

高爾夫球的旋轉角速度與飛行軌跡之探討

葉良志 謝承殷

台北市立體育學院

摘要

職業高爾夫球選手在比賽時常因比賽場地洞設計位置的關係，揮擊不同的球路，以求取較佳的進攻球位，業餘的球友則是在揮桿後方能得知球的飛行方向，完全無法掌控球的飛行軌跡。本研究針對揮桿擊球球體旋轉的角速度與飛行軌跡之間的關係，來提供揮桿擊球動作的理論基礎，實驗結果顯示，桿頭碰撞球時因不同的桿面角度產生不同的球體旋轉角速度，受到空氣動力學的影響產生不同的飛行軌跡。

關鍵字：高爾夫球、角速度、飛行軌跡、電腦模擬

壹、緒論

實驗由一名差點 5 的業餘選手作為拍攝對象，持美規 Taylor-Made TITANIUM 983K 桿身硬度 S 桿面角度 9.5 度一號木桿，以正面擊球十次，桿面向右打開以不同角度擊球十次，桿面向左關閉以不同角度擊球十次。揮桿擊球時高爾夫球飛向目標後的飛行初速度、角度和球旋轉速度都被桿面與球間的互動所控制，也就是說球體飛行的過程，形成的飛行軌跡皆出自於桿面的擊球角度與揮桿路徑 Adams (2003)，在球離開桿面後，球的飛行是由牛頓第二運動定律產生高爾夫球的升起與牽引，經由升起與牽引的空氣動力學的控制，它就變成在大氣飛行中的自由物體的圖表，本文藉由電腦程式模擬三度空間飛行軌跡的方程式。Naruo 和 Mizota (2004)，讓球友們瞭解球體旋轉的角速度與飛行軌跡之間的關係，進而修正本身的揮桿擊球動作，並微幅調整桿面的開闔，讓球技能有所提昇。

貳、研究方法

使用 Kodak 高速攝影機以 3000Hz 快門速度為 1/10000 拍攝不同擊球角度；以 SiliconCoach Pro 動作分析軟體處理影片，蒐集桿面向右打開及向左關閉時不同角度擊球時球的角速度數據。受試者揮桿擊球的平均球速為 75m/sec，桿面擊球角度為 12 度，分別討論直球水平角速度在 2500rpm、3000rpm、3500 rpm、5000rpm，將數據帶入電腦模擬程式中，其模擬程式是藉由運動方程式牛頓第二運動定律 (Newton's second law) 來說明，座標系統如圖一所示，在飛行軌跡切線上

$$m \frac{dv}{dt} = -D - \sin \alpha \quad (1)$$

在飛行軌跡切線法線 y' 上

$$mV \frac{d\alpha}{dt} = L - W \cos \alpha \quad (2)$$

在飛行軌跡切線法線 Z' 上

$$mV \frac{d\beta}{dt} = H \quad (3)$$

其中 D 為球之空氣阻力，L 為球因垂直旋轉而產生之揚升力，H 為球因水平旋轉而產生之揚升力，皆為球旋轉角速度之函數，在 X, Y, Z 三軸向之速度分量與位移關係為

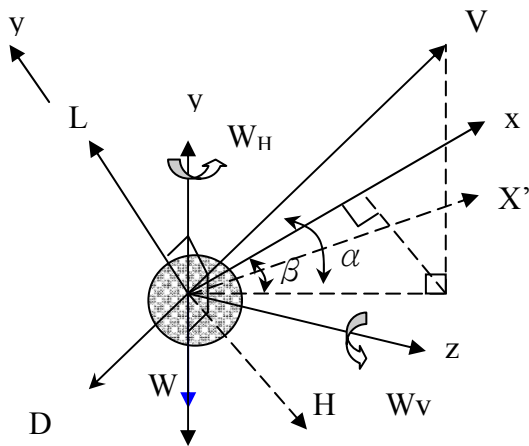
$$\frac{dx}{dt} = V \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta \quad (4)$$

$$\frac{dy}{dt} = V \cdot \sin \alpha \quad (5)$$

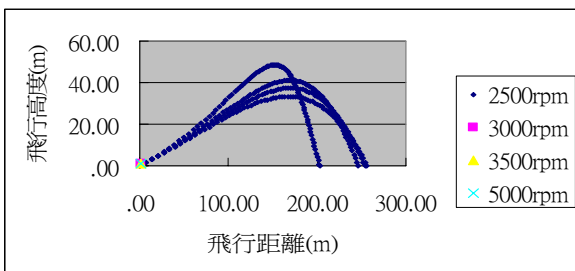
$$\frac{dz}{dt} = V \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta \quad (6)$$

以上公式(1)至(6)為一聯立微分方程式，可以數值積分法計算，只要代入初始條件 (initial conditions)，即可計算球飛行軌跡之 X, Y, Z 座標點速度及方向 (α 與 β)，本文採用 4 階 Runge - Kutta 法進行數值積分以求較準確之模擬結果。

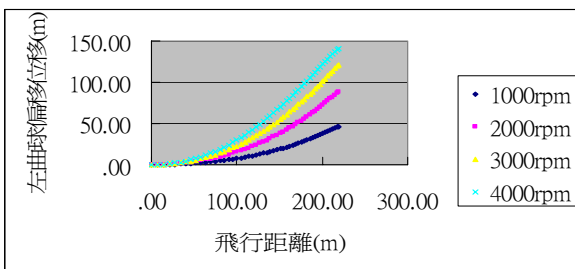
得到球體旋轉角速度與飛行軌跡關係圖 (圖二)。左右曲球垂直角速度在 1000rpm、2000rpm、3000rpm、4000rpm 時，其飛行距離與角速度及左右偏移距離的關係，得到球體旋轉角速度與飛行軌跡關係圖 (圖三、圖四)。並藉由圖三及圖四得到擊球角速度與左右偏移位之關係圖 (圖五)



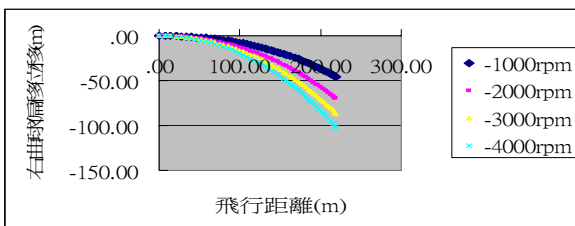
圖一、球體飛行時任一瞬間之狀態



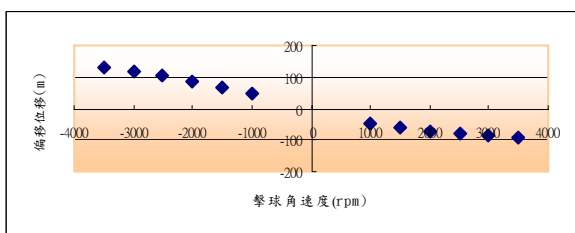
圖二、直球球體旋轉角速度與飛行軌跡關係圖



圖三、左曲球飛行距離與角速度及向左偏移距離的關係圖



圖四、右曲球飛行距離與角速度及向右偏移距離的關係圖



圖五、擊球角速度與左右位移關係圖

參、結果與討論

由圖二比較直球角速度在 2500rpm、3000rpm、

3500rpm、5000rpm 時，飛行距離與飛行高度的關係，發現當水平角速度逐漸加大時，飛行距離和高度也逐漸增加，但角速度超過某數值時，雖然飛行高度增高，可是飛行距離並未增加，反而變得較短，可能是因為高度較高受空氣壓力及阻力作用，因而提早落地。

由圖二可瞭解，球體水平速度相同時，旋轉角速度越大時，左右偏移的位移越多也代表其飛行軌跡的曲率越大。當球速與擊球角度相同，擊球角速度不同時，左右位移偏移的關係，擊球角速度越大時，左右偏移的位移會越多。當球速與角速度相同時，桿面成開放或閉鎖時，擊球桿面角度不同與左右偏移距離的關係，從圖中可瞭解桿面開闔角度越大，左右偏移也越大，再加上偏移位移與飛行距離關係，即可模擬選手在擊球時，球速多大，旋轉角速度多快，桿面擊球角度多少時，計算球體飛行距離與可左右偏移的距離，以閃避前方可能的障礙物。

肆、結論與建議

揮桿擊球時桿面擊球角度越大時球的角速度越快，而彈射的角度相對地也比較大，桿面的擊球角度決定球旋轉角速度，球體旋轉的角速度越大所造成飛行軌跡的曲率半徑會越大，能量損耗會多用在側旋上，因此將會損失些許的直線離，造成左右位移會變大，形成左右曲球的飛行軌跡。由於 Magnus 效應 (Bourg, 2001)，球體旋轉速度加快時，受到揚升係數和阻力係數的影響，氣流流過球體表面會在球體後方形成波流，產生漂浮力，在直線方向可讓球飛的更遠。若作用在左右方向上，會使球的飛行軌跡產生更大的曲率變化。

伍、參考文獻

1. Bourg, D. M. (2001). Physics for game developers. North Sebastopol, CA: O'Reilly.
2. Adams, J. C. (2003). Flight mechanics of a spinning dimpled spheroid. Keynote speech at the November 2003 program of the American Society of Mechanical Engineers, Concord, CA.
3. Naruo, T., & Mizota, T. (2004). Aerodynamic force measurement of a golf ball and 3D trajectory analysis. ながれ (日本流體力學會期刊論文), 23, 203-211. (原文為日文)。