

Motion Analysis of Football Kick Based on an IMU Sensor

基於六軸感測器信號之足球踢擊分析

組別：B141 指導教授：馬席彬 組員姓名：游鈞、黃鼎元

Abstract

The development of sports science has pushed athletes to no longer only pursue a large amount of training, but to improve the quality of training through scientific methods. With the advancement of science and technology, a greater variety of technologies are being applied in the field of sports and health. Analyzing through quantitative data, compared to self-practice, can improve the effectiveness of training. Using the correct method can not only improve the quality and efficiency of training but also avoid sports injuries.

Many image analysis software on the market can reconstruct the human body model and the state of motion, but such equipment is usually expensive and has strict environmental restrictions, which prevents it from being widely used. Therefore, this project uses an inertial measurement unit (IMU) to conduct experiments to analyze motion trajectory, speed, and posture, and explore its feasibility as a training aid.

Since the reconstruction of the trajectory requires a quadratic integration of the acceleration, how to eliminate noise in the calculation process, avoid the accumulation of errors, perform gravity compensation, accurately integrate the attitude and displacement information, are the focuses of this experimental system. We collect acceleration and angular velocity data during movement through the accelerometer and gyroscope in the six-axis inertial sensing element. After the steps of sensor correction, attitude estimation with quaternions, the transformation of the coordinates, and gravity subtraction, we observe the maximum speed and highest point of the foot before making contact with the ball while reconstructing the 2D and

3D trajectory of the kicking motion. The reason for choosing these two physical quantities will be explained later in this article.

According to the experiment results, for the instep kicking motion of trajectory length around 3.63 meters, the root mean square error (RMSE) is about 7 centimeters compared with the theoretical value obtained from high-speed cameras and image analysis software. For the maximum speed of the foot, the error is approximately 4%. This physical quantity is related to the contact point with the ball and timing of acceleration. The error for the highest point of the foot before hitting the ball is 2.8%.

摘要

運動科學的發展讓運動員不再只追求大量的訓練，而是透過科學化的方式提升訓練品質，隨著科技進步，越來越多的技術投入運動領域的應用。透過量化的數據進行分析，相較於自行練習，可以提升單位訓練時間內的訓練成效，使用正確的方法不但可以提升訓練品質以及效率，更可以避免運動傷害發生。

市面上許多影像分析軟體可以重建出人體模型和運動的狀態，但此類設備通常價格偏高且對於環境的限制較嚴苛，導致其無法被廣泛應用。因此本專題研究以慣性感測元件 (IMU) 進行實驗，進行運動軌跡、速度及姿勢等分析，探討其作為訓練輔助器材之可行性。

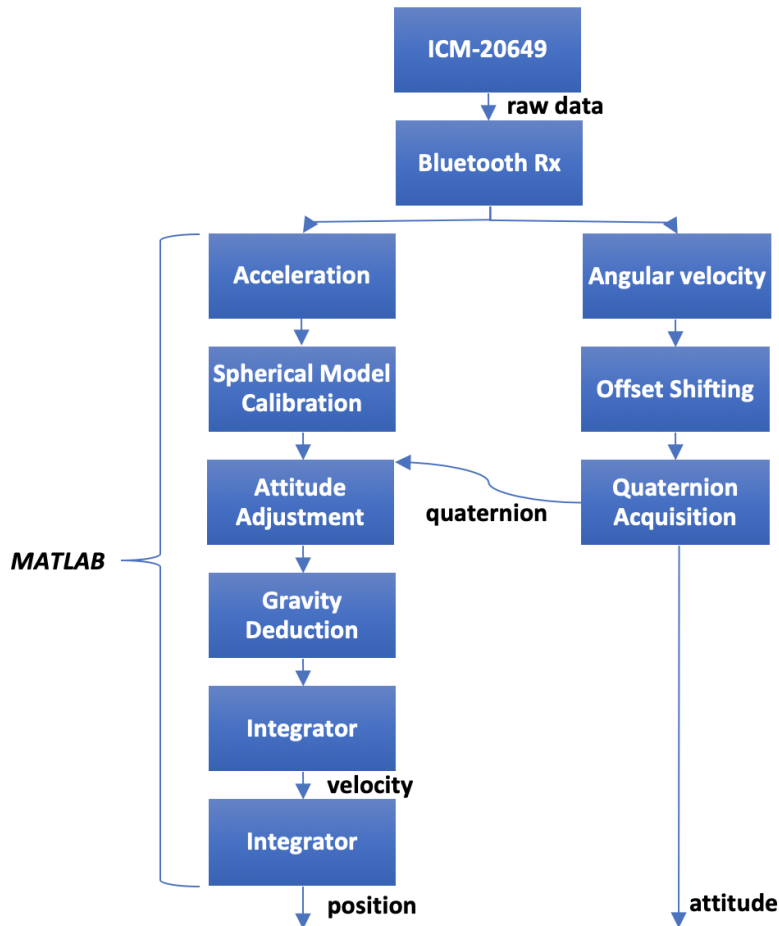
由於軌跡的重建需要對加速度進行二次積分，如何在計算過程排除雜訊，避免誤差累積、排除重力影響以及準確將每個取樣點的姿態和位移量進行整合，為本實驗系統建立之重點。我們藉由六軸慣性感測元件中的加速度計以及陀螺儀蒐集運動時的加速度及角速度資料，經過感測器校正、四元數姿態估算處理、對地座標轉換以及重力扣除等步驟後，重建出足部運動的 2D、3D 軌跡，並觀察足部最大瞬時速度和回拉最高點足部的位置，文中將說明選擇這兩個物理量的原因。

實驗結果顯示，對於平均路徑長為 3.63 公尺的腳內側踢球動作，與經由高速攝影機及影像分析軟體得到的理論值相比，方均根誤差 (Root Mean Square Error) 約為 7 公分；足部最大速度誤差大約在 4%，此物理量和擊球點及出力時機相關；而回拉最高點的誤差則約為 2.8%。

內容

一、系統架構

本專題所使用的感測系統，大致上可以區分為兩個部分，數據蒐集和資料處理分析，圖 1 為本專題研究的訊號處理架構圖。本實驗透過藍芽進行即時的資料傳輸，首先需尋找感測器的編號，並透過輸入此編號和藍芽接收器進行配對。當感測器在受到力的作用進行加速運動或是旋轉時，加速度資料與角速度資料便會傳入電腦中儲存為 txt 檔。加速度計和陀螺儀的範圍設定在 $\pm 30g$ 和 $\pm 4000 \text{ degree/s}$ ，因此資料轉換成十進位後，仍需判斷正負，作法是將加速度計大於 30 的值減掉 60，使其成為負數，同樣的將陀螺儀的資料大於 4000 的數值扣掉 8000，以補數的方式得到結果為負數的部分。



二、系統設計

1. 感測器校正

本實驗加速度計使用的校正方法為修改後的球體模型校正，首先假設偏移量為 $G = L(g + b)$ ， G 為校正前的加速度值， g 為實際加速度值， L 為感測器本身的線性比例偏差， b 則為感測器的中心值偏差，以靜止狀態下的重力加速度值進行校正。理想靜止狀態下，三軸加速度平方和應為 1，各種角度下的重力加速度值會形成一個半徑為 1 的球體，計算時可先假設線性比例偏差為 1，利用最小平方方法得到三軸的中心值偏差，再利用同樣的方法即可找出線性比例偏差，但實際測試發現此感測器靜止時三軸加速度平方和會小於 1，因此在最後加入歸一化的動作，完成加速度計校正。

2. 姿態處理—四元數

在沒有任何轉動的情況下，我們可以藉由兩次積分得到感測時間點當下的位置來進行軌跡繪製，但在正常的運動狀態下勢必有轉動的參與，而感測器三軸所收到的加速度其實是針對感測器座標本身的加速度，非對地座標的加速度，所以這樣的資料其實是無法使用的，要透過姿態的處理才能夠將數據進行應用及分析。因本專題使用六軸感測器，僅包含加速度計以及陀螺儀，不含磁力計的數據，因此我們僅能靠初始座標以及運動中的角速度改變來得到每一個感測時間點的資料，進而得到三軸分別的角度改變，來知道當下的感測器姿態。在得到姿態以後，利用旋轉座標來將感測器的加速度調整成初始座標的加速度，這樣的數據才能為後續的積分以及軌跡作圖所用。

四元數這種旋轉表示法是利用向量內積和外積的特性推導而成，可以說是將二維的實虛數擴展至四維來呈現三維空間的轉動。類似於複數，四元數由實數以及三個元素 i 、 j 、 k 組成，每個四元數都可以他們的線性組合來表示，一般可以表示為 $a + bi + cj + dk$ ，由以下方程式，我們直接用角速度的資料來進行四元數的更新，得到每個時刻的姿態。

$$\text{new orientation} += 0.5 \times \text{orientation} \times \text{angVel} \times dt$$

3. 重力扣除及對地座標轉換

在上一個階段中，各個時間點的感測器資料可經由得到的四元數轉換至初始座標，也就是感測器在開始移動前靜止的座標。為避免輕微抖動或其他外界因素影響造成初始座標難以確立，我們採取靜置期間的 500 個取樣點的加速度平均作為初始座標之重力加速度值。理論上，感測器的擺放要讓初始座標和對地座標對齊，其三軸加速度值

應為 $[0, 0, 1]$ ，僅 z 軸受到重力加速度有 $1g$ 的數值，但在實際情況下，感測器不可能擺放的如此完美，因此在 x 軸及 y 軸上會有重力加速度的分量。由於上個階段已經把整個運動期間的感測器資料轉換至初始座標，我們可以將整個運動期間的加速度資料扣除上述靜置期間的 500 個取樣點的加速度平均值進行重力扣除，如此一來處理過後的資料就是感測器消除重力影響的運動資料。

在進行重力扣除之後，仍要處理的是初始座標和對地座標不一致的問題，若此問題未處理會造成後續 2D 及 3D 作圖時整段軌跡出現傾斜的現象。與前段處理姿態變化不同，因為初始座標是在靜止情況下的座標，無法用角速度資訊來處理，所以這邊選擇採用計算重力分力傾角的方式來得到初始座標轉為對地座標的旋轉矩陣。

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\text{roll}) & -\sin(\text{roll}) \\ 0 & \sin(\text{roll}) & \cos(\text{roll}) \end{bmatrix}$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos(\text{pitch}) & 0 & \sin(\text{pitch}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\text{pitch}) & 0 & \cos(\text{pitch}) \end{bmatrix}$$

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos(\text{yaw}) & -\sin(\text{yaw}) & 0 \\ \sin(\text{yaw}) & \cos(\text{yaw}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{\text{rotate}} = R_z \times R_y \times R_x$$

4. 速度、位置積分及閾值設置

閾值設置在進行積分時是一個至關重要的部分，因我們的感測器在運動時並非單一外力所促成的移動，難免會受到一些外在因素，如振動、風吹、重力分力未完整消除等等影響，讓加速度有些微浮動的情形，而這樣的浮動對於積分的誤差影響是很可觀的，因此在經過反覆多次不同的運動實驗測試後，我們發現目標的運動加速度值大約在 $0.4g$ 以上，因此訂定了約其值十分之一的 $0.04g$ 作為加速度的閾值，在進行加速度積分的計算前進行過濾使目標運動的加速度值更加乾淨清晰。

另外在實際進行加速度積分時，會有一個物理性質上的盲點，那便是感測器在進行一段運動後靜止時，加速期間和減速期間的加速度積分面積並沒有辦法完全抵消，因此即便加速度已經完全變成 0 了，速度仍保持在前個時間的速度，這樣一來在進行速度積分得到位移時，感測器會看似以等速度持續位移下去而非呈現靜止狀態。因此這邊新增了一個判斷條件，當連續十五個取樣點的加速度為 0 時，判定為靜止狀態，將速度歸零，也透過多次實驗得到了一個合理的速度閾值，設定為 $0.02g/s$ ，來確保上述誤差累積的情形不會發生。

三、實驗結果

1. 實驗設置

我們將感測器以橡皮筋固定於腳背上，實驗的理論值由運科系高速攝影機的錄像提供，我們將錄像匯入 Tracker 中進行作圖，並匯出該視角的 2D 資料，透過正視圖以及側視圖進行峰值的對齊，再分別進行深度的校正，我們便能組合出 3D 的資料，將此資料同樣匯入到 MATLAB 中，便可將感測器資訊的運算結果和影像的結果做對比，來得到各項分析的誤差。

2. 足部軌跡及姿態分析

為檢驗此系統重建軌跡的精確度，我們使用 MATLAB 繪製 3D 軌跡圖，並計算其路徑長以及整段路徑與理論值之方均根誤差 (Root Mean Square Error)。表 1 為重複進行五次踢球動作後所得到的數據；圖 2 為 3D 運動軌跡圖，圖中藍色實線為 Tracker 所得到之理論軌跡，紅點則是 IMU 經資料處理得到的軌跡；右側感測器軸向狀態的部分，軌跡上的一個個小座標是 IMU 的軸向狀態，R、G、B 分別代表 IMU 的 x、y、z 軸。

表1 軌跡分析數據

	exp 1	exp 2	exp 3	exp 4	exp 5	Average
移動路徑長 (m)	3.48	3.76	3.65	3.66	3.61	3.63
方均根誤差 (m)	0.076	0.064	0.057	0.079	0.078	0.07

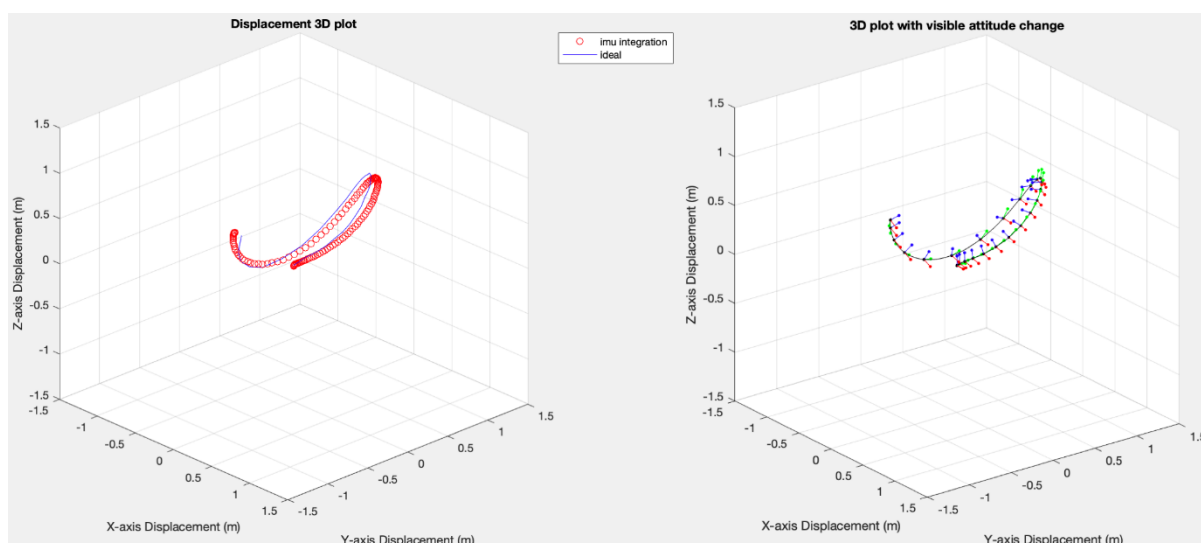


圖 1 3D 運動軌跡圖與感測器軸向狀態

3. 速度分析

此部分我們觀察運動員腳擺動時，足部的速度最大值以及最大值出現的位置。我們亦可以從 2D 軌跡圖上知道速度最大值出現的位置，來讓運動員知道自己出力的時機是否正確，是否在最大值出現的地方接觸到球將動能完整的傳遞到球上。表 2 為重複進行五次踢球動作後所得到的數據；圖 3 為 2D 運動軌跡圖，圖中藍色星號為理論軌跡中速度最大值出現的位置，紅色星號則是 IMU 軌跡中速度最大值出現的位置。

表2 速度分析數據

	exp 1	exp 2	exp 3	exp 4	exp 5	Average
實際速度最大值 (m/s)	7.448	7.252	7.252	7.644	7.742	7.468
理論速度最大值 (m/s)	7.154	7.546	7.546	7.154	7.644	7.409
誤差 (取絕對值)	4.1%	3.9%	3.9%	6.8%	1.3%	4.0%

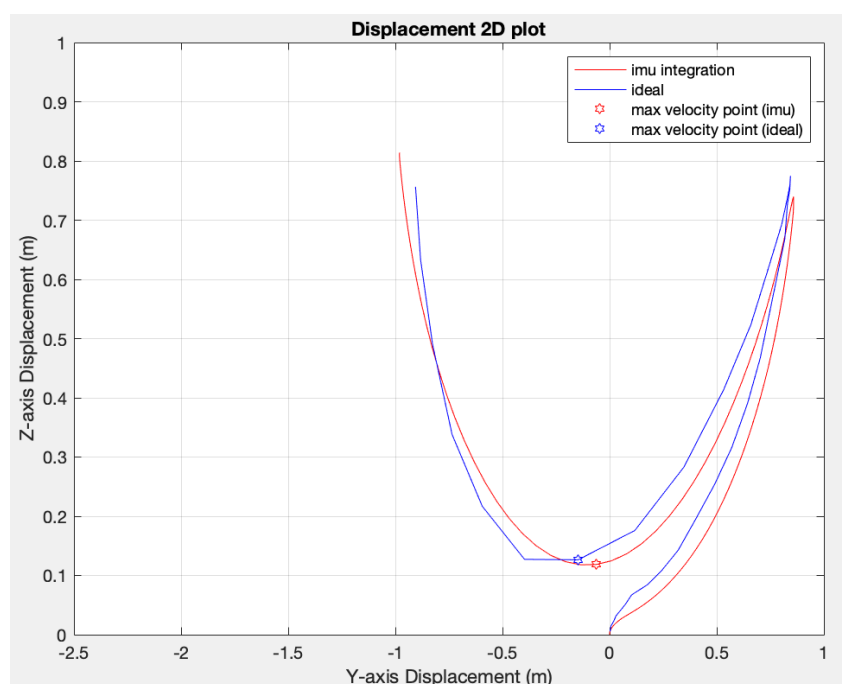


圖 3 2D 運動軌跡圖

4. 回拉最高點分析

進行射門動作時，腳與球接觸前小腿回拉的程度為決定該球速度和力道的關鍵因素，若在過度用力導致腿部的僵硬、前膝蓋彎曲程度不足而無法提高小腿的情況下擊球，此球的力量會受到影響。我們希望能透過回拉最高點的分析，來觀察運動員回拉

動作時的最高點位置。從 2D 軌跡圖上可以得知最高點出現的位置，來讓運動員知道自己在該次擊球前的回拉程度是否足夠。表 3 為重複進行五次踢球動作後所得到的數據；圖 4 為 3D 運動軌跡圖及回拉最高點，可以對兩者回拉最高點的位置進行比較。

表3 回拉最高點分析數據

	exp 1	exp 2	exp 3	exp 4	exp 5	Average
實際回拉最高點 (m)	0.6552	0.8014	0.7396	0.725	0.7824	0.741
理論回拉最高點 (m)	0.6865	0.8104	0.7745	0.7404	0.7686	0.756
誤差 (取絕對值)	4.6%	1.1%	4.5%	2.1%	1.8%	2.8%

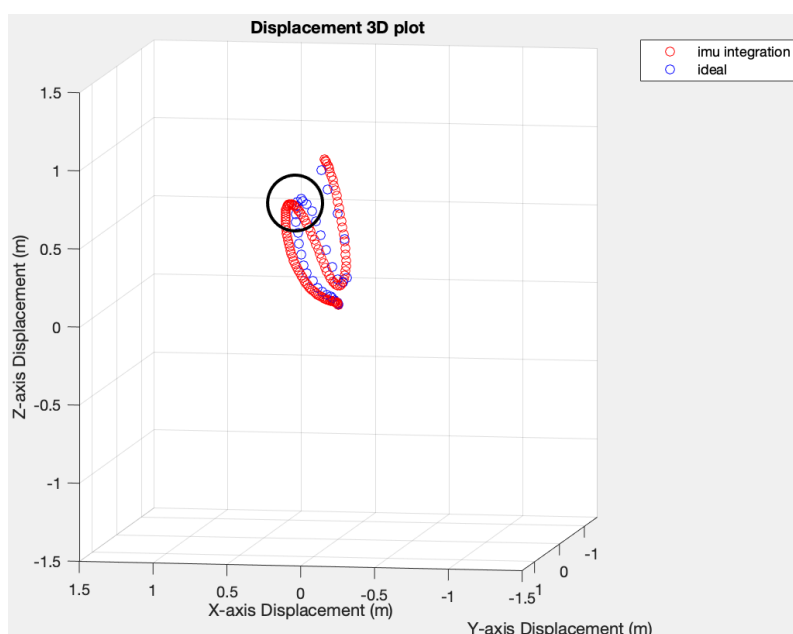


圖 2 3D 運動軌跡圖及回拉最高點

心得感想

此系統可應用於各年齡層及各種程度之球員，不論是藉由軌跡觀察動作的變化，或是只測量腳的高度或速度，以量化的形式和自己或他人比較，可讓球員或教練對動作有更具體明確的方法分析。本文實驗不需大量器材，也不需在特定場所或室內才能進行，對於實際應用的便利性提升不少。目前僅針對腳內側踢球動作驗證，儘管腳內側踢球為足球運動中使用非常頻繁的一項技術，未來仍可以嘗試加入射門動作甚至其他運動，以增加本文研究之應用，亦可加入多個感測器，放置於身體不同部位，以獲得更多資訊，達到增加訓練效果和品質的目標。

本專題一路上碰到許多問題和挑戰，首先是校正方式的選擇，使用球體模型校正，此方法收集越多不同角度下靜止的資料，理論上得到的球體會越精準，但實際進行發現結果除了會受到改變角度時移動的加速度影響外，更重要的因素為感測器本身三軸的偏移量不一致，因此分別進行歸一化後，才得到較理想的校正結果。

另一個困難是如何將四元數和陀螺儀的資料連結，也就是利用角速度更新四元數，後來發現四元數對時間的一次微分和角速度有關，成功將兩者連結，進而得以分析姿態隨時間變化的運動。此外，從陀螺儀和加速度計得到的原始資料必定包含雜訊，這些資料需經過閾值的過濾才能夠進行積分，以防止誤差累積，閾值設定方式為進行實驗前，先評估運動過程的加速度範圍，透過多次嘗試與修正，得到適合腳內側踢球動作的閾值。

理論值的取得亦是本專題的一大難題，因我們的理論值資料是從兩個角度的錄像取得，而在錄影中存在景深的問題，在感測器偏離比例尺所在的運動平面時會有比例縮放的現象。透過多個比例尺我們將影像的資料進行深度的校正，讓比例扭曲的問題獲得改善，以得到較可信的理論值。

這次的實作專題，一路上大部分的問題都是由我們發現，再自己試著找方法解決，有時這些問題也未必有標準答案，往往都需要先探討背後原因，接著尋找可能的方法，再透過一次次的嘗試得到結果。雖然一開始常因為無法解決問題而感到挫折，但現在回過頭看，那些失敗的經驗卻是我們得以完成專題的關鍵。感謝馬席彬教授每週親自和我們討論，並在題目設定方面給予我們很大的空間，讓我們能結合自身經驗自由發揮，同時感謝實驗室和運科系的學長對於本專題提供的協助。