

中華民國第 51 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高中組 物理科

第一名

040116

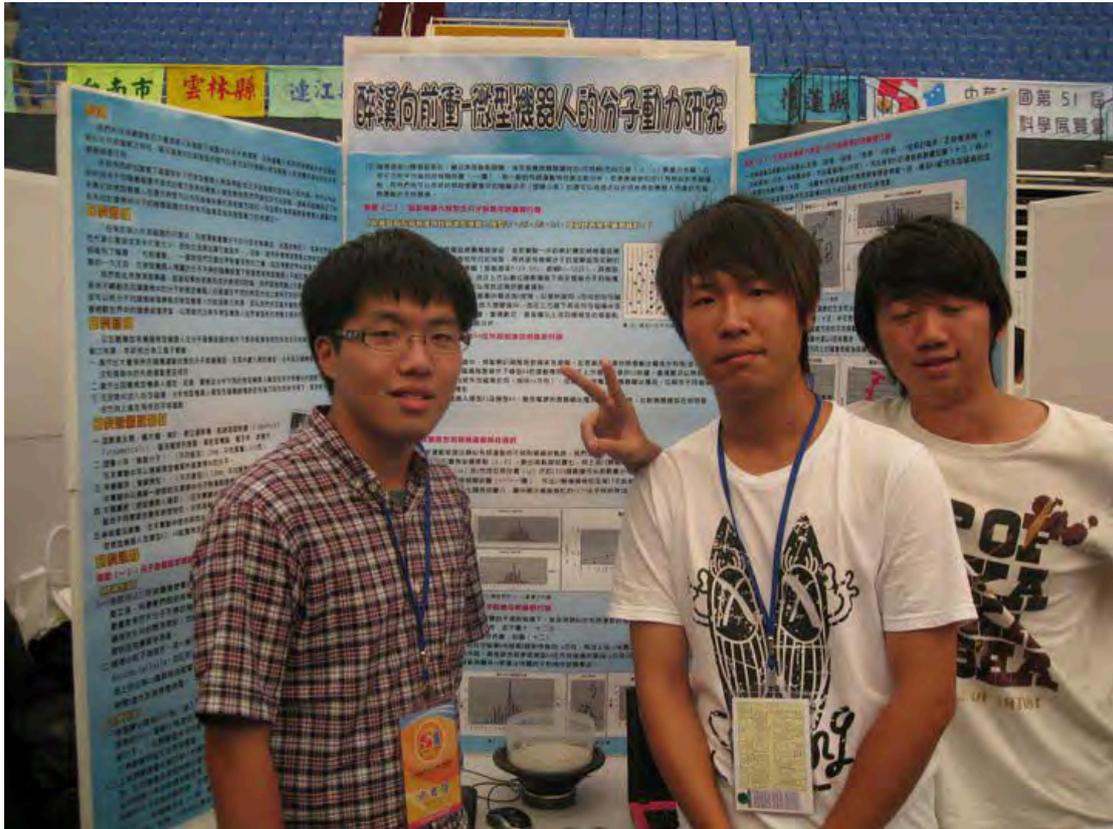
醉漢向前衝—微型機器人的分子動力研究

學校名稱：國立臺南第一高級中學

作者： 高一 劉奕寬 高一 李冠杰 高一 陳沛揚	指導老師： 劉演文 劉昌閔
---	-----------------------------

關鍵詞：布朗運動、微型機器人、模擬

得獎感言



對於這次的獲獎，可以說是出乎大家的意料，我們本來一直以為南部的學校和北部的學校差很多，我們原本以為有佳作就不錯了，但是我們也沒有因此而放鬆，還很認真的準備，因為我們是跨校的，所以必須用六日的時間去練習，許多的假日也沒有放到，都是一直不斷地練習，而在比賽時不論是縣賽還是全國比賽，我們都是秉持著有始有終的精神，不管教授提出多麼困難的問題，我們就像商人在賣商品一樣，你有問題我們就盡量說明到你了解。雖然其中有許多的挫折，比如說有隊友對自己要說明的部分有不熟悉的，其他兩個隊友就會盡全力的幫助他，而指導老師也十分的認真指導。在教授問問題完後，物理科的總召集人就來問我們一個問題：「在你們的實驗中最有趣的事是什麼？」我們的回答是：「雖然到高中後就分校了，但是因為這個科展使我們這三人又聚在一起，是最值得的。」對於我們的指導老師、父母、和許多支持我們的人，謝謝你們。

作品名稱

醉漢向前衝-微型機器人的分子動力研究

摘要

我們利用持續振動的大量塑膠小珠模擬了液體中的分子熱運動，並根據置入其中的保麗龍球所出現的類似於布朗運動之特性，顯示這樣的巨觀模型的確可以很近似的模擬出微型機器人在流體中會面對的分子隨機碰撞作用。

本研究同時也證實了適當設計下的微型機器人模型再配合上外加磁場的定向磁力矩作用，將可以有效的利用分子的隨機碰撞所造成的衝力使微型機器人模型朝向我們所指定的方向移動，這樣的結論暗示了將來真正的微型機器人在操作時是可以利用磁場來導引其前進方向的，而且原本會阻礙微型機器人運動的那些來自於環境中分子的隨機碰撞作用將有可能會成為其前進動力的來源之一。

壹、研究動機

「如果能製造出大小和細菌或分子相仿的汽車、飛機或潛艇，把這些微型機器人注射入人體，便能標定並治癒病灶，例如動脈內的斑塊和可能導致阿茲海默症的蛋白質沉澱等。」「在等於或小於活細胞的尺度中，布朗運動則讓分子的行徑全無章法。在這些情況下，就算我們能夠把汽車引擎做成奈米尺度大小，恐怕也沒辦法讓它動起來。」

以上是摘自 2009 年科學人 6 月號的兩段文字。沒錯，這些微型機器人確實擁有非常好的遠景以取代部份的外科手術，不但節省資源，也能減少病人的痛楚。但現今科學家欲開發此類微型機器人時卻碰到了難題：「布朗運動」，一個對我們巨觀世界影響至微的力量，但在微觀世界中卻是主導了物體運動的一大主因，在微型機器人周圍的分子不停的隨機碰撞下將會使得微型機器人只能在原地打轉。

我們對此效應深感興趣，經過和學校老師的討論，我們認為理論上只要能夠使微型機器人保持不轉動而且讓環境中的分子對微型機器人的碰撞在不同的特定方向上具有不同的平均衝力效應，就應該可以將分子的隨機碰撞轉換成微型机器人的前進動力來源，因此我們決定著手嘗試用巨觀模型去模擬這種微觀世界中的隨機碰撞現象，以期能找出將來微型機器人必然會面對的問題之解決方案。

貳、研究目的

以巨觀模型來模擬微型机器人在分子隨機碰撞的條件下是否確實能夠有效的利用分子的碰撞當作其移動的動力來源。本研究細分為三個子實驗，分列如下：

- 一. 製作出大量保持在隨機運動狀態的分子群體模型，在其中置入一般微粒模型，記錄、觀察並分析微粒模型在分子群體模型的隨機碰撞條件下其行為模式和預期中的布朗運動是否相符。
- 二. 製作出四種微型机器人模型，記錄、觀察並分析不同的微型机器人模型在分子群體中的運動行為異同。
- 三. 在空間中加入均勻磁場，以提供微型机器人模型定向磁力矩，觀察並分析特定的微型机器人模型在定向磁力矩的作用下，是否確實會在特定的方向上產生有效的平移運動。

參、研究設備及器材

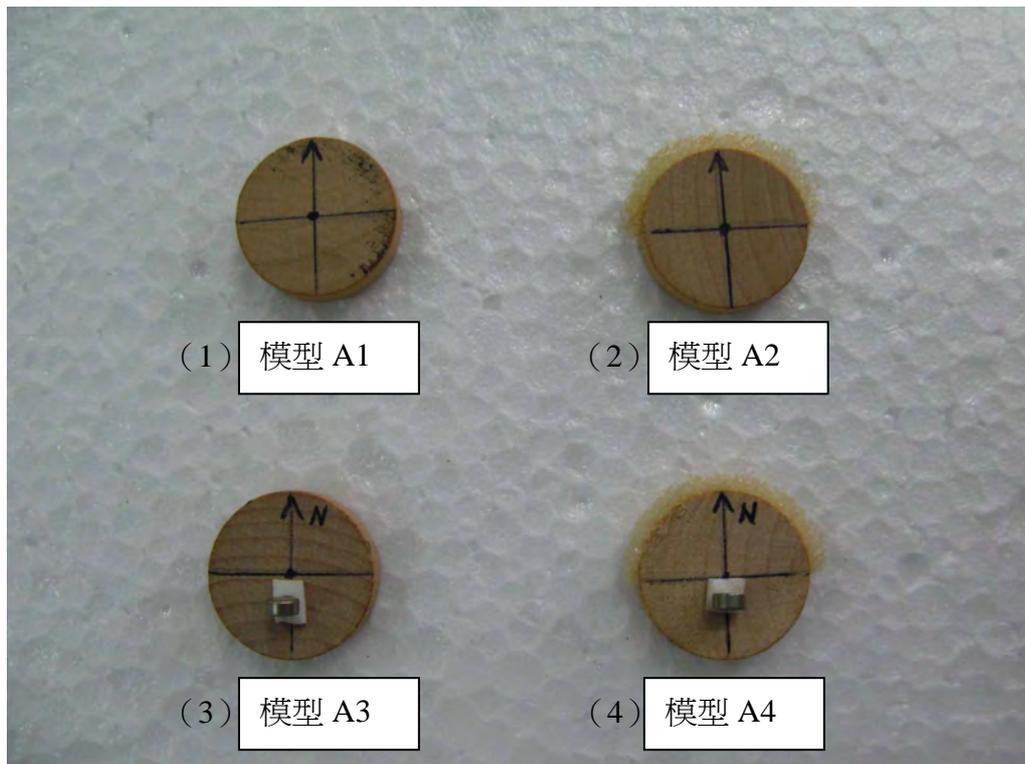
- 一. 函數產生器 (Function Generator; AMREL, Model FG-513) :
調整輸出振盪頻率, 用以模擬分子在不同熱運動條件下的行為模式。
- 二. 擴大機 (Amplifier; USHER, AU-8500 II) :
將函數產生器輸入的訊號放大後輸出到喇叭, 以造成喇叭作適當振幅的振盪。
- 三. 喇叭 (FIRST820 8Ω 100W) :
提供振盪條件, 使置於其上方的塑膠盒中的分子群體模型能保持在振動狀態, 以模擬微觀分子總是不停的做熱運動的行為。函數產生器、擴大機、喇叭三者組合裝置如圖 (一)。
- 四. 塑膠小珠 (模擬分子) : (平均直徑3.13mm, 平均質量0.010克)
在本實驗中用以模擬微型機器所處環境中的分子。
- 五. 保麗龍球 (模擬微粒) : (平均直徑10.10mm, 平均質量0.0067克)
在本實驗中用以模擬一般微粒在環境中分子熱運動隨機碰撞下的行為表現, 如圖 (二)
- 六. 木質圓板 (微型機器人模型) : (平均直徑17.70mm, 平均厚度5.0mm)
在本實驗中用以模擬微型機器人, 配合不同需要改變其物理特性, 分別為稱為模型A1、A2、A3、A4, 其外型如圖 (三), 詳細規格見第二部份實驗。
- 七. 赫姆霍茲線圈 (Helmholtz coils) :
在本實驗中提供朝向坐標+y或-y方向的均勻磁場, 使微型機器人模型A3、A4能獲得定向磁力矩, 不致因隨機碰撞而任意轉動, 如圖 (四)、圖 (五)。
- 八. 直流電源供應器 (DC POWER SUPPLY; DPS-5050) :
提供赫姆霍茲線圈直流電源, 其電流方向相反時, 赫姆霍茲線圈產生的磁場會隨之反向。
- 九. 數位攝影機 :
架設在振動裝置的正上方以拍攝、記錄模擬微粒與微型機器人模型的運動。
- 十. 軌跡追蹤軟體 (VideoPoint Fundamentals) :
追蹤模擬微粒、微型機器人模型的運動軌跡, 操作時介面如圖 (六)。
- 十一. 電子秤與游標尺 :
用來秤量各種樣品的質量與直徑大小。
- 十二. 筆記型電腦 :
一般資料圖表處理及製作研究報告。



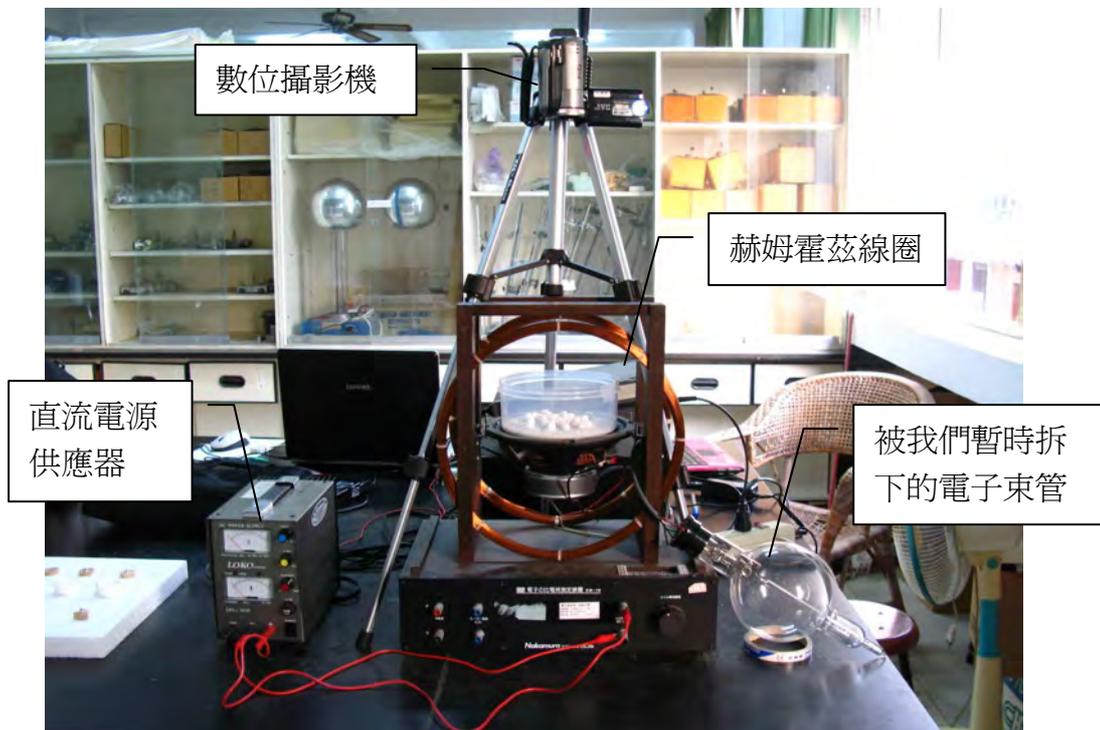
圖（一）函數產生器、擴大機、喇叭組合起來的振動裝置。



圖（二）置於塑膠盆內的塑膠小珠（用來模擬分子）和保麗龍球（用來模擬懸浮微粒）；喇叭開始振動後，模擬分子就會對模擬微粒不停的進行隨機碰撞，而模擬微粒的行為會類似於布朗運動。



圖（三）微型機器人模型A1、A2、A3、A4，其中模型A3、A4盤面上黏附的磁鐵其N極是指向畫面的正上方，使用時空間中會有利用赫姆霍茲線圈產生的外加磁場；此外，模型A2、A4的上半圓周處黏貼了海綿，以改變受到模擬分子碰撞時的衝力條件。



圖（四）直流電源供應器、赫姆霍茲線圈與正上方架設好的攝影機；喇叭與塑膠盆剛好放在赫姆霍茲線圈的線圈中心平面上。

肆、研究過程

實驗（一）：分子群體模型的隨機運動特性探討

一. 理論依據：

- (一). 自西元1827年英國植物學家勞伯·布朗（Robert Brown）發現懸浮於水中的花粉微粒會進行不規則的隨機運動之後，科學家們經由各種實驗及理論推導已經知道這是因為微小粒子在水中會受到周圍數量眾多的水分子不停的碰撞所造成的現象，我們將這種微小粒子受分子碰撞產生的隨機運動稱為布朗運動（Brownian motion）。
- (二). 微小粒子的布朗運動是由平移及轉動所構成的，其相關行為特性的理論推導主要是來自於愛因斯坦及朗之萬（Langevin）的貢獻。
- (三). 設微小粒子為球形，其一維布朗運動的軌跡方程式為 $x(t)$ 且 $x(0)=0$ ，則 $x(t)$ 應為一 Normal Random Variable，其機率密度函數（pdf）為 $\Phi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)$ ， σ = standard deviation = $\sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n-1}}$ ，因此若在固定時間間隔下觀察布朗運動，其在 x 方向上的位移 Δx 應會呈現一個標準的高斯分佈，即： $p(\Delta x) = \left(\frac{1}{2\pi\sigma^2}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{\Delta x^2}{2\sigma^2}\right)$ ；同理 y 方向亦為如此： $p(\Delta y) = \left(\frac{1}{2\pi\sigma^2}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{\Delta y^2}{2\sigma^2}\right)$ 。
- (四). 微小粒子作布朗運動時，若觀察時間 t 遠大於其特徵時間 τ ，則其各方向上位移平方的平均值應與觀察時間成正比： $\langle r^2 \rangle \propto t$ 。
- (五). 布朗運動的數學模型不只適用於水中的懸浮微粒，也能推廣應用到液體中的沉澱、金屬電化學沉積過程甚至生物群聚的徑向擴散等現象。

二. 實驗方法：

- (一). 取自文具行購得之塑膠小珠約5000粒，倒入深10.0cm、直徑15.0cm的圓型透明塑膠盆中，塑膠小珠的分佈深度約1cm，這些塑膠小珠即是用來模擬液體中的不停進行熱運動的分子，本實驗中也稱之為「模擬分子」。
- (二). 上述塑膠盆置於開口朝上的喇叭上方後，將函數產生器、擴大器、喇叭電路接妥，啟動電源，以函數產生器控制喇叭振動頻率，以擴大器音量旋鈕調整喇叭振動的振幅，進而控制塑膠盆內塑膠小珠的集體振動型態，塑膠小珠因彼此間不停的互相碰撞，其個別的運動會類似液體中分子的熱運動現象。
- (三). 在塑膠盆中平均散佈置入保麗龍球約30顆，用以模擬微小粒子在液體中被分子不停碰撞而產生的布朗運動，本實驗中也將這些保麗龍球稱之為「模擬微粒」。

- (四). 適當的調整喇叭的振動頻率及振幅（本實驗中取振動頻率 $f=19.0\text{Hz}$ ，振幅 $R=-32\text{dB}$ ），自正上方以數位攝影機錄下保麗龍球的運動約10秒，重複此步驟數次，以獲得足夠的數據。
- (五). 注意上述步驟中函數產生器的頻率與擴大器振幅應互相配合，避免在某些頻率下塑膠盆內形成特定駐波振動模式，致使保麗龍球會往盆內的特定區域集中。擴大器輸出的振幅若太小時模擬分子的振動不明顯而振幅太大時則又會造成模擬分子跳出盆外或使微型機器人模型翻覆。
- (六). 將數位攝影機錄下的影像傳到筆電中，經由格式工廠（Format Factory）軟體轉換成.mov檔，配合影像擷取軟體VideoPoint記錄塑膠盆中的模擬微粒（保麗龍球）每隔1/24秒的位置坐標，並輸出到Excel中以進行統計處理。
- (七). 隨機選取10顆模擬微粒，繪出其移動軌跡圖、每次取樣時間間隔內的x方向與y方向位移（ Δx 、 Δy ）數量分佈圖、位移平方的平均值與時間關係圖（ $\langle r^2 \rangle - t$ 圖），與一般的布朗運動特性做比較分析，若是模擬微粒的行為類似於布朗運動，則我們就可以合理的假設塑膠盒中的模擬分子（塑膠小珠）的確可以造成近似於將來微型機器人所處的充滿熱運動分子的環境。

實驗（二）：微型機器人模型在分子群體中的運動行為

一. 製備具有不同物理特性的微型機器人模型：

(一). 微型機器人模型A1：

取一均質木質圓盤，通過圓盤中心劃一對正交直線，以利記錄其位置並觀察其在模擬分子的隨機碰撞下之移動與轉動的情形，其外形如前圖（三-1）所示。

(二). 微型機器人模型A2：

取如模型A1的均質木質圓盤，並在其中半圓周上黏貼海綿，以使模擬分子與本模型碰撞時對貼有海綿處出現較大的平均衝力作用（原因參見討論七），其外形如前圖（三-2）所示。

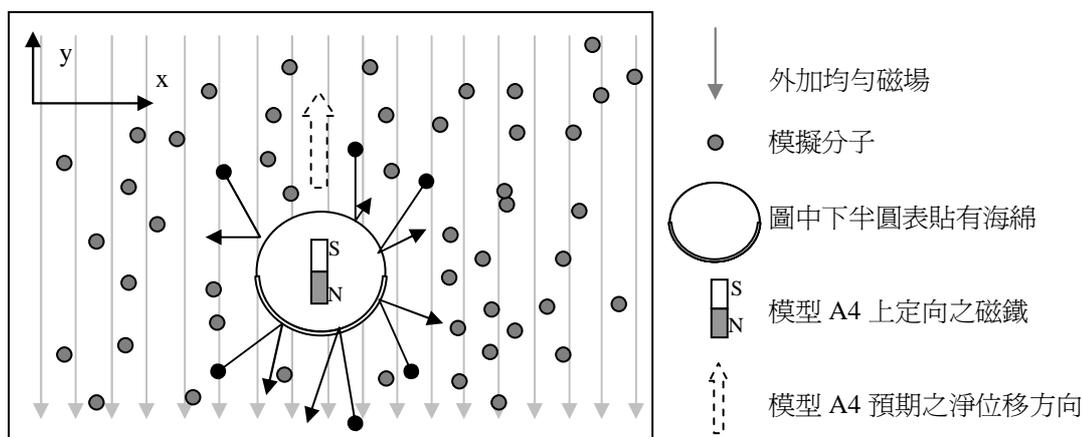
(三). 微型機器人模型A3：

取如模型A1的均質木質圓盤，在盤面中央處黏貼一強力磁鐵，使本模型在外加均勻磁場的作用下能獲得定向的磁力矩，本模型在受到模擬分子隨機碰撞的過程中盤面上磁鐵的兩極總能保持與外加磁場同向，其外形如前圖（三-3）所示。

(四). 微型機器人模型A4：

取模型A3，並在其磁鐵N極邊的半圓周上黏貼海綿。在外加均勻磁場的磁力矩作用下本模型將可保持不轉動，而模擬分子對其N、S兩個半圓周上的不同碰撞條件應該

可以提供本模型向著未貼有海綿的那個方向（即外加磁場的反方向）上出現淨位移效應，其外形如前圖（三-4），運作原理如下圖（七）所示。



圖（七）微型機器人模型A4在內部磁鐵配合外加磁場的定向力矩以及模擬分子對海綿造成的較大平均衝力作用下，應該會出現與外加磁場反向（即圖中+y方向）明顯的淨位移效應。

(五). 以上四種模型的基本物理特性比較如下表（一）：

模型編號	A1	A2	A3	A4
物理特性				
模型直徑 (mm)	17.70	17.70	17.70	17.70
模型厚度 (mm)	5.00	5.00	5.00	5.00
模型質量 (克)	1.17	1.18	1.32	1.33
模型中定向磁鐵	無	無	有	有
操作時外加磁場	無	無	有	有
半圓周加上海綿	無	有	無	有
預期的行為表現	隨機運動	隨機運動	隨機運動	模型在平行於磁場的方向上出現明顯位移

表（一）四種微型機器人模型的基本物理特性

二. 實驗方法：

- (一). 將直流電源供應器與赫姆霍茲線圈電路接妥，並把實驗一中的喇叭置於赫姆霍茲線圈中央處，調整喇叭開口平面恰平行於地面，再將裝有模擬分子的塑膠盆放在喇叭正上方，裝置如前圖（四）。
- (二). 調整喇叭振動頻率及振幅如實驗一中的條件後（振動頻率 $f=19.0\text{Hz}$ ，振幅 $R=-32\text{dB}$ ），將微型機器人模型A1放入塑膠盆中，自正上方以數位錄影機錄下其在模擬分子的碰撞下的運動情形約10秒鐘，重複數次以得到足夠的數據資料。
- (三). 將微型機器人模型A1取出後換成模型A2放入塑膠盆中，重複步驟（二）。
- (四). 啓動直流電源供應器維持赫姆霍茲線圈中電流為1安培，以提供指向-y方向的均勻磁場。將微型機器人模型A3放入塑膠盆中，自正上方錄下其在均勻磁場中及模擬分子碰撞下的運動情形約10秒鐘，重複數次以得到足夠的數據資料。
- (五). 將微型機器人模型A3取出後換成模型A4放入塑膠盆中，其餘如模擬分子的振動模式、外加均勻磁場強度與方向均維持不變，重複步驟（四）。
- (六). 將數位攝影機錄下的影像傳到筆電中進行轉檔後配合VideoPoint記錄塑膠盆中各種微型機器人模型每隔1/24秒的位置坐標，並輸出到Excel中以進行統計處理。
- (七). 繪出上述四種模型的移動軌跡圖、 Δx 、 Δy 數量分佈圖，進行比較分析。

實驗（三）：比較微型機器人模型A4在不同磁場中的運動行爲

一. 實驗方法：

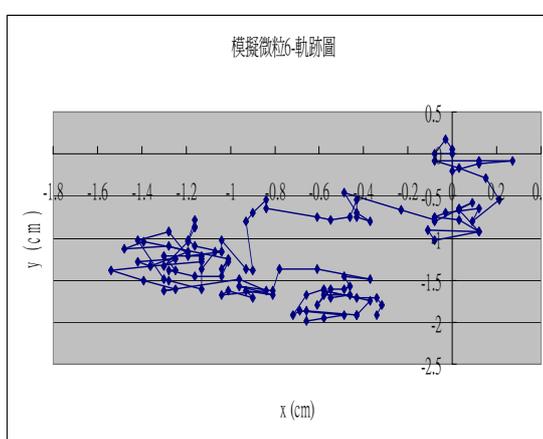
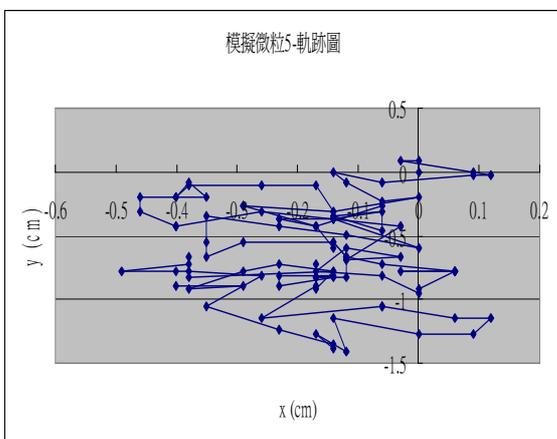
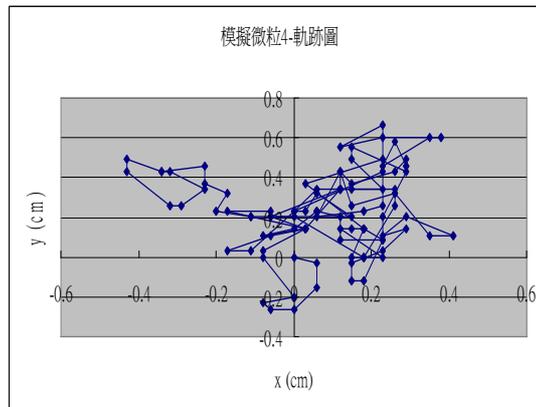
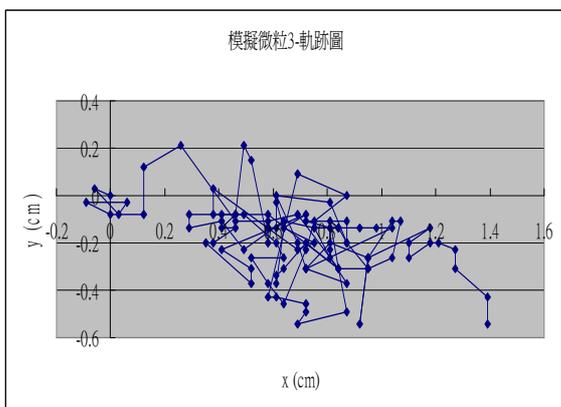
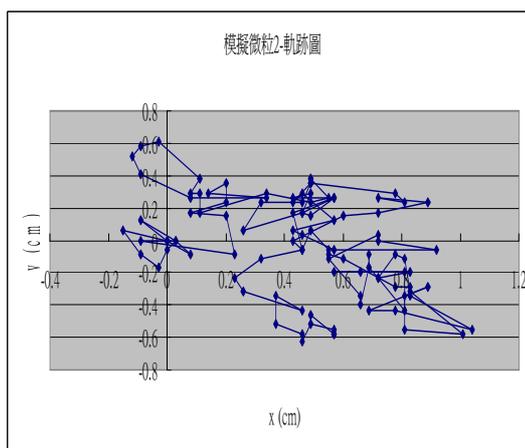
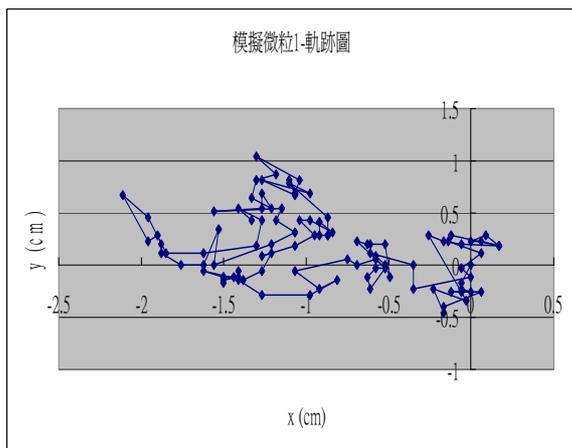
- (一). 將微型機器人模型A4放入塑膠盆中，啓動喇叭調整振動頻率及振幅，並使直流電源供應器輸出電流分別為1安培、2安培、4安培，以比較在不同磁場強度條件下模型A4的運動情形，自正上方錄下影像約10秒鐘，重複數次以得到足夠的數據資料。
- (二). 改變電流方向使外加磁場反向（指向+y方向），並調整直流電源供應器輸出電流分別為1安培、2安培、4安培，以比較在不同磁場強度及方向下模型A4的運動情形。
- (三). 在塑膠盆中同時置入微型機器人模型A1及模型A4，直流電源供應器輸出電流固定為4安培，比較兩種模型在模擬分子不規則碰撞作用下的行爲差異。
- (四). 用數位攝影機錄下上述影像傳到筆電中進行轉檔後配合VideoPoint記錄塑膠盆中微型機器人模型每隔1/24秒的位置坐標，並輸出到Excel中以進行統計處理。
- (五). 繪出上述各種條件下模型A4的移動軌跡圖、y方向平均速率圖，進行比較分析。

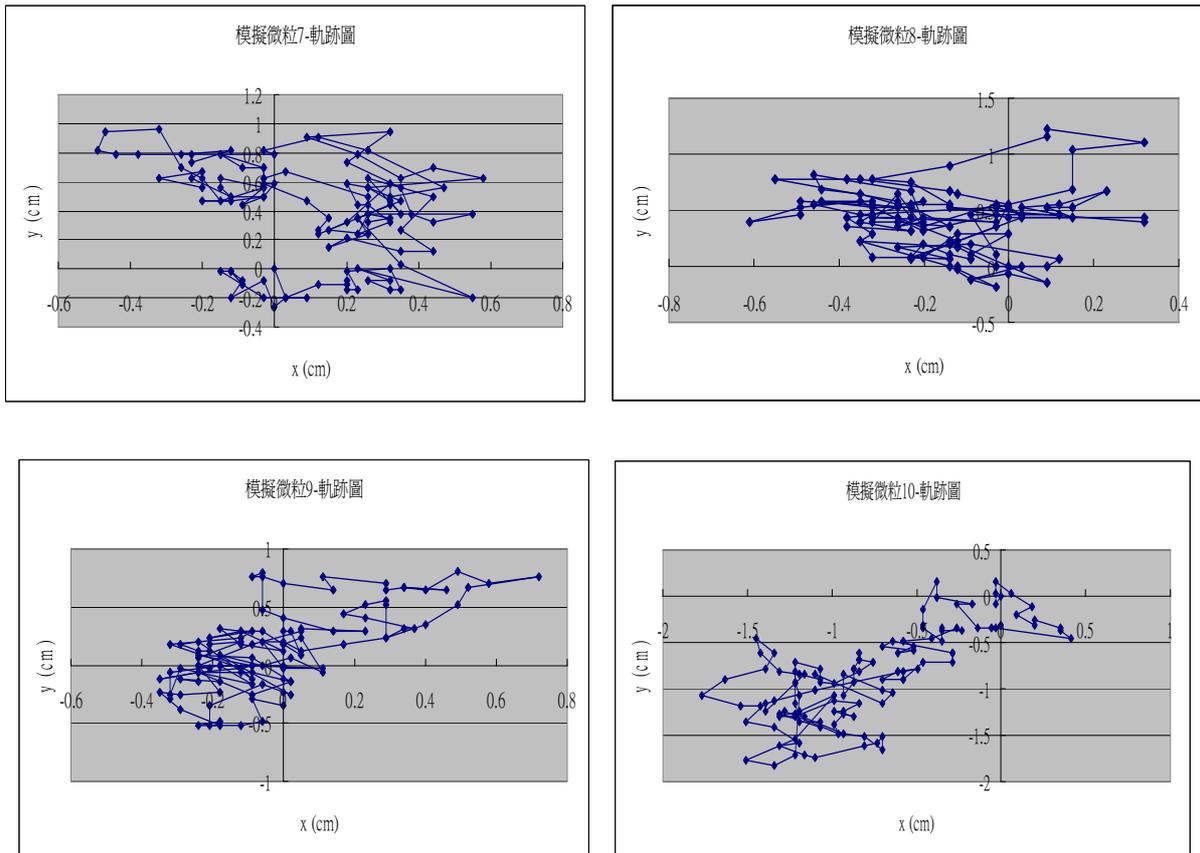
伍、實驗結果

實驗（一）：分子群體模型的隨機運動特性探討

一. 模擬微粒軌跡圖：

塑膠盆中的模擬微粒（保麗龍球）在模擬分子（塑膠小珠）的不停碰撞下，其運動呈現出類似布朗運動的不規則鋸齒狀軌跡，我們任選了10顆模擬微粒，記錄其坐標位置各約100個點，格式詳如附錄一，並以其初始位置為坐標原點（0，0），劃出其軌跡如圖（八）。

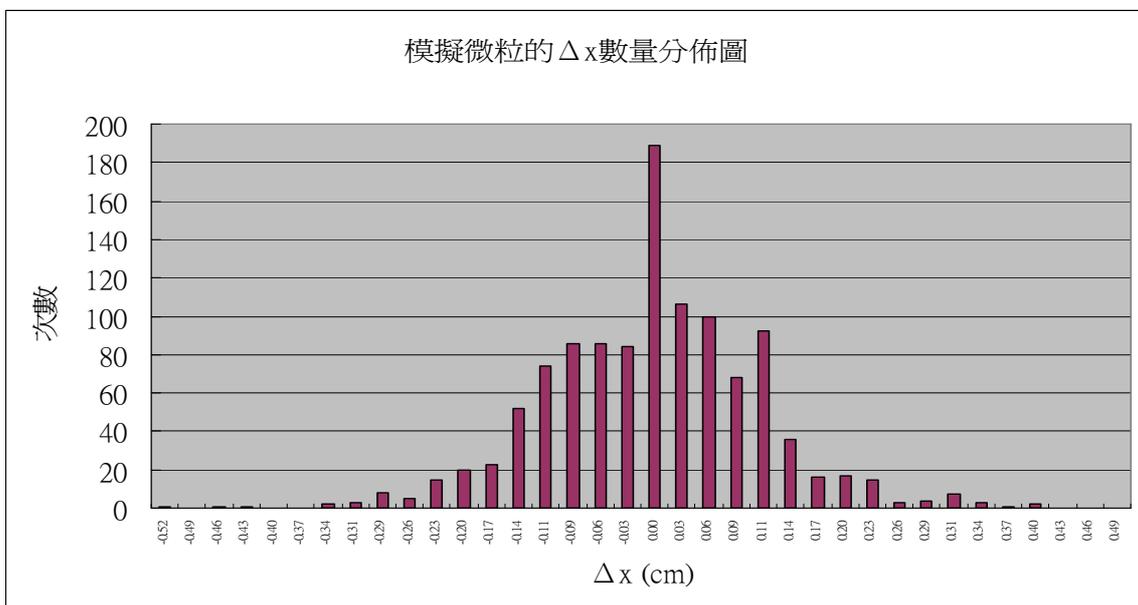


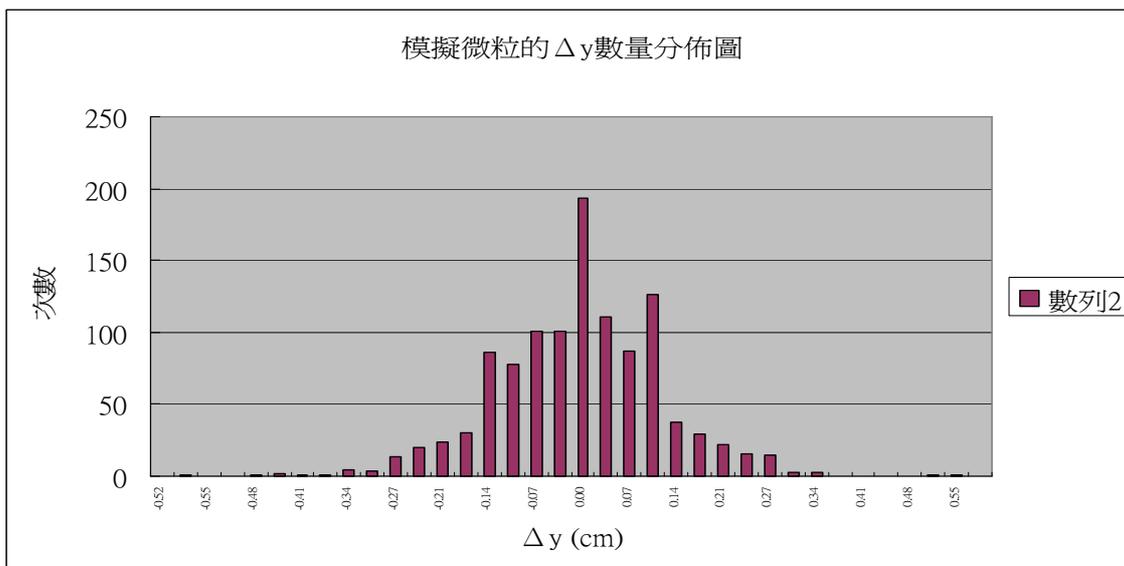


圖(八) 10顆隨機選取的模擬微粒(保麗龍球)在模擬分子(塑膠小球)持續碰撞下的軌跡圖，它們的不規則鋸齒狀特性和典型的布朗運動非常相似。

二. 模擬微粒的 Δx 與 Δy 的數量分佈圖：

將上述10顆模擬微粒在每次取樣時間間隔內(1/24秒)的x方向位移分量(Δx)及y方向位移分量(Δy)共約1000個數據，作出其數量分佈圖(Number Distribution)，如圖(九)。

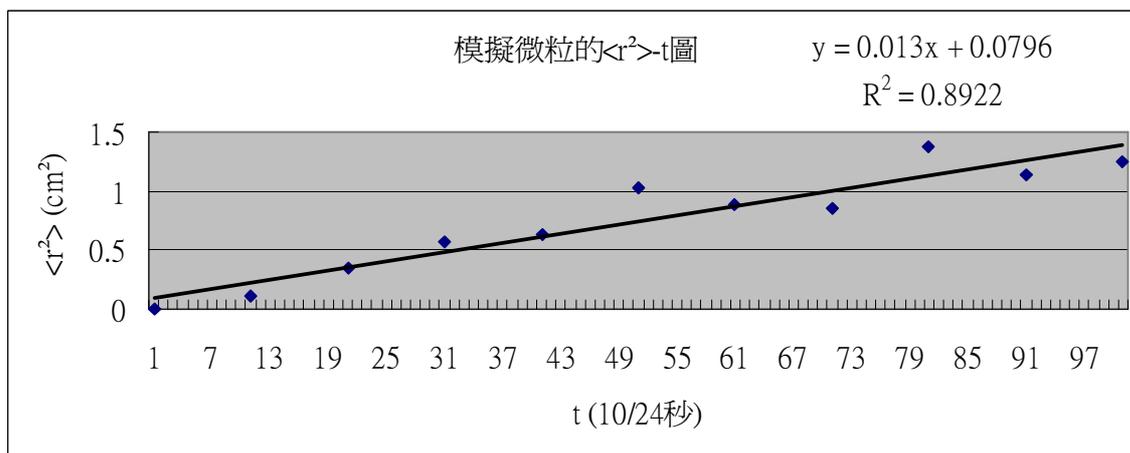




圖(九) 10顆隨機選取的模擬微粒在每次取樣時間間隔內在x方向與y方向的位移數量分佈圖(使用Excel中的Frequency函數),兩者都很像是高斯分佈的情況。

三. 模擬微粒的位移平方平均值與時間關係圖 ($\langle r^2 \rangle$ -t圖) :

作出10顆模擬微粒在每10次取樣時間間隔(10/24秒)內的位移平方的平均值隨時間的變化關係如圖(十),圖中顯示模擬微粒的 $\langle r^2 \rangle$ 近乎與時間t成正比,線性迴歸的相關係數平方=0.89。



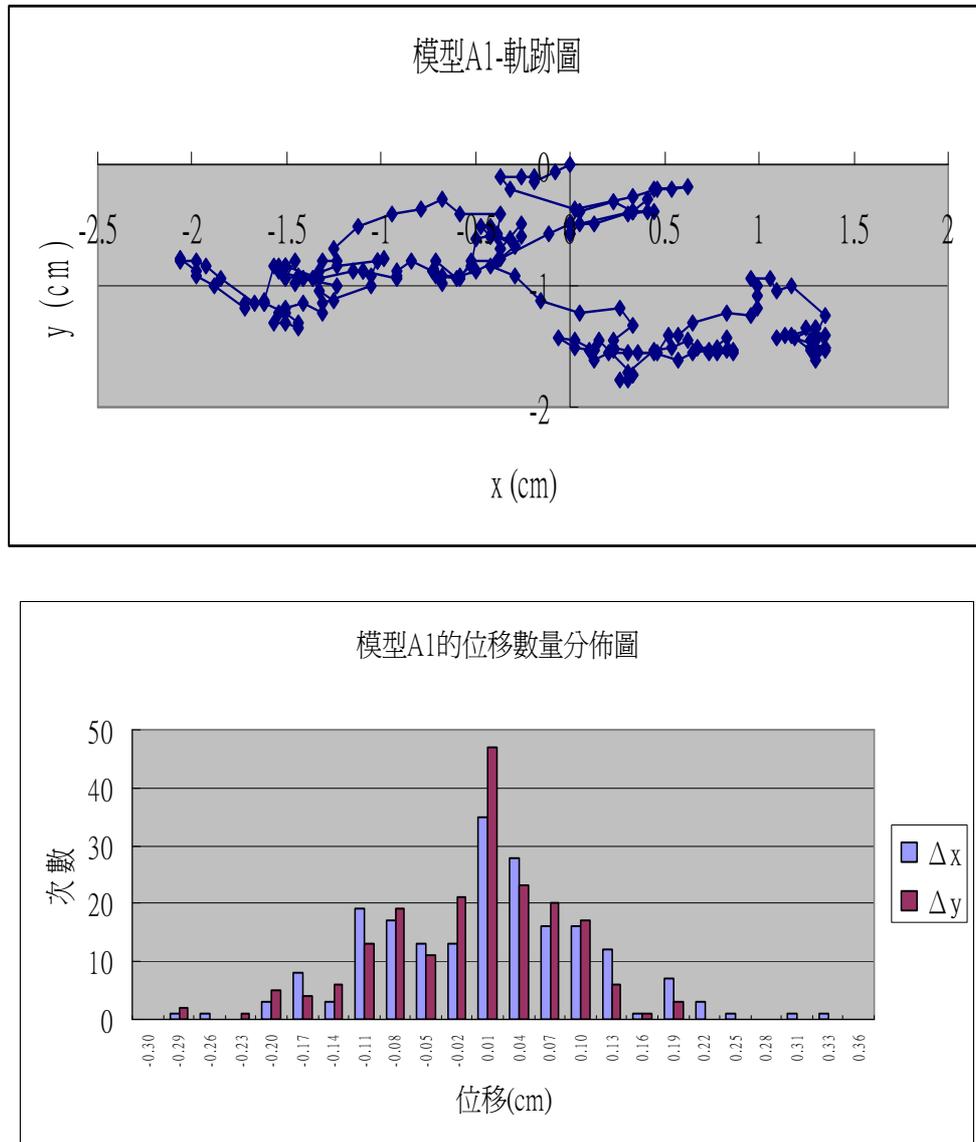
圖(十) 10顆隨機選取的模擬微粒在每隔10次取樣時間間隔(10/24秒)內的位移平方平均值,若間隔時間更大,則其成正比的趨勢應會更加顯著。

四. 由以上對模擬微粒的運動特性分析,我們發現將數量夠多的塑膠小珠(模擬分子)放置於喇叭上藉由喇叭的振動使塑膠小珠保持不停的振動與互相碰撞,確實可以模擬出一般液體中大量分子持續的熱運動對液體中微小粒子的影響,並使置於其中的模擬微粒或模型出現類似於布朗運動的特性。

實驗（二）：分析微型機器人模型在分子群體中的運動行為

一. 微型機器人模型A1的軌跡圖與 Δx 、 Δy 數量分佈圖，如圖（十一）：

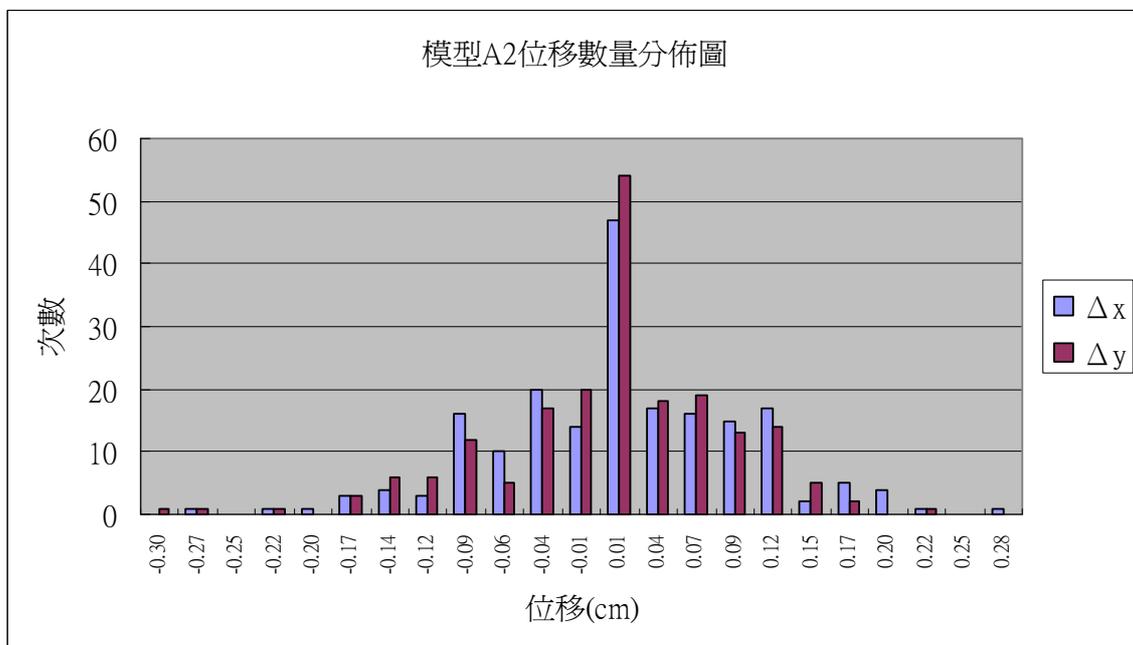
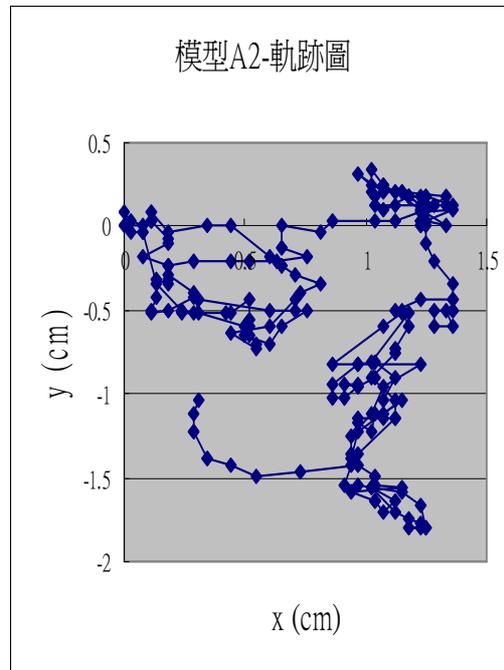
由圖中可見模型A1在模擬分子群體的不規則碰撞下，呈現類似於布朗運動的鋸齒狀軌跡，而且位移分量 Δx 、 Δy 的數量分佈圖也近似於高斯對稱分佈。



圖（十一）微型機器人模型A1的運動呈現了不規則鋸齒狀的軌跡，x方向及y方向的位移也近似高斯對稱分佈，顯示模型本身的對稱特性使其運動行為與一般懸浮微粒在液體中被熱運動分子碰撞的結果很相似。

二. 微型機器人模型A2的軌跡圖與 Δx 、 Δy 數量分佈圖，如圖（十二）：

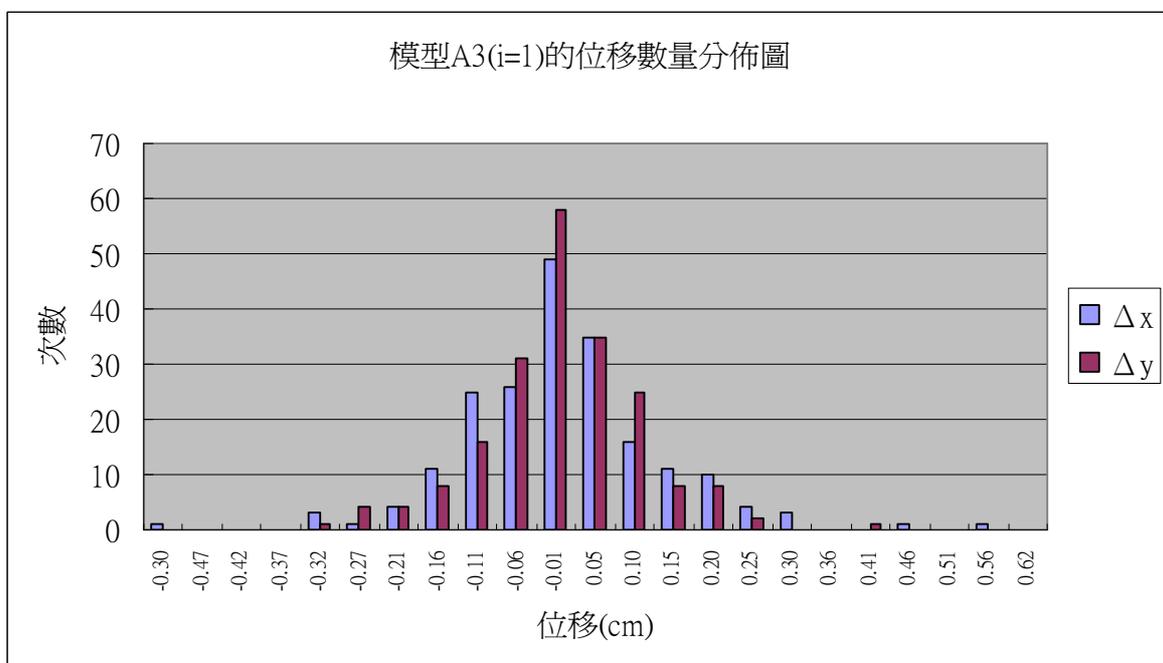
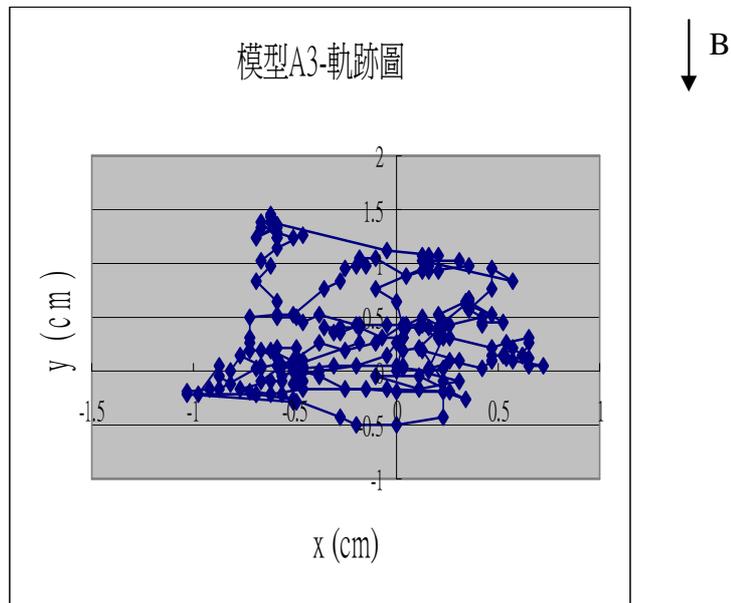
雖然塑膠小珠對模型A2貼有海綿處碰撞時會有較大的平均衝力作用，但是因為模型A2移動時也會伴有隨機的轉動現象，導致平均衝力較大的方向也隨時變化中，因此模型A2的軌跡圖與 Δx 、 Δy 數量分佈圖均與模型A1類似，仍為近似於布朗運動的狀態。



圖（十二）微型機器人模型A2因為不具有定向的功能，隨意的轉動導致其運動仍然呈現了與模型A1的類似軌跡，而x方向及y方向的位移也近似高斯對稱分佈。

三. 微型機器人模型A3的軌跡圖與 Δx 、 Δy 數量分佈圖，如圖（十三）：

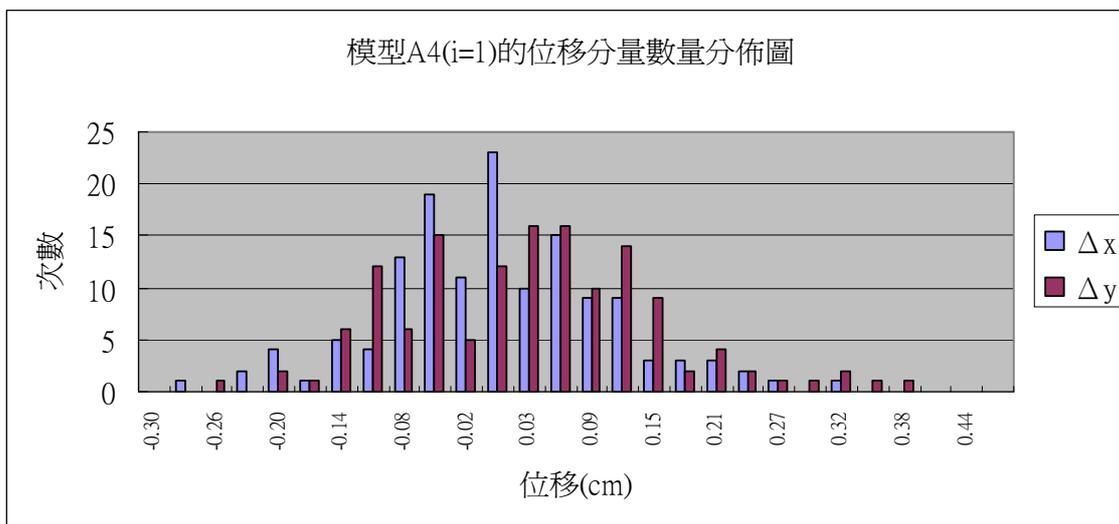
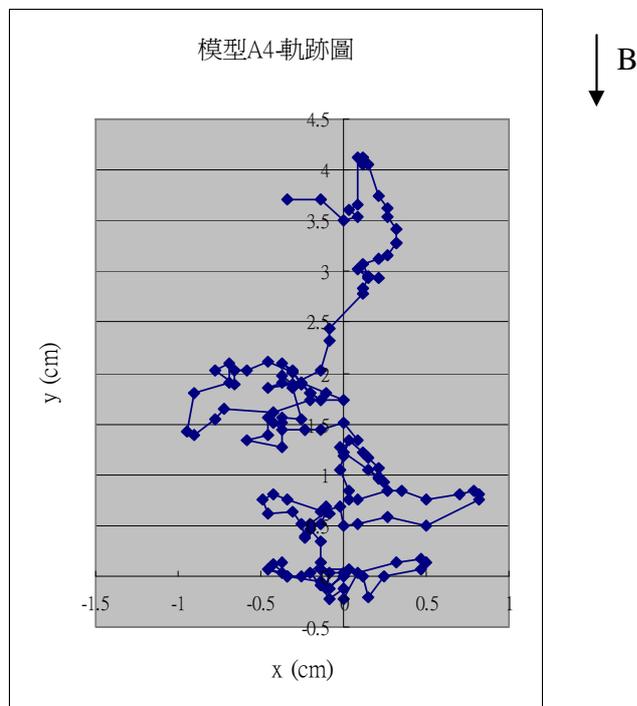
雖然模型A3上的定向磁鐵會使其在赫姆霍茲線圈提供的-y方向均勻磁場中幾乎保持不轉動的狀況（磁鐵N極指向-y方向），但因為模型四周的碰撞條件、模擬分子平均衝力均相同，故其軌跡圖與 Δx 、 Δy 數量分佈圖均與模型A1類似，仍為近似布朗運動的狀態。



圖（十三）微型機器人模型A3雖然在磁場中具有定向的功能，但因模型本身四周的碰撞條件均相同，故其軌跡和x方向及y方向的位移分佈圖仍與一般布朗運動類似。

四. 微型機器人模型A4的軌跡圖與 Δx 、 Δy 數量分佈圖，如圖（十四）：

模型A4上的定向磁鐵會使其在-y方向均勻磁場B中磁鐵N極保持指向-y方向，再加上在-y半圓上的海綿導致模擬分子對模型在+y方向上有較大的平均衝力作用，兩者綜合結果使模型A4在外加磁場中會向+y方向(外加磁場的反方向上)出現較大的平均位移現象，這點可由其軌跡圖及 Δy 數量分佈圖的不對稱性明顯看出。

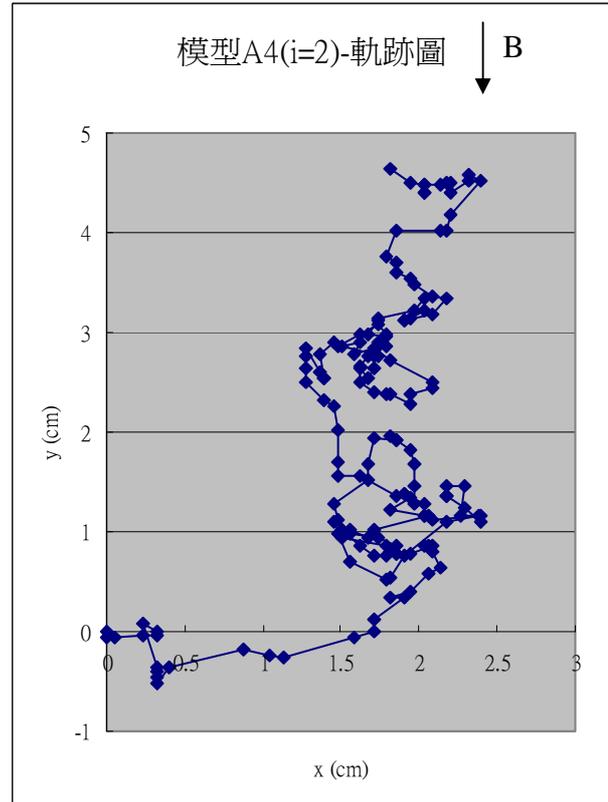
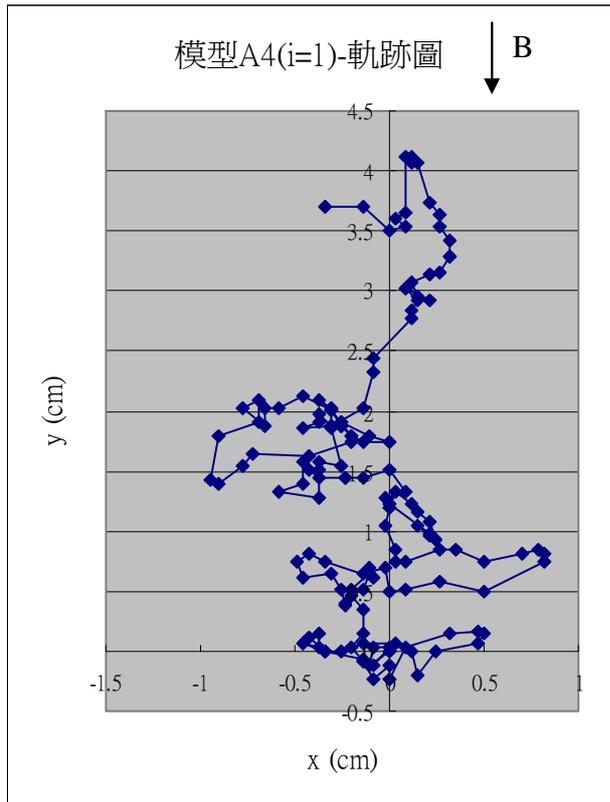


圖（十四）微型機器人模型A4在磁場中的定向功能及周圍碰撞條件的非對稱性使其能在特定的方向上出現明顯的位移效果。注意其軌跡有明顯向+y方向移動，而且在y方向上的位移分量 Δy 也在+y方向上出現較多分佈，而不像 Δx 仍呈現左右對稱分佈。

實驗（三）：比較微型機器人模型A4在不同磁場中的運動行為

一. 微型機器人模型A4在不同磁場中的運動軌跡圖與 Δy 數量分佈圖：

在赫姆霍茲線圈中分別通以1安培、2安培、4安培、-1安培、-2安培、-4安培的電流（正向電流時，外加磁場B朝-y方向，負向電流時，外加磁場B朝+y方向），作出模型A4的運動軌跡圖如圖（十五）與 Δx 、 Δy 數量分佈圖如圖（十六），由圖中可見其運動行為與預期現象相當一致，模型A4配合外加磁場的定向作用之下都會有明顯向外加磁場B的反方向出現較大的位移現象。



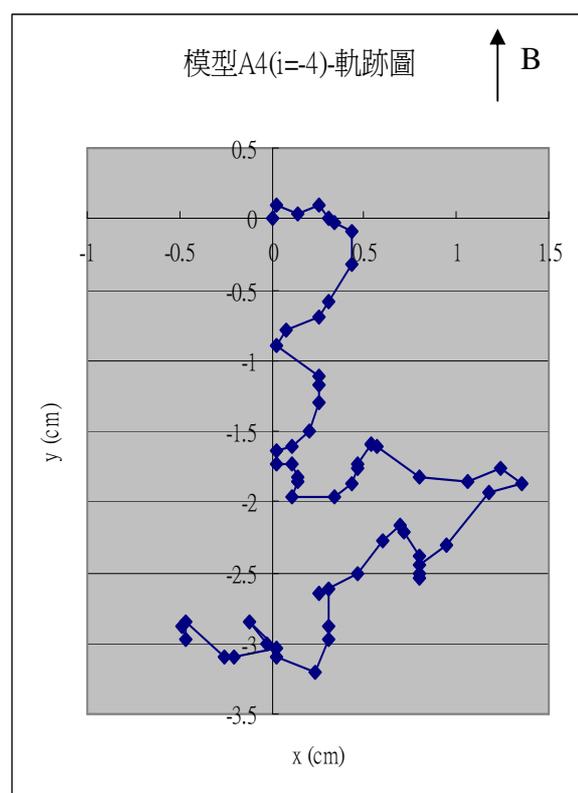
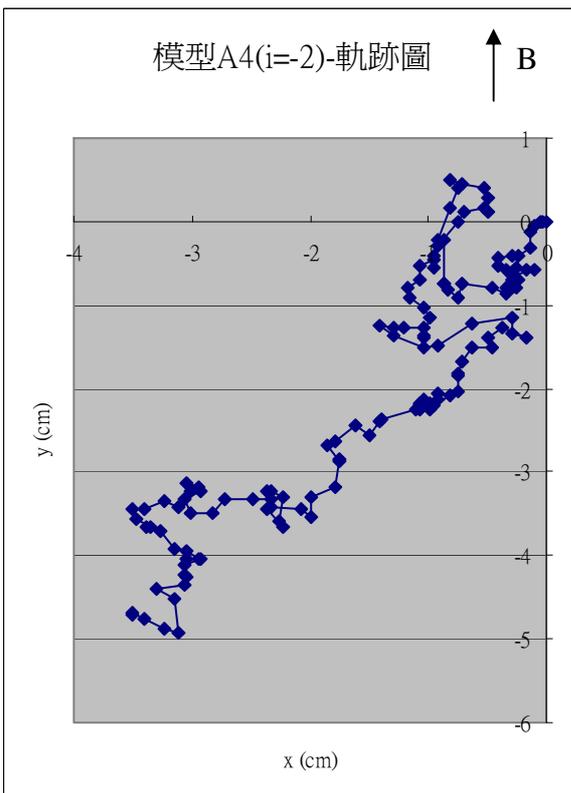
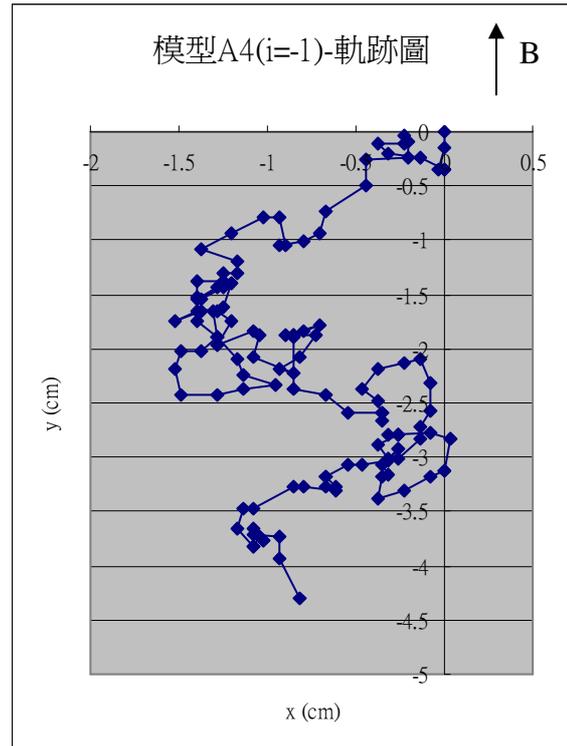
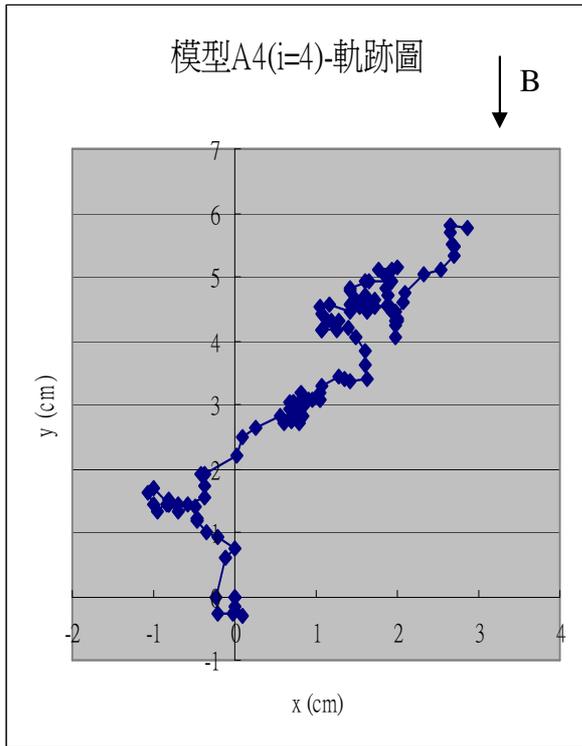
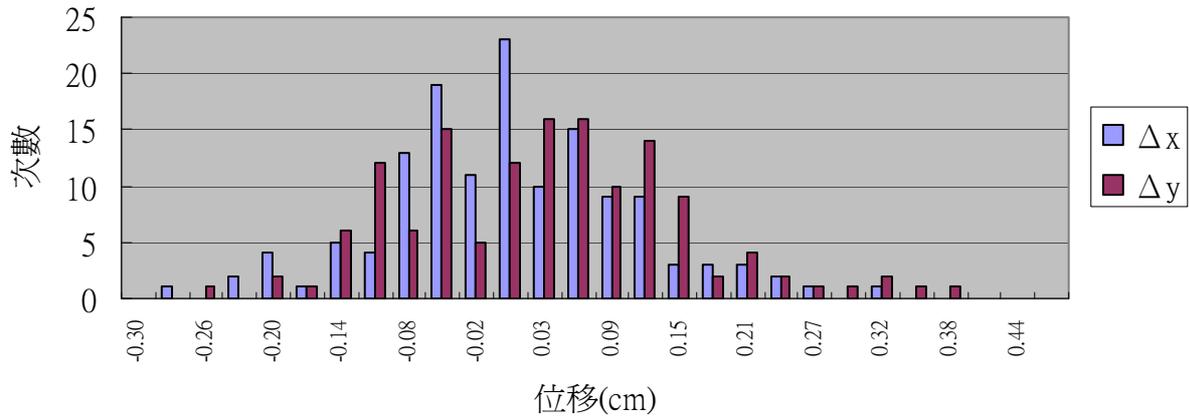
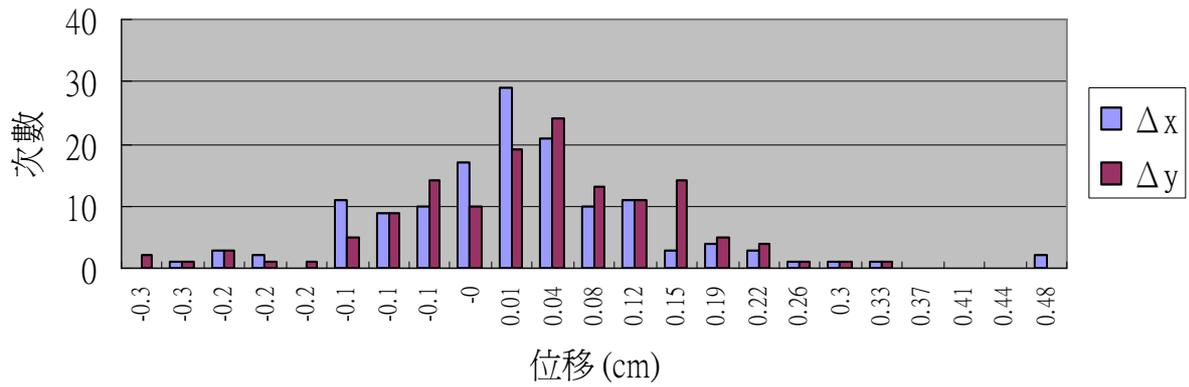


圖 (十五) 當外加磁場向 $-y$ 方向時微型機器人模型A4的其軌跡明顯向 $+y$ 方向移動，當外加磁場向 $+y$ 方向時其軌跡則明顯向 $-y$ 方向移動。

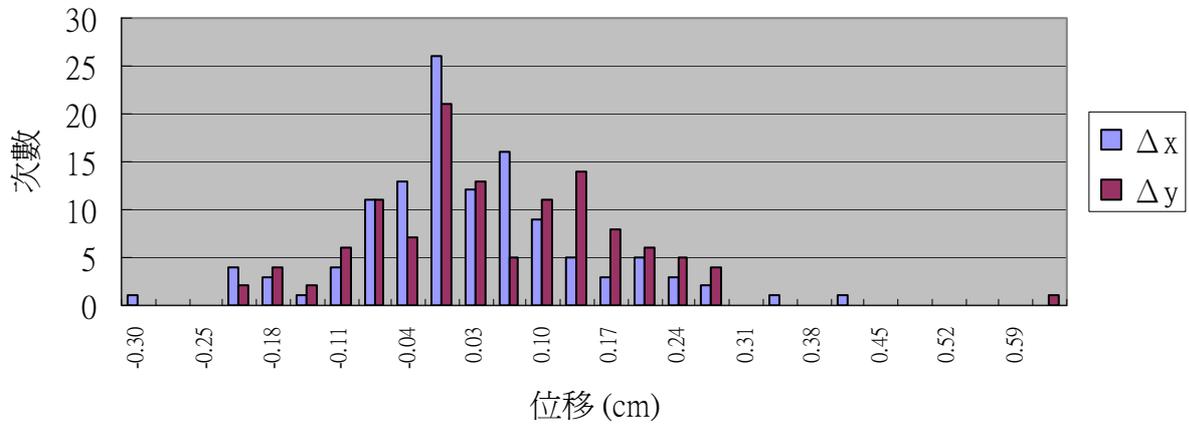
模型A4(i=1)的位移分量數量分佈圖



模型A4(i=2)的位移數量分佈圖



模型A4(i=4)的位移數量分佈圖



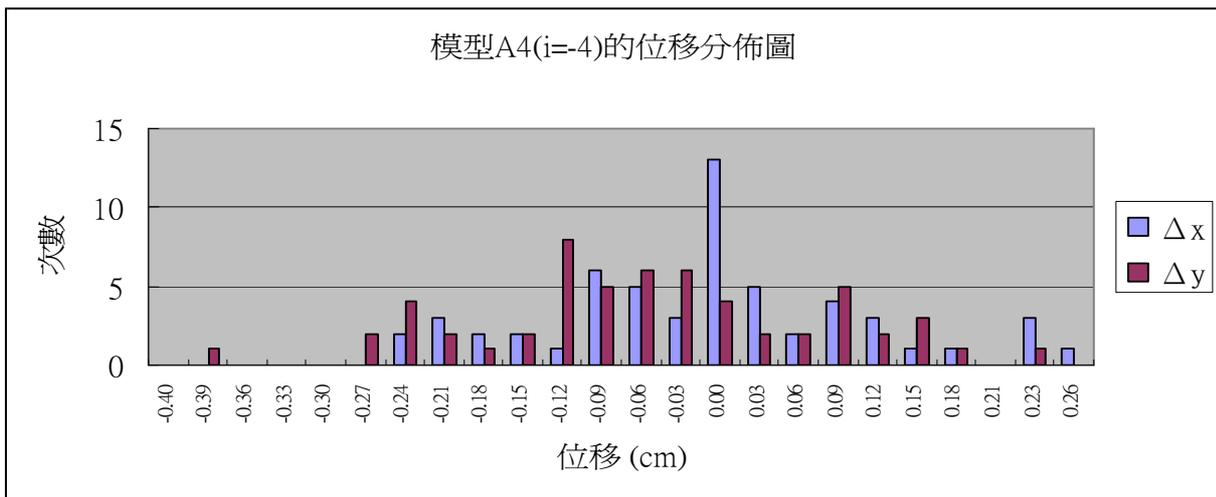
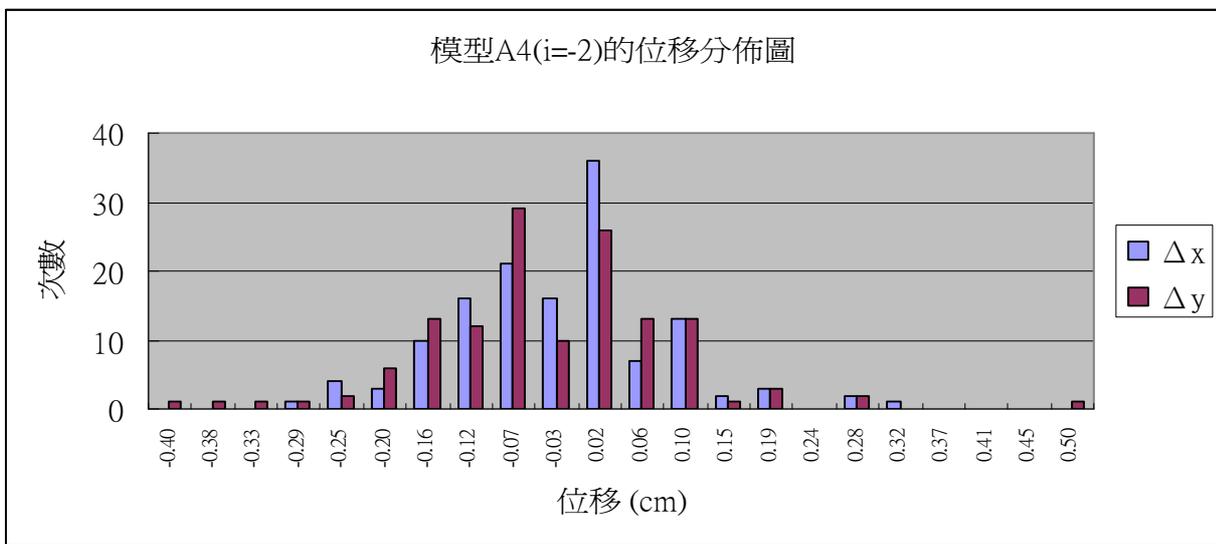
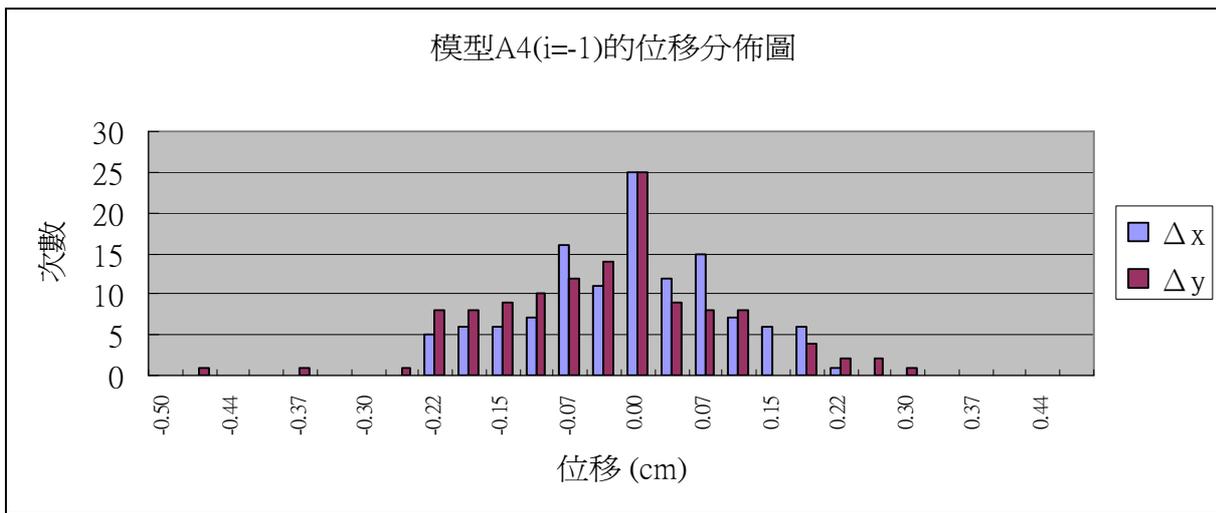
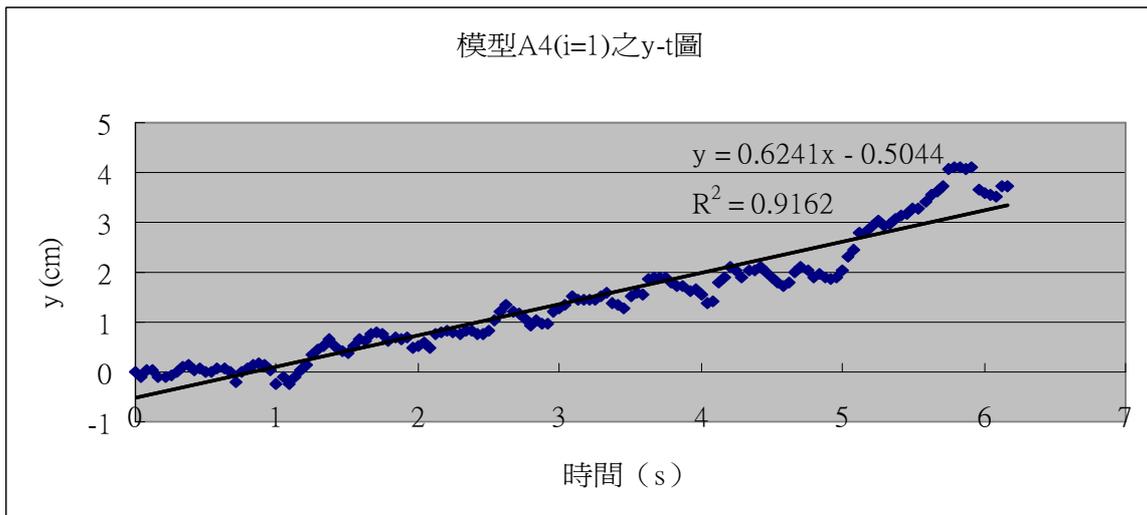
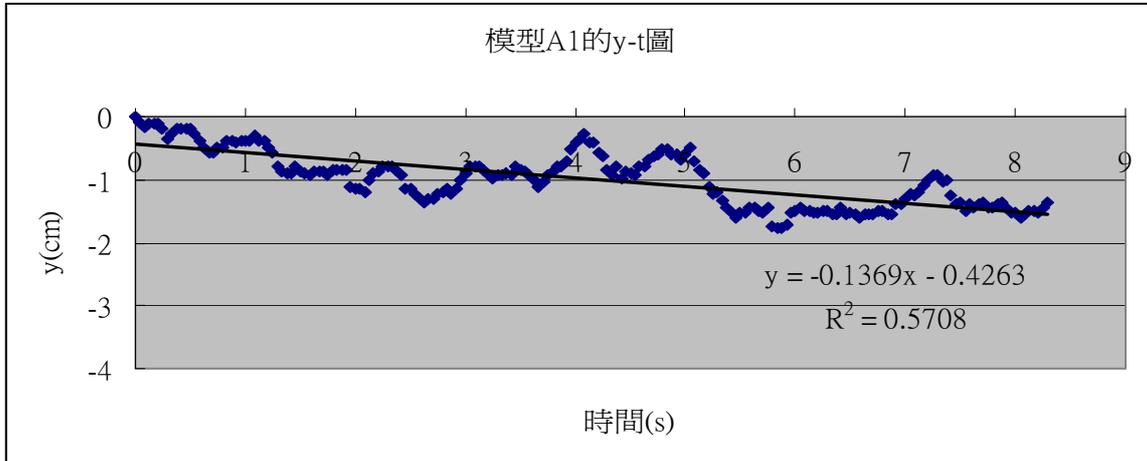


圖 (十六) 相對於 Δx 的對稱分佈型態，模型A4在外加磁場的定向作用下，y方向的位移數量分佈較不對稱， Δy 總是在外加磁場的反方向上有著較多的數量分佈。

二. 模擬微粒與各種微型機器人模型在y方向上的平均移動速度比較：

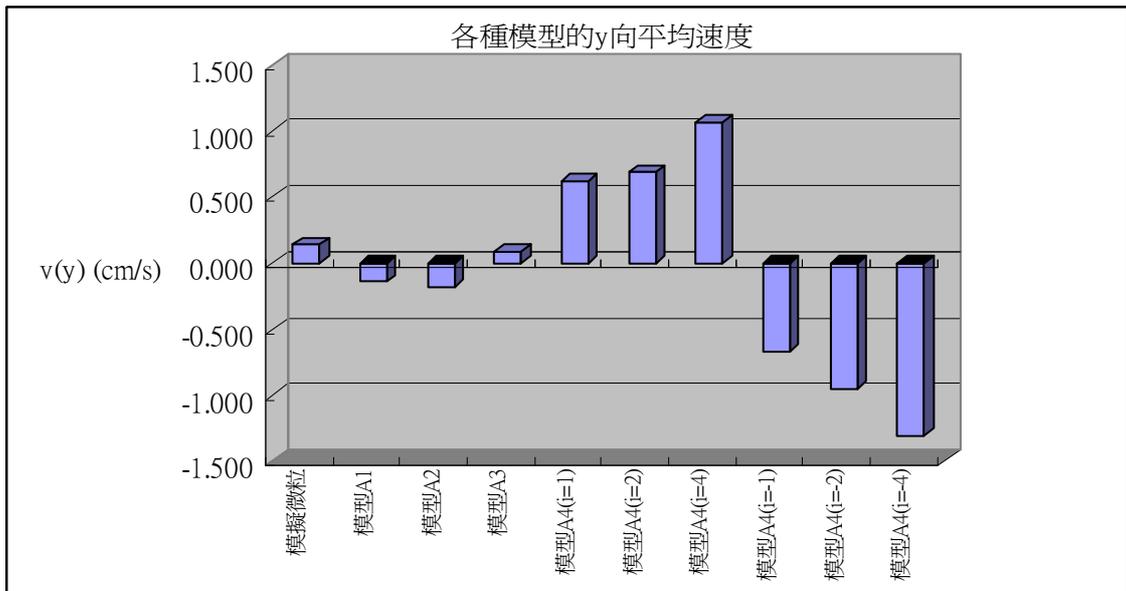
將上述各種模型與模擬微粒以線性迴歸的方法找出其y-t圖中的斜率，當作是其y方向上的平均移動速度，圖例如圖（十七），整理後得如表（二）、作圖比較如圖（十八）。由圖（十八）中可見模型A4的確可以造成顯著的平行於磁場的移動效應，由表（二）可計算出模型A4在平行於磁場方向的平均移動速率約為其它各樣本的6.5倍。



圖（十七）模型A1和模型A4在外加磁場定向作用下的y-t圖及其線性迴歸直線。

樣本	模擬分子	模型 A1	模型 A2	模型 A3	模型 A4	模型 A4	模型 A4	模型 A4	模型 A4	模型 A4
赫姆霍茲線圈電流	0	0	0	1安培	1安培	2安培	4安培	-1安培	-2安培	-4安培
v_y (cm/s)	0.140	-0.137	-0.176	0.089	0.624	0.690	1.067	-0.668	-0.948	-1.303

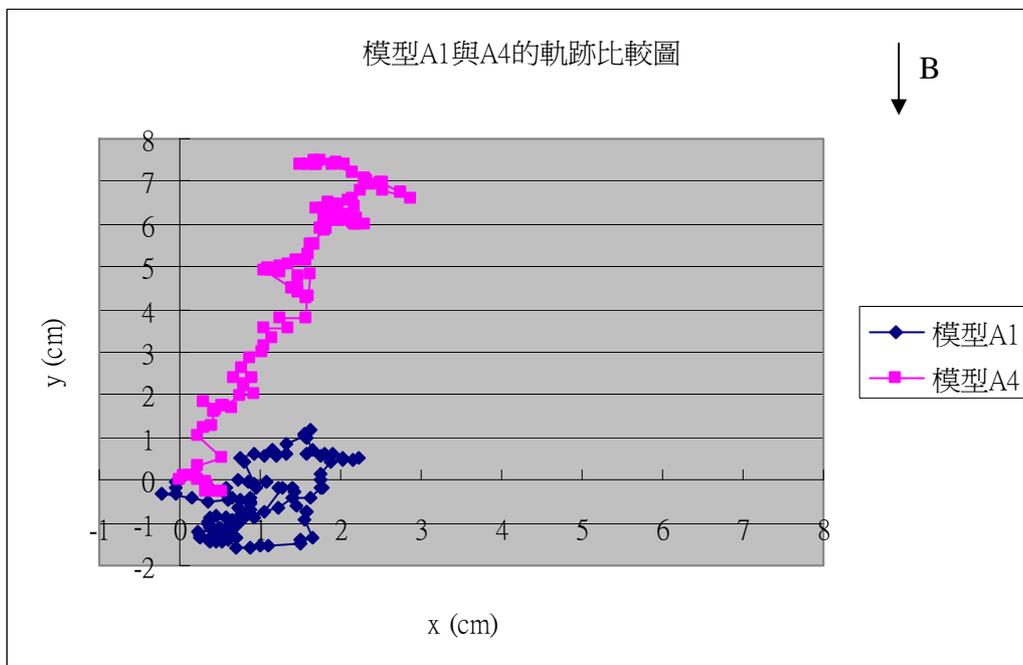
表（二）各種樣本在y方向上的平均移動速度；模型A4在平行於磁場方向的移動速率平均而言約為其它各樣本的6.5倍。



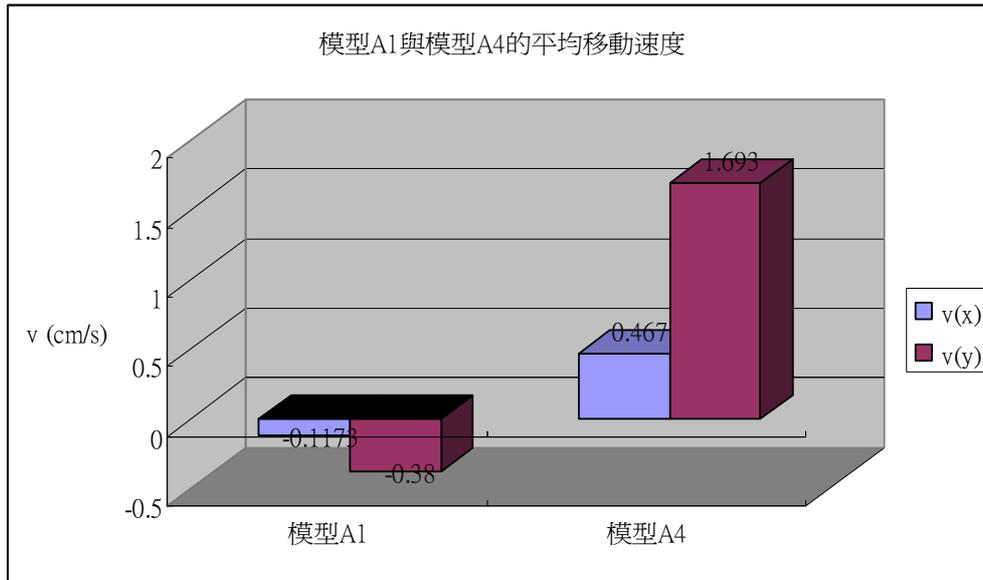
圖(十八)由圖中可見模型A4在外加磁場定向作用下，的確可以在y方向上造成顯著移動效應，而且其移動方向也可以由磁場方向來進行控制。

二. 微型機器人模型A1與A4在同一模擬分子群體中的軌跡圖與平均速度比較圖：

我們將模型A1與A4同時置入塑膠盆中，赫姆霍茲線圈中通以4安培電流，可以觀察到在同樣的模擬分子群體隨機碰撞作用下，模型A4在平行於外加磁場的方向上的確會有較為明顯淨位移效應，其兩者軌跡如圖(十九)，以線性迴歸算出的平均速度如圖(二十)。



圖(十九)在外加磁場的定向作用下，模型A4相較於模型A1有著明顯的向+y方向的位移特性。



圖（二十）在外加磁場的定向作用下，模型A4向+y方向的平均移動速度明顯較大。

陸、討論

- 一. 本實驗是以喇叭的振動來造成模擬分子的類似熱運動現象，但實際操作時我們發現很多振盪頻率會使塑膠盆中出現特定的駐波振盪模式，導致模擬微粒及模型會移向振盪平面上的波節所在處，對於模擬微粒及模型的隨機運動造成干擾，如圖（廿一），故操作時應小心避免這種情況的出現。

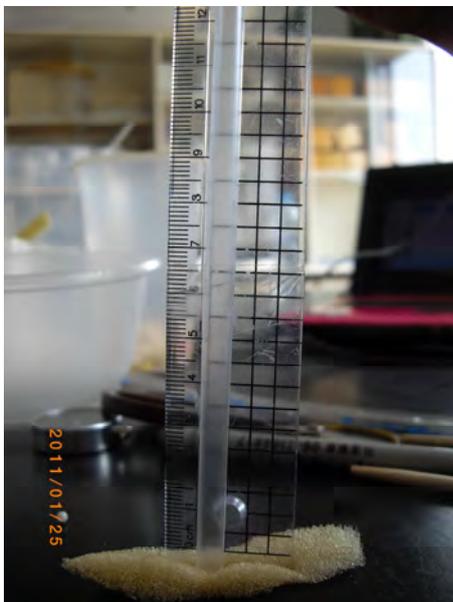


圖（廿一）在某些振動頻率時，塑膠盆會形成特定的駐波模式，導致盆類的各種模型都會向駐波波節處集中，這種情況會影響我們對模型運動特性分析的正確性。

- 二. 當模擬微粒或微型機器人模型移動至塑膠盆的邊緣時，其運動就會受到阻礙，此後的數據就只能捨棄不用了，因此我們對每個模擬微粒或微型機器人模型的追縱數據點數並不相

同，少者約80個資料點，多者約有200個資料點。

- 三. 實驗一開始我們曾經想要用一般市售的磁鐵兩塊使N、S極相對來造成空間中局部的均勻磁場，不過我們發現那樣的磁場均勻性都不夠，以至於A3和A4模型一但開始向某一塊磁鐵的磁極移動後就會因為磁力的增強而加速移動，此時造成模型移動的動力就是磁力而非模擬分子的碰撞衝力了，還好後來在老師的建議下我們使用了赫姆霍茲線圈，這個問題才能解決。
- 四. 實驗室空間中除了赫姆霍茲線圈產生的磁場外，地磁及喇叭下方的場磁鐵及線圈磁場也會對黏貼有磁鐵的模型之運動造成一些影響，不過只要赫姆霍茲線圈提供的磁場夠強，這些因素造成的干擾也就不大，我們可由磁針指向及模型的運動結果看出這樣的結論。
- 五. 實驗剛開始進行時，我們本以為在微型機器人模型周圍貼上海綿會使得模擬分子對貼海綿處有較小的碰撞恢復係數，因而也會有較小的平均衝力。但是開始進行觀察後才發現，模型的前進方向恰好和我們原先預期的相反，其顯現出來的反而是貼了海綿的半圓處會有較大平均衝力！後來我們用透明吸管與直尺製作了簡易的測量工具如圖（廿二），才發現其實模擬分子對模型的木質部份和對海綿處的碰撞恢復係數差異並不大（0.57：0.55），而造成貼海綿處會受到較大的平均衝力應該是因為海綿表面的粗糙多孔特性，使得模擬分子與其碰撞時在切面上會有較大的摩擦力造成的結果，如圖（廿三）。



圖（廿二）把透明吸管黏在直尺上，讓塑膠小珠由距底部20cm處自由下落，由其反跳高度就可以很簡單的算出碰撞時的恢復係數了，實驗中塑膠小珠碰到木質模型的平均反跳高度為6.4cm，塑膠小珠碰到海綿的平均反跳高度為為6.0cm，換算成恢復係數的定義則分別為0.57和0.55，其差異並沒有原先想像中那麼大。

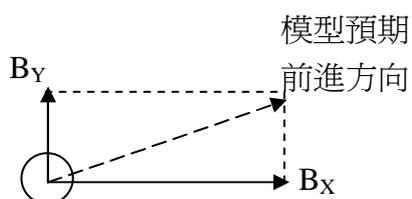


圖(廿三)海綿表面的粗糙特性可能增加了塑膠小珠與模型碰撞時切線方向的作用力，從而使貼有海綿的這半圓周上會有較大的平均衝力，我們在實驗過程中總是看到模型A4會向沒有黏貼海綿的那個方向移動過去。

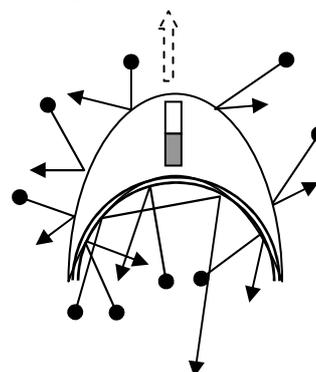
- 六. 進行此實驗之初，我們很擔心利用分子的隨機熱運動來造成微型機器人模型的有序移動這樣的想法是否根本上就已經是違反了熱力學定律，但是經過和老師的討論後，我們才發現利用赫姆霍茲線圈來提供使模型定向的外加磁場的同時事實上也已經引進了外來能量，所以這樣的實驗構想應該是可行的。
- 七. 計算微型機器人模型A4在沿著磁場方向的平均移動速度時，我們原本是取各次觀測時間間隔內的y方向位移 (Δy) 做算術平均，不過後來發現這樣的計算結果會只和模型最後出現的位置有關，經過和老師討論後我們才知道這種資料應該用線性迴歸的方法去算出y-t圖中的斜率比較合理，幸好我們在Excel中找到了SLOPE這個函數，恰好可以進行這種計算。

柒、結論與展望

- 一. 使用不停振動的塑膠小珠去作液體中分子熱運動行為的巨觀模擬是可行的，在本實驗中控制喇叭振動頻率19.0Hz、擴大器輸出音量-32dB的情況下，不停振動又彼此碰撞的塑膠小珠（模擬分子）對置於其上的保麗龍球（模擬微粒）之隨機碰撞，會導致保麗龍球出現類似於布朗運動的行為，不論就其軌跡、位移數量分佈圖或位移平方平均值與觀察時間長度的關係圖來看，保麗龍球的運動都和布朗運動的數學模式非常近似，請參見圖（八）、（九）、（十）。
- 二. 在微型機器人模型中加入定向用的磁鐵，同時配合空間中的均勻磁場，就可以使微型機器人模型在磁力矩的作用下不致於因模擬分子的隨機碰撞而任意轉動方向。此時若再設計微型機器人模型四周與模擬分子的碰撞力學條件不相同，就可以利用模擬分子的碰撞來造成朝向特定方向的平均衝力及較大的平均位移效果，在我們實驗的巨觀模型中，顯示了適當的使用上述機制的微型機器人模型A4在平行於磁場的方向上的平均移動速率是其它樣本的6.5倍，請參見表（二）、圖（十八）、（十九），這證實了我們初始的構想確實是可行的，也就是環境中分子的碰撞作用真的有可能成為將來微型機器人的動力來源。
- 三. 我們在實驗中觀察到微型機器人模型A4在外加磁場強度增強時，其在平行於磁場方向上的平均速率也有增加的趨勢，但是因為赫姆霍茲線圈能容許的最大電流有限，我們沒能進行更多的實驗去找出外加磁場強度和模型平均移動速率間的定量關係。
- 四. 本實驗中只使用了一個赫姆霍茲線圈來造成磁場，如果可以的話我們也想嘗試用兩個赫姆霍茲線圈來造成兩個正交的磁場（ B_x ， B_y ），然後調整兩個磁場強度的比例來造成任意方向的合成磁場，如此一來，微型機器人應該就可以隨著合成磁場的方向移動，達到導引微型機器人的目的了。將來要控制微型機器人在人體或各種環境中移動時，這應該會是個不錯的方法，如圖（廿四）。
- 五. 本實驗中的微型機器人模型A4是最簡單的圓形對稱，我們認為將來如果配合適當的形狀設計和碰撞材質的改變，也許就可以更有效率的將分子碰撞的平均衝力轉換成微型機器人前進的動力來源。例如將微型機器人製成如圖（廿五）所示，則分子對其凹面部份可能就會因為適當角度下的反彈而產生更多次數的碰撞來造成更大的總衝力。



圖（廿四）利用合成磁場的方向來引導模型的前進。



圖（廿五）在外加磁場下，這樣的模型可能具有更佳的前進動力。

- 六. 地球上的微生物千奇百怪，我們不禁會想難道沒有一些微生物已經發展出配合地球磁場與分子碰撞的效應來當成移動的動力來源嗎？請教過學校生物老師好像也沒聽過有這麼一回事，這真是叫人百思不解。將來如果有機會的話應該可以來試著找找看。
- 七. 我們的實驗畢竟是一個巨觀的模擬模型，雖說讓我們看出了一些結論，但是如果以後能夠真的用一些很好的奈米技術來製作出真正的微型機器人，並在其中放置小小的磁鐵，然後用顯微鏡來觀察它在液體中的運動或者配合外加磁場來控制它的運動一定會更有趣才對。

捌、參考資料

- 一. 2009年科學人6月號. (遠流出版社)
- 二. 漫談布朗運動 (數學傳播, 第9卷第3期, 李育嘉, 民國74年)
- 三. 在液體裡跳布朗舞步的膠體粒子 (物理雙月刊, 廿七卷三期, 林耿慧, 2005年6月)
- 四. 漫談布朗運動 (物理雙月刊, 廿八卷一期, 龐寧寧, 2006年2月)
- 五. Brownian Motion (Peter Möters and Yuval Peres)
- 六. 高中物理及大學普通物理教科書

玖、誌謝

本實驗能夠順利完成要特別感謝■大■■■■教授的意見、本校老師的指導；此外設備組■■組長、物理實驗室■■■■小姐總是細心周到又不厭其煩的提供我們各種實驗器材更是銘感於心。

【評語】 040116

此作品利用持續振動的大量塑膠小球模擬液體分子熱運動，再利用外加磁場導引帶磁矩的微型機器模型，朝向指定方向運動。作品創意佳，實驗結果與理論預期相符合，實驗雖然簡單，但卻能夠探討複雜系統的主要運動機制。