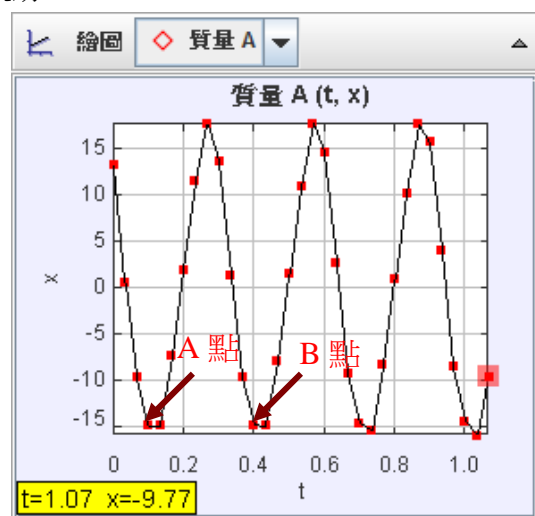


圖 44 直線往復偏擺軌跡週期圖

二、雷射裝置對吊扇的偏擺影響結果

測試時，使用畫有 X 軸及 Y 軸的靶紙，靶紙上繪製有一標準長度作為 Tracker 校正桿比對用，將運動軌跡描繪出來，由於相機錄影格式為 30fps，所以每一個影格為 1/30 秒，實際繪製光點軌跡如圖 45，在繪圖部分以 X-Y 軸形式顯示，但為比較不同的位置圖形，所以必須將數據輸出，再以 EXCEL 軟體處理，Tracker 處理錄影資料如附錄三，資料表如附錄四。

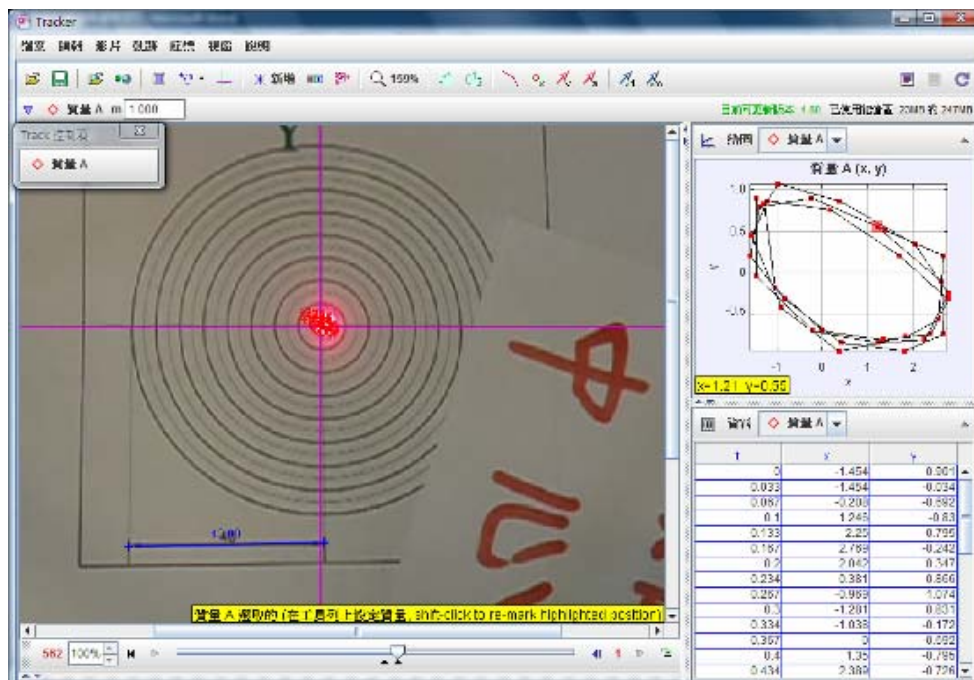


圖 45 以 Tracker 軟體描繪光點軌跡圖

經過 EXCEL 處理的結果如圖 46~48 所示，圖形拖曳至 X 軸與 Y 軸比例相同，從圖中可以發現吊扇下方控制盒上放置物品時，對吊扇的偏擺是有影響的，當將雷射筆裝置放置偏移中心時，吊扇的偏擺軌跡就會改變，不管是輕微偏擺(0 個長尾夾)或是重度偏擺(兩個長尾夾)都會有影響，經過這個實驗後可以發現當我們在校正吊扇時，需要將雷射筆固定於中心位置。同時之前文獻探討的校正專利中，其所安裝的附件都是偏移於吊扇中心，因此對吊扇原本的偏擺會有影響，而無法偵測真正的誤差位置。

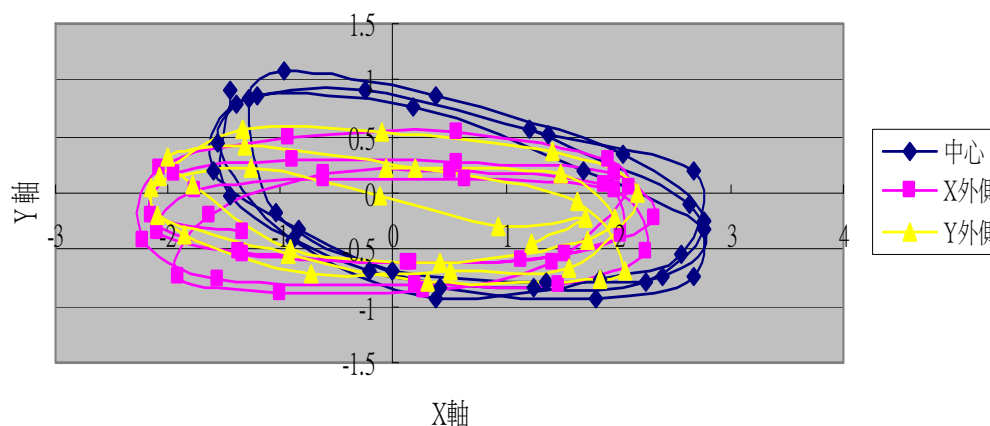


圖 46 吊扇輕微偏擺時軌跡圖(0 長尾夾)

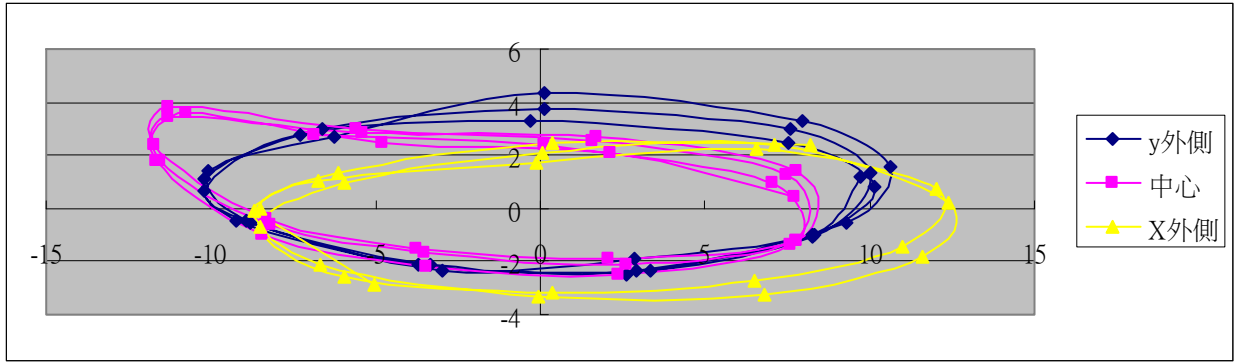


圖 47 吊扇中度偏擺時軌跡圖(1 個長尾夾)

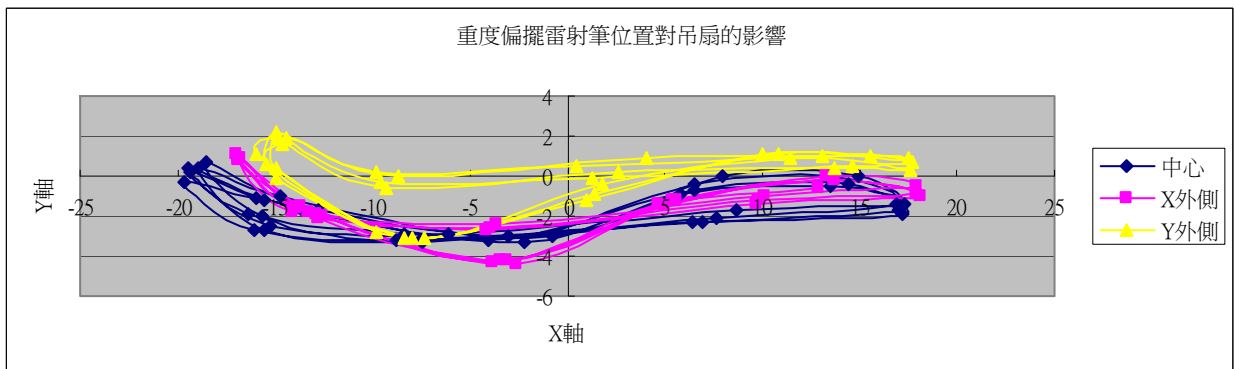


圖 48 吊扇嚴重偏擺時軌跡圖(2 個長尾夾)

我們以另外一組全新吊扇做實驗如圖 49，希望了解長尾夾數量對吊扇偏擺的影響，重新錄影如圖 50 所示使用最高轉速約為 220RPM，經過處理後的雷射光點軌跡如圖 51，實驗時將雷射筆固定於吊扇控制盒中心，夾上不同數目的長尾夾，0 中心表示無長尾夾，中心 1 表示加掛一只長尾夾於扇葉外緣，同樣的中心 2 表示加掛兩只長尾夾，其他同理。從圖中可以發現長尾夾數目增加時偏擺的半徑會增加，但是圖形會接近，從不同的實驗結果可以發現新吊扇的穩定性及平衡皆較好，舊吊扇的偏擺軌跡就不一致。



圖 49 全新吊扇安裝



圖 50 以 P310 相機錄影雷射光點

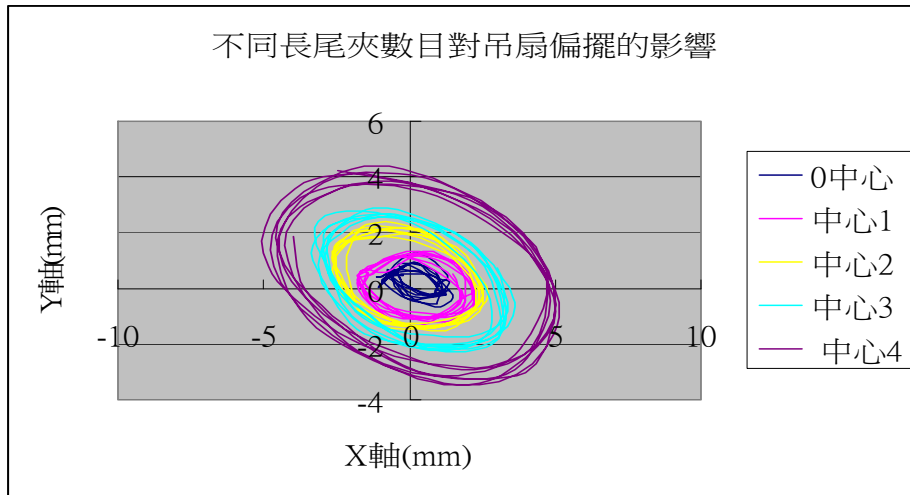


圖 51 不同數目長尾夾對吊扇偏擺的影響軌跡圖

陸、討論及應用

一、調整的公式驗證結果討論

我們從偏轉的光點半徑推算吊扇旋轉的離心力，再推算出對應的重量與旋轉半徑，透過這個公式，可以很容易使用已知重量的配重，來算出應該放置的半徑位置。圖 52~55 是使用 Tracker 來測量偏移半徑。圖 56 是實測與理論的比較圖，實測結果大致符合理論曲線。

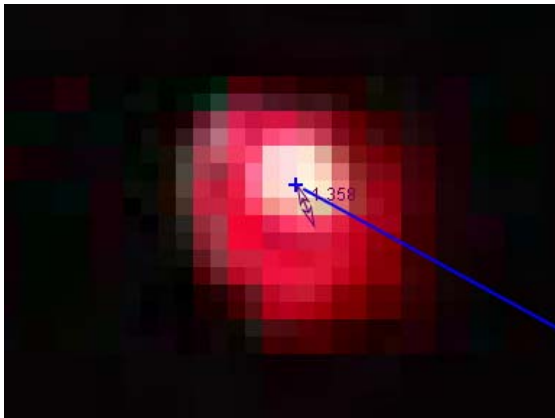


圖 52 起始狀態

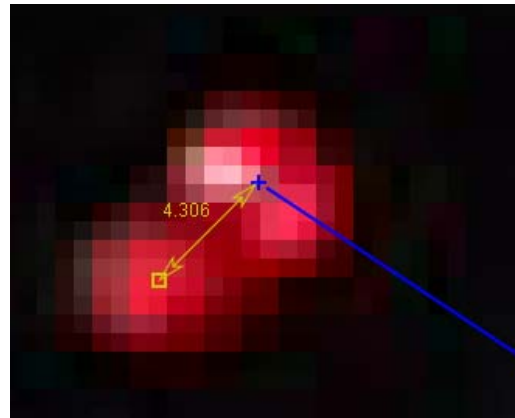


圖 53 一個長尾夾

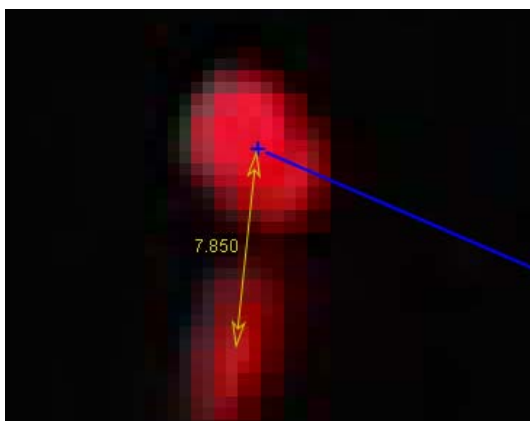


圖 54 二個長尾夾

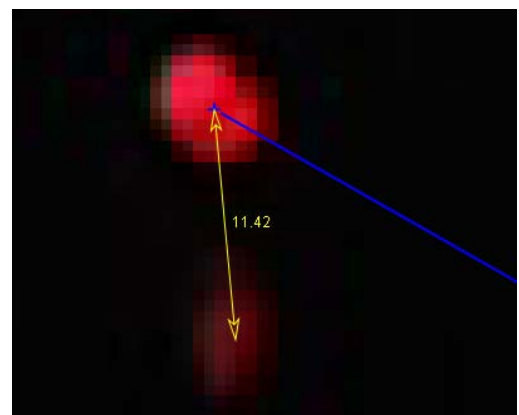


圖 55 三個長尾夾

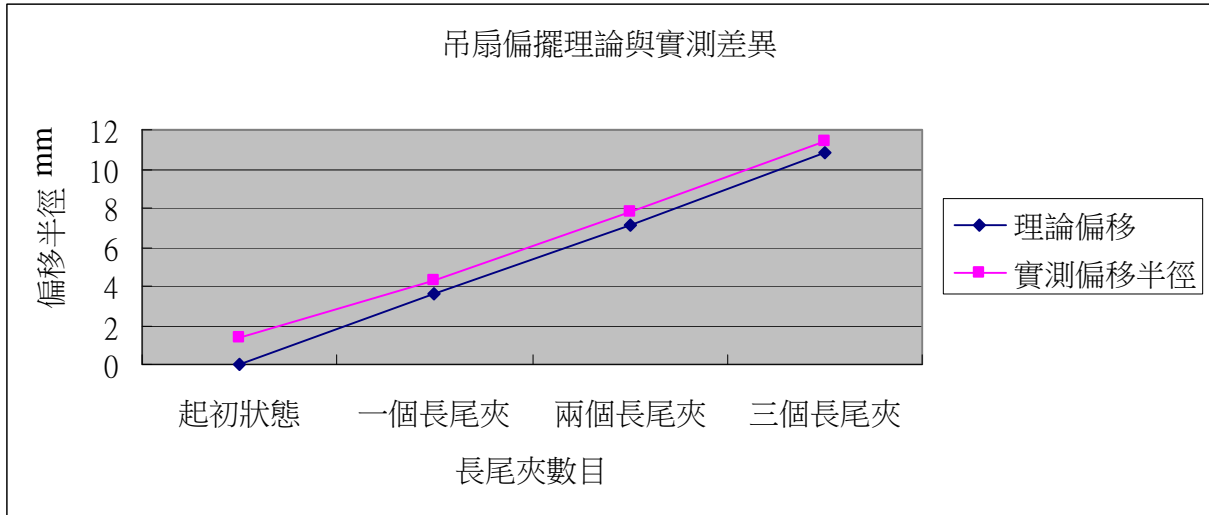


圖 56 吊扇偏擺理論與實測差異比較

我們將之前的公式再作精簡推導，得到如下公式，從圖 57 中可以發現吊桿拉力 T 的水平分力即為離心力 F_n

$$T \times \sin \theta = T \times \frac{r}{L} = M \times r \times \omega^2$$

整理後得

$$T = M \times L \times \omega^2$$

由於水平分力亦為重心偏移(配重 m)造成的離心力

$$M \times L \times \omega^2 \times \sin \theta = m \times R \times \omega^2$$

由於角速度 ω 一樣，因此

$$M \times L \times \sin \theta = m \times R$$

θ 可由下列反射鏡距離及光點迴轉半徑求得

$$\theta = \tan^{-1} \frac{X}{2H}$$

所以最後推得

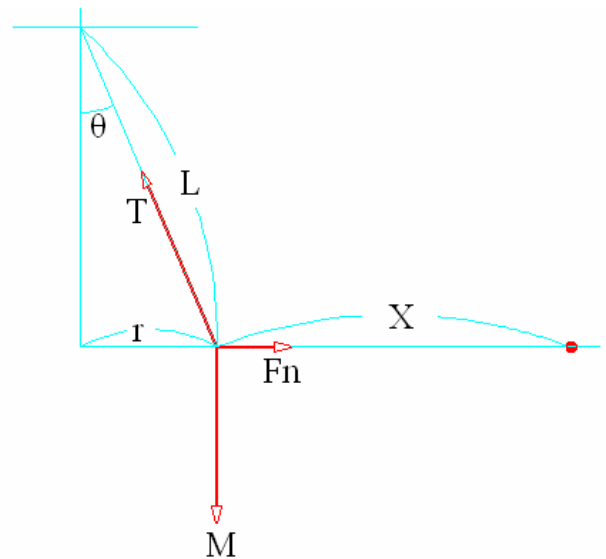


圖 57 力學分析圖

$$m \times R = M \times L \times \sin(\tan^{-1} \frac{X}{2H})$$

運算時

m：配重重量，單位 g

M：吊扇整體重量，單位 g

R：配重位置，單位 cm

L：天花板至雷射圓盤距離，單位 cm

X：光點旋轉半徑，單位 cm

H：雷射圓盤與反射鏡距離，單位 cm

從公式中可以發現吊扇的轉速 N 不見了，離心力不是跟轉速有關嗎？我們與老師討論後認為，雷射光點反射的位置 X 已經將離心力大小呈現出來，也就是當吊扇轉速較慢時，X 值會變小；當吊扇轉速較快時，X 值會變大，因此我們只要將實際測量的 X 值及 H 值代入公式，就能算出**配重 m 及位置 R 的乘積**，這樣就能直接由現有的配重塊知道配重的位置及距離。

二、實際吊扇校正測試結論

在實際校正測試中，發現已知配重及位置後，我們發現一般吊扇扇葉有五片，各片夾角 72 度，因此重心偏移對應的另外一側，不一定有扇葉存在，因此配重就無法固定上去，如圖 58 所示。

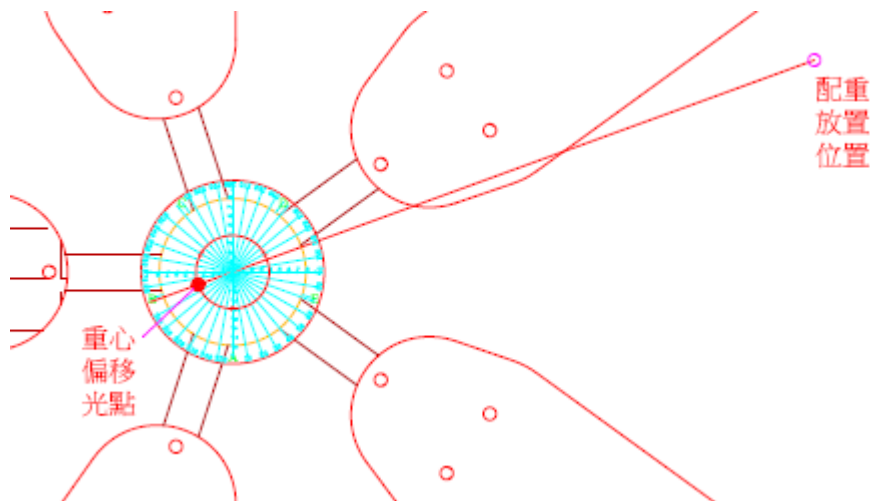


圖 58 重心對應位置無扇葉

在力學的學習中，將一已知力，分成兩個或數個分力，而不改變物體之外效應者，稱為力的分解，如圖 59 所示，二力合成或是分解通常是用平行四邊形法或是三角形法解得。

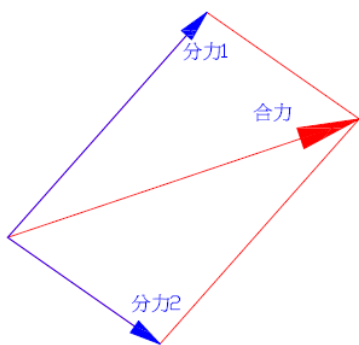


圖 59 力的合成

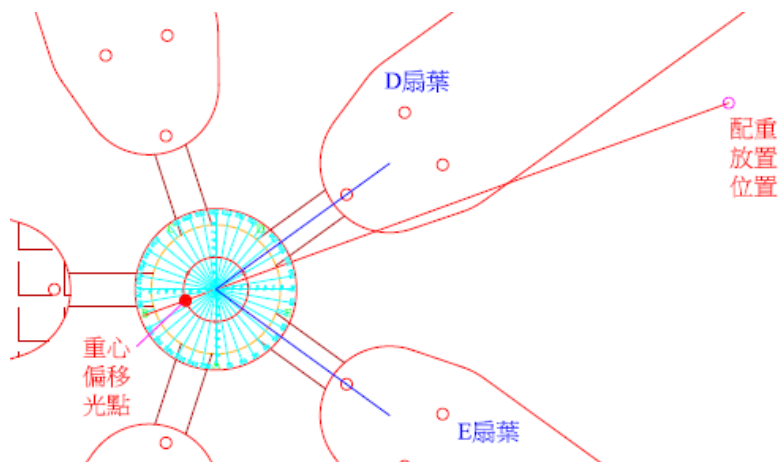


圖 60 配重放置於扇葉實體位置示意圖

由於吊扇晃動的的結果是重心偏移，因此我們需要平衡造成吊扇偏擺的離心力，如圖 60 所示，與我們所學的共點力系平衡可以用拉蜜定理來計算相符。

拉蜜定理：

若三力 (F_A 、 F_B 、 F_C)作用於一物體上，其合力為零 ($\vec{F}_A + \vec{F}_B + \vec{F}_C = 0$)，並共點，則任一力的量值與其他兩力夾角之正弦值的比值皆相等。

$$\frac{F_A}{\sin \alpha} = \frac{F_B}{\sin \beta} = \frac{F_C}{\sin \gamma}$$

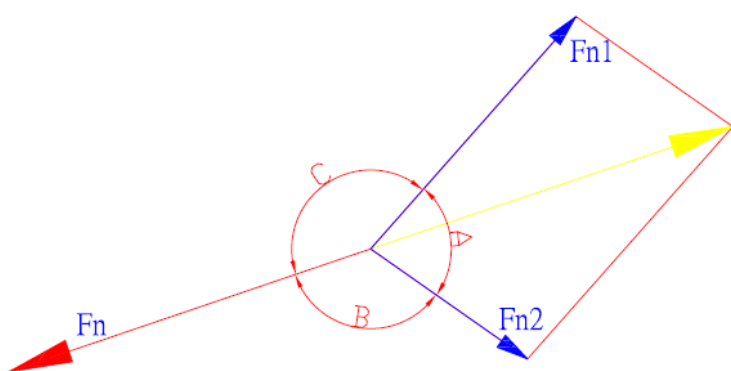


圖 61 吊扇離心力的平衡

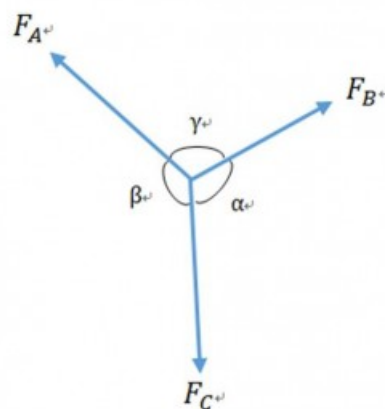


圖 62 拉蜜定理

<http://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=46235>

科技部高瞻自然科學教學資源平台

從圖 61 中得出如下公式

$$\frac{Fn}{\sin A} = \frac{Fn1}{\sin B} = \frac{Fn2}{\sin C}$$

Fn 為原本吊扇重心偏移後造成的離心力， $Fn1$ 及 $Fn2$ 為沿著扇葉 D 及扇葉 E 上所需的平衡配重。

$$\frac{mR\omega^2}{\sin A} = \frac{m_1R_1\omega^2}{\sin B} = \frac{m_2R_2\omega^2}{\sin C}$$

簡化後得

$$\frac{mR}{\sin A} = \frac{m_1R_1}{\sin B} = \frac{m_2R_2}{\sin C}$$

m 及 R 為原本公式計算所得的配重及位置。

m_1 及 R_1 為在 D 扇葉上所需的配重及位置， m_2 及 R_2 為在 E 扇葉上所需的配重及位置。

吊扇五個扇葉夾角 72 度，A 角度為 72 度。B 及 C 角度就需要從攝影的照片去觀察了。配重的重量為固定，只要計算出 R_1 及 R_2 的距離就可以將配重裝上。

我們校正教室內偏擺較為嚴重的吊扇，經過照相後觀察光點位置如圖 63 所示，相對於扇葉的位置也如圖面上編號。相關尺寸如下：

吊扇重量 M ：6.815kg（利用磅秤反向上推吊扇，使吊扇懸空可以秤重）

天花板至雷射面板位置 L ：45cm

雷射裝置面板至反射鏡距離 H ：262cm

扇葉迴轉半徑 R ：63cm

光點迴轉半徑 X ：1.25cm

$$m \times R = M \times L \times \sin\left(\tan^{-1} \frac{X}{2H}\right)$$

$$m \times R = (6815 + 200) \times 45 \times \sin\left(\tan^{-1} \frac{1.25}{2 \times 262}\right)$$

$$m \times R = 753 \text{ g} \cdot \text{cm}$$

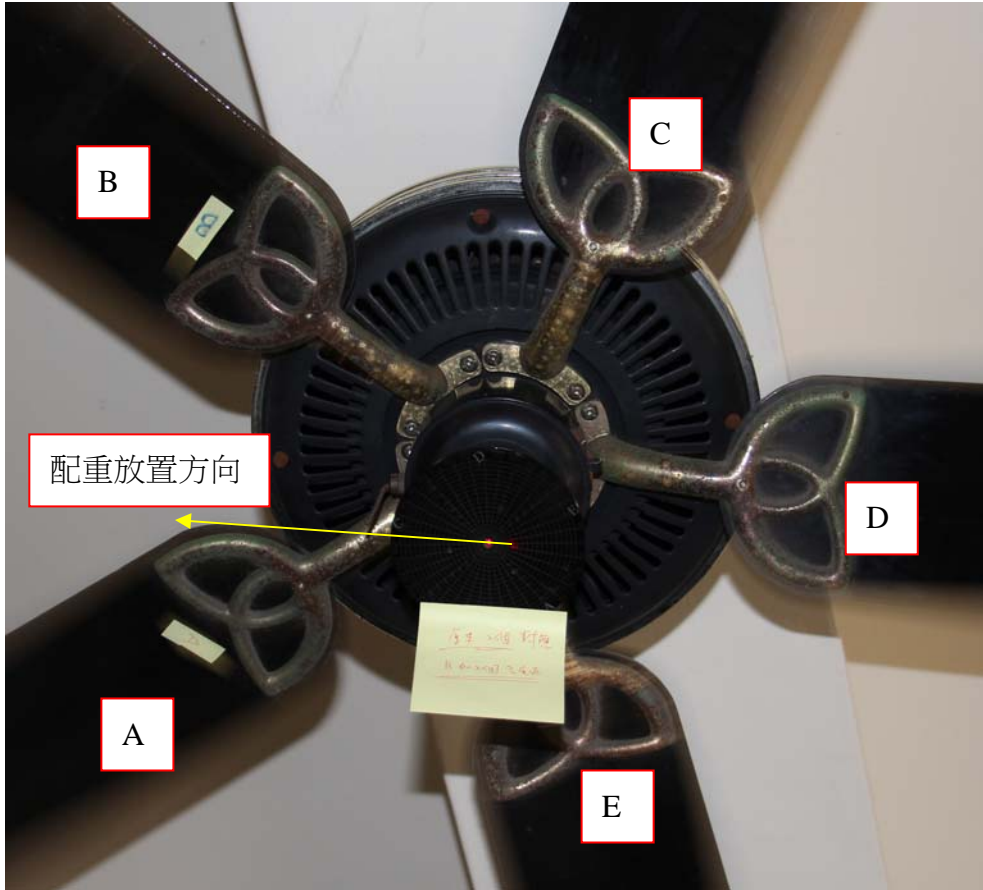


圖 63 偏擺嚴重的舊吊扇測試時光點位置

如圖 64 所示，

$$\frac{mR}{\sin \gamma} = \frac{m_B R_B}{\sin \beta} = \frac{m_A R_A}{\sin \alpha}$$

$$\frac{753}{\sin 72} = \frac{m_B R_B}{\sin 142} = \frac{m_A R_A}{\sin 146}$$

$$m_B R_B = 487.45 \text{ g} \cdot \text{cm}$$

$$m_A R_A = 442.74 \text{ g} \cdot \text{cm}$$

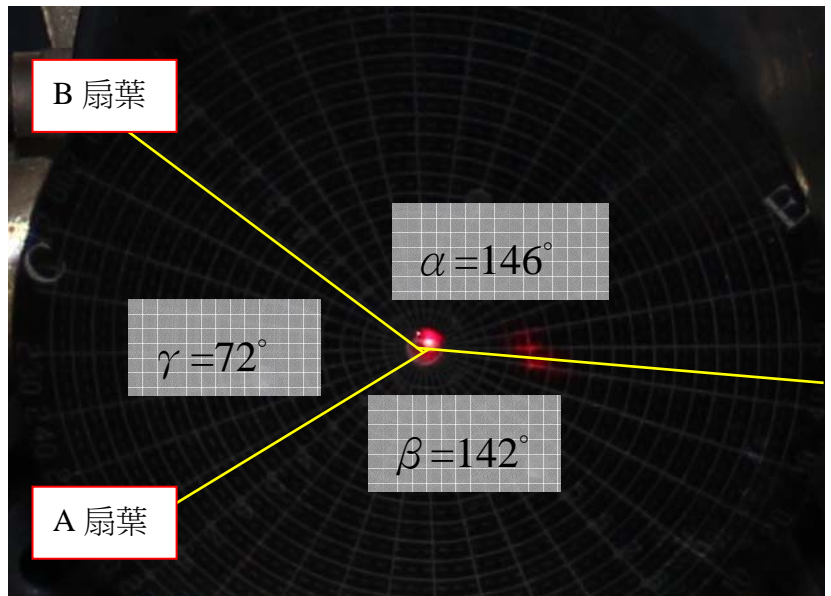


圖 64 扇葉與光點角度

扇葉外緣到中心距離 63cm，A 扇葉配重位置在外緣時，需要 7.73 克的配重。B 扇葉則需要 7.02 克的配重，以長尾夾夾上紙張作為配重，再運轉測試一次，拍照光點如圖 65 所示。從實際觀察及照相中發現還是有約 5mm 半徑的擺動，但是已經有改善的情況，從相片中發現會

不會是配重不足，扇葉 A 和扇葉 B 上再加重配重後，吊扇的偏擺反而變嚴重，表示除了配重外還有其他影響吊扇偏擺的原因。



圖 65 校正配重安裝後運轉光點位置略為改善

校正過程問題討論

1. **無法正面拍攝光點軌跡，會有視差存在：**因為使用數位相機拍攝時，相機若正視於雷射裝置下方，會擋到雷射光的光路，因此需要偏離一個角度，就會使照片中扇葉角度不易正確判斷。
2. **軌跡的運動模式不是正圓形：**雷射光點擺動的形式不是圓形，部分情況為橢圓形，也增加校正的誤差，力學系統中是不是還有沒有注意到的力，所以影響運動軌跡。
3. **依公式計算後還是有誤差：**整體系統類似抗力錐擺的運動，因為吊扇扇葉有迴轉運動，研究中並沒有探討到慣性運動所產生的影響(陀螺儀現象)。

三、吊扇擺動模式討論

由於實驗過程中發現吊扇擺動的方式不一定為圓形，有些情況為橢圓形，如前面研究結果，觀察吊扇組裝零件時，發現吊扇的固定座如圖 66 中的球型槽有一凸出的塊狀體，而吊桿的球頭上也有一個凹槽如圖 67，這兩個特徵必須配合一起，用來抵抗吊扇旋轉時的扭矩，這個限制會影響吊扇的擺動特性。



圖 66 吊扇固定座上的圓球槽
(注意上方有一凸塊)



圖 67 吊扇吊桿上的球頭
(上方有凹槽)

四、吊扇晃動程度與耗能關係

吊扇偏擺程度會不會影響功率消耗呢？我們利用瓦特計來作實驗，電器用品上標註的使用功率為其最大的消耗功率，例如電風扇標註為 65W，表示其在最高速時消耗的功率為 65W，中速及慢速為較低的功率消耗。實驗時將電源線拉出(圖 68)後裝設插頭可以插到瓦特計的插座位置如圖 69，再將瓦特計連接電源就可以讀出消耗功率。



圖 68 吊扇電源另外拉出



圖 69 瓦特計測量耗電功率

表三、吊扇偏擺耗能實驗記錄表

偏擺	次數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
輕度	時間	1'	1'30"	2'	2'30"	3'	3'30"	4'	4'30"	5'	5'30"	
	轉速	201.4	201.9	201.2	201.1	201.4	201.4	201.5	201.4	201.5	201.5	201.43
	耗能	92.2	92	92.3	92.1	92.1	92.2	92.1	91.9	92.4	92.3	92.16

中度	時間	1'	1'30"	2'	2'30"	3'	3'30"	4'	4'30"	5'	5'30"	
	轉速	201.4	201.9	201.5	201.6	201.4	201.5	201.5	201.6	201.6	201.7	201.57
	耗能	92.7	92.3	93	92.6	93	92.9	92.1	92	93	93	92.66

重度	時間	1'	1'30"	2'	2'30"	3'	3'30"	4'	4'30"	5'	5'30"	
	轉速	201.5	201.5	201.2	201.4	201.5	201.7	201.5	201.6	201.5	201.6	201.5
	耗能	92.4	92.2	93	92.2	92.3	92.5	92.8	93	92.6	92.6	92.56

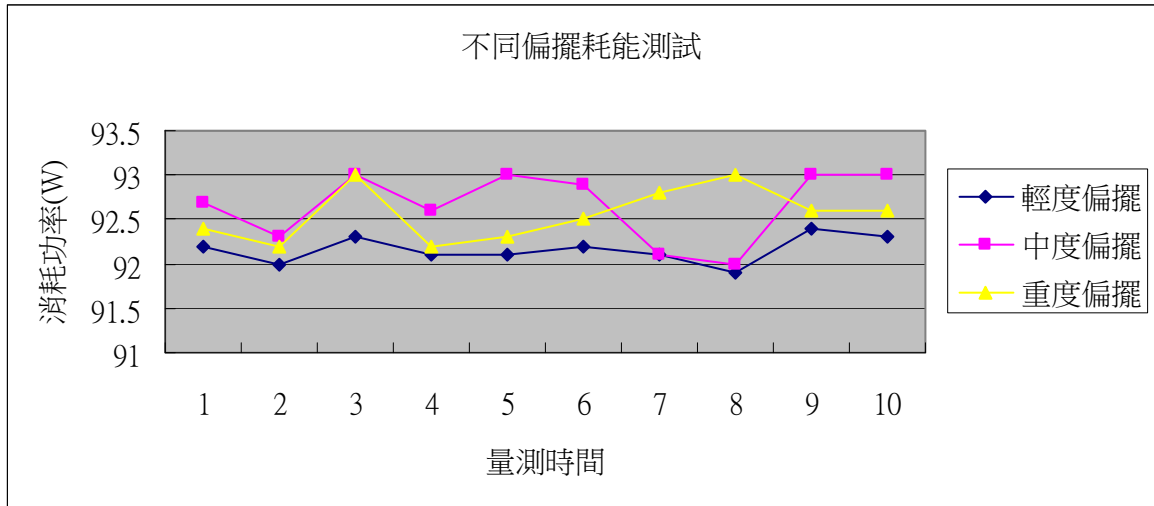


圖 70 吊扇消耗功率與偏擺關係

在耗能實驗結果如圖 70 可以發現，吊扇偏擺的確會影響吊扇的消耗功率，圖中的中度及重度偏擺的量測曲線大都在輕微偏擺曲線上方，表示偏擺現象的確會比較耗電，大約在 0.5W 左右。

五、其他應用

雷射筆及同心圓盤裝置應用於其他測量轉速的測試，我們測量電風扇的轉速，將一片小鏡子黏接於電風扇的迴轉中心上如圖 71，黏接時須要使鏡面微微傾斜一個角度，將雷射筆吸附在腳架上的鐵板上，只要將雷射光對準小鏡子，再調整相關位置可以得到如圖 72 的光點軌跡圖，同樣的方式也可以計算出立扇扇葉轉動的速度，為了解轉速的變化情況，再研究使用軟體記錄的方式，量測轉速變化情況。

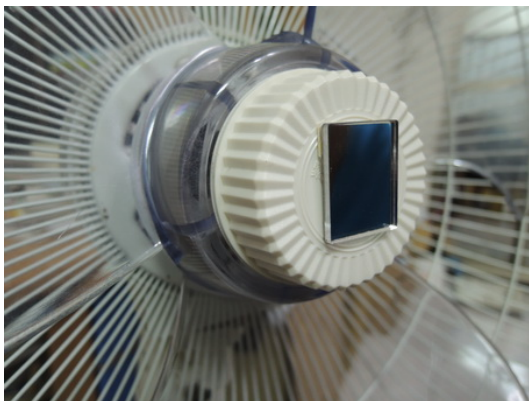


圖 71 迴轉中心黏接一片鏡子

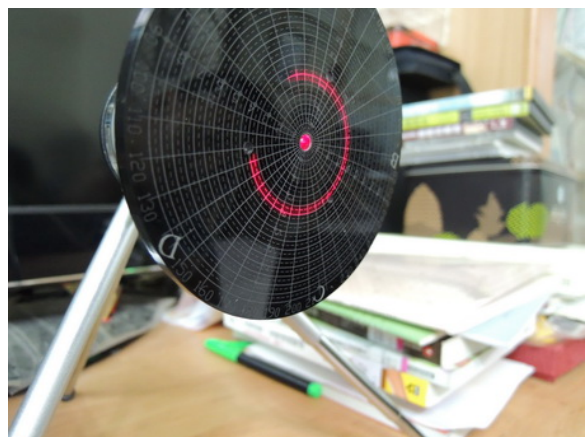


圖 72 雷射裝置吸附在腳架上

非固定轉速的系統例如史特林引擎、風車、水車，會因為外部動力媒介的影響，有不同的轉速變化，若使用同步轉速儀無法測量變動的轉速。因此我們利用雷射光做非接觸測量，經過錄影後以 Tracker 處理影像，希望能繪出轉速的變化圖。圖 73 為直流馬達轉速測量的實驗架構。實驗方式是將一小片反光鏡利用磁鐵吸附在馬達心軸上，將雷射筆光投射到鏡面後再反射至一張靶紙上，可以造成如圖的圓形軌跡，我們利用數位相機錄影，再使用 Tracker 軟體分析。

在分析光點變化時，先將檔案的亮度及對比度修改成如圖 74，再偵測 RGB 區變化的方式，來顯示轉速的變化。利用軟體自動偵測每一幀(frame)影格的亮度(luma)變化，完成如圖 74 右側繪圖區的结果。



圖 73 直流馬達運轉轉速量測

我們利用充電器的電壓改變使直流馬達的轉速變化，充電器有 3V、4.5V、6V、7.5V、9V、12V 共六個波段可以切換。當切換不同電壓時，繪圖區可以顯示光度的變化情況，表示轉速的變化情況，不過在最高的 12V 時，偵測的光度變化規則性與其他 5 個條件不同，觀察影格的雷射光軌跡變化情況如圖 75~80，發現圖 80 軌跡中有些影像沒有被完全錄影起來，在 30fps 錄影條件下，轉速較快無法的軌跡無法全部被錄影起來，因此以本研究的方式量測轉速變化有其限制性。

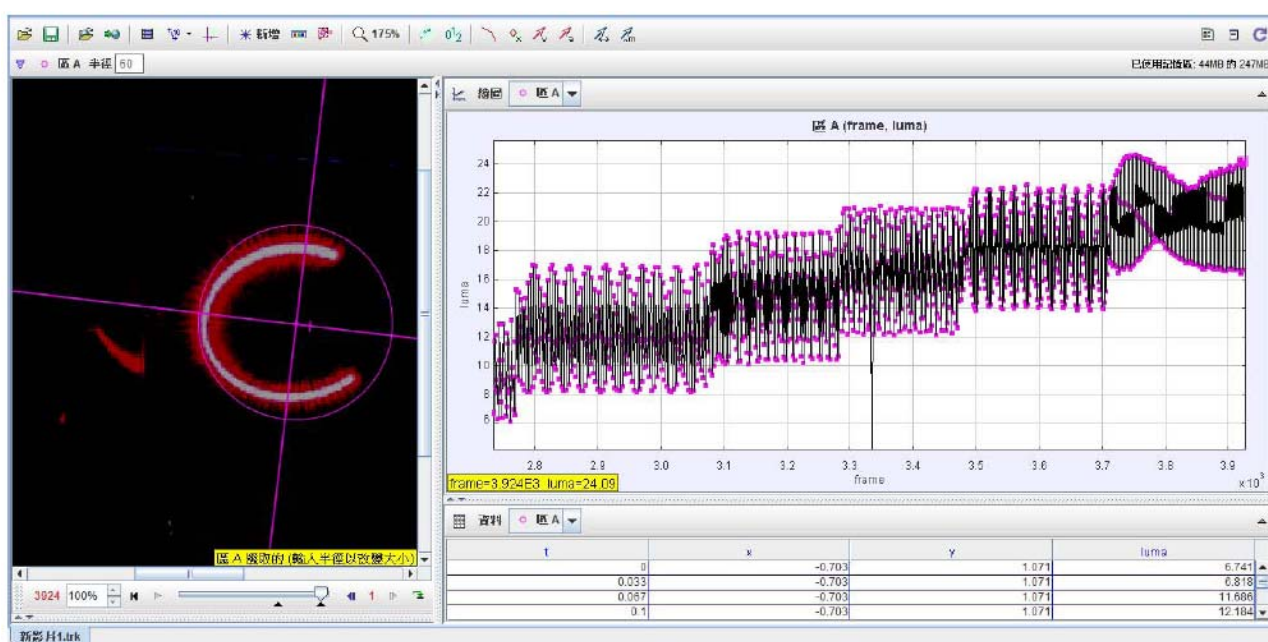


圖 74 Tracker 偵測轉速變化曲線圖

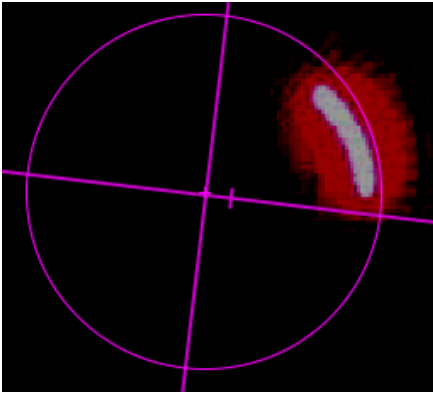


圖 75 3V 轉速 990rpm

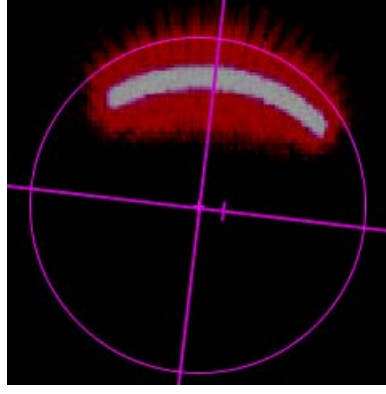


圖 76 4.5V 轉速 1574rpm

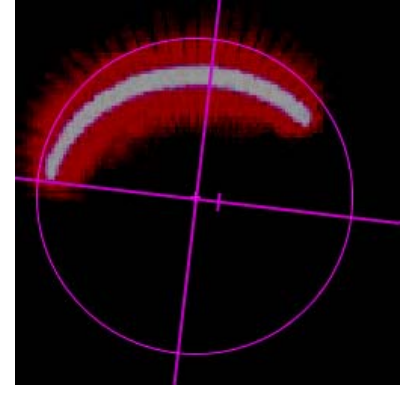


圖 77 6V 轉速 2215rpm

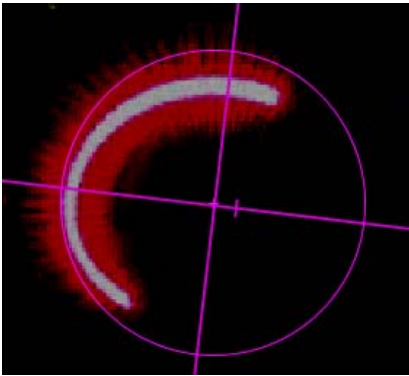


圖 78 7.5V 轉速 2698rpm

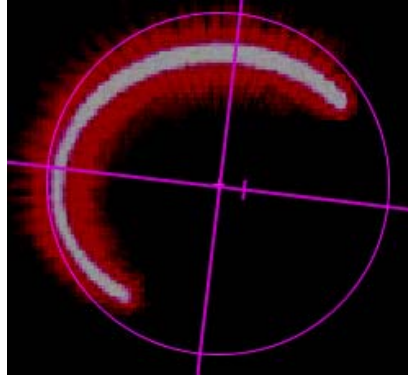


圖 79 9V 轉速 3206rpm

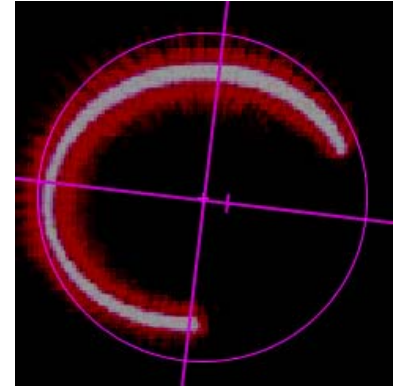


圖 80 12V 轉速 3911rpm

柒、結論

本研究透過簡單的自製實驗設備，能快速檢驗吊扇的偏擺幅度及位置，經由照相顯示雷射反射點的位置就可以計算出需要的配重及位置，經過實際測試應用，雖然有誤差的存在，但仍可以達到快速校正吊扇偏擺的功能。在簡易測量物體轉速的實驗中，我們利用不同的數位相機、自製的雷射筆裝置及同心圓盤來實驗測量，結果發現國際牌 DSC-TX7 的整體量測誤差較小，同時轉速較低時其誤差較小。吊扇偏擺的研究過程中，最後公式推論的結果，不需要測量吊扇轉速，就能計算出偏擺的配重位置。在吊扇下方外掛物品對吊扇偏擺的影響實驗中，發現附加在控制盒上的物品位置也會影響吊扇的偏擺，因此實際應用校正時，需要將雷射筆掛在控制盒的中心。實際校正時仍然會因為吊扇機齡而有所影響，太過於老舊的吊扇偏擺的原因不只有重心偏移，還有零件間隙、扇葉變形等因素影響，也需要我們更深入的探討。在非接觸式轉速的測量實驗中，我們發現以雷射光點的軌跡來計算轉速是可行，但是在較高的轉速時，會有相當大的誤差，所以轉速測量的研究不適合偵測高轉速的迴轉物體。

捌、參考資料及其他

1. 中華民國 第 50 屆中小學科學展覽會 搶"風"頭---彎曲吊扇與風力的探討 高雄市三民區民族國民小學。
2. 中華民國專利資料檢索系統
<http://twpat.tipo.gov.tw/tipotwoc/tipotwk>
3. 吊扇葉片晃動的終極解決法，民 102 年 1 月 2 日，取自
http://www.diycomm.com/wp-content/uploads/file/ultimate_solution_ceiling_fan_wobble.pdf
4. 黃達明，**機械力學 I**，台科大圖書股份有限公司，民 100 年，新北市。
5. 葉英珍、張敏哲，**基礎物理 C II**，龍騰文化事業股份有限公司，民 103 年 12 月三版，新北市。
6. 楊仲準，**Tracker 軟體安裝與使用教學**，中原大學物理系，民 101 年 12 月 10 日，取自
<http://c002.ndhu.edu.tw/ezfiles/25/1025/img/1231/581613291.pdf>

附錄一 簡易型轉速測速實驗相片



P4120-1



P4120-2



P4120-3



P4120-4



P4120-5



P4120-6



P8120-1



P8120-2



P8120-3



P8120-4



P8120-5



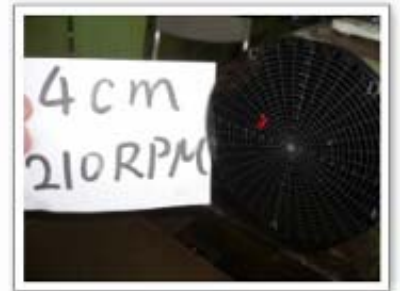
P8120-6



P4210-1



P4210-2



P4210-3



P4210-4



P4210-5



P4210-6



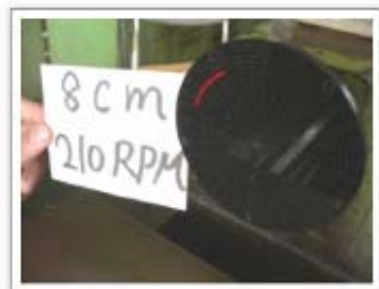
P8210-1



P8210-2



P8210-3



P8210-4



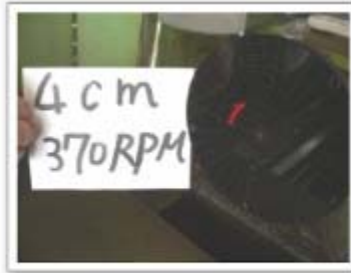
P8210-5



P8210-6



P4370-1



P4370-2



P4370-3



P4370-4



P4370-5



P4370-6



P8370-1



P8370-2



P8370-3



P8370-4



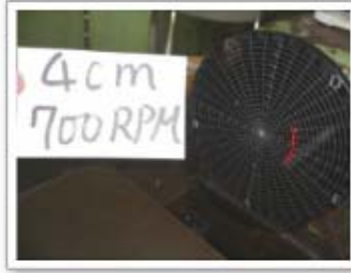
P8370-5



P8370-6



P4700-1



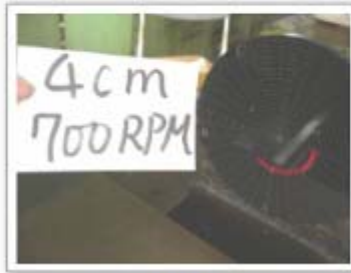
P4700-2



P4700-3



P4700-4



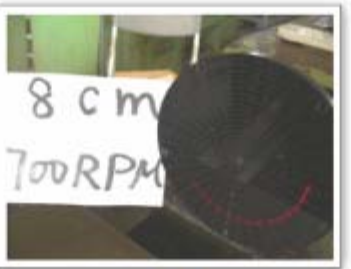
P4700-5



P4700-6



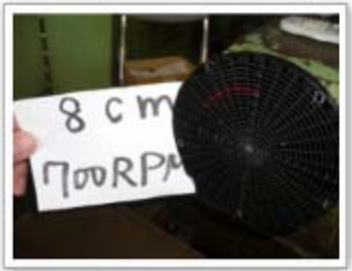
P8700-1



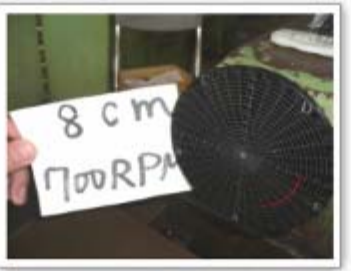
P8700-2



P8700-3



P8700-4



P8700-5



P8700-6



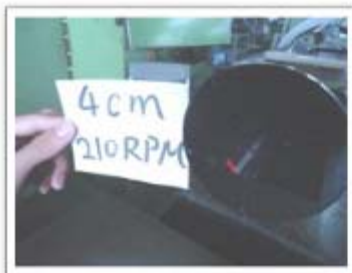
S4210-1



S4210-2



S4210-3



S4210-4



S4210-5



S4210-6



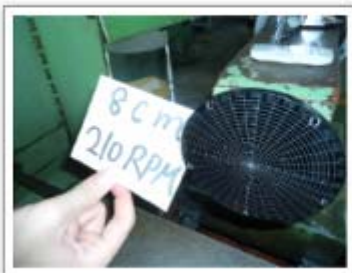
S8210-1



S8210-2



S8210-3



S8210-4



S8210-5



S8210-6



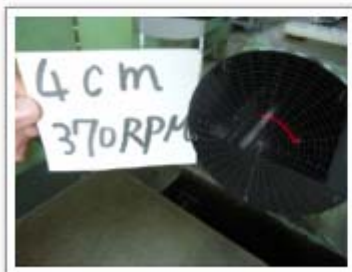
S4370-1



S4370-2



S4370-3



S4370-4



S4370-5



S4370-6



S8370-1



S8370-2



S8370-3



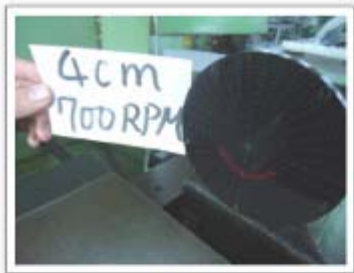
S8370-4



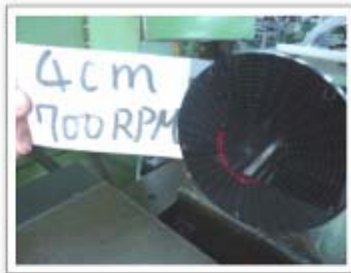
S8370-5



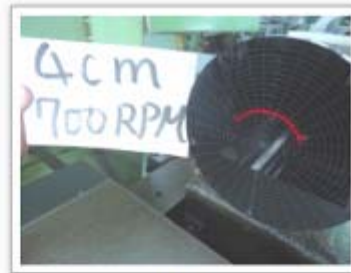
S8370-6



54700-1



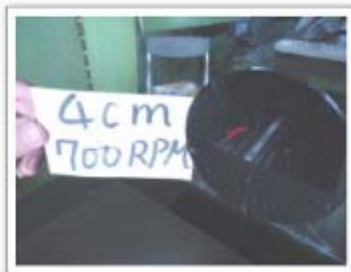
54700-2



54700-3



54700-4



54700-5



54700-6



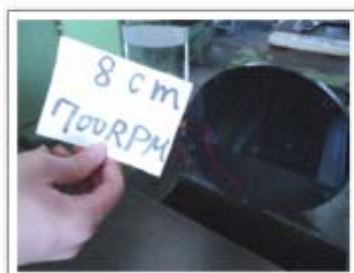
58700-1



58700-2



58700-3



58700-4



58700-5



58700-6

附錄二、簡易測速實驗記錄表

相機測速結果(轉速 120rpm)			
編號	快門速度	軌跡角度	換算轉速
S4120-1	40	20	133
S4120-2	30	22	110
S4120-3	30	24	120
S4120-4	80	10	133
S4120-5	30	22	110
S4120-6	60	14	140
S8120-1	60	12	120
S8120-2	40	19	127
S8120-3	50	14	117
S8120-4	80	11	147
S8120-5	50	10	83
S8120-6	50	16	133
P4120-1	30	22	110
P4120-2	25	30	125
P4120-3	25	30	125
P4120-4	20	34	113
P4120-5	60	14	140
P4120-6	60	13	130
P8120-1	25	29	121
P8120-2	25	28	117
P8120-3	25	30	125
P8120-4	25	29	121
P8120-5	60	12	120
P8120-6	60	12	120

相機測速結果(轉速 210rpm)			
編號	快門速度	軌跡角度	換算轉速
S4210-1	30	40	200
S4210-2	30	38	190
S4210-3	50	25	208
S4210-4	50	21	175
S4210-5	40	31	207
S4210-6	40	28	187
S8210-1	80	20	267
S8210-2	80	16	213
S8210-3	125	11	229
S8210-4	80	15	200
S8210-5	125	11	229
S8210-6	100	12	200
P4210-1	60	22	220
P4210-2	60	22	220
P4210-3	60	21	210
P4210-4	30	40	200
P4210-5	25	48	200
P4210-6	30	40	200
P8210-1	60	22	220
P8210-2	30	40	200
P8210-3	25	50	208
P8210-4	30	42	210
P8210-5	60	21	210
P8210-6	60	21	210

相機測速結果(轉速 370rpm)			
編號	快門速度	軌跡角度	換算轉速
S4370-1	50	46	383
S4370-2	30	70	350
S4370-3	50	40	333
S4370-4	30	80	400
S4370-5	30	80	400
S4370-6	30	71	355
S8370-1	80	24	320
S8370-2	50	38	317
S8370-3	80	26	347
S8370-4	80	27	360
S8370-5	60	31	310
S8370-6	60	45	450
P4370-1	40	51	340
P4370-2	40	52	347
P4370-3	40	54	360
P4370-4	60	36	360
P4370-5	30	70	350
P4370-6	60	38	380
P8370-1	30	60	300
P8370-2	30	60	300
P8370-3	40	48	320
P8370-4	60	39	390
P8370-5	60	38	380
P8370-6	60	37	370

相機測速結果(轉速 700rpm)			
編號	快門速度	軌跡角度	換算轉速
S4700-1	30	130	650
S4700-2	30	133	665
S4700-3	30	135	675
S4700-4	80	52	693
S4700-5	80	52	693
S4700-6	40	95	633
S8700-1	80	41	547
S8700-2	40	103	687
S8700-3	60	75	750
S8700-4	40	93	620
S8700-5	60	74	740
S8700-6	40	108	720
P4700-1	60	70	700
P4700-2	60	70	700
P4700-3	60	70	700
P4700-4	30	130	650
P4700-5	30	124	620
P4700-6	30	122	610
P8700-1	25	150	625
P8700-2	25	142	592
P8700-3	25	160	667
P8700-4	60	68	680
P8700-5	60	68	680
P8700-6	60	66	660

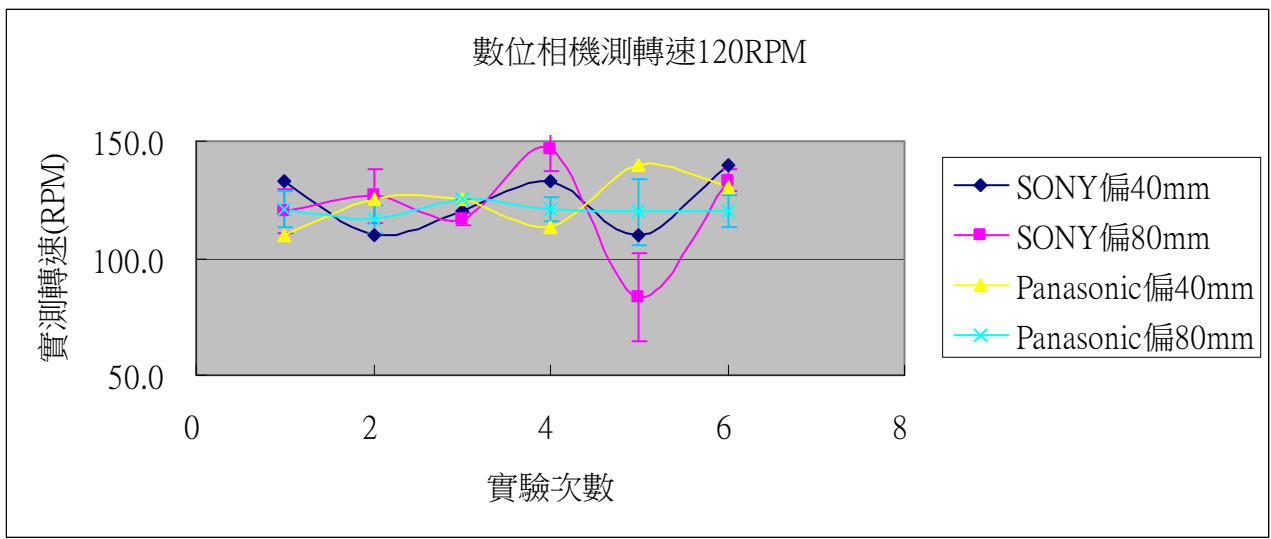


圖 41 以數位相機測量轉速實驗結果，轉速 120RPM

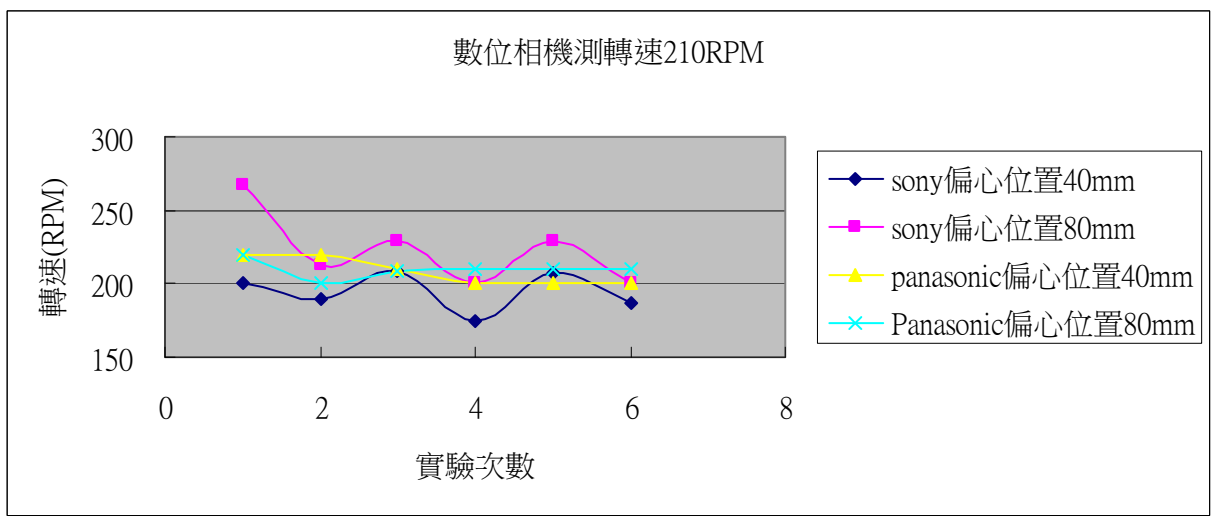


圖 42 以數位相機測量轉速實驗結果，轉速 210RPM

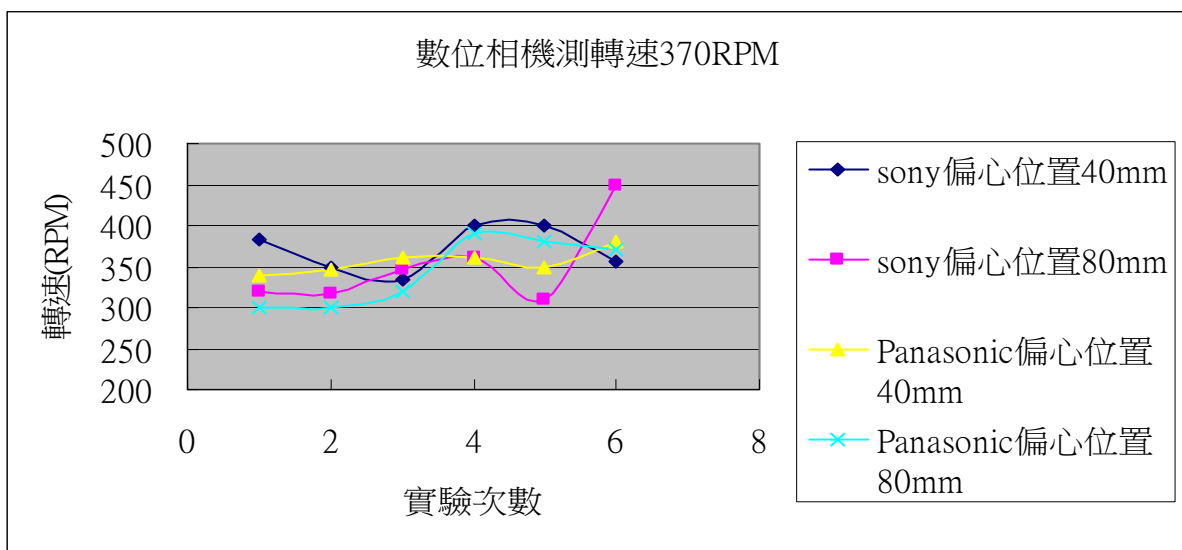


圖 43 以數位相機測量轉速實驗結果，轉速 370RPM

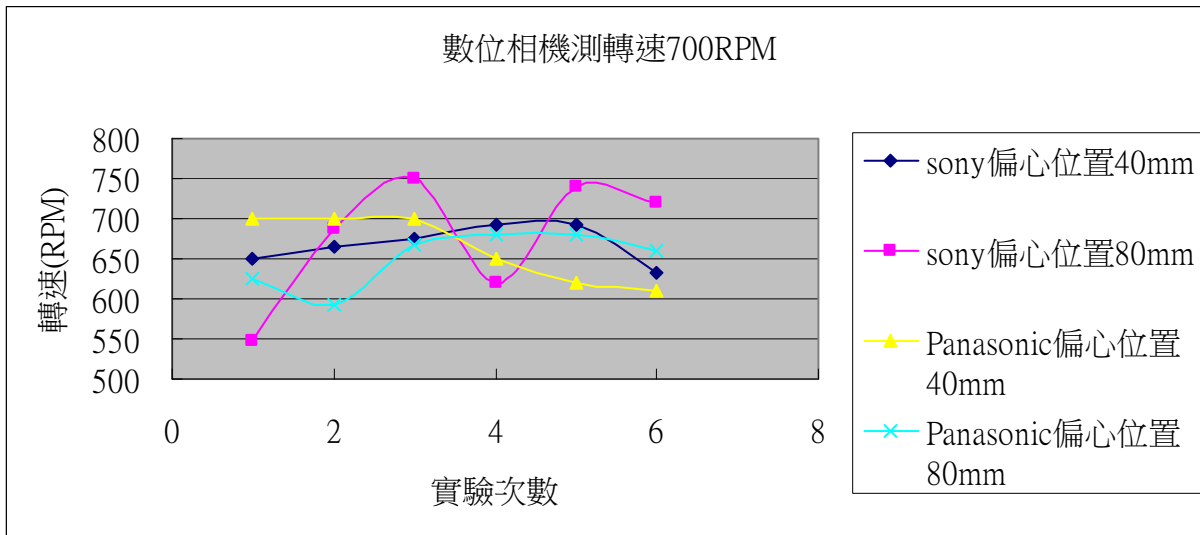
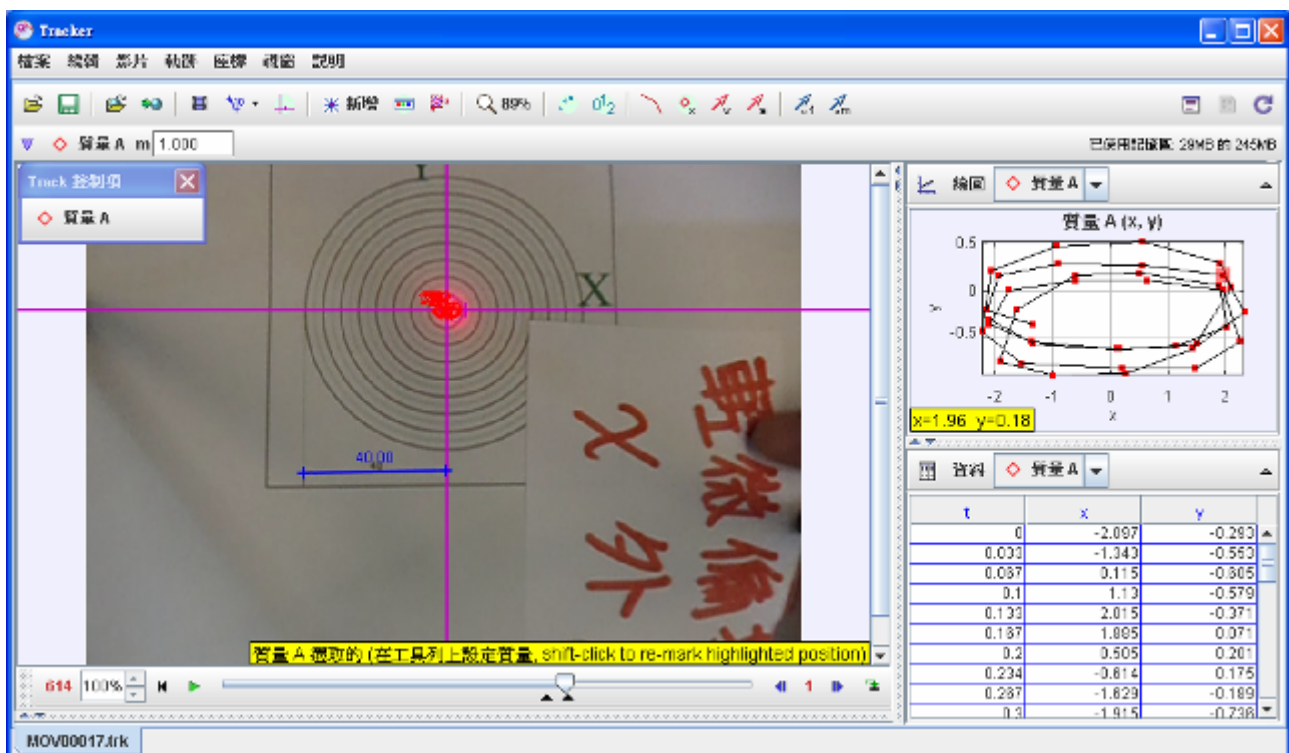
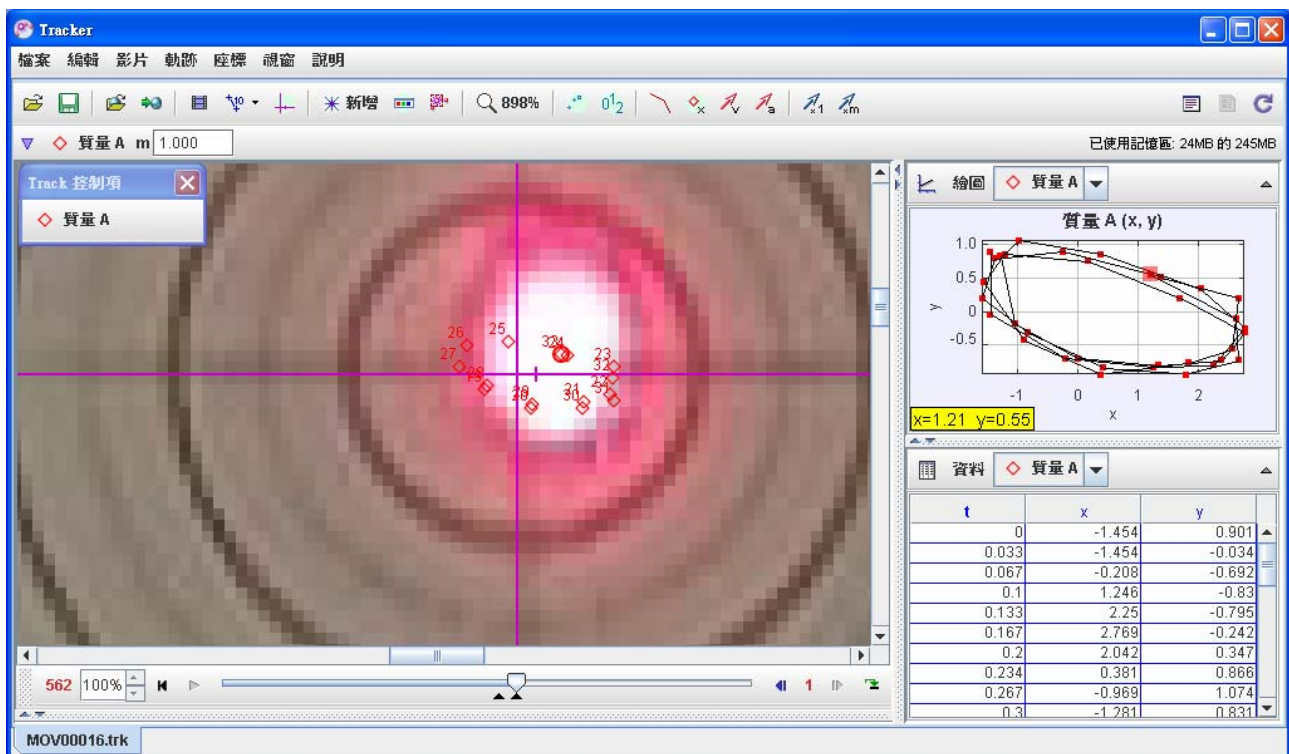


圖 44 以數位相機測量轉速實驗結果，轉速 700RPM

附錄三、雷射筆位置影響吊扇實驗處理圖

錄影編碼表

	雷射筆吸附中心	雷射筆吸附 X 軸外	雷射筆吸附 Y 軸外
輕微偏擺	MOV00016	MOV00017	MOV00018
中度偏擺	MOV00020	MOV00021	MOV00022
重度偏擺	MOV00023	MOV00024	MOV00025



Tracker

檔案 編輯 影片 軌跡 座標 視窗 說明

1,131%

0.2

軸線 角度 -1.5°

Track 控制項

質量 A

已使用記憶體: 35MB 的 245MB

繪圖 質量 A

質量 A (x, y)

x=-0.07 y=0.22

資料 質量 A

t	x	y
0	1.226	-0.454
0.033	1.715	-0.233
0.067	0.935	-0.305
0.1	-0.114	-0.02
0.133	-1.267	0.21
0.167	-2.149	0.057
0.2	-1.851	-0.378
0.234	-0.722	-0.714
0.267	0.502	-0.682
0.3	1.57	-0.654

x=6.289E0 y=0E0

727 100%

MOV00018.trk

Tracker

檔案 編輯 影片 軌跡 座標 視窗 說明

566%

0.2

質量 A m 1.000

Track 控制項

質量 A

已使用記憶體: 41MB 的 245MB

繪圖 質量 A

質量 A (x, y)

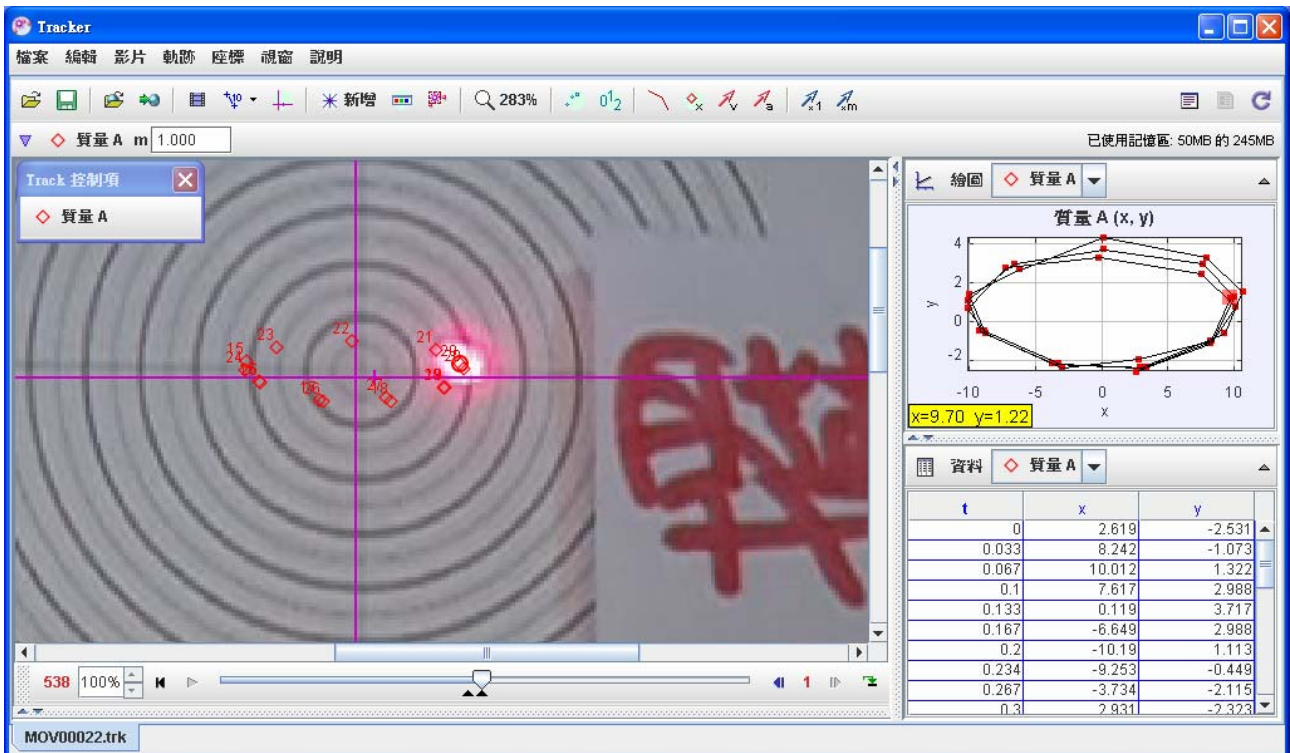
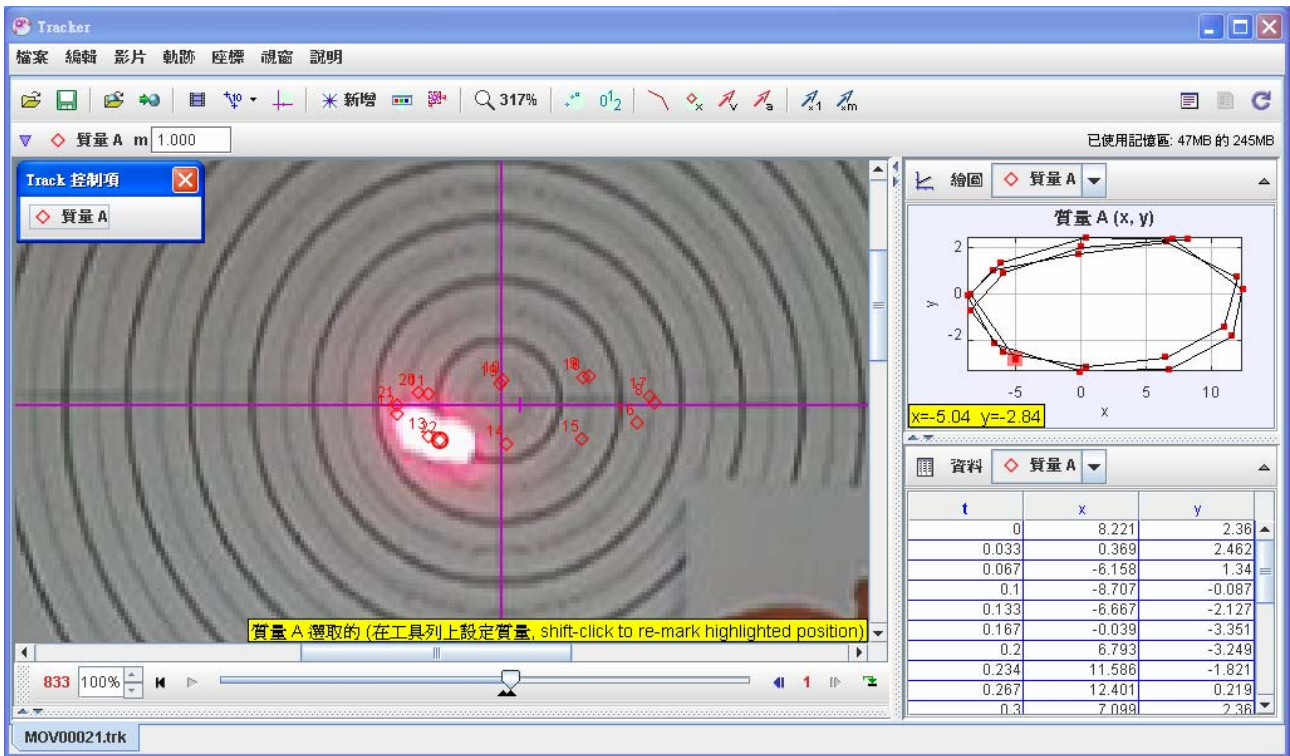
x=-6.88 y=2.80

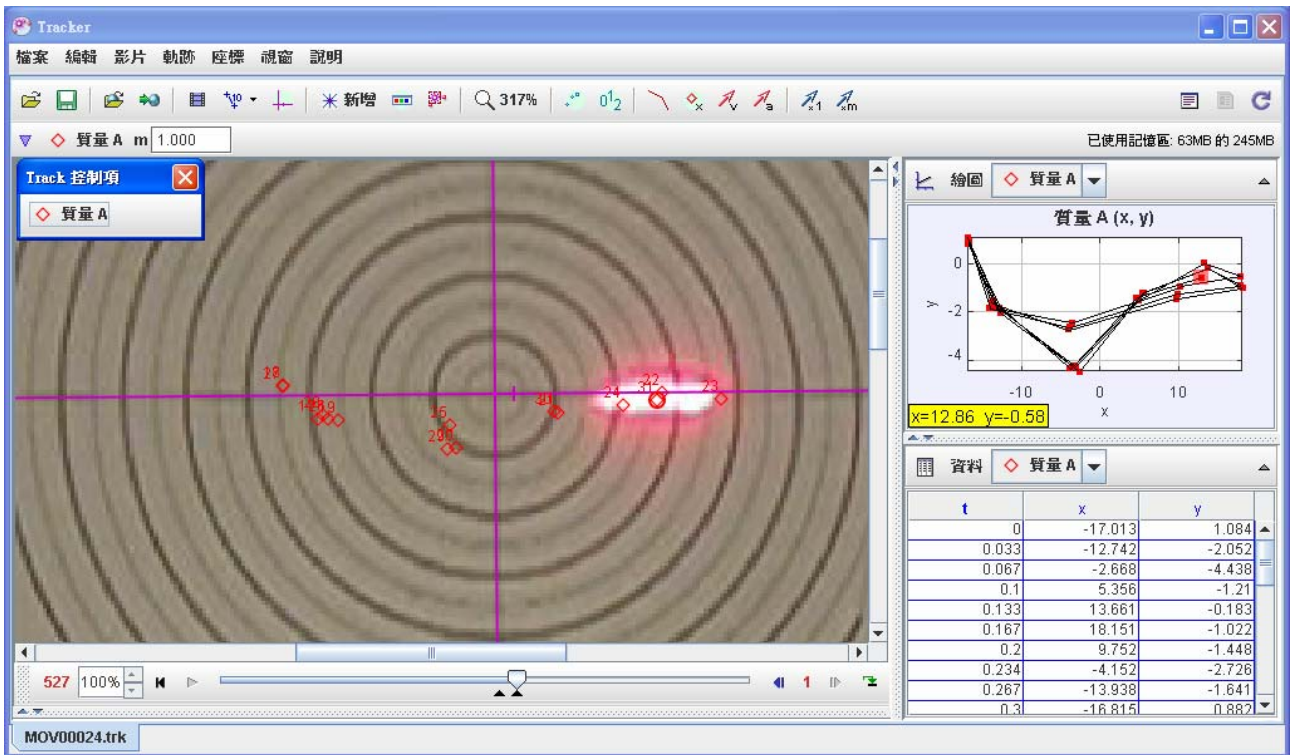
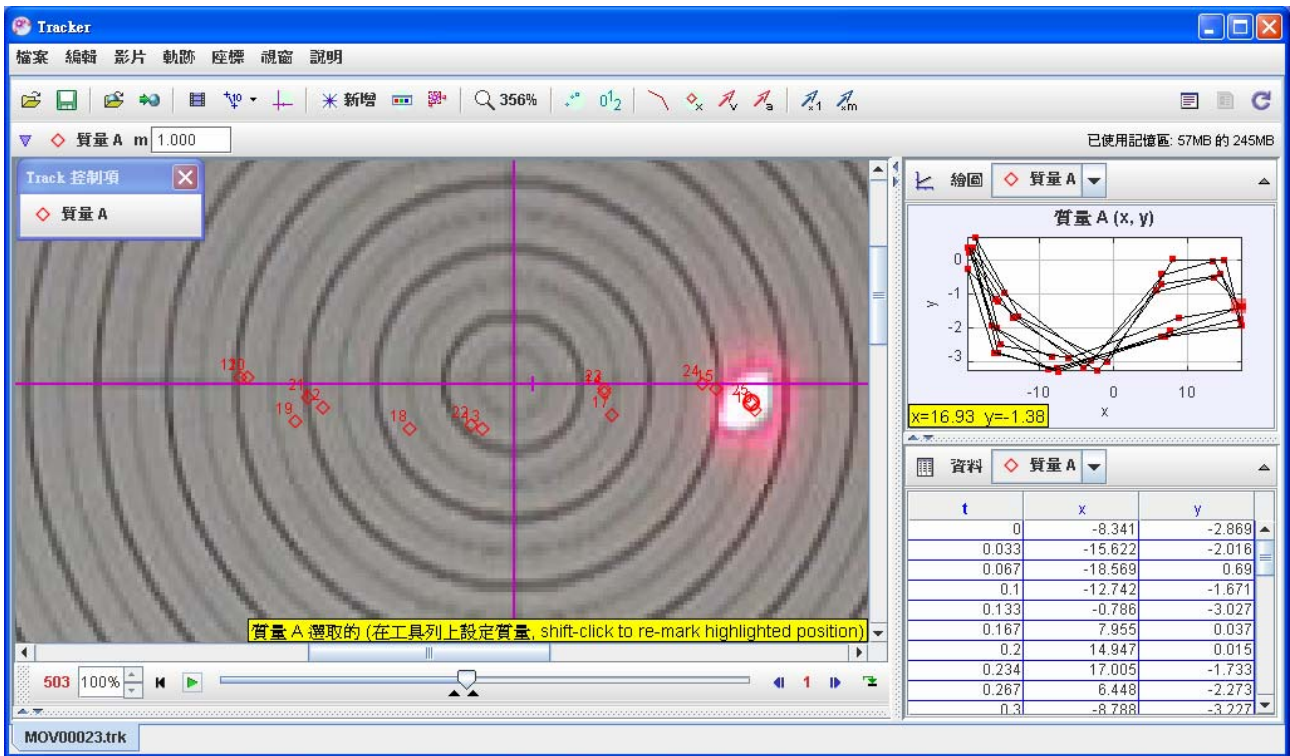
資料 質量 A

t	x	y
0	7.729	0.435
0.033	2.101	2.078
0.067	-4.804	2.443
0.1	-10.745	3.629
0.133	-11.748	2.418
0.167	-8.348	-0.378
0.2	-3.742	-1.511
0.234	2.052	-1.869
0.267	7.802	-1.229
0.3	7.744	1.38

841 100%

MOV00020.trk





Tracker

檔案 編輯 影片 軌跡 座標 視窗 說明

356% 0.2

質量 A m 1.000 已使用記憶體: 69MB 的 245MB

Track 控制項

質量 A

質量 A 選取的 (在工具列上設定質量, shift-click to re-mark highlighted position)

1094 100%

MOV00025.trk

繪圖 質量 A

質量 A (x, y)

x=-9.77 y=-2.82

資料 質量 A

t	x	y
0	13.129	1.035
0.033	0.469	0.484
0.067	-9.771	0.18
0.1	-14.968	2.207
0.133	-14.968	-0.084
0.167	-7.304	-3.079
0.2	1.77	-0.436
0.234	11.461	0.885
0.267	17.628	0.268
0.3	13.663	0.445

輕度偏擺雷射筆位置數據表

中心			Y 外側			X 外側		
t	x	y	t	x	y	t	x	y
0	2.619	-2.531	0	7.729	0.435	0	8.221	2.36
0.033	8.242	-1.073	0.033	2.101	2.078	0.033	0.369	2.462
0.067	10.012	1.322	0.067	-4.804	2.443	0.067	-6.158	1.34
0.1	7.617	2.988	0.1	-10.75	3.629	0.1	-8.707	-0.087
0.133	0.119	3.717	0.133	-11.75	2.418	0.133	-6.667	-2.127
0.167	-6.649	2.988	0.167	-8.348	-0.378	0.167	-0.039	-3.351
0.2	-10.19	1.113	0.2	-3.742	-1.511	0.2	6.793	-3.249
0.234	-9.253	-0.449	0.234	2.052	-1.869	0.234	11.586	-1.821
0.267	-3.734	-2.115	0.267	7.802	-1.229	0.267	12.401	0.219
0.3	2.931	-2.323	0.3	7.744	1.38	0.3	7.099	2.36
0.334	9.283	-0.553	0.334	1.687	2.671	0.334	0.063	2.054
0.367	10.637	1.53	0.367	-5.431	2.805	0.367	-5.954	0.932
0.4	7.929	3.3	0.4	-11.29	3.438	0.4	-8.503	-0.699
0.434	0.119	4.342	0.434	-11.67	1.81	0.434	-5.954	-2.535
0.467	-6.233	2.675	0.467	-8.432	-0.993	0.467	0.369	-3.147
0.5	-10.09	1.426	0.5	-3.491	-2.166	0.5	6.487	-2.739
0.534	-8.94	-0.449	0.534	2.355	-2.467	0.534	10.974	-1.413
0.567	-3.317	-2.115	0.567	7.585	-1.349	0.567	11.994	0.728
0.601	3.348	-2.323	0.601	7.471	1.257	0.601	6.589	2.258
0.634	8.346	-0.969	0.634	1.581	2.555	0.634	-0.141	1.748
0.667	10.116	0.801	0.667	-5.607	3.02	0.667	-6.769	1.034
0.701	7.513	2.467	0.701	-11.31	3.826	0.701	-8.503	0.015
0.734	-0.297	3.3	0.734	-11.55	1.76	0.734	-5.036	-2.841
0.767	-7.274	2.78	0.767	-8.172	-0.593			
0.801	-10.19	0.697	0.801	-3.513	-1.667			
0.834	-8.836	-0.553	0.834	2.618	-2.122			
0.868	-3.005	-2.323	0.868	7.746	-1.231			
0.901	2.827	-1.907	0.901	7.04	0.96			
0.934	8.242	-0.969	0.934	0.144	2.382			
0.968	9.7	1.218	0.968	-6.875	2.797			

吊扇中度偏擺雷射筆位置影響數據

中心			X 外側			Y 外側		
t	x	y	t	x	y	t	x	y
0	-1.454	0.901	0	-2.097	-0.293	0	1.226	-0.454
0.033	-1.454	-0.034	0.033	-1.343	-0.553	0.033	1.715	-0.233
0.067	-0.208	-0.692	0.067	0.115	-0.605	0.067	0.935	-0.305
0.1	1.246	-0.83	0.1	1.13	-0.579	0.1	-0.114	-0.02
0.133	2.25	-0.795	0.133	2.015	-0.371	0.133	-1.267	0.21
0.167	2.769	-0.242	0.167	1.885	0.071	0.167	-2.149	0.057
0.2	2.042	0.347	0.2	0.505	0.201	0.2	-1.851	-0.378
0.234	0.381	0.866	0.234	-0.614	0.175	0.234	-0.722	-0.714
0.267	-0.969	1.074	0.267	-1.629	-0.189	0.267	0.502	-0.682
0.3	-1.281	0.831	0.3	-1.915	-0.736	0.3	1.57	-0.654
0.334	-1.038	-0.172	0.334	-1.004	-0.892	0.334	2.179	-0.012
0.367	0	-0.692	0.367	0.271	-0.866	0.367	1.413	0.359
0.4	1.35	-0.795	0.4	1.416	-0.605	0.4	-0.103	0.553
0.434	2.389	-0.726	0.434	2.093	0.045	0.434	-1.329	0.573
0.467	2.769	-0.311	0.467	1.911	0.305	0.467	-2.073	0.137
0.5	1.696	0.208	0.5	0.557	0.54	0.5	-2.09	-0.202
0.534	0.173	0.762	0.534	-0.926	0.488	0.534	-0.935	-0.537
0.567	-1.211	0.866	0.567	-2.071	0.227	0.567	0.297	-0.791
0.601	-1.557	0.451	0.601	-2.228	-0.423	0.601	1.833	-0.751
0.634	-0.9	-0.415	0.634	-1.551	-0.762	0.634	2.066	-0.693
0.667	0.381	-0.934	0.667	0.193	-0.814	0.667	1.633	-0.079
0.701	1.835	-0.761	0.701	1.468	-0.814	0.701	0.192	0.222
0.734	2.562	-0.553	0.734	2.249	-0.527	0.734	-1.325	0.417
0.767	2.665	0.208	0.767	1.963	0.019	0.767	-2	0.321
0.801	1.385	0.52	0.801	0.635	0.123	0.801	-1.785	0.066
0.834	-0.242	0.901	0.834	-0.614	0.123	0.834	-0.91	-0.484
0.868	-1.384	0.797	0.868	-1.759	0.019	0.868	0.422	-0.606
0.901	-1.592	0.208	0.901	-2.097	-0.345	0.901	1.72	-0.415
0.934	-0.831	-0.311	0.934	-1.369	-0.527	0.934	1.976	-0.226
0.968	0.416	-0.83	0.968	0.167	-0.605	0.968	1.496	0.178
1.001	1.8	-0.934	1.001	1.52	-0.553	1.001	-0.068	0.216
1.034	2.665	-0.726	1.034	2.327	-0.215			
1.068	2.631	-0.103	1.068	1.963	0.175			
1.101	1.212	0.555	1.101	0.557	0.279			
			1.134	-0.9	0.305			

吊扇重度偏擺雷射位置影響數據表

中心			X 外側			Y 外側		
t	x	y	t	x	y	t	x	y
0	-8.341	-2.869	0	-17.01	1.084	0	13.129	1.035
0.033	-15.62	-2.016	0.033	-12.74	-2.052	0.033	0.469	0.484
0.067	-18.57	0.69	0.067	-2.668	-4.438	0.067	-9.771	0.18
0.1	-12.74	-1.671	0.1	5.356	-1.21	0.1	-14.97	2.207
0.133	-0.786	-3.027	0.133	13.661	-0.183	0.133	-14.97	-0.084
0.167	7.955	0.037	0.167	18.151	-1.022	0.167	-7.304	-3.079
0.2	14.947	0.015	0.2	9.752	-1.448	0.2	1.77	-0.436
0.234	17.005	-1.733	0.234	-4.152	-2.726	0.234	11.461	0.885
0.267	6.448	-2.273	0.267	-13.94	-1.641	0.267	17.628	0.268
0.3	-8.788	-3.227	0.3	-16.82	0.882	0.3	13.663	0.445
0.334	-16.4	-1.93	0.334	-12.84	-1.851	0.334	1.242	-0.084
0.367	-19.5	0.381	0.367	-3.466	-4.232	0.367	-9.594	-0.348
0.4	-13.58	-1.705	0.4	5.556	-1.212	0.4	-14.79	1.854
0.434	-2.192	-3.283	0.434	13.661	-0.183	0.434	-14.97	0.445
0.467	6.49	-0.69	0.467	17.952	-0.92	0.467	-7.921	-3.079
0.501	14.376	-0.425	0.501	9.853	-1.249	0.5	1.418	-0.877
0.534	17.167	-1.94	0.534	-3.952	-2.628	0.534	10.844	1.061
0.567	6.962	-2.259	0.567	-14.14	-1.84	0.567	17.716	0.709
0.601	-7.467	-3.295	0.601	-16.91	0.883	0.601	14.633	0.533
0.634	-15.6	-2.737	0.634	-12.54	-1.953	0.634	2.651	0.18
0.667	-18.95	0.372	0.667	-3.166	-4.234	0.667	-9.33	-0.613
0.701	-14.72	-0.983	0.701	4.954	-1.506	0.701	-14.62	1.59
0.734	-3.003	-2.976	0.734	13.263	0.02	0.734	-15.5	0.621
0.767	6.484	-0.425	0.767	17.956	-0.52	0.767	-8.361	-3.079
0.801	13.42	-0.027	0.801	10.156	-0.952	0.801	0.977	-1.229
0.834	16.927	-1.382	0.834	-3.65	-2.431	0.834	10.051	1.061
0.868	7.68	-2.099	0.868	-13.34	-1.847	0.868	17.54	0.885
0.901	-7.547	-3.215	0.901	-16.92	0.783	0.901	15.602	0.973
0.934	-16.08	-2.737	0.934	-13.74	-1.543	0.934	4.061	0.885
0.968	-19.67	-0.266	0.968	-3.867	-4.328	0.968	-8.625	0.004
1.001	-15.6	-1.222	1.001	4.655	-1.404	1.001	-14.44	1.942