

即時高速運動物體之三維軌跡重建系統設計與實現

洪晟翔
亞洲大學
e-mail :

smallpig01@gmail.com

謝宗倫
亞洲大學
e-mail :

geniusraykimo@yahoo.com.tw

李正宇
亞洲大學
e-mail :

leecheng@asia.edu.tw

摘要

目前常見的三維重建技術多應用於靜態物體上。為了提升三維重建的應用範圍，提出並實現了一種基於立體視覺原理的高速運動物體之軌跡還原與測量方法。該方法利用兩台高速相機同時拍攝正在運動中的物體，並根據立體視覺演算法[1]，重建其連續運動中之物體的中心座標，並於最後提出軌跡重建系統設計過程中遇到之困難與解決方案。

關鍵詞：機械視覺、雙相機、三維重建、軌跡還原、立體視覺。

Abstract

Among 3D reconstruction techniques, most of them are for still objects. We design and implement a ready-to-use system for 3D trajectory reconstruction of high speed moving objects. Hardware camera synchronization, multi-threading programming, 3D reconstruction camera model (rather than pin-hole model) are used for enhancing performance in speed and in accuracy to fulfill the requirement in high speed environment. This implementation is especially useful for computer-assisted evaluation in game study, sport medicine, and physical therapy.

Keywords: Machine vision, Double-camera, 3D reconstruction, Trajectory reconstruction, 3D vision.

1. 前言

近幾十年來，隨著資訊快速的進步，影像處理技術已經被廣泛的應用在各個領域上。但是礙於電腦的計算速度，以往的影像處理技術大多以處理二維影像為主，如 Canny 檢測[4]、Otsu 檢測[6]。隨著近來電腦運算速度倍增，並為了擴大影像處理技術的應用範圍，漸漸的三維空間的重建技術越來越受到重視。

物體三維表面測量及重建技術隨著近年來逆向工程、現代製造技術、多媒體技術的需求應運而生並發展起來的。使用兩支攝影機對物體進行三維表面重建，不僅精準度高、速度

快。且光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資訊，更使雙相機重建方法應用更為廣泛。但目前的物體三維表面重建，如 2009 年，趙光興等人提出的三維系統測量平台[2]等等，幾乎都是以拍攝靜態物體為主，目前較少對高速移動中之物體進行軌跡的重建研究。

理論上的三維空間重建可以使用針孔三維定位模型[3]來描述，如圖 1-1：

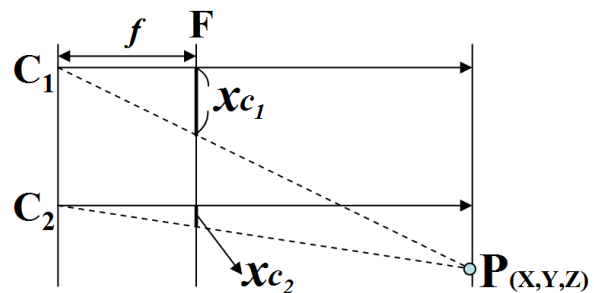


圖 1-1 針孔相機模型示意圖

其中 C_1 、 C_2 為同一平面中的兩台相機， P 為空間中一座標點， F 為影像平面， f 為相機焦距， x_{c_1} 、 x_{c_2} 為 P 點投影在影像上的座標與影

像中心的距離。可求出其深度為 $Z = \frac{df}{x_{c_1} \cdot x_{c_2}}$

針孔三維定位模型很容易了解，且數學上的推演也很單純，許多學術界的研究都以此模型為基礎。然而，針孔三維定位模型卻存在著實用的困難，如：感光量不足、缺乏應用彈性。但是當使用光學鏡頭的相機時，就不能再使用簡單的針孔三維定位模型攝影幾何，而必須以矩陣來描述物體與影像間(外部參數)的線性關係及相機鏡頭與影像平面間(內部參數)內部關係，在”方法”中，我們將詳細說明這立體視覺理論。

本篇基於即時高速運動球體之三維運動軌跡重建，設計並實作了一個雙相機攝影環境以及視窗化界面軟體，提供於球類運動環境使用。如棒球投手投出的變化球之變化軌跡重建，不僅提供給球員與教練間訓練時的討論，也可運用於比賽現場中由於攝影機之二維影

像無法提供真實三維空間球體軌跡而導致的爭議球等用途。相信因為這篇研究，能夠引發更多對於即時運動物體之三維重建方向的研究。如：實驗環境中生物體移動的軌跡、動態人體姿勢重建[5]、X光影像重建[9]...等等。

雖然在相機三維定位模型中，尚存在難解的 correspondence[7,8]問題，但是我們使用球狀物體來避開這個問題，因為不管在任何視角，球的中心點是固定的。

我們將在第二章詳細說明整個相機三維定位模型演算法，在第三章描述實驗數據與結果，並在第四章介紹視窗化介面系統的功能及特色，最後在第五章討論實作上遇到的問題與解決方案。

2. 方法

我們設計之實驗環境為一座長寬高各 1.2 公尺的立方體骨架，並於骨架頂端與側面各架設一台 AISYS ALTAIR U36F 相機(C1、C2)，運動之球狀物體直徑為 5cm，如圖 2-1 所示。

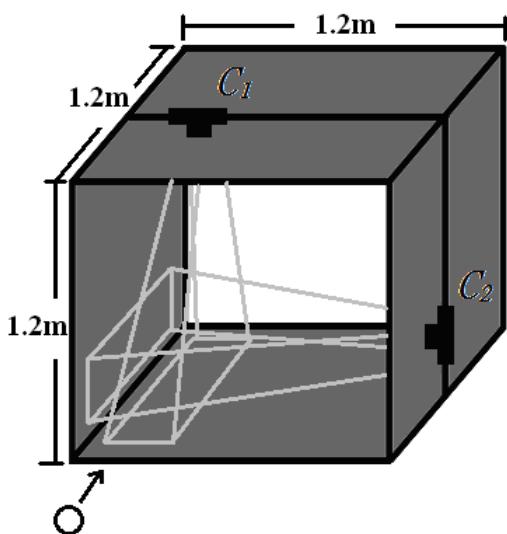


圖 2-1 高速運動球體之三維影像重建系統

表 2-1 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

三維空間重建技術的基本原理必須經由至少兩台不同位置之相機，在經過數個校正點校正並由演算法回歸取得各相機之內部參數及外部參數後，同時對待測物進行拍攝，取得兩支相機影像中對應點像素之影像座標，透過這兩組影像座標及三維空間的重建演算法，即可推算出該對應點於真實世界中的正確位置。其中，影像中的座標點皆須利用二值化[3]及區塊分析法[3]對影像預處理取出。流程圖如下。

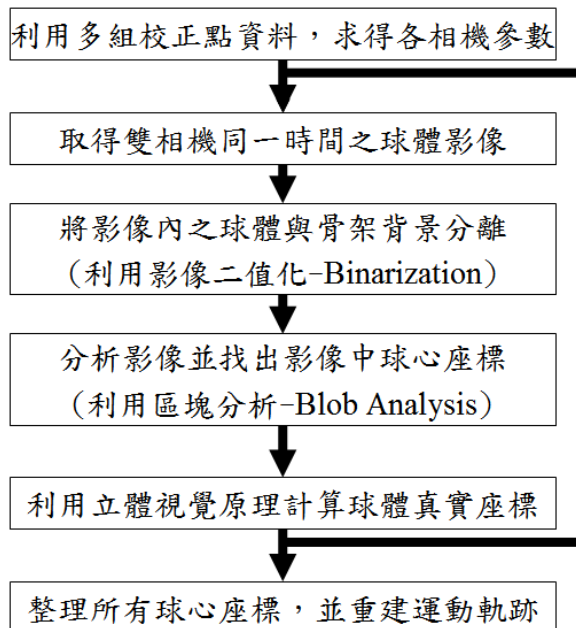


圖 2-2 實驗流程圖

2.1 利用定位點取得相機內部及外部參數

根據三維空間重建演算法，我們可以得知二維影像座標點 $C[u, v]$ 到三維空間中座標點 $[X_w, Y_w, Z_w]$ 之間的旋轉、放大、平移及相機內部參數的關係。如式 1：

$$C \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 u_0, v_0 為影像上某座標點， dx, dy 為影像 X 方向及 Y 方向的縮放係數， f 為相機之焦距， R 為座標轉換中的旋轉角度關係矩陣，其維度為 3×3 ； T 為座標轉換中的平移關係矩陣，其維度為 3×1 ；將中間三個座標轉換的關係矩陣整理之後，會得到一個維度為 4×3 的矩

陣 M ，我們稱 M 為相機參數矩陣。如式 2：

$$C \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

經由式 2，我們能更清楚的得知影像座標 $C[u, v]$ 和世界座標 $[X_w, Y_w, Z_w]$ 間的關係。因此我們不需要去詳細求得式 1 中所有矩陣參數，只需要算出 M 矩陣中之 12 個未知參數，即可得知影像座標和世界座標間的轉換關係。

式 1 整理過程中， M 矩陣乘以任意不為零的常數並不影響 $C[u, v]$ 與 $[X_w, Y_w, Z_w]$ 間的關係，因此，我們指定 M 矩陣中之 $m_{34} = 1$ 。

將式 2 展開後得到三個方程式：

$$\begin{aligned} Cu_1 &= m_{11}X_w + m_{12}Y_w + m_{13}Z_w + m_{14} \\ Cv_1 &= m_{21}X_w + m_{22}Y_w + m_{23}Z_w + m_{24} \\ C_1 &= m_{31}X_w + m_{32}Y_w + m_{33}Z_w + m_{34} \end{aligned} \quad (3)$$

將式 2 中第一式除第三式，第二式除第三式分別消去後，可得如下兩個關於 m_{ij} 的線性方程式。如式 4：

$$\begin{aligned} X_w m_{11} + Y_w m_{12} + Z_w m_{13} + m_{14} - \\ u_1 X_w m_{31} - u_1 Y_w m_{32} - u_1 Z_w m_{33} &= u_1 m_{34} \\ X_w m_{21} + Y_w m_{22} + Z_w m_{23} + m_{24} - \\ v_1 X_w m_{31} - v_1 Y_w m_{32} - v_1 Z_w m_{33} &= v_1 m_{34} \end{aligned} \quad (4)$$

因此，一組影像座標點 $C[u, v]$ 與真實世界座標 $[X_w, Y_w, Z_w]$ 可以利用上方方程式導出兩個方程式。由於必須解出 M 矩陣中另外 11 個未知數，我們知道 11 個未知數必須由 11 組相互獨立之方程式才能解出，因此我們至少需要 6 組校正點才能解出 M 矩陣中所有未知數。將 6 組校正點導出的 12 組方程式，利用線性迴歸之特性，將已知數及未知數整理後，整理成 $P \cdot M = Q$ 矩陣格式。如式 5：

$$\begin{bmatrix} X_{w1} & Y_{w1} & Z_{w1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1 X_{w1} & -u_1 Y_{w1} & -u_1 Z_{w1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{w1} & Y_{w1} & Z_{w1} & 1 & -v_1 X_{w1} & -v_1 Y_{w1} & -v_1 Z_{w1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{w6} & Y_{w6} & Z_{w6} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_6 X_{w6} & -u_6 Y_{w6} & -u_6 Z_{w6} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{w6} & Y_{w6} & Z_{w6} & 1 & -v_6 X_{w6} & -v_6 Y_{w6} & -v_6 Z_{w6} \end{bmatrix}$$

$$\cdot \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ \vdots \\ m_{32} \\ m_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 m_{34} \\ v_1 m_{34} \\ \vdots \\ u_6 m_{34} \\ v_6 m_{34} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 P 及 Q 皆為定位點中之已知數， M 為未知之相機參數。而由 $M = (P^T P)^{-1} \cdot P^T Q$ 公式即可求得相機參數矩陣 M 。

2.2 立體視覺理論

相機參數 M 矩陣求得後，我們可以利用一組世界座標轉換成相機之影像座標（即三個已知數求兩個未知數）。但是我們無法由一組相機影像座標求得其世界座標（即兩個已知數求三個未知數）。所以我們必須要利用兩支已知內外參數之相機才能求得其對應之世界座標（即四個已知數求三個未知數）。如式 6：

$$\begin{aligned} C_1 \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} m_{11}^1 & m_{12}^1 & m_{13}^1 & m_{14}^1 \\ m_{21}^1 & m_{22}^1 & m_{23}^1 & m_{24}^1 \\ m_{31}^1 & m_{32}^1 & m_{33}^1 & m_{34}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \\ C_2 \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} m_{11}^2 & m_{12}^2 & m_{13}^2 & m_{14}^2 \\ m_{21}^2 & m_{22}^2 & m_{23}^2 & m_{24}^2 \\ m_{31}^2 & m_{32}^2 & m_{33}^2 & m_{34}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

其中， $C_1[u_1, v_1]$ 與 $C_2[u_2, v_2]$ 為相機一及相機二中相對應點之影像座標， M_1 及 M_2 為相機一及相機二之相機參數矩陣。 $[X_w, Y_w, Z_w]$ 為世界座標，因此我們藉由這四個已知數即可求出物體之真實世界座標。將上式展開後可得以下四個方程式。如式 7：

$$\begin{aligned} (u_1 m_{31}^1 - m_{11}^1)X + (u_1 m_{32}^1 - m_{12}^1)Y + (u_1 m_{33}^1 - m_{13}^1)Z &= m_{14}^1 - u_1 m_{34}^1 \\ (v_1 m_{31}^1 - m_{21}^1)X + (v_1 m_{32}^1 - m_{22}^1)Y + (v_1 m_{33}^1 - m_{23}^1)Z &= m_{24}^1 - v_1 m_{34}^1 \\ (u_2 m_{31}^2 - m_{11}^2)X + (u_2 m_{32}^2 - m_{12}^2)Y + (u_2 m_{33}^2 - m_{13}^2)Z &= m_{14}^2 - u_2 m_{34}^2 \\ (v_2 m_{31}^2 - m_{21}^2)X + (v_2 m_{32}^2 - m_{22}^2)Y + (v_2 m_{33}^2 - m_{23}^2)Z &= m_{24}^2 - v_2 m_{34}^2 \end{aligned} \quad (7)$$

相同的，我們可將這些方程式利用線性迴歸找出最佳的世界座標解。將方程式整理成 $M \cdot W = N + \varepsilon$ 矩陣格式，如式 8：

$$\begin{bmatrix} u_1 m_{31}^1 - m_{11}^1 & u_1 m_{32}^1 - m_{12}^1 & u_1 m_{33}^1 - m_{13}^1 \\ v_1 m_{31}^1 - m_{21}^1 & v_1 m_{32}^1 - m_{22}^1 & v_1 m_{33}^1 - m_{23}^1 \\ u_2 m_{31}^2 - m_{11}^2 & u_2 m_{32}^2 - m_{12}^2 & u_2 m_{33}^2 - m_{13}^2 \\ v_2 m_{31}^2 - m_{21}^2 & v_2 m_{32}^2 - m_{22}^2 & v_2 m_{33}^2 - m_{23}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{14}^1 - u_1 m_{34}^1 \\ m_{24}^1 - v_1 m_{34}^1 \\ m_{14}^2 - u_2 m_{34}^2 \\ m_{24}^2 - v_2 m_{34}^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中 M 及 N 皆為影像座標及相機參數中之已知數， W 為未知之世界座標。將公式整理成 $W = (M^1 \cdot M)^{-1} \cdot M^1 \cdot N$ 公式即可求得最佳世界座標解 W 。

3. 結果

3.1 校正點數量與誤差率間的關係

我們首先進行三維空間校正準確率的實驗。我們將利用六組、七組、九組三種不同數量的校正點(圖 3-1 A、B)，在取得各組之相機參數矩陣後，另外再由世界中隨機取出 4 組驗證點(圖 3-1 C、D)，利用立體視覺演算法求出世界座標，取得各組之平均誤差值及誤差率變異數。

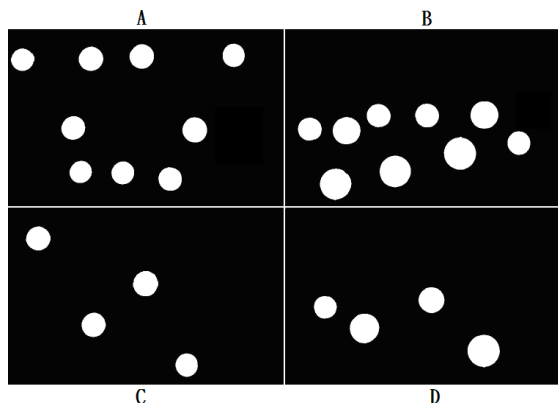


圖 3-1 (A、B)九組校正點之上方相機影像及側面相機影像。(C、D)四組驗證座標之上方相機影像及側面相機影像。

表 3-1 九組校正點之影像座標及世界座標

	C1 X	C1 Y	C2 X	C2 Y	W X	W Y	W Z
1	39.363	82.313	66.929	270.695	30	15	21
2	177.679	267.523	167.346	275.016	40	30	21
3	312.894	389.368	299.983	385.304	50	40	15
4	364.669	73.703	386.937	233.756	55	15	24
5	442.061	406.077	476.714	336.805	60	40	18
6	509.187	272.884	543.379	232.174	65	30	24
7	615.273	70.667	637.517	308.448	75	15	18
8	197.919	386.903	137.228	419.739	40	40	13
9	225.964	80.045	254.717	234.144	45	15	24

表 3-2 隨機四點驗證點之影像及世界座標

	C1 X	C1 Y	C2 X	C2 Y	W X	W Y	W Z
1	364.890	191.780	383.000	234.240	54	24	24
2	82.118	83.311	109.109	269.659	34	15	21
3	233.117	317.535	216.095	326.867	44	33	18
4	487.194	426.545	541.281	387.989	64	42	15

表 3-3 六組校正點之座標重建結果

	Result X	Result Y	Result Z	Distance	Error rate
1	54.850	23.9113	23.9774	0.73189	0.98459%
2	33.627	15.1428	21.2493	0.22129	0.54140%
3	44.089	33.8505	17.856	0.75204	0.99805%
4	63.052	42.0469	15.8085	1.55362	1.43451%

表 3-4 七組校正點之座標重建結果

	Result X	Result Y	Result Z	Distance	Error rate
1	54.4433	23.9032	23.9099	0.214003	0.53240%
2	33.2774	15.2986	21.0232	0.611851	0.90022%
3	44.1278	33.8156	17.9629	0.682913	0.95107%
4	63.5414	42.4036	15.2659	0.44391	0.76679%

表 3-5 九組校正點之座標重建結果

	Result X	Result Y	Result Z	Distance	Error rate
1	54.571	23.8122	23.9656	0.362493	0.69291%
2	33.2988	15.1264	21.1579	0.532591	0.83989%
3	43.8548	33.7291	18.0941	0.561525	0.86241%
4	63.7313	42.5166	15.2334	0.393551	0.72198%

計算各組的誤差距離在可視空間中的誤差率(Error rate)。使用六組校正點的誤差率為 0.99%，七組校正點的誤差率為 0.79%，使用九組校正點的誤差率為 0.78%。如下表。

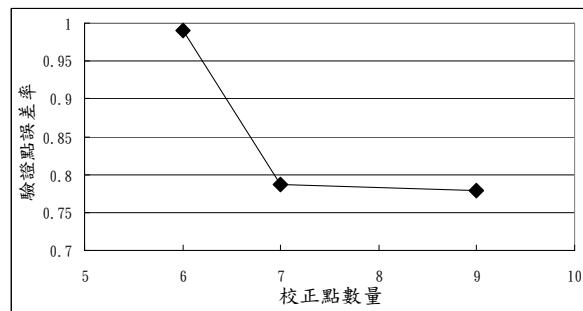


圖 3-2 校正點數量/誤差率關係圖

將上圖各組定位誤差率進一步求得其誤差率變異數(Error rate Variance)。使用六組校正點的誤差率變異數為 1.12%，七組校正點的誤差率變異數為 0.79%，九組校正點的誤差率變異數為 0.66%。如下表。

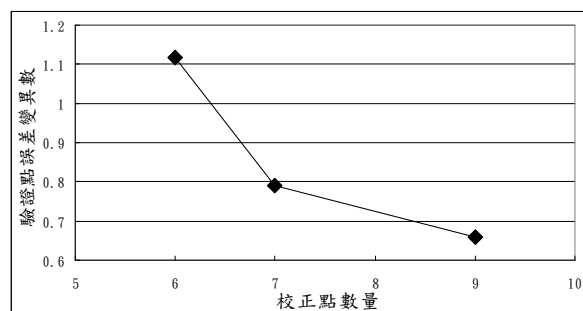


圖 3-3 校正點數量/誤差率變異數關係圖

經由以上兩圖可確定，增加校正點的數量不僅可以大幅降低重建結果的誤差率，更能降低誤差率變異數。在誤差率及誤差率變異數大幅降低的情況下，表示定位結果的準確率及穩定度將會大幅提升。由表 3-3 及 3-4 可見，使用七組校正點定位結果的誤差距離(Distance)可壓低至 0.7cm，而九組校正點更降低至 0.6cm 內，這樣的定位誤差距離已經可以非常精準的運用於高速運動物體的軌跡重建。

3.2 球體運動軌跡重建結果

由於我們使用的相機最快的拍攝速度為 20ms，若以棒球 100km 的球速，且欲取得 20 個樣本點求軌跡的情況下實作，那就必須得使兩台相機的拍攝範圍增加至 15 公尺才能實現。但是在本次實驗實作中，我們的環境設定為 120cm，必須降低球的速度來實作。因此我們利用線段將球綁於骨架頂端，並將球丟入雙相機之可視範圍內，使球體呈現如鐘擺般的運動，此方式不僅能夠有效的減低球體運動速度亦可使球體呈現較大的擺動幅度。

將取得的樣本點 3 維座標繪製於三維空間內，再加入移動軌跡，即可清楚表示球的移動軌跡。此例取得 20 組球心世界座標，繪製結果如下圖

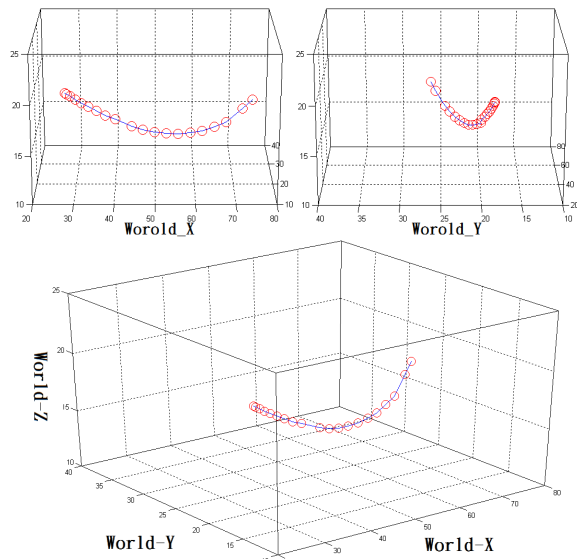


圖 3-4 球體移動軌跡於三維空間中繪製結果

4. 視窗化界面系統實作

我們使用 Borland C++Builder 6 來實現整個軌跡重建系統程式設計，程式主要含有三大部分：軌跡重建系統主程式、世界座標轉換工具、自動化校正工具。

4-1 軌跡重建系統介紹

軌跡重建系統主程式：主畫面中左側可直

覺化的觀看兩支相機的拍攝影像，右側可即時檢視所有計算出的影像球體中心及球體真實世界座標。上方工具列可作相機的細部設定。

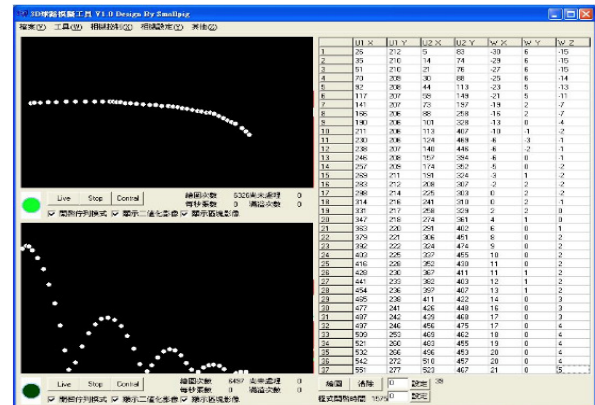


圖 4-1 視窗化主程式介面圖

自動化校正工具：配合使用七顆校正球之校正板，並於雙相機影像中由 X 方向依序取出區塊中心位置，並搭配預先設定好的六組校正球體的世界座標，即可自動化取得相機參數，圖 4-2(上)。並由第七顆校正點資訊計算定位結果的誤差率，圖 4-2(下)。

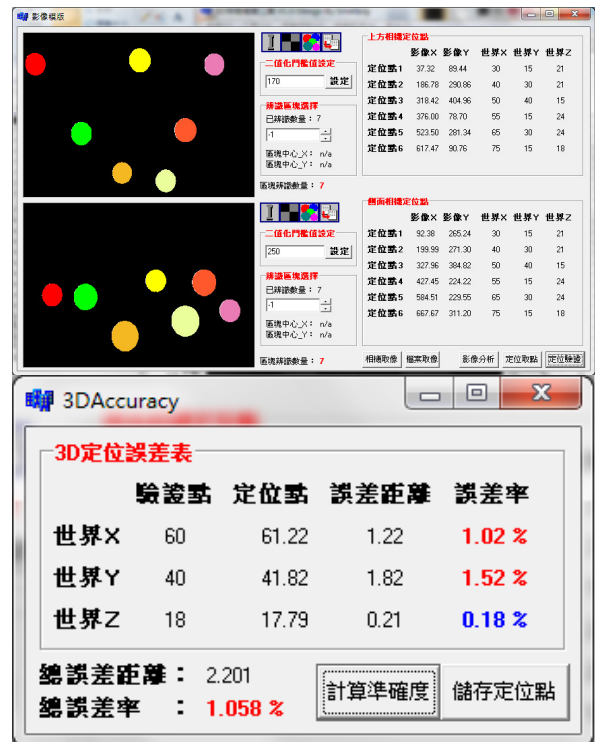


圖 4-2 自動化校正工具

世界座標轉換工具：若無法使用自動化校正工具，在此能夠選擇手動輸入兩隻相機的校正參數進行校正。校正完成後，輸入兩張影像中對應之座標點，即可立即算出其世界座標，

圖 4-3。



圖 4-3 世界座標轉換工具

4.2.使用多執行緒(Multi-Thread)

雖然我們使用的相機解析度並不大，但是程式必須每秒分析 100 張解析度為 752(H) x 480(V)的影像(左右相機每秒各 50 張)如果只使用單執行緒時，會因為作業系統限制的關係，使得處理器無法同時將所有的效能權限分配至某一個執行緒使用，導致會有舊影像尚未處理完畢但新影像已經拍攝完成卻無法進入執行緒，造成遺失影像的問題。因此我們必須要使用多條執行緒來達到分工分擔這些分析的工作，才能在不遺失影像的情況下還能正確且快速的即時分析及判斷球體位置。

5. 系統設計上之困難與解決方案

1. 影像拍攝速度與相機快門時間

如果使用相機內部預設取像率 30fps (33.3ms)，在拍攝快速運動球體的影像上，球體會因為快門速度過慢，曝光時間過長，而形成橢圓形的形狀(圖 5-1)，因此從橢圓形的球體我們無法取得正確的球心影像座標。另外，我們要實現的是高速球體的運動，如果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，軌跡點也會因為取得的影相越多而增加(圖 5-2)，使得高速球體運動的軌跡重建更加完整且真實。

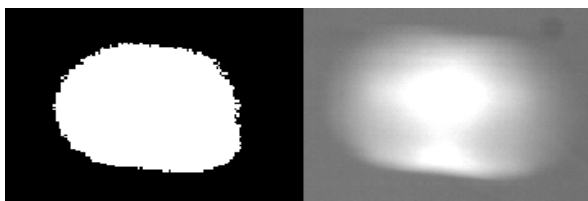


圖 5-1 快門速度太低，導致球體影像失真

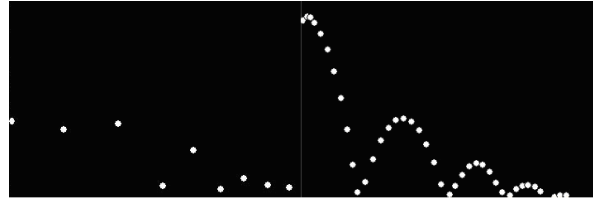


圖 5-2 增加快門速度，能夠增加軌跡點

而快門速度縮短的同時，勢必要加強外部的光源才能取得完整的球體影像。因此在快門速度與外部光源取捨的平衡下，我們實驗出能夠讓球體呈現正圓的影像，也能夠取得足夠的軌跡點的情況下，影像拍攝的最佳時間為 20ms(50fps)。

2. 外部照明設備之選擇

因為縮短了相機的快門速度，所以必須要從外部加上充足的光源，來補足拍攝影像亮度不足的問題，圖 5-3。

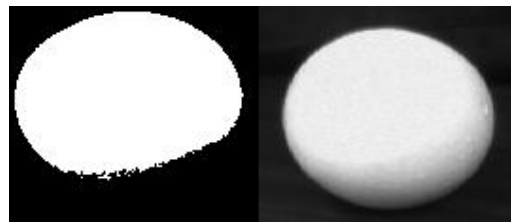


圖 5-3 若無外部照明設備，側面相機所拍得之影像常會有明暗及失真的問題

但若使用日光燈管作為外部燈源，會因為交流電是以每秒 60 次的頻率(60Hz)來回變換電流的方向和大小造成閃爍。雖然在這個頻率下，人眼會因為視覺殘留而無法感受出日光燈管忽明忽暗的情形，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明顯且嚴重。圖 5-4。

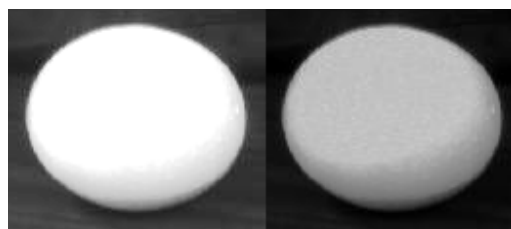


圖 5-4 使用日光燈管在高速拍攝下會產生嚴重的閃爍情形，鎢絲燈泡能大幅改善其問題

為了改善日光燈管於高速攝影中使影像出現閃爍的情況，採用鎢絲燈泡為電阻加熱之特性，於高速攝影下能夠大幅改善影像閃爍的情形。除此之外，使用直流電之 LED 燈泡更能

完全改善影像閃爍的情形，是最佳的選擇。

3. 定位方塊與定位板之選擇

在實驗的過程中，我們必須要先計算出相機的內部參數及外部參數。在找出參數的過程中，我們必須要先做校正的動作，而校正的過程即是找出影像上某個像素點的影像二維坐標及該像素點在真實世界的三維空間座標，利用立體視覺演算法去找出影像座標與世界座標的關係，即是相機的參數。

在實驗的初步階段，我們先使用厚紙板製成成的校正方塊(圖 5-5 左)來做校正的動作，使用定位方塊的優點是影像上的座標

$Z_1[u_1, v_1]$ 和方塊座標 $[X_w, Y_w, Z_w]$ 的取得非常容易。但是會因為校正方塊在影像上及真實世界的體積過小，對於校正結果的精準度往往不是那麼準確，加上最後的世界座標結果要從校正方塊的三維坐標系轉換為真實世界的三維坐標系，都是很複雜的座標轉換，不僅會增加演算法的計算量，甚至將會延遲到整個程式的運算時間。

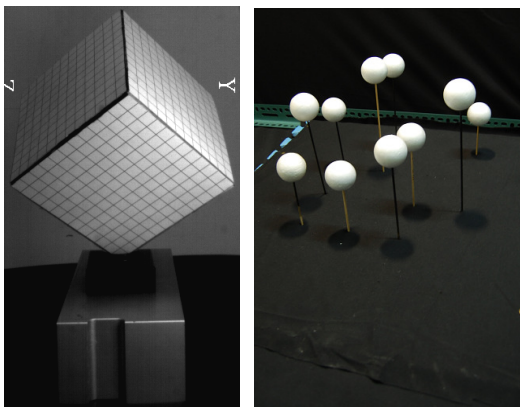


圖 5-5 定位方塊(左)與定位板(右)

為了降低校正的複雜性，我們想到一個解決方案，不僅可以降低定位工作的複雜性，又可提升定位結果的準確度-定位板(圖 5-5 右)。在平穩的板子上，分別在標定的位置插上已知高度的桿子，因此球心的世界座標

$[X_w, Y_w, Z_w]$ 對於這塊校正板都是以知且固定的，再將這塊校正板對準並固定於實驗環境骨架中的固定位置即可使用。

4. 使用單晶片觸發相機拍攝時間

因為我們實作的系統是對於高速運動中的物體，如果要做到準確的座標重建，則相機的拍攝時間必須要是完全相同的情況下才有辦法做到，只要有些微的時間差，重建的座標點對於真實的位置一定會有很嚴重的偏差。為

了克服這個問題，我們使用 Microchip 的 PIC16C54 單晶片加上 4MHz 外部震盪器，來達到每 20ms(50fps)就從外部定時觸發相機拍攝，使兩台相機(C1、C2)的拍攝時間相同且非常準確。

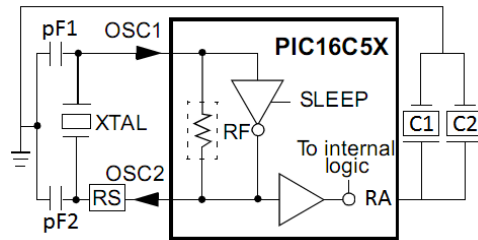


圖 4-7 相機觸發裝置晶片電路圖

6. 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] 趙光興、于春雨，”基於雙目視覺三維測量系統平台的搭建與實現”，安徽工業大學學報，Vol.26 No.4，2009。
- [3] 鐘國亮，影像處理與電腦視覺導論，東華，2008。
- [4] Canny, J., “A Computational Approach to Edge. Detection”, *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8:679-714, November 1986.
- [5] Remondino, F. and Roditakis, A., ”3D Reconstruction of Human Skeleton from Single Images or Monocular Video Sequences”, *Pattern Recognition Symposium*, pp.100-107, 2003.
- [6] Otsu, N., “A threshold selection method from gray-level histograms”, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol.9, No. 1, pp.62-66, 1979.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Roh, Y.J. and Cho, H.S., “Implementation of uniform and simultaneous ART for 3-D reconstruction in an X-ray imaging system”, *IEE Proceedings – Vision, Image, and Signal Processing*, Vol.151, No.5, October 2004.