

單相機高速運動物體 3D 軌跡重建的新方法

謝宗倫
亞洲大學
e-mail :

geniusraykimo@yahoo.com.tw

洪晟翔
亞洲大學
e-mail :

smallpig01@gmail.com

李正宇
亞洲大學
e-mail :

leecheng@asia.edu.tw

摘要

目前常見的三維重建方式是利用雙相機或多相機取得多個二維影像座標來重建出三維世界座標；使用單一相機來重建三維世界座標，不僅可降低校正與環境架設的困難、增加系統的實用性，更可以降低開發成本與時間。在本篇論文中，我們提出新的三維重建方法，是利用單相機取得球體影像的二維座標和球體在影像中的幾何面積等資訊，重建高速球體在三維世界座標中的移動軌跡。本研究對於低階的三維影像重建的應用有很高的實用性及效能成本比的優勢。

關鍵詞：單相機、三維重建、軌跡重建、幾何面積。

Abstract

In computer vision, most studies of three-dimensional reconstruction focus on using multiple cameras. However, there are some practical advantages in using single camera, e.g. lower system complexity, simpler calibration procedure, low cost, and shorter development time. In this study, we propose a new and simple approach for 3D trajectory reconstruction using single camera. In this approach, after calibration, the world coordinates of objects can be retrieved from given information of the object's image coordinates (X,Y) and its geometric area. The depth of objects can be found by transformation of a quadratic function of object's geometric area and coordinates on image, and thus the trajectory of the moving objects can be reconstructed. This study is useful in practice for low-precision and low-cost 3D reconstruction applications in the sense of performance-cost ratio.

Keywords: Single-Camera, 3D reconstruction, Trajectory reconstruction, Geometric area.

1. 前言

近年來在機器視覺以及電腦圖學的領域中，重建物體的三維世界模型是相當熱門與實用的一項研究課題；但動態重建物體移動軌跡

等相關研究並不多。本研究以單相機重建球體於高速移動時的軌跡，這研究結果可廣泛且輕易的應用在運動醫學、復建醫學、動物生態行為學與涉及高速動態行為的各種工程問題上。

常見的三維重建方法有兩種：一種是利用立體視覺理論[1]，將物體上的同一點在雙相機或多相機影像中的兩個或多個座標來重建出世界座標；另一種方法是利用單相機影像序列[2]，來重建出世界座標。前者準確度較高，但由於是利用多相機定位，所以成本也相對提高，且環境的架設也比較複雜；後者是利用單相機來重建三維座標，卻無法利用單張影像就能重建出物體的三維座標，而是需要靠著單相機拍攝一連串的影像序列才能進行三維重建，理論上仍屬多相機法。以上兩種方法皆潛在存有難解的 correspondence 問題[5, 6]。

為了達到單相機僅利用單張影像重建三維座標，我們提出基於物體在影像上的幾何面積來取代深度的原理，在本研究中，我們只需知道球體在影像上的形心座標和幾何面積，就能重建球體中心在真實世界座標上的位置。

1.1 雙相機三維空間定位原理

理論上，如果只利用物體在單一相機中的影像座標是無法得知物體的深度，必須利用物體投影到雙相機影像中的座標，才可計算物體在世界座標中的深度資訊。

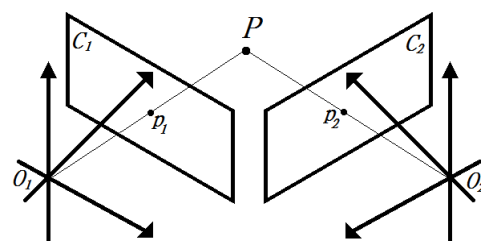


圖 1-1 雙相機定位示意圖

在圖 1-1 中， C_1 為左相機的影像平面， C_2 為右相機的影像平面， O_1 左相機的座標原點， O_2 為右相機的座標原點， $P(X, Y, Z)$ 為世界

座標上的一點， $p_1(X_1, Y_1)$ 為 P 點投影到左影像中的座標， $p_2(X_2, Y_2)$ 為 P 點投影到右影像中的座標。雙相機經過校正程序後[3, 4]，利用 X_1, Y_1, X_2, Y_2 ，這四個資訊，即可重建 P 點在世界座標中的位置。

1.2 本研究的單相機三維空間定位原理

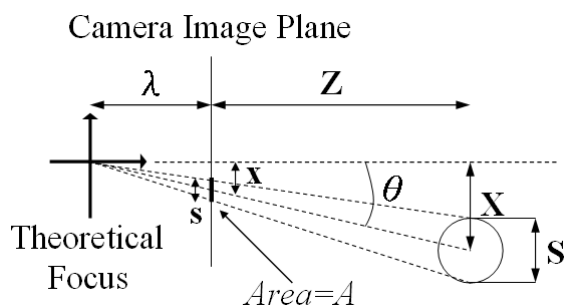


圖 1-2 單相機定位示意圖 (針孔模型)

以針孔三維定位模型(pin-hole model)來分析本研究之單相機定位原理，其幾何關係如圖 1-2。此圖中， S 為球體的直徑， X 為球體中心到鏡心的水平距離。 Z 為球體中心到影像平面的距離。 λ 為理論焦點 (theoretical focus) 到影像平面的距離。 A 為球體投影到影像中的幾何面積。 θ 為球體中心與理論焦點所形成的線段跟鏡頭垂直線的夾角。 x 為影像中球體形心到鏡心的水平距離。 s 為影像中球體的直徑。

假設球心的世界座標為 $P(X, Y, Z)$ ，球體投射在影像上的座標為 $p(x, y)$ ，影像座標跟世界座標的轉換公式如下：

$$X = \frac{x}{\lambda}(Z + \lambda)$$

$$Y = \frac{y}{\lambda}(Z + \lambda)$$

if θ is small enough,

$$Z \cong \frac{\lambda S}{s} - \lambda,$$

$$\text{where } A = \pi(s/2)^2 \Rightarrow s = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\sqrt{A}.$$

由此分析可得知，在針孔模型中物體投影到影像中的幾何面積與世界座標 $P(X, Y, Z)$ 的關係。在下一節“方法”中我們將進一步分析：使用相機鏡頭時(相機三維定位模型)單相機定位原理。

2. 方法

在進入 3D 座標重建工作前，我們必須要找到球體投影到影像中的形心座標以及幾何面積，為了取得這兩項數據，我們必須先對影像作預處理的動作。

2.1 影像二值化(Binarization)

為了讓影像能夠清楚地分辨出球體和背景的差异，在拍攝影像的同時我們依當時的光源強度決定二值化門檻值，依照門檻值大小將影像中低於門檻值的灰階值設為 0 (黑)，高於門檻值的灰階值設為 255 (白)，經過這個簡單的步驟即可輕易的將背景顏色與球體顏色區分開來，如圖 2-1。

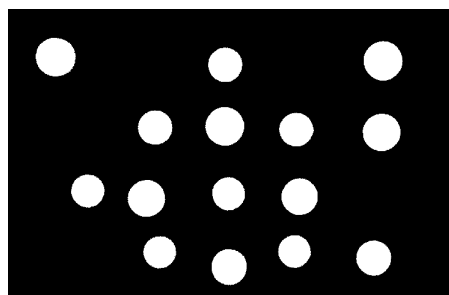


圖 2-1 經過二值化處理結果

2.2 影像區塊分析(Blob Analysis)

影像經過二值化後，人眼已經可以清楚分辨出球體區塊的位置，但是還是需要讓電腦可以經由計算得知影像中球體的形心座標和幾何面積才能重建三維世界座標。為了讓電腦可以計算球體在影像上的形心座標和幾何面積，我們利用區塊分析(Blob Analysis)，讓電腦可以自動計算球體在影像中的形心座標和幾何面積。

取得經過二值化後的影像後，影像上的灰階值只剩下 0 和 255，當灰階值為 255 時，表示該點即為球上的其中一點，然後把該點附近灰階值一樣為 255 的點視為同一個區塊，把整個影像都掃描後，便可取得球的區塊在影像中的位置及其面積，如圖 2-2。

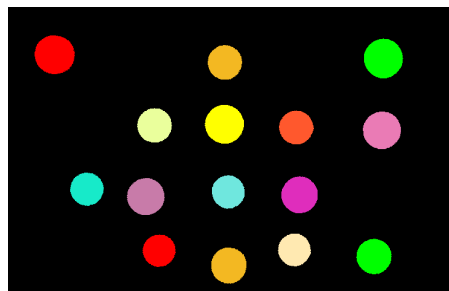


圖 2-2 經過區塊分析後的結果

2.3 單相機定位方法

在本篇論文中，我們利用物體在影像上的幾何面積變化來取代深度的變化，藉此解決單相機在重建三維世界座標時資訊不足的問題。我們假設影像中球體區塊的形心座標和幾何面積跟世界座標中存在著轉換關係：

$$\begin{aligned} X_w &= f_x(X_c, Y_c, \sqrt{A_c}) \\ Y_w &= f_y(X_c, Y_c, \sqrt{A_c}) \\ Z_w &= f_z(X_c, Y_c, \sqrt{A_c}) \end{aligned} \quad (1)$$

在公式 (1) 中， X_w 、 Y_w 、 Z_w 各為世界座標中的 X 、 Y 、 Z 座標； X_c 、 Y_c 為影像上的 X 、 Y 座標； A_c 為球體投影到影像上的幾何面積； f_x 、 f_y 、 f_z 為球體投影到影像上的形心座標和幾何面積轉換成世界座標的轉換函式。

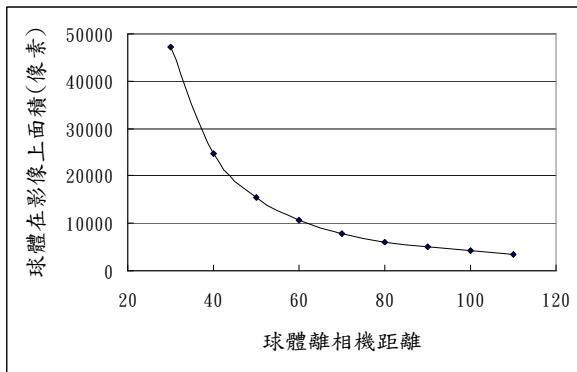


圖 2-3 球體的深度與幾何面積關係圖

由圖 2-3 可以得知，當球體距相機愈遠其球體投影到影像上的幾何面積愈小，加上球體的深度與影像上的幾何面積並非線性關係，而是呈二次曲線關係，因此 f_x 、 f_y 、 f_z 是由物體在影像上的形心座標和面積(即 X_c 、 Y_c 及 $\sqrt{A_c}$) 所組成的二次方程式。

因此，影像中球體區塊的形心座標、面積跟世界座標的轉換關係：

$$\begin{aligned} X_w &= f_x(X_c, Y_c, \sqrt{A_c}) \\ &= i_1 X_c^2 + i_2 Y_c^2 + i_3 A_c + i_4 X_c \sqrt{A_c} + i_5 Y_c \sqrt{A_c} \\ &\quad + i_6 X_c Y_c + i_7 X_c + i_8 Y_c + i_9 \sqrt{A_c} + i_{10} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Y_w &= f_y(X_c, Y_c, \sqrt{A_c}) \\ &= j_1 X_c^2 + j_2 Y_c^2 + j_3 A_c + j_4 X_c \sqrt{A_c} + j_5 Y_c \sqrt{A_c} \\ &\quad + j_6 X_c Y_c + j_7 X_c + j_8 Y_c + j_9 \sqrt{A_c} + j_{10} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Z_w &= f_z(X_c, Y_c, \sqrt{A_c}) \\ &= k_1 X_c^2 + k_2 Y_c^2 + k_3 A_c + k_4 X_c \sqrt{A_c} + k_5 Y_c \sqrt{A_c} \\ &\quad + k_6 X_c Y_c + k_7 X_c + k_8 Y_c + k_9 \sqrt{A_c} + k_{10} \end{aligned} \quad (4)$$

公式 (2)、(3)、(4) 為影像中球體區塊的形心座標、幾何面積跟 X_w 、 Y_w 、 Z_w 間的轉換關係， $i_1 \sim i_{10}$ 、 $j_1 \sim j_{10}$ 、 $k_1 \sim k_{10}$ 分別為 f_x 、 f_y 、 f_z 函式中的未知係數。由此可見，我們只需要找出這 30 個未知的係數，我們就可以利用物體在影像中的二維座標跟幾何面積大小來求得三維世界座標。為了最佳化實際校正的結果我們將上列三式整理成矩陣形式的線性方程式：

$$\begin{aligned} K \cdot M_i &= X_w \\ K \cdot M_j &= Y_w \\ K \cdot M_k &= Z_w \end{aligned} \quad (5)$$

$$K = \begin{bmatrix} X_{c1}^2 & Y_{c1}^2 & A_{c1} & \cdots & Y_{c1} & \sqrt{A_{c1}} & 1 \\ X_{c2}^2 & Y_{c2}^2 & A_{c2} & \cdots & Y_{c2} & \sqrt{A_{c2}} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{cn}^2 & Y_{cn}^2 & A_{cn} & \cdots & Y_{cn} & \sqrt{A_{cn}} & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_i = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_9 \\ i_{10} \end{bmatrix}; \quad M_j = \begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \\ \vdots \\ j_9 \\ j_{10} \end{bmatrix}; \quad M_k = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_9 \\ k_{10} \end{bmatrix}$$

$c_1 \sim c_n$ 代表總共有 n 組球體在影像上的形心座標和幾何面積。由公式中可以得知同一個矩陣 K 就可以分別求得 M_i 、 M_j 、 M_k 三組未知的係數，由於這三組係數都是 10 個未知數，所以為了求出這三組矩陣，矩陣 K 必須至少要有 10 列，意思就是至少需要 10 組球體在影像上的形心座標、幾何面積，才能求出這三組未知的矩陣。

我們可以利用線性回歸，分別求出最佳的 M_i 、 M_j 、 M_k 三組未知的矩陣，如下：

$$\begin{aligned} M_i &= (K^T K)^{-1} K^T X_w \\ M_j &= (K^T K)^{-1} K^T Y_w \\ M_k &= (K^T K)^{-1} K^T Z_w \end{aligned} \quad (6)$$

解出 M_i 、 M_j 、 M_k 後，我們就可以利用球狀物體在影像中的二維形心座標和幾何面積，經由 f_x 、 f_y 、 f_z 求出物體在三維世界座標中的移動軌跡。

3. 結果

3.1 實驗環境設定

相機: AISYS ALTAIR U36F (USB 工業相機)

表 3-1 AISYS ALTAIR U36F 相機相關規格

| 感光晶片規格 | CMOS |
|--------|-------------------------------|
| 影像解析度 | 752 (H) x 480 (V) |
| 像素尺寸 | 6.0 x 6.0 μm 正方形像素 |
| 影像輸出格式 | 8 位元，灰階 |
| 最大像速率 | 60 fps；預設值 = 30 fps |
| 動態範圍 | 大於 60.0 dB |
| 電子快門 | 電子全域快門 |
| 掃描模式 | 循序式掃描、全域式曝光 |
| 像速率控制 | 軟體控制：30 到 60 FPS |
| 資料傳輸介面 | USB 2.0、每秒 480 百萬位元 |

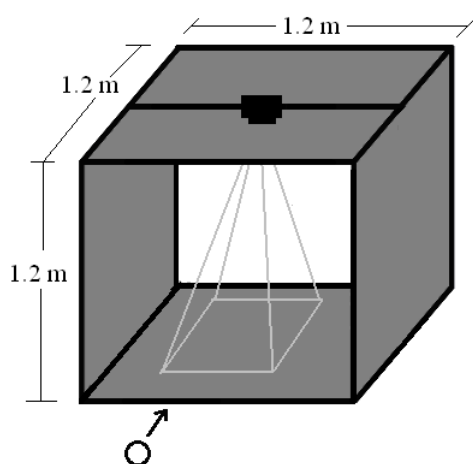


圖 3-1 重建三維軌跡重建系統示意圖

拍攝骨架的長、寬、高都是 1.2 公尺，相機架在頂端正中央，並且把相機鏡頭朝下方拍攝。運動中的球體為直徑 5 公分的球。

3.2 校正點多寡與誤差率的關係

為了評估校正點的多寡是否會影響重建的準確度。在此，我們作了三組數量不同的校正點，校正點數據如下：

表 3-2 校正點數據

| 編號 | 影像_X | 影像_Y | 影像_Area | 世界_X | 世界_Y | 世界_Z |
|----|--------|--------|---------|------|------|------|
| 1 | 78.81 | 79.41 | 3350 | 10 | 15 | 24 |
| 2 | 360.93 | 92.24 | 2542 | 30 | 15 | 10 |
| 3 | 244.4 | 196.41 | 2550 | 20 | 24 | 8.5 |
| 4 | 360.27 | 194.48 | 3234 | 30 | 24 | 20 |
| 5 | 621.18 | 204.45 | 3060 | 50 | 24 | 18 |
| 6 | 132.33 | 301.73 | 2358 | 10 | 33 | 5.5 |
| 7 | 366.53 | 306.41 | 2336 | 30 | 33 | 4 |
| 8 | 484.72 | 311.25 | 2876 | 40 | 33 | 14.5 |
| 9 | 367.44 | 428.06 | 2750 | 30 | 42 | 13 |
| 10 | 476.12 | 402.22 | 2282 | 40 | 42 | 3.5 |
| 11 | 479.15 | 199.85 | 2469 | 40 | 24 | 7 |
| 12 | 229.92 | 314.14 | 2975 | 20 | 33 | 16 |
| 13 | 623.59 | 85.7 | 3302 | 50 | 15 | 22 |
| 14 | 251.99 | 403.48 | 2261 | 20 | 42 | 3.5 |
| 15 | 608.05 | 413.15 | 2647 | 50 | 42 | 11.5 |

第一組校正點為編號 1~10，第二組校正點為編號 1~12，第三組校正點為編號 1~15，為了評估這三組數據的準確率，我們利用 6 組已知的驗證點，來各別評估這三組數據的準確率，驗證點資訊如下：

表 3-3 驗證點資訊

| 編號 | 影像_X | 影像_Y | 影像_Area | 世界_X | 世界_Y | 世界_Z |
|----|--------|--------|---------|------|------|------|
| 1 | 208.99 | 197.16 | 2315 | 16 | 24 | 5.5 |
| 2 | 436.34 | 203.79 | 3003 | 36 | 24 | 18 |
| 3 | 205.3 | 307.65 | 2514 | 16 | 33 | 8.5 |
| 4 | 437.72 | 299.35 | 2269 | 36 | 33 | 3.5 |
| 5 | 202.09 | 417.76 | 2623 | 16 | 42 | 11.5 |
| 6 | 441.17 | 419.47 | 2837 | 36 | 42 | 14.5 |

分別把第一組 (10 個校正點)、第二組 (12 個校正點) 和第三組 (15 個校正點) 的數據利用第二節所說的方法求出 M_i 、 M_j 、 M_k 後，拿表 3-3 中的 6 個驗證點在影像上的 X 、 Y 座標和幾何面積來重建該球體在三維世界座標

中的位置，再來計算球體重建後的位置跟實際上位置的誤差率，6 個驗證點的誤差率如下：

表 3-4 第一組驗證點的誤差率

| 編號 | 世界_X | 世界_Y | 世界_Z | 重建_X | 重建_Y | 重建_Z | 誤差率 |
|----|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 16 | 24 | 5.5 | 19.54 | 26.87 | 7.23 | 5.61% |
| 2 | 36 | 24 | 18 | 34.69 | 23.69 | 15.09 | 3.69% |
| 3 | 16 | 33 | 8.5 | 15.12 | 31.59 | 6.71 | 2.81% |
| 4 | 36 | 33 | 3.5 | 36.76 | 32.05 | 3.53 | 1.4% |
| 5 | 16 | 42 | 11.5 | 13.38 | 38.05 | 8.87 | 6.24% |
| 6 | 36 | 42 | 14.5 | 37.75 | 42.82 | 15.98 | 2.80% |

由表 3-4 中可以看出，當校正點的個數為 10 組時，我們可以發現幾乎每組驗證點的誤差率都偏高，其中還有一組驗證點重建出來的三維世界座標的誤差率還大於 6% 以上，這表示利用 10 組校正點重建出來的三維世界座標的誤差率普遍偏高。

表 3-5 第二組驗證點的誤差率

| 編號 | 世界_X | 世界_Y | 世界_Z | 重建_X | 重建_Y | 重建_Z | 誤差率 |
|----|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 16 | 24 | 5.5 | 18.12 | 24.35 | 7.13 | 3.10% |
| 2 | 36 | 24 | 18 | 35.08 | 24.36 | 15.17 | 3.45% |
| 3 | 16 | 33 | 8.5 | 15.97 | 33.07 | 6.83 | 1.92% |
| 4 | 36 | 33 | 3.5 | 37.24 | 33.03 | 3.61 | 1.43% |
| 5 | 16 | 42 | 11.5 | 15.3 | 41.38 | 9.1 | 2.96% |
| 6 | 36 | 42 | 14.5 | 37.03 | 41.46 | 15.97 | 2.16% |

由表 3-5 中可以看出，當校正點的個數為 12 組時，我們可以發現每組驗證點的誤差率都小於 4%，而且有兩組驗證點重建出來的三維世界座標的誤差率小於 2% 以下，這表示利用 12 組校正點重建出來的三維世界座標的誤差率已經降低許多。

表 3-6 第三組驗證點的誤差率

| 編號 | 世界_X | 世界_Y | 世界_Z | 重建_X | 重建_Y | 重建_Z | 誤差率 |
|----|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 16 | 24 | 5.5 | 16.06 | 24.53 | 5.44 | 0.62% |
| 2 | 36 | 24 | 18 | 36.03 | 24.27 | 15.92 | 2.41% |
| 3 | 16 | 33 | 8.5 | 16.81 | 33.01 | 7.7 | 1.31% |
| 4 | 36 | 33 | 3.5 | 36.42 | 33.06 | 3.04 | 0.72% |
| 5 | 16 | 42 | 11.5 | 16.87 | 41.39 | 10.48 | 1.70% |
| 6 | 36 | 42 | 14.5 | 35.92 | 41.71 | 14.88 | 0.56% |

由表 3-6 中可以看出，當校正點的個數為 15 組時，我們可以發現只有一組驗證點的誤差率都大於 2%，甚至有三組驗證點重建出來的三維世界座標的誤差率小於 1% 以下，這表示利用 15 組校正點重建出來的三維世界座標的平均誤差率相當的小。

驗證點在第一組（10 個校正點）的平均誤差率為 3.76%；驗證點在第二組（12 個校正點）的平均誤差率為 2.51%；驗證點在第三組（15 個校正點）的平均誤差率為 1.22%。

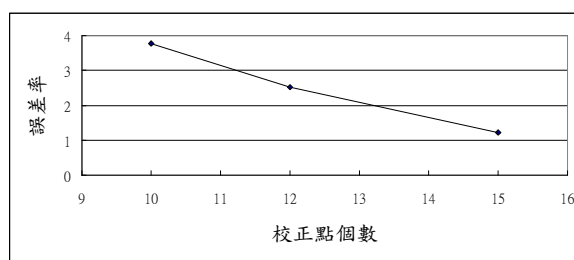


圖 3-2 校正點個數與準確率關係圖

由圖 3-2 可以得知，只要校正點的組數愈多，重建三維世界座標的結果將會更準確。但是隨著定位點愈來愈多，雖然解 M_i 、 M_j 、 M_k 這三個矩陣的計算量並不會因此增加，但是校正點的擺放將會非常困難，如能依據讀者所需的準確度再來決定到底需要多少個校正點，是比較好的判斷方法。

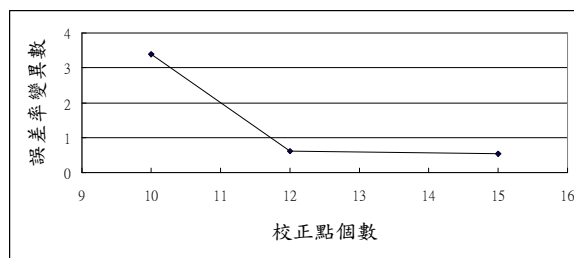


圖 3-3 校正點個數與誤差率變異數關係圖

由圖 3-3 顯示，當校正點個數為 10 個時，誤差率的變異數為 3.39%；校正點個數為 12 個時，誤差率的變異數為 0.61%；校正點個數為 15 個時，誤差率的變異數為 0.54%。當誤差率變異數愈小時，表示重建出來的三維世界座標愈穩定。所以當校正點大於等於 12 個校正點的時候，其重建後的三維世界座標的穩定度其實已經相當好。

3.3 球體運動軌跡重建結果

將球丟入單相機的可視範圍內，即可即時運算出球體在世界座標中的球心座標，並將計

算後的座標繪製於三度空間內，再加上移動軌跡線，即可清楚表示球的移動軌跡。下圖為利用 19 組形心座標、幾何面積，重建後的移動軌跡：

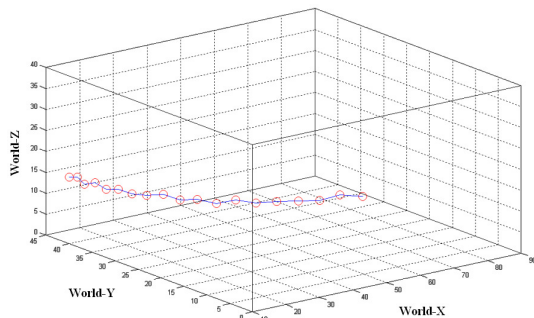


圖 3-4 球體移動軌跡於三度空間中繪製結果

4. 結果

4.1 本研究的優點：

由結果可以得知，本研究可以即時重建快速移動球體在世界座標中的移動軌跡，且誤差率相當的低。定位時快速又方便，相當節省人力物力，再加上本研究是利用單相機來重建球體的移動軌跡，所以不用擔心會有雙相機重建中的 correspondence 問題，成本也相對的比雙相機重建低。

4.2 本研究的缺點：

由於高速移動的物體在現實世界移動的過程中會不停的旋轉，假使移動中的物體不是近球體，將會造成移動物體呈現在影像上的幾何面積不穩定，導致重建出錯誤的世界座標。所以本研究目前較適用於重建近球體的移動軌跡。

4.3 單相機與雙相機三維重建的精準度比較

在前言中，我們知道雙相機是利用四個已知的條件來重建三維座標，而在本研究中，我們提出的單相機重建方法是利用三個已知的條件來重建三維座標。所以當已知的條件遠大於 3 個（世界座標中的 X 、 Y 、 Z 座標）時，重建出來的三維座標愈精確，這就是為什麼雙相機三維重建的準確度高於單相機三維重建的準確度。單相機影像中的球體幾何面積不易穩定掌握，也造成準確度上的不足。

4.4 系統設計上之困難與解決方案

1、相機快門時間的設定

如果使用相機預設的快門時間（30fps），在拍攝運動中球體影像上，球體會因為快門速

度過慢，而形成橢圓形的形狀，然而從橢圓形的球體我們無法取得正確的球心影像座標。所以每張影像拍攝的時間越短，將能夠在相同的時間內取得越多的影像，相對的，軌跡點也會增加，使得運動中球體的軌跡重建更加完整。

2、外部照明設備之選擇

因為縮短了相機的快門速度，我們必須要從外部加上固定的光源，來補足拍攝影像亮度不足的問題。如果使用日光燈管，會因為交流電以每秒 60 次的頻率（60Hz）來回變換電流的方向和大小造成閃爍。雖然人眼會因為視覺暫留而無法感覺出日光燈管閃爍的情形，但是在相機高速快門時間的拍攝下，這個情況就會變得非常嚴重。

而鎢絲燈泡在高速攝影下，能夠大幅改善影像閃爍的情形。除此之外，使用直流電的 LED 燈泡更能夠完全改善影像閃爍的情形。

參考文獻

- [1] 馬頌德、張正友，「計算機視覺--計算理論與算法基礎」，科學出版社，pp. 52-71，1998。
- [2] Remondino, F. and Roditakis, A., "3D Reconstruction of Human Skeleton from Single Images or Monocular Video Sequences", *Pattern Recognition Symposium*, pp. 100-107, 2003.
- [3] Qian, G. and Chellappa, R., "Bayesian Self-Calibration of a Moving Camera", *Center for Automation Research and Department of Electrical and Computer Engineering*, pp. 277-293, 2002.
- [4] Mendonca, P.R.S. and Cipolla, R., "A Simple Technique for Self-Calibration", *IEEE*, 1999.
- [5] Fallavollita, P. and Cheriet, F., "Optimal 3D reconstruction of coronary arteries for 3D clinical assessment", *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 32, pp. 476-487, 2008.
- [6] Pollard, S.B., Mayhew, J.E.W., and Frisby, J.P., "PMF A Stereo Correspondence Algorithm Using a Disparity Gradient Limit", *Perception*, pp.449-470, 1985.