

磁性微游泳器操控技術之研究

李彥宏、陳慶耀

國立交通大學機械工程學系

摘要

本研究主要以實驗方式探討之磁性微游泳器在擺動磁場下的運動及操控機制，此微游泳器係由尺寸分別為直徑 4.5 微米及 2.8 微米之超順磁性粒子組成，實驗時先施以單一方向之外加磁場將磁性粒子串接，再施加擺動磁場進行粒子串(游泳器)之操控。由於此粒子串係由不同粒徑之磁粒子串接而成，在隨磁場擺動時，會產生不對稱的運動而產生淨推力而隨著粒子串的質心方向前進。我們知道磁性粒子在隨外加磁場運動時，會因流體阻力而與磁場合力方向形成一延遲角度，即所謂相位角差($\Delta\theta_L$)，由本研究之實驗結果發現，當加大外加磁場之強度，而使瞬間相位角差超過 90 度時，會出現一有趣之反轉現象，此時，粒子串之擺動軌跡不再依原軸線擺動，而將轉換成沿著垂直原軸線的方向擺動，本研究將介紹此轉向機制之原理，並說明如何利用此轉向機制，成功操控微游泳器轉向，而不需調整任何磁場裝置之擺設位置。

關鍵詞—磁性粒子，微游泳器，擺動磁場，轉向機制

1. 前言

磁流變液(MR)是一種人工且智慧型的流體，主要由高磁導率、低磁滯性的微米尺寸之磁性粒子和非磁性液體混合而成的懸浮液體。近年來，有關磁性粒子在旋轉磁場[1-5]及擺動磁場[6-9]下之串接及運動模式之研究已有較深入成果。由先前文獻之研究報告可知，微磁性粒子串在隨外加磁場運動時，粒子串會因不同的磁場條件而形成剛體、扭曲及斷裂等運動模式。有關微游泳器之研究，已有學者利用 DNA 串接磁性粒子，並施加擺動磁場，使粒子串達到仿生游動之成果[6]，而本研究先前之成果亦利用了兩種尺寸不同之磁粒子製作出微游泳器，並藉由擺動磁場之操控，使其產生推力，成功地向前游動[7]，上述微游泳器對於微機電及生物機電系統均具備了潛在的應用價值，然而此等游泳器僅能朝著磁場擺動之軸線方向前進，無法改變方向，使得游泳器的操控上有所限制，而若能簡單的改變游泳器的游動方向，則能使微游泳器具有較高效率的操控機制及更廣泛的應用範圍。以往改變游泳器游動方向之方法，不外乎藉由調整線圈位置而改變串接及擺動磁場方向，而本研究則是發展出微游泳器較創新的操控方法，由本研究實驗成果發現微磁性粒子串在擺動磁場下會出現之一有趣現象-「軌跡轉換」[9,10]，當粒子串與外加磁場間之相位角差超過 90 度時，此現象即會發生，此時，粒子串之擺動軌跡不再依原軸線擺動，而將轉換成沿著垂直原軸線的方向擺動，此現象即為「軌跡轉換」。本研究將有系統地呈現粒子串在不同實驗條件下的軌跡轉換情形，並說明如何將軌跡轉換的原理應用於微游泳器轉向機制。

2. 實驗裝置

本研究實驗架構示意圖如圖 1。實驗中使用的超順磁性粒子成份為聚苯乙烯珠而外層包覆了氧化鐵，並懸浮於蒸餾水中，共使用兩種不同尺寸之粒子，半徑分別為 $a=2.25\mu\text{m}$ 及 $1.4\mu\text{m}$ ，磁化率分別為 $\chi=1.6$ 及 1.0 ，且無磁滯效應，其飽和磁化強度約為 350~400 Oe。在磁場架構方面，首先將一組線圈接上直流電源產生單一方向磁場 H_d ，此單一方向之均勻磁場將使磁性粒子磁化

產生磁性後，互相吸引而形成粒子串，接著在垂直於前一組線圈之方向，擺設另一組線圈接上交流電源，以產生正弦波形之擺動磁場 H_v ，其頻率為 f ，最大磁場強度為 H_p ，故 $H_v = H_p \sin(2\pi ft)$ ，此外加之擺動磁場與單一方向之串接磁場所形成之合磁場 $H = H_d i + H_v j$ ，其中 i 及 j 分別表水平及垂直方向之單位向量。此種磁場架構下，磁性粒子串將隨著外加磁場方向擺動，而其擺動軌跡之角度 $\theta(t) = \tan^{-1}[(H_p/H_d)\sin(2\pi ft)]$ ，最大擺動角度(振幅) $\theta_{Amax} = \tan^{-1}(H_p/H_d)$ 。實驗中粒子串所有運動係透過光學顯微鏡觀測，並連接到拍攝速度每秒 200 張之高速攝影機將其運動過程記錄成影片，以便進一步分析粒子串在各種實驗條件下之運動模式，所有微游泳器之實驗影片均上傳於網頁 (<http://www.youtube.com/user/athomeli#p/u>)，有興趣之讀者可自行點閱。

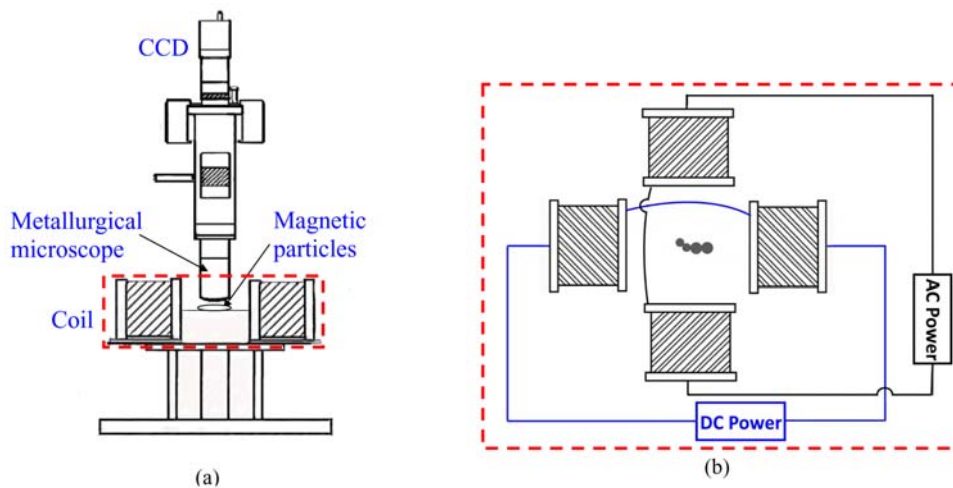


圖 1：(a) 實驗裝置示意圖；(b) 利用線圈產生擺動磁場之架構示意圖。圖(b)中微游泳器之比例係因繪圖所需將其誇大，並非實際尺寸

3. 結果與討論

3.1 游泳器之游動

透過前述實驗步驟，磁性粒子在施加串接及擺動磁場後，將形成粒子串並隨磁場擺動，因粒子串係由不同尺寸之粒子組成，隨磁場擺動時，其對稱性將遭到破壞，而使粒子串產生淨推力向前游動，形成一可逆之微磁性游泳器。圖 2 及 3 為分別由 3 小 1 大(S3L1)及 5 大 3 小(L5S3)之磁粒子串接而成之微游泳器，其擺動頻率均為 11Hz，擺動振幅分別為 $7.8 \mu\text{m}$ 及 $17.13 \mu\text{m}$ 。如圖所示，粒子串明顯朝著質心(大顆粒子)移動方向前進，兩粒子串移動之軌跡如圖 4 所示。為了解粒子串移動之效率，本文引用了判定一般自然界水中生物游動效率之無因次參數 Strouhal number (St)，其定義為 $St = f A / U$ ，其中 U 及 A 分別代表游泳器移動速度及擺動振幅， f 為頻率，經計算該兩型游泳器之游動效率，S3L1 及 L5S3 最佳平均 St 分別為 32.63 及 67.12(如表 1)，比起自然生物最佳游泳效率之 0.25-0.4 高出甚多，因此如何提升游泳器之游動效率，實為本研究未來努力的重點之一。

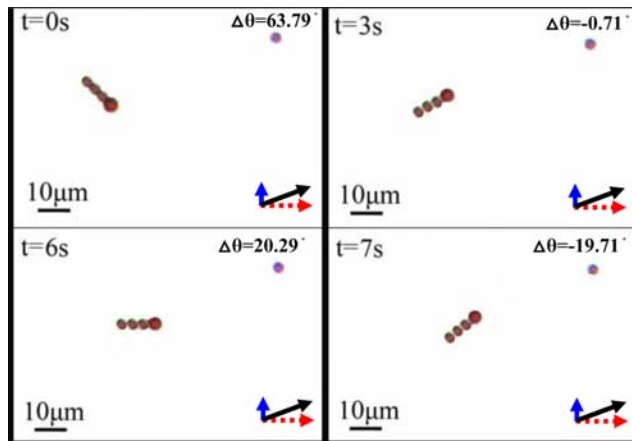


圖 2：S3L1 型游泳器游動之照片，擺動振幅 $A=7.86\mu\text{m}$ 頻率 $f=11\text{ Hz}$ 。

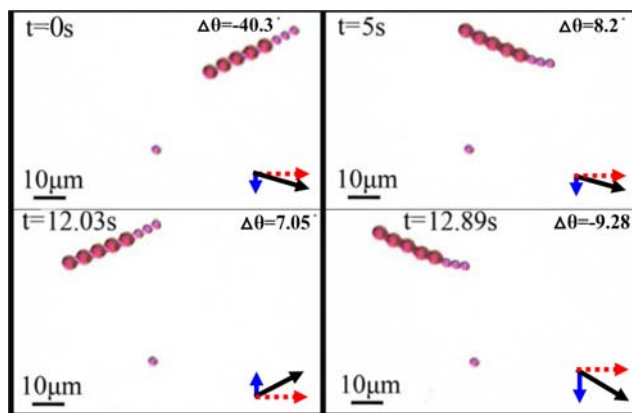


圖 3：L5S3 型游泳器游動之照片，擺動振幅 $A=17.13\mu\text{m}$ 頻率 $f=11\text{ Hz}$ 。

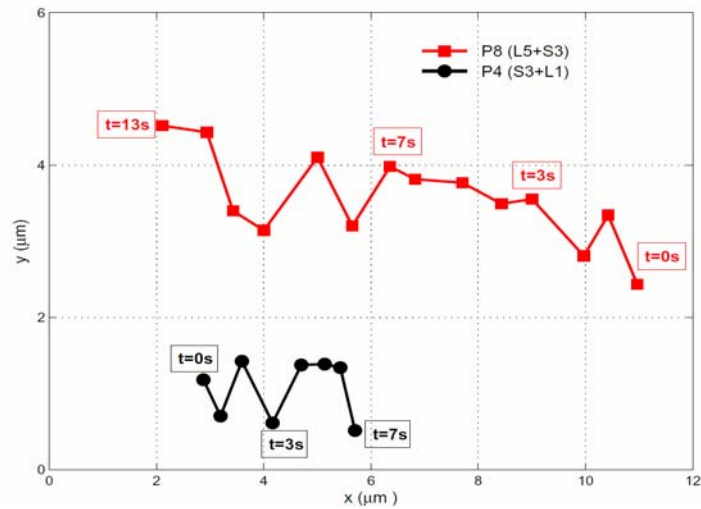





圖 4：圖 2(S3L1)及圖 3(L5S3)之游泳器移動軌跡比較。

表 1：圖 2(S3L1)及圖 3(L5S3)之游泳器游動效率比較表

λ	17.13 μm	5.72 μm	7.86 μm
U_{avg}	2.81 $\mu\text{m/s}$	0.93 $\mu\text{m/s}$	2.65 $\mu\text{m/s}$
St_{avg}	67.12	68.00	32.63
Swimmer			

3.2 游泳器之轉向

上一段的文章裡，介紹了游泳器的製作方式及驅使其前進之操作機制，為使游泳器能有更廣泛的應用範圍，除了改善游動效率外，提升操控之效能亦是相當重要的課題。事實上，本研究在尋求改善游動效率的同時，發現了在同一磁場裝置下，可輕易並有效率地操控游泳器轉向的方法，而提升了操控游泳器的便利性，因此，從本段開始，將針對游泳器的進階操控機制，做更深入介紹及說明。

圖 5 為 2 小 2 大(2S2L)磁性粒子串接而成之微游泳器前進及轉向之影像截圖，實驗過程中，串接磁場強度均固定為 $H_d=24.15\text{Oe}$ ，在起始階段 $0\text{s}<t<10\text{s}$ 時，游泳器之質心偏右，亦即右側為其前進方向，此時施加之擺動磁場強度為 $H_p=25.08\text{Oe}$ ，為觀察游泳器加速的情形，擺動頻率區分 $t<1\text{s}$ 、 $1\text{s}<t<5\text{s}$ 及 $t>5\text{s}$ 等三階段逐步增加，各階段頻率分別為 $f=1\text{Hz}$ 、 5Hz 及 10Hz ，在此實驗條件下，可由圖 5 看出游泳器向右前進及加速之過程。接著將擺動磁場強度瞬間增加到 $H_p=169.9\text{Oe}$ ，此時粒子串出現瞬間逆時針轉 90 度之情形，在 $10\text{s}<t<15\text{s}$ 時朝著上方游動，而當 $15.6\text{s}<t<35\text{s}$ 時，將擺動磁場強度瞬間降回 $H_p=25.08\text{Oe}$ ，游泳器朝逆時針方向再轉 90 度，而形成向左游動之情形。之後，重覆上述操控方法，增加擺動磁場強度，使游泳器在 $40\text{s}<t<45\text{s}$ 時，轉為向下游動，而當 $t>45\text{s}$ 時，再調降擺動磁場後，游泳器又回到向右游動。藉由上述簡易之操控機制，可輕易且不斷改變游泳器之游動方向。

游泳器之轉向機制可透過磁扭力之理論方程式來解釋，我們知道，磁性粒子串的運動行為係受所施加的磁力與其所承受的流體阻力所主宰，而流體阻力與磁力之比值，即為無因次參數 Mason number (Mn)之定義。當一由 N 顆粒子組成知粒子串於旋轉磁場下運動時，此粒子串將同時承受磁扭力 (M^m)及黏滯阻力 (M^v)，而透過前人之推導，此兩種力與 Mason number 之方程式可以下列方式表式之[2, 3]：

$$M^m = \frac{\mu_0 \mu_s}{4\pi} \frac{3|\bar{m}|^2 N^2}{2(2a)^3} \sin(2\Delta\theta_L) \quad (1)$$

$$M^v = \frac{4}{3} N \pi a^3 \frac{2N^2}{\ln(N/2)} \eta \omega \quad (2)$$

$$Mn = \frac{32\mu_0 \eta \omega}{\mu_s \chi^2 |\bar{H}|^2} \quad (3)$$

上述方程式中， μ_0 及 μ_s 分別代表真空磁導率及相對磁導率， m 為單顆粒子所受到的磁偶極矩， η 為溶液之黏滯度， ω 則為粒子串之角速度。由方程式(1)可知，當相位角差之絕對值 $|\Delta\theta_L|>90^\circ$ ，磁扭力(M^m)將改變其正負值，亦即所受磁力的方向將隨之改變，而驅使粒子串改變

運動方向，使游泳器不在隨原磁場軸線方向擺動及前進，而轉換成沿著垂直原軸線的方向擺動及前進，此即為前述「軌跡轉換」理論之應用。然而，當調降磁場強度，使相位角差絕對值 $|\Delta\theta_L| < 90^\circ$ 時，磁扭力(M^m)將再次改變其正負值，而使游泳器回到原來擺動軌跡，有關「軌跡轉換」詳細之說明可參閱文獻[9]。雖然上述方程式較適用於探討由同一尺寸粒子組成之粒子串之運動行為，而游泳器卻包含著不同尺寸之磁性粒子，但是兩者在同樣承受磁力及流體阻力下運動，其基本物理性應是一致的，因此本研究所創造之游泳器，其運動行為在定性上，仍可運用上述方程式來解釋。

圖6則為另一組游泳器轉向之影像截圖，此實驗結果較有趣的現象為，包含了2個游泳器同時轉向的情形。在 $0s < t < 20s$ 時，分別由1大2小(L1S2)及3小1大(S3L1)磁粒子組成之游泳器，在水平方向各自朝左及右方游動，而當調整擺動磁場強度後，兩游泳器則同時於 $t < 24.1$ 及 $t > 35s$ 逆時針轉了90度，而改變各自游動方向。其中1大2小(L1S2)游泳器由於尾巴較短，造成游動效率較差，反觀3小1大(S3L1)游泳器之效率則明顯較佳；然而，由圖6中 $t=15.03s$ 時，可發現S3L1游泳器之尾巴有發生扭曲、斷裂及重組之情形，進而形成了可能影響其游動效率的原因之一。

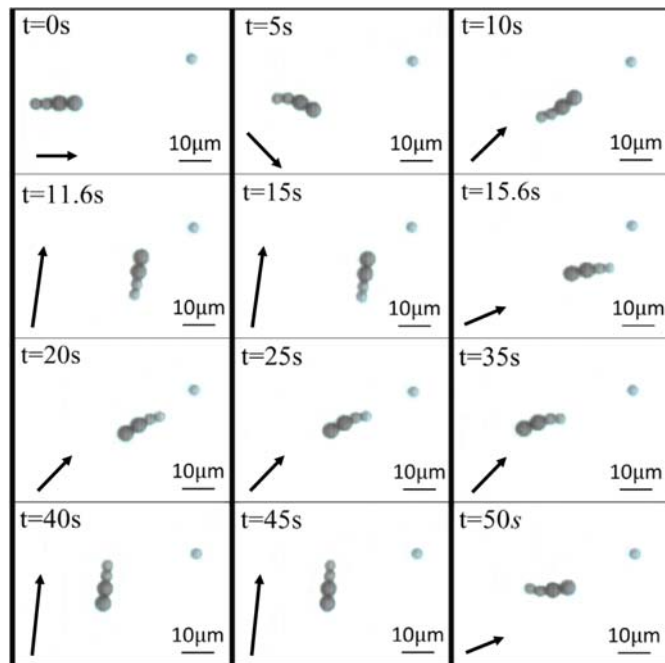


圖 5：由 2 小 2 大(2S2L)磁性粒子串接而成之微游泳器前進及轉向之影像截圖。黑色箭頭之方向及長度代表總磁力之方向及其強度。此實驗結果成功地藉由外加磁場之調控，操作游泳器使其改變游動方向。

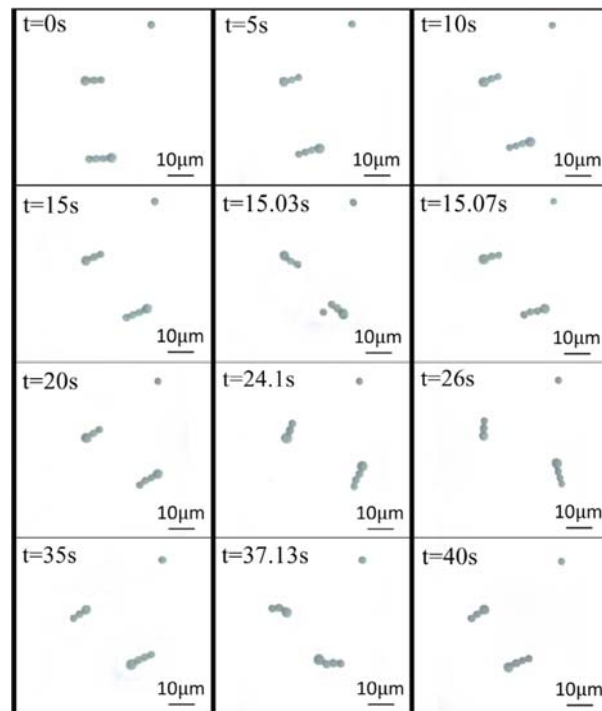


圖 6：L1S2 及 S3L1 游泳器同步游動及轉向之成功案例。t= 15.03s 時，由於結構的不穩定，使得 S3L1 游泳器尾部發生扭曲、瞬間斷裂及重組，使得該游泳器游動方向些微偏移。

3.3 游泳器軌跡分析

圖 5 中 S2L2 游泳器之質心位置移動軌跡示意圖如圖 7 菱形點線所示，由圖中可明顯看出，在水平方向移動效率較垂直方向佳，亦即游泳器分別在 $0 < t < 10s$ 向右及 $15.6s < t < 35s$ 向左游動時，相較於 $10s < t < 15s$ 朝上及 $40s < t < 45s$ 朝下游動時之效率為佳。L1S2 及 S3L1 游泳器之移動軌跡則分別由圖 7 中圓形點線及方形點線表示，其水平及垂直方向游動效率之比較結果與前述 S2L2 游泳器有著相同的趨勢，也就是水平游動效率仍較垂直游動效率佳。其原因可由進一步觀察游泳器擺動形狀得知，由圖 5 可看到，當游泳器在 $t < 10s$ ，朝右游動時，其尾部之擺動呈現出 S 型的扭曲，而此種型態之擺動將可產生較大的推力及增加其水平方向之前進效率；然而，當 $10s < t < 15s$ 時，游泳器尾部之擺動幾乎呈現剛體運動，此種剛體型態之擺動較不利於產生推力，而形成了垂直方向游動效率較差的原因。

另外，透過游泳器頭部及尾部擺動軌跡之比較後，可更進一步瞭解水平及垂直方向游動效率有著明顯差異之原因。圖 8 為 S2L2 游泳器之頭部及尾部在水平(向右)游動及垂直(向上)游動之擺動軌跡比較圖。由此圖可明顯觀察到，當游泳器朝向上後，其頭部及尾部之擺動軌跡已明顯脫離正弦波形，意味著其擺動行為對於產生淨推力是較無效果的；此外，此圖還可觀察到，游泳氣轉為垂直游動後，頭部及尾部擺動軌跡幾乎同步，表示此時的擺動型態幾乎對稱，違背了游泳器需具備頭尾(左右)非對稱擺動之原則，使得游泳器在垂直方向的擺動無法產生足夠推力，而影響了游動效率。透過上述說明可以瞭解，為何游泳器在轉為垂直方向游動後，其游動效率相較於初始游動方向會明顯下降。因此，考量游泳器需具備較佳游動效率，本研究目前所發表的技術較適用於操控游泳器前進及朝相反方向游動。

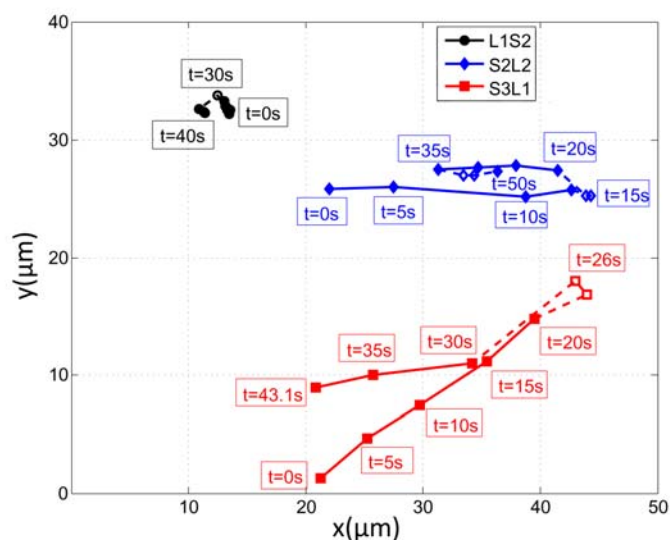


圖 7：圖 5 及圖 6 中游泳器之移動軌跡示意圖，實線及虛線分別表水平及垂直方向移動軌跡，其中水平方向游動效率明顯優於垂直方向。

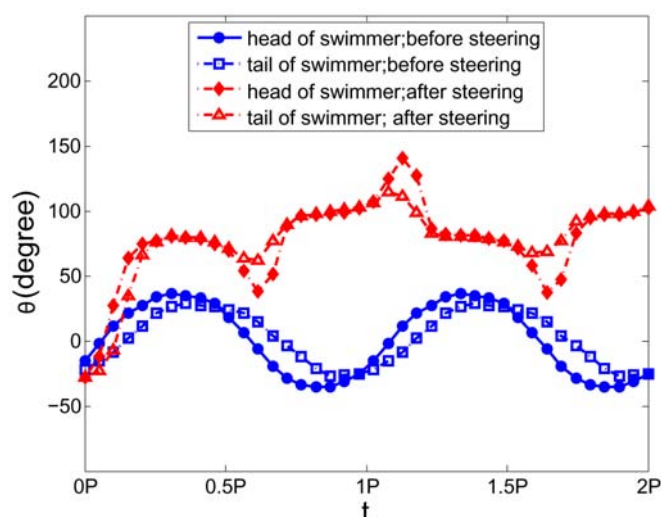


圖 8：圖 5 中 S2L2 游泳器在向右及向上游動時，其頭部及尾部擺動軌跡比較圖。為便於觀察其軌跡是否具週期性，擷取了游泳器於水平及垂直擺動時，任意 2 個週期之擺動角度。在轉向(垂直)後，游泳器頭尾之擺動軌跡均明顯脫離了與磁場相似之正弦波形，此外，在轉向(垂直)後，頭部及尾部擺動軌跡幾乎同步，致使游泳器在轉向(垂直)後，游動效率明顯不如原始(水平)方向。

3.4 轉向之操控機制

在談及游泳器之轉向機制時，另一可無可避免之重要的議題則是，如何操控及決定游泳器之轉彎方向。上述所有游泳器轉向時，均朝逆時針轉 90 度，而達到轉向之目的，此轉向機制皆是透過適時增加擺動磁場之強度而使瞬間相位角差之絕對值($|\Delta\theta_L|$)超過 90 度所達成，而增加擺動磁場之時機必須在當相位角差為正值時(磁場之擺動角度大於游泳器之擺動角度)，因此掌握增加擺動磁場強度之時機，即為決定游泳器轉彎方向之關鍵，其原理可透過圖 9 詳細的磁場及游泳器擺動軌跡比較圖來說明；若要使游泳器朝順時針方向轉 90 度，擺動磁場調增之時機，則必須在相位角差為負值時(磁場之擺動角度小於游泳器之擺動角度)，基於此論點，順時針轉向

及逆時針轉向之擺動軌跡應為相似，如圖 9 所示，因本研究之實驗結果並未呈現順時針轉向之游泳器，故圖 9 中順時針轉向之擺動軌跡曲線實為預測值，然在本研究所進行之實驗中，確實有觀察到游泳器順時針轉向之情形，惟若需更精準的操控游泳器的轉向，對於瞬間相位角差值之掌握及擺動磁場強度之調整需更為精確及熟練。

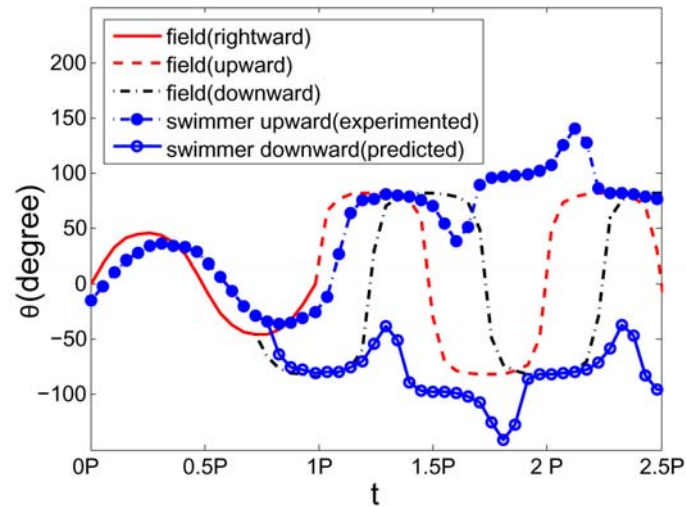


圖 9：操控游泳器精確轉向之預判曲線圖。游泳器朝逆時針或順時針轉向，取決於增加擺動磁場強度之時機，是否在瞬間相位角差為正或負值時。圖中之磁場及游泳器擺動軌跡為圖 5 中 S2L2 游泳器之量測值，朝逆時針轉向後，其磁場及游泳器之軌跡分別由虛線及實心圓表示，若欲使游泳器朝順時針轉向，則其預測之磁場及游泳器擺動軌跡則分別由點線及空心圓所表示之。

4. 結論

在本研究中，除了成功的利用了尺寸不同之磁粒子製造出微磁性游泳器，使其在高頻率之擺動磁場條件下，產生推力向前游動，並進一步呈現了新穎的操控其轉向之技術。在初始狀態朝水平方向游動之游泳器，藉由瞬間改變擺動磁場強度，使其瞬間相位角差之絕對值 $|\Delta\theta| > 90^\circ$ ，可使其改為朝垂直方向游動，透過此操控機制，可不需改變任何線圈或磁場設備之擺設方式或方向，即可使游泳器之改變游動方向；然而，在此仍須強調，由於游泳器轉向(垂直)後，其擺動型態將不利於產生淨推力，而造成游動效率相較於水平方向會明顯下降。因此，此種操作技術目前較適用於操控游泳器前進及朝相反方向游動。此外，有關精準操控游泳器之轉向技術，同時為決定游泳器朝逆時針或順時針轉向之關鍵，在於能否精確掌握相位角差之正負值及增加擺動磁場強度之時機。

誌謝

感謝國科會計畫編號 NSC 99-2221-E-009-057-MY3 對本研究之經費補助。

參考文獻

- [1] S. Melle, G. G. Fuller, and M. A. Rubio, "Structure and dynamics of magnetorheological fluids in rotating magnetic fields," *Phys. Rev. E* 61, 4111, 2000.
- [2] S. Melle and J. E. Martin, "Chain model of a magnetorheological suspension in a rotating field," *J. Chem Phys*: Vol. 118, no. 21, Jun. 2003.

- [3] T.G. Kang, M. Hulsen, P. Anderson, J. D. Toonder, and H. Meijer “Chaotic mixing induced by a magnetic chain in a rotating magnetic field,” *Phys. Rev. E* 76:066303, 2007
- [4] I. Petousis, E. Homburg, R. Derks, A. Dietzel, ”Transient behaviour of magnetic micro-bead chains rotating in a fluid by external fields,” *Lab Chip* 7: 1746, 2007.
- [5] S. Biswal and A. Gast. “Rotational dynamics of semiflexible paramagnetic particle chains,” *Phys. Rev. E* 69: 041406, 2004.
- [6] R. Dreyfus, J. Baudry, M. Roper, M. Fermigier, H. Stone, and J. Bibette, “Microscopic artificial swimmers,” *Nat.* 437:862, 2005.
- [7] Y.H. Li, S.T. Sheu, J.M. Pai, and C.Y. Chen, “Manipulations of Oscillating Micro Magnetic Particle Chains,” *J. Appl. Phys.*, 111: 07A924, 2012.
- [8] Y.H. Li, C.Y. Chen, S.T. Sheu, and J.M. Pai, “Dynamics of a microchain of superparamagnetic beads in an oscillating field,” *Microfluid Nanofluid*, 13, 579, 2012.
- [9] Y.H. Li, H.C. Lin, C.Y. Chen, “Trajectory Shift of Magnetic Microchains in an Oscillating Field,” *Microfluid Nanofluid*, 14, 831-838, 2013.
- [10] Y.H. Li, H.C. Lin, C.Y. Chen, “Steering of Magnetic Micro-swimmers”, *IEEE Transactions on Magnetism*, 49, 7, 4120-4123, 2013.