

國立交通大學

電機與控制工程學系

碩 士 論 文

密度基礎群聚色彩一致性法之三維物體模型重建

A Density-Based Clustering Color Consistency
Method for 3D Object Reconstruction

研 究 生：呂宥瑾

指 導 教 授：林昇甫 博士

中華民國九十七年一月

密度基礎群聚色彩一致性法之三維物體模型重建

A Density-Based Clustering Color Consistency Method
for 3D Object Reconstruction

研究生：呂宥瑾

Student: Yu-Ching Lu

指導教授：林昇甫 博士

Advisor: Dr. Sheng-Fuu Lin

國立交通大學

電機與控制工程學系

碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Electrical and Control Engineering

College of Electrical Engineering and Computer Engineering

National Chiao-Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master

in

Electrical and Control Engineering

January 2008

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十七年一月

密度基礎群聚色彩一致性法之三維物體模型重建

研究生：呂宥瑾

指導教授：林昇甫 博士

國立交通大學電機與控制工程學系

摘 要

本論文主要採用**立體像素法**(voxel-based method)來重建三維物體模型，系統可分為四個部分。第一部份為**相機校正**(camera calibration)，目的是取得相機的內、外部參數；第二部分為**影像分割**(image segmentation)，目的是將物體從背景中分離出來；第三部分為三維模型重建，目標是得到三維物體表面點的座標與顏色資訊，而在此步驟中會使用到兩種方法，分別是**立體像素可見度**(voxel visibility)及**色彩一致性**(color consistency)，作法是在三維世界座標中，先建立一個立方體包含有 $N \times N \times N$ 個**立體像素**(voxel)，將每一個立體像素透過相機參數投影在相機的影像平面上，再利用立體像素可見度及色彩一致性方法重建三維物體，其中色彩一致性是本論文重點；第四部分為顯示介面，主要利用VC++程式及OpenGL函式庫將所建立的三維模型顯示出來。

目前常用的色彩一致性方法有**單一臨界值法**(single threshold method)、**直方圖法**(histogram method)及**適應臨界值法**(adaptive threshold method)三種方法，在此提出一種新的色彩一致性方法，主要利用**密度基礎群聚法**(density-based clustering method)來實現色彩一致性，並與其它三種色彩一致性方法做比較。由實驗結果得知，密度基礎群聚法能有效刪除不需要的立體像素且能精確得到立體像素的顏色，使得重建模型更接近實際的三維物體。

A Density-Based Clustering Color Consistency Method for 3D Object Reconstruction

Student: Yu-Ching Lu

Advisor: Dr. Sheng-Fuu Lin

Institute of Electrical and Control Engineering
National Chiao-Tung University

Abstract

A voxel-based approach for 3D object reconstruction is used in this thesis, and there are four steps in the process of a voxel-based 3D reconstruction system. In the first step, the camera is calibrated, and the purpose of camera calibration is to acquire the intrinsic and extrinsic parameters of the camera. Second, image segmentation is executed to extract object from background. Third, a 3D model is built, and the coordinates and colors information of a large amount of surface points of the object are determined. The third step includes two sub-steps that are voxel visibility and color consistency, and color consistency is the main issue of this thesis. Finally, a reconstructed 3D object is displayed by computer language VC++ with OpenGL libraries in the fourth step.

So far, generally speaking, there are three different methods for implementing color consistency, and these three methods are single threshold method, histogram method and adaptive threshold method. A new color consistency method by using the density-based clustering method is proposed in the thesis, and the proposed method is compared with the other three color consistency methods. According to the experimental results, the proposed method can eliminate the unnecessary voxels and determine the true colors of voxels very well.

誌 謝

首先要以最誠摯的謝意，感謝我的指導教授林昇甫博士，感謝他在研究上的啟迪與指導，以及在待人處事上的諄諄教誨。同時也要感謝本實驗室的學長、同學和學弟，由於他們熱心的協助與討論，使得研究過程中的困境能夠迎刃而解。

最後要感謝我親愛的父母，感謝他們的養育之恩，以及對我的鼓勵與支持，使我得以在精神和經濟上無後顧之憂，順利完成學業。



目錄

中文摘要	i
Abstract	ii
誌謝	iii
目錄	iv
圖目錄	vi
表目錄	x
	
第一章 緒論	1
1.1 相關研究	1
1.2 研究動機	2
1.3 論文架構	4
第二章 相關知識及理論	5
2.1 相機校正原理	6
2.2 影像分割技術	11
2.2.1 色彩空間轉換	11
2.2.2 臨界值法	13

2.2.3 型態學運算	14
2.3 立體像素色彩法	16
2.4 DBSCAN 演算法	19
第三章 以立體像素為基礎之三維模型重建系統	21
3.1 系統概述	22
3.2 相機校正	23
3.3 影像分割	26
3.4 立體像素可見度	29
3.5 色彩一致性	31
3.5.1 單一臨界值法	31
3.5.2 適應臨界值法	31
3.5.3 直方圖法	33
3.5.4 密度基礎群聚法	34
3.6 顯示介面	37
第四章 實驗結果與分析	38
4.1 實驗機制	38
4.1.1 峰值訊噪比	39
4.1.2 投影誤差	39
4.2 實驗結果	40
4.3 實驗分析	69
第五章 結論	72
參考文獻	73



圖目錄

2.1	針孔相機模型。	7
2.2	RGB 色彩模型。	11
2.3	HIS 色彩模型。	12
2.4	灰階直方圖 1。	13
2.5	灰階直方圖 2。	13
2.6	膨脹運算。(a) 膨脹前影像；(b) 結構元素；(c) 膨脹後影像。	14
2.7	侵蝕運算。(a) 侵蝕前影像；(b) 結構元素；(c) 侵蝕後影像。	15
2.8	立體像素與相機影像平面。	16
2.9	空間中的立體像素。	17
2.10	遮蔽情形。	18
2.11	核心點與邊緣點。	19
2.12	直接密度可到達與密度可到達。	20
2.13	密度可連接。	20
2.14	離群值。	20
3.1	系統架構圖。	22
3.2	相機校正工具箱視窗。	23
3.3	選取轉角點。	24
3.4	影像分割流程圖。	26
3.5	建立前景遮罩影像的圖例。(a) 輸入影像；(b) 背景影像；(c) 前景遮罩。	27
3.6	背景相減法運算後結果。	27
3.7	臨界值法運算後結果。	28
3.8	二值化影像。(a) 型態學運算前；(b) 型態學運算後。	28

3.9	影像分割結果。	28
3.10	相機配置方式。(a) 適用於物體重建；(b) 適用於場景重建。	29
3.11	物體與相機的世界座標關係。	29
3.12	序數可見性。	30
3.13	相機影像平面 I 值。(a) 初始化；(b) 立體像素 P 重建之後。	30
3.14	立體像素與表面。(a) S_{π^k} 小， \bar{S} 小；(b) S_{π^k} 大， \bar{S} 大；(c) S_{π^k} 大， \bar{S} 大；(d) S_{π^k} 大， \bar{S} 小。	32
3.15	密度基礎群聚色彩一致性法流程圖。	34
3.16	立體像素投影到相機影像平面。	35
3.17	像素集合 RGB 色彩空間資料分布。	35
3.18	密度基礎群聚法分群結果。	36
3.19	拍攝至顯示介面流程。	37
4.1	三維模型重建使用色彩一致性方法與無使用色彩一致性方法。	38
4.2	大象模型。(a) 原圖；(b) 單一臨界值法重建結果；(c) 適應臨界值法重建結果；(d) 直方圖法重建結果；(e) 密度基礎群聚法重建結果。	40
4.3	大象模型凹陷部位。(a) 原圖；(b) 凹陷部位放大；(c) 單一臨界值法重建結果；(d) 適應臨界值法重建結果；(e) 直方圖法重建結果；(f) 密度基礎群聚法重建結果。	41
4.4	大象模型眼睛部位。(a) 原圖；(b) 眼睛部位放大；(c) 單一臨界值法重建結果；(d) 適應臨界值法重建結果；(e) 直方圖法重建結果；(f) 密度基礎群聚法重建結果。	42
4.5	投影誤差曲線。	44
4.6	時間曲線。	45
4.7	熊模型。(a) 原圖；(b) 單一臨界值法重建結果；(c) 適應臨界值法重建結果；(d) 直方圖法重建結果；(e) 密度基礎群聚法重建結果。	46
4.8	熊模型肚子部位。(a) 原圖；(b) 肚子部位放大；(c) 單一臨界值法重建結果；(d) 適應臨界值法重建結果；(e) 直方圖法重建結果；(f) 密度基礎群聚法重建結果。	47
4.9	投影誤差曲線。	49

4.10 時間曲線。	50
4.11 老鼠模型。(a) 原圖；(b) 單一臨界值法重建結果；(c) 適應臨界值法重建結果；(d) 直方圖法重建結果；(e) 密度基礎群聚法重建結果。	51
4.12 老鼠模型眼睛部位。(a) 原圖；(b) 眼睛部位放大；(c) 單一臨界值法重建結果；(d) 適應臨界值法重建結果；(e) 直方圖法重建結果；(f) 密度基礎群聚法重建結果。	52
4.13 投影誤差曲線。	54
4.14 時間曲線。	55
4.15 狗模型。(a) 原圖；(b) 單一臨界值法重建結果；(c) 適應臨界值法重建結果；(d) 直方圖法重建結果；(e) 密度基礎群聚法重建結果。	56
4.16 狗模型鏤空部位。(a) 原圖；(b) 鏤空部位放大；(c) 單一臨界值法重建結果；(d) 適應臨界值法重建結果；(e) 直方圖法重建結果；(f) 密度基礎群聚法重建結果。	57
4.17 狗模型凹陷部位。(a) 原圖；(b) 凹陷部位放大；(c) 單一臨界值法重建結果；(d) 適應臨界值法重建結果；(e) 直方圖法重建結果；(f) 密度基礎群聚法重建結果。	58
4.18 投影誤差曲線。	60
4.19 時間曲線。	61
4.20 魚模型。(a) 原圖；(b) 單一臨界值法重建結果；(c) 適應臨界值法重建結果；(d) 直方圖法重建結果；(e) 密度基礎群聚法重建結果。	62
4.21 魚模型原圖。(a) 角度 0 度；(b) 角度 30 度；(c) 角度 60 度；(d) 角度 90 度；(e) 角度 120 度；(f) 角度 150 度；(g) 角度 180 度；(h) 角度 210 度；(i) 角度 240 度；(j) 角度 270 度；(k) 角度 300 度；(l) 角度 330 度。	64
4.22 魚模型反面。(a) 原圖；(b) 單一臨界值法重建結果；(c) 適應臨界值法重建結果；(d) 直方圖法重建結果；(e) 密度基礎群聚法重建結果。	65
4.23 投影誤差曲線。	67
4.24 時間曲線。	68
4.25 凹陷的表面結構與重建結果。(a) 凹陷表面 1；(b) (a)之重建結果；(c) 凹陷表面 2；(d) (c)之重建結果。	69

4.26 S_{z^k} 值大和 \bar{S} 值大的情形。(a) 立體像素在表面；(b) 立體像素不在表面。 70



表目錄

4.1 重建影像 PSNR 平均值。	43
4.2 重建影像角度。	43
4.3 鑑定影像 PSNR 平均值。	43
4.4 鑑定影像角度。	43
4.5 投影誤差。	44
4.6 時間(秒)。	45
4.7 重建影像 PSNR 平均值。	48
4.8 重建影像角度。	48
4.9 鑑定影像 PSNR 平均值。	48
4.10 鑑定影像角度。	48
4.11 投影誤差。	49
4.12 時間(秒)。	50
4.13 重建影像 PSNR 平均值。	53
4.14 重建影像角度。	53
4.15 鑑定影像 PSNR 平均值。	53
4.16 鑑定影像角度。	53
4.17 投影誤差。	54
4.18 時間(秒)。	55
4.19 重建影像 PSNR 平均值。	59
4.20 重建影像角度。	59
4.21 鑑定影像 PSNR 平均值。	59
4.22 鑑定影像角度。	59
4.23 投影誤差。	60
4.24 時間(秒)。	61

4.25 重建影像 PSNR 平均值。	66
4.26 重建影像角度。	66
4.27 鑑定影像 PSNR 平均值。	66
4.28 鑑定影像角度。	66
4.29 投影誤差。	67
4.30 時間(秒)。	68



第一章

緒論

在三度空間中，人類眼睛所看到的是立體的世界，自然需要能忠實呈現物體或周遭環境三維面貌的技術。想要藉由二維影像重建三維模型，一直是電腦視覺所探討的一個議題，雖然這個議題的研究有一段長時間的歷史，可是進展卻十分有限。然而隨著多媒體與電腦視覺的愈益重要，以及電腦科技的日新月異，目前的個人電腦已經可以顯示複雜的三維模型，加上許多電腦遊戲都架構在三維世界中，網際網路用到三維模型和三維環境的機會也愈來愈多，這樣的趨勢讓三維模型重建愈顯的重要。



1.1 相關研究

在多媒體蓬勃的科技時代，現實生活中景物的展示不該停留在平面媒體時代的靜態相片表現，而是要做到動態立體真實影像呈現，其方式可分為下列三大類：

- (1) 使用三維模型製作軟體，如 3D MAX、MAYA 等軟體，以半自動的方式建構出物體的幾何形狀，物體的三維位置，形狀，顏色甚至於質感都由軟體控制，此種方式並不需要有實物存在。
- (2) 經由環物或環場的技术拍攝多張不同角度的影像，可以依不同角度看到的影像排列成一個影像序，把這個影像序播放出來就猶如看到物體不同角度的影像，此種方式並不需要重建三維模型。
- (3) 利用多張二維影像，重建物體的三維模型，再搭配真實拍攝的物體表面紋理映

射。

在第三大類中，依照重建三維模型的方式，目前可以分成幾種作法：

- 1.雷射掃描法(laser scanner method)
- 2.條狀光柵法(stripe generator method)
- 3.立體視角法(stereoscope method)
- 4.體積交集法(volume intersection method)
- 5.立體像素法(voxel-based method)

雷射掃描法[1]與條狀光柵法[2]-[4]是採取主動式光源，使用雷射或其它高亮度光源，可以避免處理特徵點方面的問題。立體視角法[5]是採取被動式光源，就是物體在自然光下作反射，必須解決**特徵點**(feature point)與**特徵對應**(feature correspondence)等問題。若物體表面均勻，則無特徵點可言，為了避開此困難，遂有體積交集法[6]與立體像素法[7]產生。上述的方法都有其困難存在，本篇論文將在下一節說明。



1.2 研究動機

使用三維模型製作軟體是一種最直接的方法，物體的三維位置，形狀，顏色甚至於質感都由軟體控制，也不需要實物存在，目前的電腦圖學已經發展到一定的程度，雖說可以建構出複雜的三維模型，但畢竟是人造的，還是不如真實物體來的逼真，而且要得那麼複雜的模型，也得花費非常大的心力，且需要一定電腦操作技術才能達成。

經由環物或環場的技术拍攝多張不同角度的影像，可以依不同角度看到的影像排列成一個影像序，把這個影像序播放出來就猶如看到物體不同角度的影像，此種方式並不需要重建三維模型，也沒有真正的三維模型，有的只是很多不同角度的影像而已，當觀察者想看看物體的另一面或是走進走遠去看時，往往沒辦法從這樣的方法得到結果，因為拍攝的影像有限，很難把所有的情形都包含進去。

雷射掃描法與條狀光柵法藉由三維掃描器，以雷射光束掃描物體周遭，再將掃得三度空間資料傳入電腦中，亦可完成一件與原物體相似度頗高的三維模型，這是目前工業界在數位化逆向工程系統常採用方式，但由於反射光束會受到物體表面材質光滑與否及顏色不同而有不同的結果，加上雷射立體掃描系統價格昂貴，無法普及。

立體視角法為目前最常見到的方法，使用成對的攝影機對物體取像，經由攝影機與物體的成像幾何關係，以及對影像對找尋特徵點與特徵比對的工作之後，對特徵點進行深度推導，遂將物體的三維模型建出。此方法最大的困難就在於特徵點與特徵比對，因為當物體為均勻表面時，會造成缺少特徵點的問題，而重覆的表面紋理會造成對特徵比對的困難。

體積交集法一般使用八分樹(octree)與**線段實體模型(line-based solid model)**，只用物體成像的輪廓線，不必找尋特徵點，也沒有特徵點與特徵比對的問題，只要物體表面的點出現在某張照片的輪廓上，即可利用投影線的交集去算，所面臨的缺點主要是物體凹陷的表面無法出現在物體的輪廓上。

對於動態立體真實影像呈現，上述方法有的費力且不切實際，有的有模型重建上的困難與限制，立體像素法為比較符合實際且合理的方法。立體像素法的架構會在第三章詳加說明，而影響立體像素法重建三維模型的表現在於**色彩一致性(color consistency)**的方法，參考文獻中常見的色彩一致性的方法有**單一臨界值法(single threshold method)**、**直方圖法(histogram method)**及**適應臨界值法(adaptive threshold method)**，本篇論文欲提出一個新的色彩一致性方法，主要利用**密度基礎群聚法(density-based clustering method)**來實現色彩一致性，改善三維模型重建之表現。

1.3 論文架構

本篇論文剩餘章節的安排如下：論文使用到的一些相關知識與理論會在第二章作簡要的描述，以**立體像素(voxel)**為基礎之三維模型重建系統會在第三章提出並且作詳細的說明，實驗結果及分析會詳列在第四章，最後第五章會作一些結論。



第二章

相關知識及理論

在三維模型重建之前，必須先進行相機校正(camera calibration)與影像分割(image segmentation)的工作，相機校正的目的是要取得相機的內、外部參數，而影像分割的目的是為了將物體從背景中分離出來。而立體像素色彩法(voxel coloring method)為三維模型重建之方法，將空間中的物體當作由眾多的立體像素所組成，再將一個一個立體像素重建，進而將模型重建出來。本篇論文使用了密度基礎群聚法來實現色彩一致性，密度基礎群聚法依據資料點的分佈密度來決定是否形成群聚，本篇論文所採用的演算法為 DBSCAN(Density Based Spatial Clustering of Applications with Noise)。

與本篇論文相關的知識及理論將會在此章節說明，相機校正原理會在 2.1 節中介紹，一些影像分割的相關技術會在 2.2 節中介紹，立體像素色彩法將在 2.3 節中介紹，DBSCAN 演算法會在 2.4 節中介紹。

2.1 相機校正原理

相機校正一直是困難的議題，原因在相機校正的研究中牽涉較多的數學與一些光學模式，本節將介紹參考文獻[8]中的內容，在相機校正的領域中，參考文獻[8]是一篇很有代表性的文章。

有三個座標系統，分別為世界座標系統(world coordinate system)、相機座標系統(camera coordinate system)和二維的影像座標系統(image coordinate system)。利用旋轉矩陣 R 和平移向量 T ，可將世界座標系統和相機座標系統聯繫起來，式子如下：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + T$$
$$R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}$$

而相機座標系統與影像座標系統的關係可用針孔相機模型(pinhole camera model)來說明，如圖 2.1 所示，根據三角比例關係，可得：

$$X_t = f \frac{x}{z}$$
$$Y_t = f \frac{y}{z} \quad (2.2)$$

其中 f 為相機的焦距(focal length)。

(X_t, Y_t) 為 P 投射到影像座標系統的理想位置，由於受到透鏡的輻射效應， P 實際投射到影像座標系統的位置應為 (X_a, Y_a) ，且關係如下：

$$\begin{aligned} X_a + E_x &= X_t \\ Y_a + E_y &= Y_t \end{aligned} \quad (2.3)$$

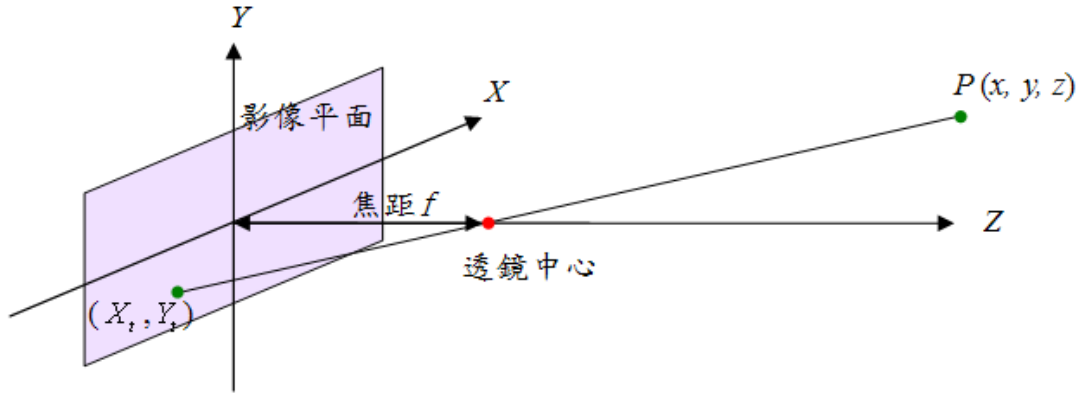


圖 2.1 針孔相機模型。

其中 E_x 和 E_y 為誤差項，可表示為：

$$\begin{aligned} E_x &= X_a(k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ E_y &= Y_a(k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ r &= \sqrt{X_a^2 + Y_a^2} \end{aligned} \quad (2.4)$$

上面式子中的係數 k_1 和 k_2 為待求的參數，在光學透鏡**輻射失真**(radial distortion)的影響下，內部參數 k_1 和 k_2 往往滿足 k_1 遠大於 k_2 ，這時令 $k_2 = 0$ ，只關心 k_1 的求解。

前面所提的 (X_a, Y_a) 為實數，而數位影像的座標系統之座標，一般皆為整數座標 (X_l, Y_l) 。在介紹 (X_a, Y_a) 和 (X_l, Y_l) 的關係前，先引入影像**感應器**(sensor)為媒介以便將 (X_a, Y_a) 和 (X_l, Y_l) 的關係聯繫起來。假設感應器的 $X(Y)$ 方向共有 $S_x(S_y)$ 個感應器，兩個感應器中心點距離為 d_x ， N_x 為影像在 X 方向的解析度，令

$$d'_x = d_x \frac{S_x}{N_x} \quad (2.5)$$

而 (C_x, C_y) 分別為數位影像的中心座標，於是 (X_a, Y_a) 和 (X_l, Y_l) 存在有下列的關係：

$$\begin{aligned} X_l &= C_x + s \frac{X_a}{d'_x} \\ Y_l &= C_y + \frac{Y_a}{d'_y} \end{aligned} \quad (2.6)$$

其中 s 為放大係數。目前已經將三個座標系統的關係建立起來了，將式子(2.2)至式子(2.6)整理可得：

$$\begin{aligned}
f \frac{x}{z} &= X_t = X_a + E_x = X_a + X_a k_1 r^2 \\
&= \frac{(X_i - C_x) d'_x}{s} + \frac{(X_i - C_x) d'_x k_1 r^2}{s} \\
&= \frac{\bar{X} d'_x}{s} + \frac{\bar{X} d'_x k_1 r^2}{s} \\
f \frac{y}{z} &= d_y \bar{Y} + d_y \bar{Y} k_1 r^2
\end{aligned} \tag{2.7}$$

將式子(2.1)代入式子(2.7)整理可得：

$$\begin{aligned}
\frac{\bar{X} d'_x}{s} + \frac{\bar{X} d'_x k_1 r^2}{s} &= f \frac{r_1 x_w + r_2 y_w + r_3 z_w + T_x}{r_7 x_w + r_8 y_w + r_9 z_w + T_z} \\
d_y \bar{Y} + d_y \bar{Y} k_1 r^2 &= f \frac{r_4 x_w + r_5 y_w + r_6 z_w + T_y}{r_7 x_w + r_8 y_w + r_9 z_w + T_z}
\end{aligned} \tag{2.8}$$

旋轉矩陣 R 可改寫成下式：

$$R = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \sin \psi \cos \theta & -\sin \theta \\ -\sin \psi \cos \phi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi & \cos \psi \cos \phi & \cos \theta \sin \phi \\ \sin \psi \sin \phi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi & -\cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \tag{2.9}$$

推導致此，已經將六個外部參數(extrinsic parameter)和五個內部參數(intrinsic parameter)的關係聯繫起來了。這六個外部參數分別為 ψ 、 θ 、 ϕ 、 T_x 、 T_y 、 T_z ，

且五個內部參數分別為 f 、 s 、 k_1 、 C_x 、 C_y ，接下來就是利用數值的方法求解這些參數，這也是相機校正的主要工作。

先解出五個外部參數 ψ 、 θ 、 ϕ 、 T_x 、 T_y 。在二維影像座標上取一經過原點的向量 (X_a, Y_a) ，且在相機座標上取一平行 (X_a, Y_a) 的向量 (x, y) ，因為向量 (X_a, Y_a) 平行於 (x, y) ，所以得：

$$\begin{aligned}
(X_a, Y_a) \times (x, y) &= 0 \\
X_a \cdot y - Y_a \cdot x &= 0 \\
X_a (r_4 x_w + r_5 y_w + r_6 z_w + T_y) &= Y_a (r_1 x_w + r_2 y_w + r_3 z_w + T_x)
\end{aligned} \tag{2.10}$$

因為 z 軸的值可以不理它，令 $z_w = 0$ ，則可以得到：

$$\begin{bmatrix} Y_a x_w & Y_a y_w & Y_a & -X_a x_w & -X_a y_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_y^{-1} r_1 \\ T_y^{-1} r_2 \\ T_y^{-1} T_x \\ T_y^{-1} r_4 \\ T_y^{-1} r_5 \end{bmatrix} = X_a \quad (2.11)$$

利用五組世界座標 (x_w, y_w, z_w) 和五組底片上的真實座標 (X_a, Y_a) 就可解出 $T_y^{-1} r_1$ 、

$T_y^{-1} r_2$ 、 $T_y^{-1} T_x$ 、 $T_y^{-1} r_4$ 、 $T_y^{-1} r_5$ 。關於內部參數 T_y 的求解，令

$$C = \begin{bmatrix} \bar{r}_1 & \bar{r}_2 \\ \bar{r}_4 & \bar{r}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_y^{-1} r_1 & T_y^{-1} r_2 \\ T_y^{-1} r_4 & T_y^{-1} r_5 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

則旋轉矩陣可改寫成下式：

$$R = \begin{bmatrix} \bar{r}_1 T_y & \bar{r}_2 T_y & r_3 \\ \bar{r}_4 T_y & \bar{r}_5 T_y & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

利用 R 中每一行向量為單位長和每一列向量為單位長，可得下式：

$$R = \begin{bmatrix} \bar{r}_1 T_y & \bar{r}_2 T_y & \pm[1 - T_y^2(\bar{r}_1^2 + \bar{r}_2^2)]^{\frac{1}{2}} \\ \bar{r}_4 T_y & \bar{r}_5 T_y & \pm[1 - T_y^2(\bar{r}_4^2 + \bar{r}_5^2)]^{\frac{1}{2}} \\ \pm[1 - T_y^2(\bar{r}_1^2 + \bar{r}_4^2)]^{\frac{1}{2}} & \pm[1 - T_y^2(\bar{r}_2^2 + \bar{r}_5^2)]^{\frac{1}{2}} & \pm(-1 + M T_y^2)^{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

其中 $M = \bar{r}_1^2 + \bar{r}_2^2 + \bar{r}_4^2 + \bar{r}_5^2$ 。

因為 R 為正交矩陣，任兩行的內積為零，利用 R 中第一行和第二行內積為零的條件，可得：

$$(\bar{r}_1 \bar{r}_5 + \bar{r}_2 \bar{r}_4)^2 T_y^4 - M T_y^2 + 1 = 0 \quad (2.15)$$

上面等式中的 T_y^2 可視為一個待解的變數，上面等式可解得 T_y^2 的兩個解為

$$T_y^2 = \frac{M \pm [M^2 - 4(\bar{r}_1 \bar{r}_5 + \bar{r}_2 \bar{r}_4)^2]^{\frac{1}{2}}}{2(\bar{r}_1 \bar{r}_5 + \bar{r}_2 \bar{r}_4)^2} \quad (2.16)$$

解出 T_y 的值後，以及先前解出的 $T_y^{-1}r_1$ 、 $T_y^{-1}r_2$ 、 $T_y^{-1}T_x$ 、 $T_y^{-1}r_4$ 、 $T_y^{-1}r_5$ ，可以解出 r_1 、 r_2 、 T_x 、 r_4 、 r_5 。再利用 r_1 、 r_2 、 r_4 、 r_5 和式子(2.9)以及式子(2.14)可解出 R 內其它未知元素以及 ψ 、 θ 、 ϕ 。

目前為止已解出五個外部參數 ψ 、 θ 、 ϕ 、 T_x 、 T_y 。接下來求解 T_z 和 f ，將式子(2.8)中 k_1 和 z_w 設為零，可得：

$$d_y \bar{Y} = f \frac{r_4 x_w + r_5 y_w + T_y}{r_7 x_w + r_8 y_w + T_z} \quad (2.17)$$

上式可改寫成

$$\begin{bmatrix} t_1 & -d_y \bar{Y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \\ T_z \end{bmatrix} = t_2 d_y \bar{Y} \quad (2.18)$$

其中 $t_1 = r_4 x_w + r_5 y_w + T_y$ 且 $t_2 = r_7 x_w + r_8 y_w$ 。利用多於兩組世界座標 (x_w, y_w, z_w) 和兩組底片上的真實座標 (X_a, Y_a) 就可解出 f 和 T_z ，然後以此 f 和 T_z 及令 $k_1 = 0$ 為初始值來解非線性方程式

$$d_y \bar{Y} + d_y \bar{Y} k_1 r^2 = f \frac{t_1}{t_2 + T_z} \quad (2.19)$$

則可透過數值的解法求得 (f, T_z, k_1) 的逼近解，在參考文獻[8]中， (C_x, C_y) 取底片座標的中心，而 $s = 1$ 。

2.2 影像分割技術

本節將介紹本篇論文所使用到的一些影像處理技術，內容是依據參考文獻[9]中的內容。色彩空間轉換將在 2.2.1 節介紹，型態學(morphological)將在 2.2.2 節介紹，臨界值法將在 2.2.3 節介紹。

2.2.1 色彩空間轉換

在 RGB 色彩模型中，每種色彩是以其紅色、綠色、藍色的主要頻譜分子來顯現，此模型是建立在直角座標系統的基礎上，假定所有的色彩值都已經被正規化， R 、 G 、 B 的值都在 $[0,1]$ 的範圍內，如圖 2.2 所示，其中紅色、綠色、藍色分別在三個頂點上，青色、紫紅和黃色在另外三個頂點上，黑色在原點上，白色是離原點最遠的頂點上。

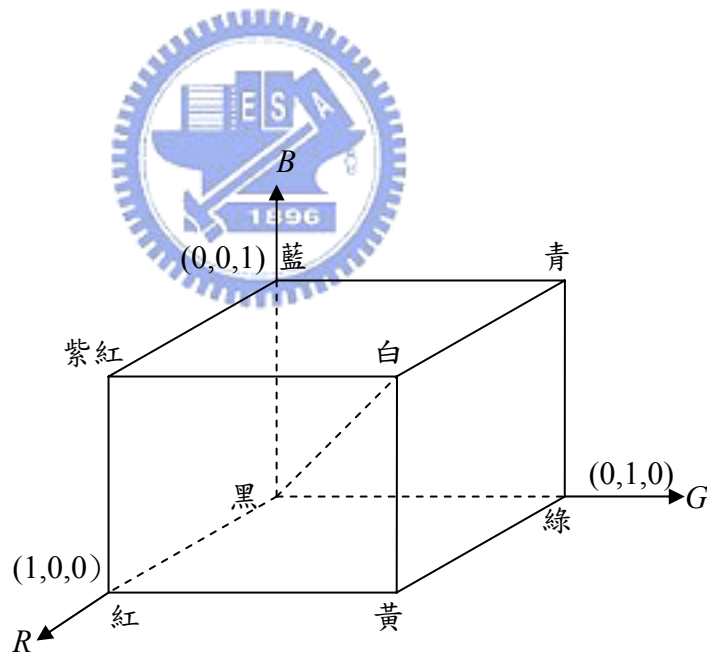


圖 2.2 RGB 色彩模型。

以 RGB 色彩模型表示的影像是由三個分量影像所組成，每個原色對應一個分量影像，RGB 色彩系統極適合硬體實現，與人眼強烈感受到紅、綠、藍原色的事實相當吻合，然而 RGB 色彩系統卻不適合用來描述色彩。

因此提出了 HSI 色彩模型，如圖 2.3 所示。當看到一個彩色物體時，用色調 (hue)、飽和度 (saturation) 及強度 (intensity) 來描述它。色調是描述純色彩的一個色彩屬性，而飽和度則是一個純色彩添加白光之程度的測量，強度是事實上不可能測量的一個主觀描述子，HIS 參數表示如下：

$$H = \begin{cases} \theta, & \text{if } B \leq G \\ 360 - \theta, & \text{if } B > G \end{cases} \quad (2.20)$$

其中

$$\theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2}[(R-G) + (R-B)]}{\left[(R-G)^2 + (R-B)(G-B) \right]^{1/2}} \right\} \quad (2.21)$$

$$S = 1 - \frac{3}{(R+G+B)} [\min(R, G, B)] \quad (2.22)$$

$$I = \frac{1}{3}(R+G+B) \quad (2.23)$$

其中 R 、 G 、 B 為像素紅、綠、藍之分量。

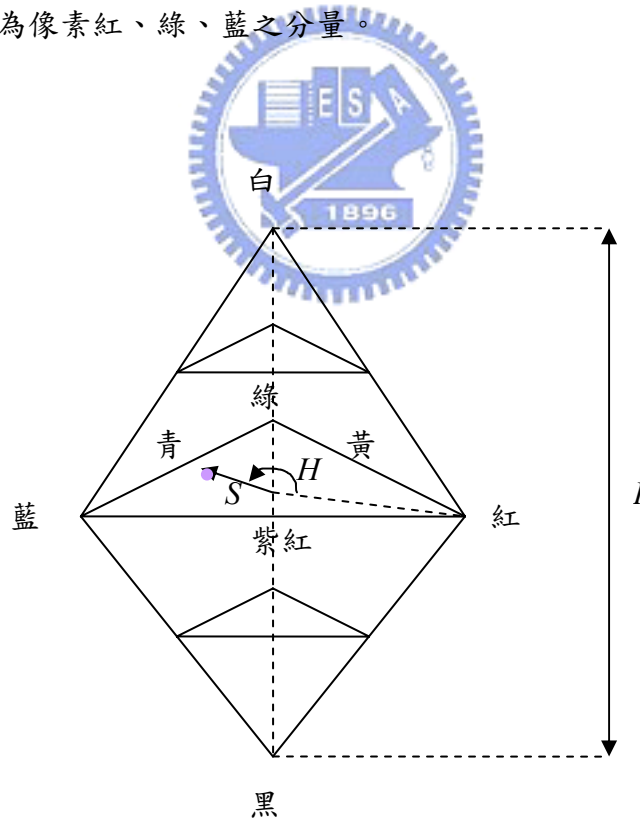


圖 2.3 HIS 色彩模型。

2.2.2 臨界值法

臨界值法常常應用在影像分割處理上，影像經由臨界值法二值化，以便將前景與背景分離。假設一幅影像是由在陰暗背景上的明亮物體所組成，其灰階直方圖如圖 2.4 所示。

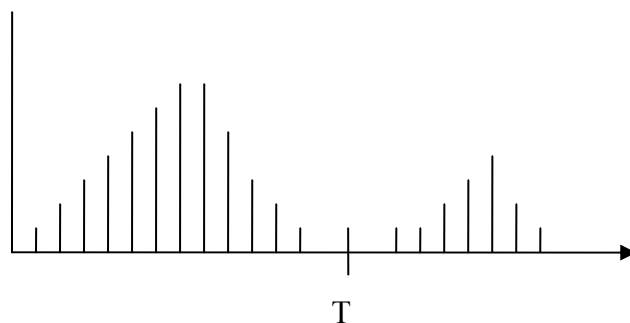


圖 2.4 灰階直方圖 1。

物體和背景的像素被分組為兩個主要模式的灰階，從背景中抽取物體的一個方式是選擇臨界值 T 將影像二值化，一個臨界值化的影像 $g(x,y)$ 定義為

$$g(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{if } f(x,y) > T \\ 0, & \text{if } f(x,y) < T \end{cases} \quad (2.24)$$

其中 $f(x,y)$ 是點 (x,y) 的灰階值。 $g(x,y)$ 標記為 1 的像素對應於物體，標記為 0 的像素對應於背景。圖 2.5 為更普遍的情況，在此影像的直方圖上有三個主要模式的特徵，可利用兩個臨界值 T_1 和 T_2 將三個模式分離出來，此種方法為多階臨界值法。

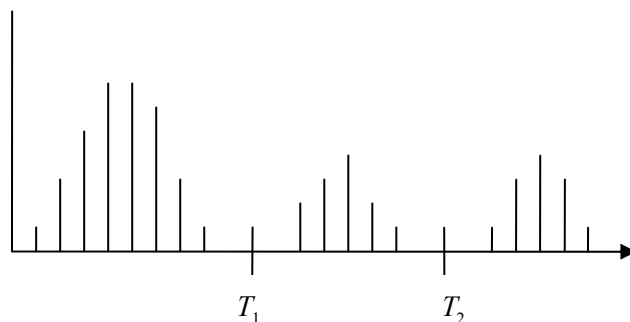


圖 2.5 灰階直方圖 2。

2.2.3 型態學

形態學有許多各式各樣的運算可以用來處理物體的外形及結構，這些運算是使用在二值化影像。膨脹(dilation)及侵蝕(erosion)是兩種最基本的運算，斷開(opening)及閉合(closing)運算是膨脹及侵蝕這兩種運算的延伸，這四種運算會在此章節作說明。

首先介紹一些基本定義，設 A 和 B 是 Z^2 中的兩個集合，則 A 平移點 $z = (z_1, z_2)$ ，用 $(A)_z$ 表示之，定義為

$$(A)_z = \{c \mid c = a + z, a \in A\} \quad (2.25)$$

B 的反射，用 \hat{B} 表示之，定義為

$$\hat{B} = \{x \mid x = -b, b \in B\} \quad (2.26)$$

假設有一影像的集合為 A ，且有一結構元素的集合為 B ，則 A 被 B 膨脹記為 $A \oplus B$ ，定義為

$$A \oplus B = \{z \mid (\hat{B})_z \cap A \neq \Phi\} \quad (2.27)$$

圖 2.6 是一個膨脹的例子，圖 2.6(a) 中的藍色部分是影像的集合 A ，圖 2.6(b) 中的藍色部分是結構元素的集合 B ，圖 2.6(c) 中的藍色部份是膨脹後的集合。

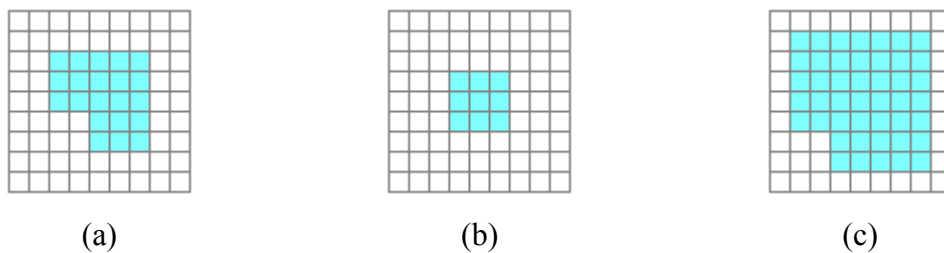


圖 2.6 膨脹運算。(a) 膨脹前影像；(b) 結構元素；(c) 膨脹後影像。

假設有一影像的集合為 A ，且有一結構元素的集合為 B ，則 A 被 B 侵蝕記為 $A \ominus B$ ，定義為

$$A \ominus B = \{z | (B)_z \subseteq A\} \quad (2.28)$$

圖 2.7 是一個侵蝕的例子，圖 2.7(a)中的藍色部分是影像的集合 A ，圖 2.7(b)中的藍色部分是結構元素的集合 B ，圖 2.7(c)中的藍色部份是侵蝕後的集合。

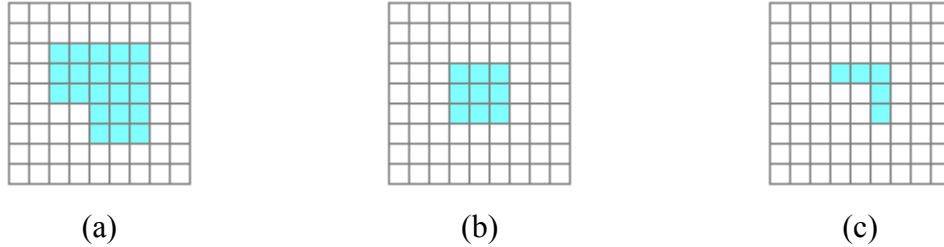


圖 2.7 侵蝕運算。(a) 侵蝕前影像；(b) 結構元素；(c) 侵蝕後影像。

假設有一影像的集合為 A ，且有一結構元素的集合為 B ，則 A 被 B 斷開記為 $A \circ B$ ，定義為

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (2.29)$$

它代表的意思為影像先經過侵蝕後再膨脹。斷開運算可以用來消除物體突出的地方及雜訊。

閉合運算剛好與斷開運算相反， A 被 B 閉合記為 $A \bullet B$ ，定義為

$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B \quad (2.30)$$

它代表的意思為影像先經過膨脹後再侵蝕。閉合運算可以用來消除影像中的空洞及填滿空隙。

總結上述型態學運算與其對應的效果：膨脹運算可以延展影像的邊界；侵蝕運算可以將邊界收縮；斷開運算可以平滑輪廓，將狹長帶截斷，並消除孤立的雜訊點；閉合運算可以平滑輪廓，將狹窄的斷開處接合，以及填滿影像中的小洞。

2.3 立體像素色彩法

三維物體可以經由拍攝的動作，投影在二維影像平面上，透過影像平面上的資訊可以得知物體的形狀與顏色，因此也發展了利用二維影像去重建三維物體的方法，而立體像素色彩法[10][11]就是其中之一。在三維的世界中，可以把所有的物體都假想為是由眾多的點所組成，而這個點稱為立體像素，而拍攝則是將各個立體像素投影到相機影像平面上，若能在相機影像平面上得知立體像素的顏色，就可將物體的三維模型重建出來。

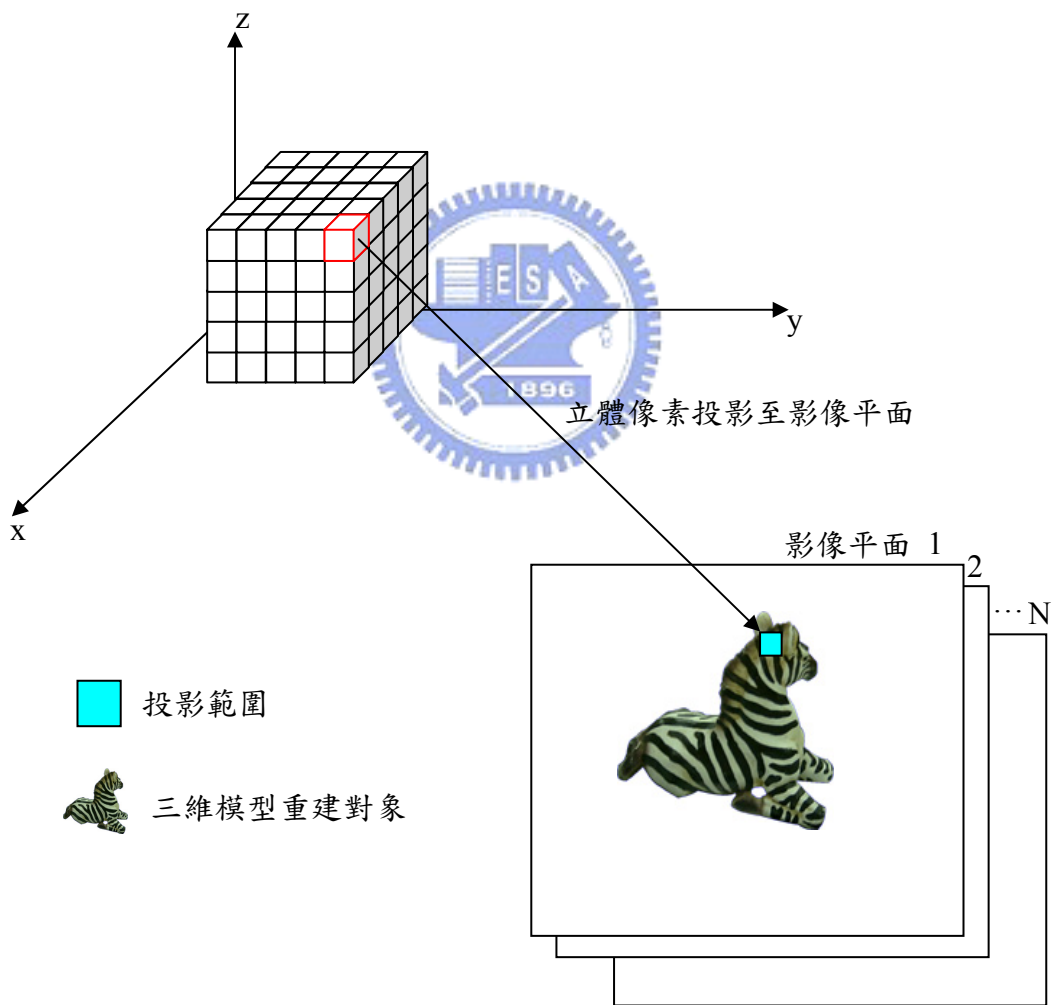


圖 2.8 立體像素與相機影像平面。

在重建之前，必須先建立模型，模型是由 $N \times N \times N$ 個立體像素所組成，有了假想存在於真實世界的模型後，利用相機校正參數去求得立體像素在相機影像平面上的投影範圍，如圖 2.8 所示，可得到立體像素的顏色，以及模型本身就提供了立體像素的位置，進而可以將三維模型重建出來。

然而，並非所有的立體像素都要被重建，根據參考文獻[12]中的內容，立體像素分為三類：

- (1) empty voxel: 存在於物體外面的立體像素，由於並非存在於物體表面，所以在相機影像平面上的投影範圍可能是背景或是物體表面的顏色，因此在不同相機所看到的立體像素顏色差異較大；
- (2) surface voxel: 物體表面上的立體像素，在相機影像平面上的投影範圍為物體表面顏色，因此在不同相機所看到的立體像素顏色差異較小；
- (3) interior voxel: 存在於物體裡面的立體像素，在相機影像平面上的投影範圍為物體表面的顏色，可是不同位置的相機所拍攝到的表面並非唯一，所以在不同相機所看到的立體像素顏色差異較大，情況與 empty voxel 相似。

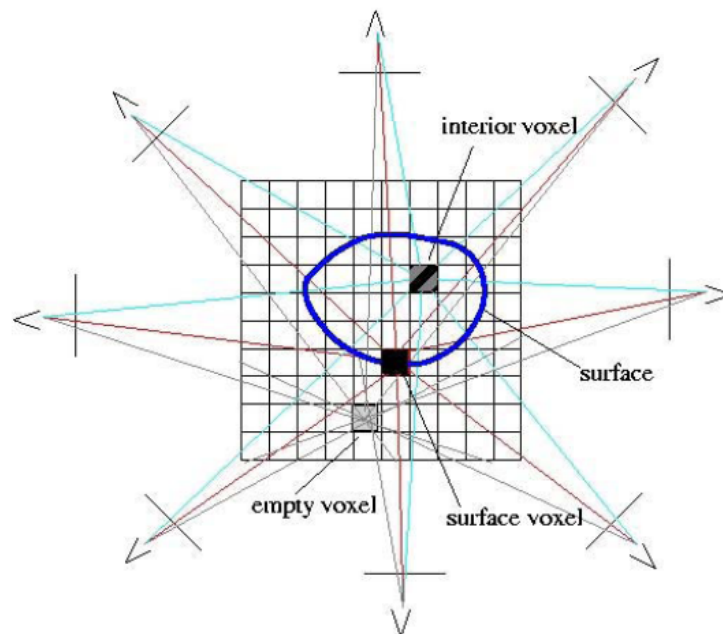


圖 2.9 空間中的立體像素。

而在重建的過程中，只需要對物體表面上的立體像素重建，根據上述可知，物體表面上的立體像素，在不同相機所看到的顏色差異較小，換句話說，色彩較為一致，而判斷色彩是否一致的方法為色彩一致性。若經過色彩一致性方法判定為色彩一致，代表立體像素為物體表面上的立體像素，立體像素可以重建。

然而，在色彩一致性步驟前，必須考慮**遮蔽(occlusion)**，如圖 2.10 所示，五個立體像素都為物體表面上的立體像素，對相機 1 而言，立體像素 p 被立體像素 n 遮蔽了，立體像素 p 確實存在於空間中，但在兩張相機影像平面上所對應的顏色不同，因此立體像素 p 無法重建；對相機 2 而言，立體像素 q 被立體像素 r 遮蔽了，但在兩張相機影像平面上所對應的顏色相同，而立體像素 q 可以重建。

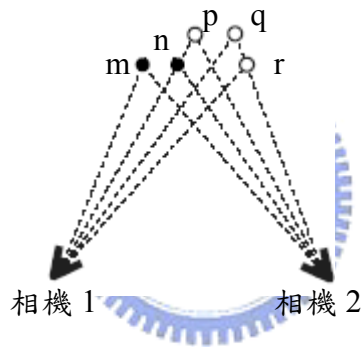


圖 2.10 遮蔽情形。

當遮蔽發生會對三維模型重建造成影響，若能在立體像素 p 重建前，得知有遮蔽發生，則可以知道立體像素 p 只會出現在相機 2 之影像平面上，在不考慮相機 1 之影像平面的情形下，立體像素 p 將會被重建。事實上，在重建過程中，無法得知遮蔽的發生，卻有處理遮蔽的方法，這個方法為**立體像素可見度(voxel visibility)**。立體像素可見度與色彩一致性的方法將在第三章中介紹。

2.4 DBCSAN 演算法

在一個資料集合內，假設有某些資料點的分佈密度相當密集，則這些資料點形成一個群聚，換句話說，在群聚內的資料分佈的密度應該大於群聚外的資料分佈的密度，而 DBCSAN [13]演算法便是基於以上觀念所發展出來的群聚方法。

在 DBCSAN 的方法中，有兩個參數 Eps 和 $MinPts$ 必須先行設定， Eps 是一個半徑值， $MinPts$ 則是最少點的個數，兩個參數的意義為：「資料群中的任一點，在 Eps 半徑內，如果包含超過 $MinPts$ 的點，則可形成群聚」，如圖 2.11 所示，若以 p 點為圓心，以 Eps 為半徑，搜尋半徑內的資料點數大於 $MinPts$ ，則形成群聚， p 點稱為**核心點**(core point)；若是將圓心移至 q 點，卻無法形成群聚，則 q 點稱為**邊緣點**(border point)。

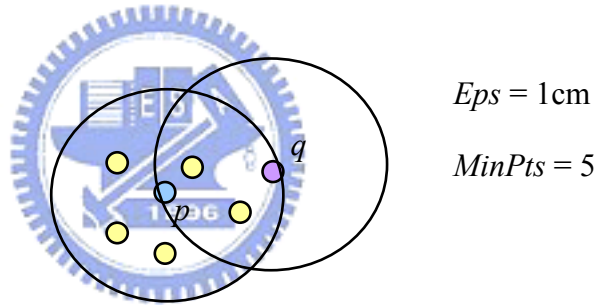


圖 2.11 核心點與邊緣點。

而在核心點 p 的半徑區域內的點可用 $N_{Eps}(p)$ 表示，其定義如下：

$$N_{Eps}(p) = \{q \in D \mid dist(p, q) \leq Eps\} \quad (2.31)$$

其中 $dist(p, q)$ 表示 p 點與 q 點的距離。而在群聚中的資料點之間的關係可分為**直接密度可到達**(directly density-reachable)與**密度可到達**(density-reachable)，如圖 2.12 所示， r 點為 q 點的直接密度可到達，定義為

$$\begin{aligned} r \in N_{Eps}(q) \\ N_{Eps}(q) \geq MinPts \end{aligned} \quad (2.32)$$

若 r 點為 q 點的直接密度可到達，且 q 點為 p 點的直接密度可到達，則 r 點為 p 點

的密度可到達。

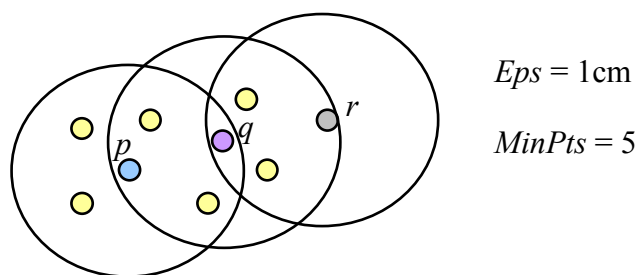


圖 2.12 直接密度可到達與密度可到達。

上述關係衍生出了**密度可連接**(density-connected)的概念，如圖 2.13 所示，若 r 點為 q 點的密度可到達，且 p 點為 q 點的密度可到達，則 r 點與 p 點為密度可連接。

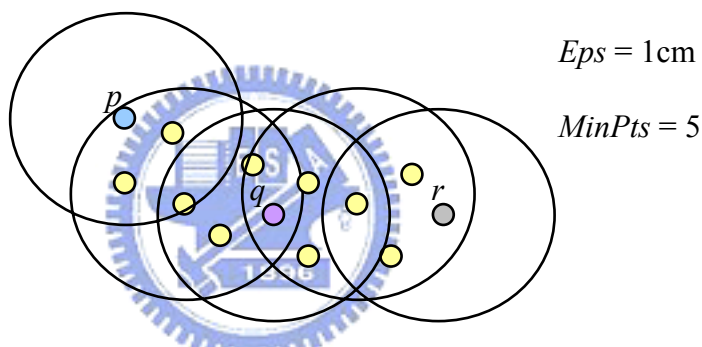


圖 2.13 密度可連接。

藉由可以包含到的資料點，群聚不斷的向外擴展，直到所有資料點分配完成為止，若有資料點未被分配到任何群聚中，如圖 2.14 所示，則將此資料點視為**雜訊**(noise)，有時又稱為**離群值**(outlier)。

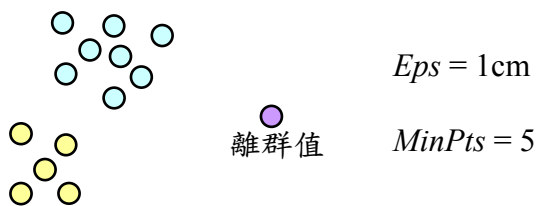


圖 2.14 離群值。

第三章

以立體像素為基礎之三維模型重建系統

想要藉由二維影像重建三維模型，一直是電腦視覺所探討的一個議題，雖然這個議題的研究有一段長時間的歷史，可是進展卻十分有限，由第一章的探討可以知道目前存在許多的相關文獻，但是大部分的方法有的費力且不切實際，有的有模型重建上的困難與限制，立體像素法為比較符合實際且合理的方法，以立體像素為基礎之三維模型重建系統將在本章節介紹。

在章節 3.1 中會概述整個系統的流程，在 3.2 節中會介紹相機校正的方法，在 3.3 節中會介紹影像分割方法與流程，在 3.4 節中會介紹立體像素可見度，在 3.5 節中會介紹色彩一致性，在 3.6 節中會介紹顯示介面。

3.1 系統概述

圖 3.1 為系統的架構，整個系統的流程可以分成四個部份。第一個部分相機校正，相機校正的目的是要取得相機的內、外部參數，進而得知立體像素投影到相機影像平面的位置。第二個部分為影像分割，影像分割的目的是為了將物體從背景中分離出來。第三個部分為三維模型重建，目標是得到三維物體表面點的座標與顏色資訊，而在此步驟中會使用到兩種方法，分別是立體像素可見度及色彩一致性，作法是在三維世界座標中，先建立一個立方體包含有 $N \times N \times N$ 個立體像素，將每一個立體像素透過相機參數投影在相機的影像平面上，再利用立體像素可見度及色彩一致性方法重建三維物體，其中色彩一致性是本論文重點。第四個部分為顯示介面，利用 VC++ 程式及 OpenGL 函式庫，將其顯示出來。

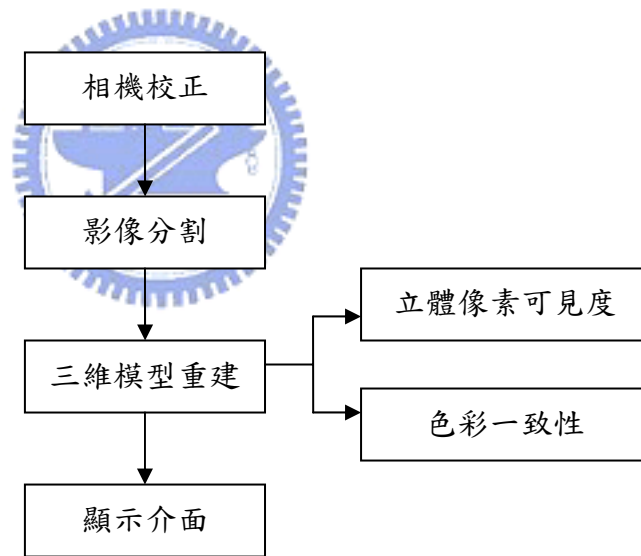


圖 3.1 系統架構圖。

3.2 相機校正

相機校正的目的是要取得相機的內、外部參數。內部參數包含相機的焦距、**主要點**(principal point)、**歪斜係數**(skew coefficient)、以及**失真**(distortion)，這些參數值在拍攝時是固定的。外部參數包含**旋轉**(rotation)及**位移**(translation)，這些參數值會隨著相機位置的不同而改變。

本篇論文使用參考文獻[14]中的**相機校正工具箱**(camera calibration toolbox)來求得相機的內、外部參數，此軟體作業於 Matlab 程式下，工作視窗如圖 3.2 所示。相機校正的步驟分為下列三個：

- (1) Read images：將所需要相機校正影像序列讀入程式中，本篇論文在角度每隔十度拍攝一張，共三十六張相機校正影像；

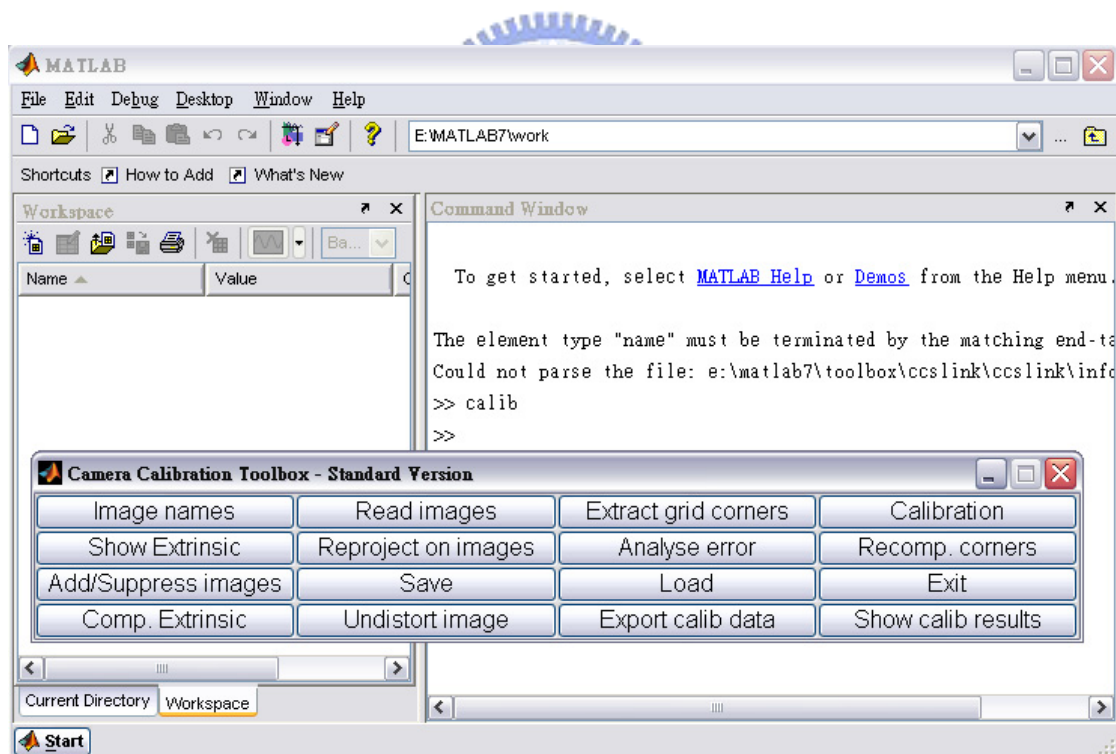


圖 3.2 相機校正工具箱視窗。

- (2) Extract grid corners：選取轉角點，如圖 3.3 所示。選取轉角點之規則：第一個轉角點位置可任意選擇，此轉角點也當為**原點**(origin)，此後每個轉角點必須

相鄰，順時針方向或逆時針方向都可，校正的過程中不可以任意改變方向；

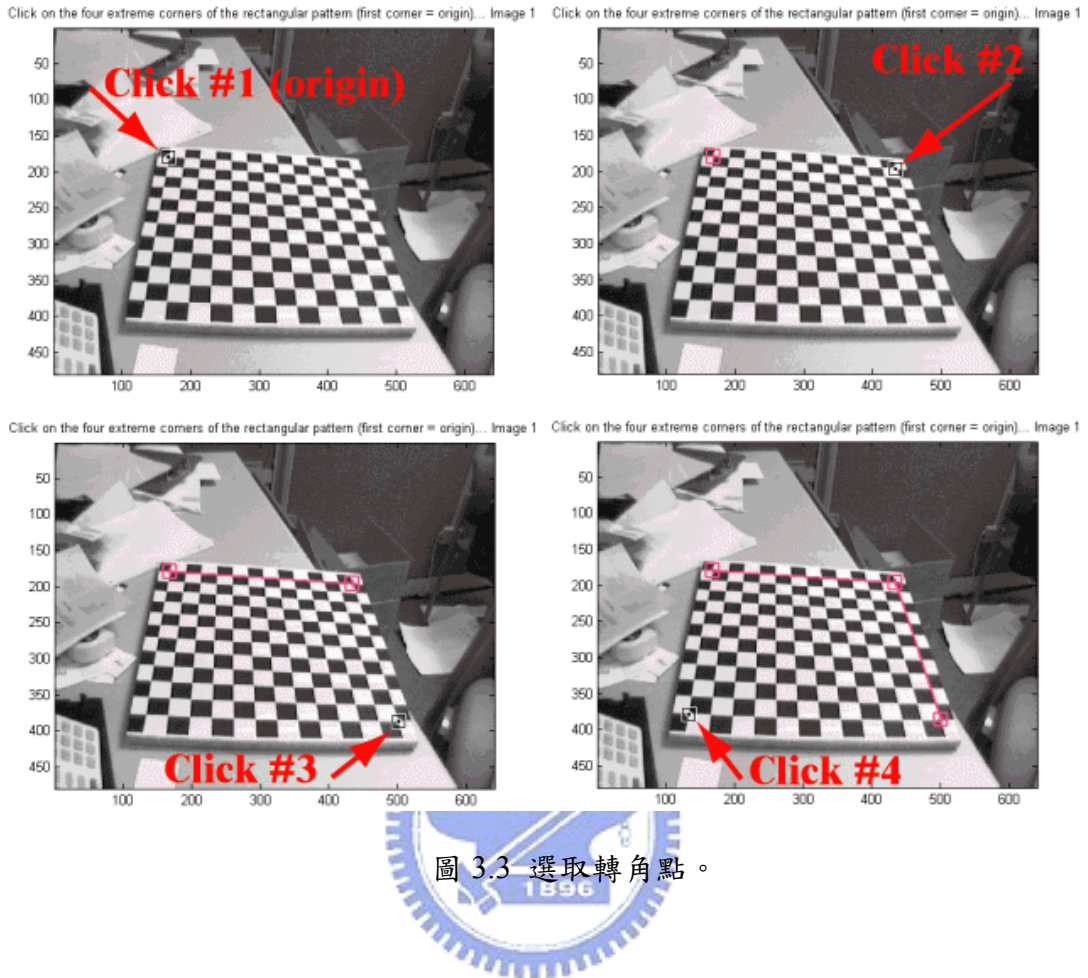


圖 3.3 選取轉角點。

(3) Calibration：當完成前面步驟後，選取 Calibration，即可得到相機校正之參數。

取得相機的內、外部參數之後，遂可求出相機影像平面與三維世界之關係。令 p 為世界座標中一點， (X_w, Y_w, Z_w) 為其世界座標， (X_c, Y_c, Z_c) 為其相機座標，則 (X_w, Y_w, Z_w) 與 (X_c, Y_c, Z_c) 關係如下：

$$\begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{pmatrix} + T \quad (3.1)$$

$$R = \begin{pmatrix} R_c(1) & R_c(2) & R_c(3) \\ R_c(4) & R_c(5) & R_c(6) \\ R_c(7) & R_c(8) & R_c(9) \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

$$T = \begin{pmatrix} T_c(1) \\ T_c(2) \\ T_c(3) \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

其中 R 、 T 為相機外部參數。

透過相機外部參數旋轉及位移，可將世界座標系統轉換為相機座標系統。若 (x_p, y_p)

為 p 投影到影像平面之座標，則 (X_c, Y_c, Z_c) 與 (x_p, y_p) 關係如下：

$$X_n = \begin{pmatrix} X_c / Z_c \\ Y_c / X_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3.5)$$

$$dx = \begin{pmatrix} 2k_c(3)xy + k_c(4)(r^2 + 2x^2) \\ k_c(3)(r^2 + 2y^2) + 2k_c(4)xy \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

$$\begin{pmatrix} x_d(1) \\ x_d(2) \end{pmatrix} = \left(1 + k_c(1)r^2 + k_c(2)r^4 + k_c(5)r^6\right) X_n + dx \quad (3.7)$$

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_c(1) & \alpha_c * f_c(1) & c_c(1) \\ 0 & f_c(2) & c_c(2) \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_d(1) \\ x_d(2) \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

其中 $f_c(1)$ 、 $f_c(2)$ 、 $c_c(1)$ 、 $c_c(2)$ 、 α_c 、 $k_c(1)$ 、 $k_c(2)$ 、 $k_c(5)$ 為相機內部參數。

利用上述相關公式，以及相機內外部參數，可得知 p 的世界座標 (X_w, Y_w, Z_w) 與其投影在影像平面座標 (x_p, y_p) 之關係。

3.3 影像分割

影像分割的目的是將物體從背景中分離出來，其流程如圖 3.4 所示。首先取得輸入影像 I 及背景影像 I_b ，進行背景相減法運算，對輸入影像與背景影像做比較的結果可以用前景遮罩影像 I_m 表示， I_m 是一個二值化的影像，可由下列式子求得：

$$I_m(u, v) = \begin{cases} 1, & \text{if } \|I(u, v) - I_b(u, v)\| > \tau_f \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.9)$$

其中 τ_f 是一個適當的臨界值(threshold)。

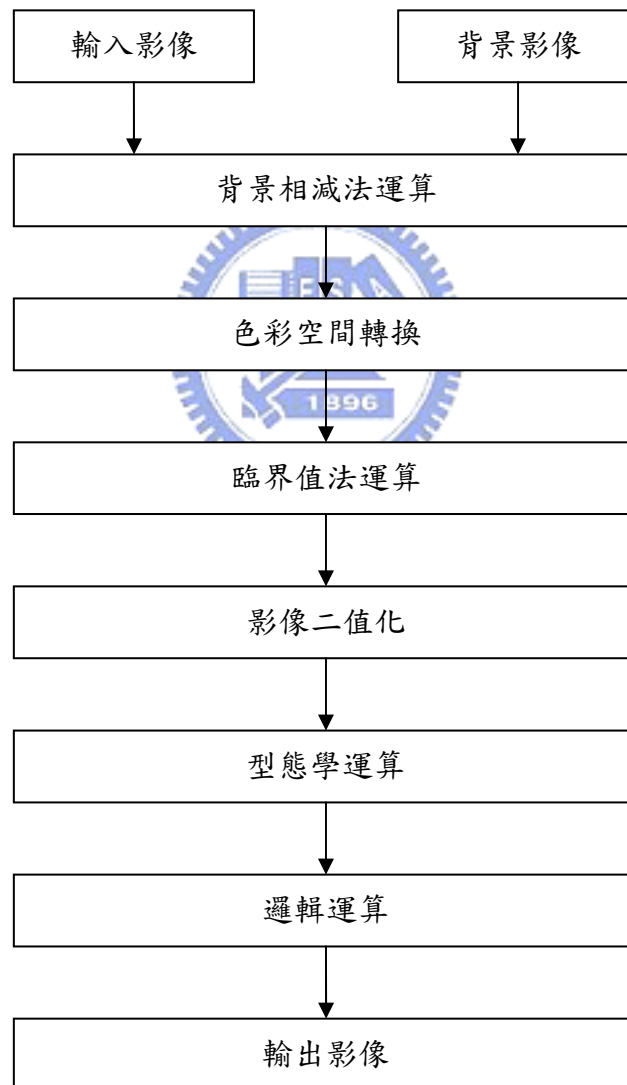


圖 3.4 影像分割流程圖。

式子(3.9)的意義是當輸入影像與背景影像在 (u,v) 點的範數(norm)大於某一臨界值，則該點為前景，並標示為1。由 Im 可以得到前景 Ip ，定義如下：

$$Ip(u,v) = \begin{cases} I(u,v), & \text{if } Im(u,v) = 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.10)$$

亦即 Ip 只有定義在 Im 為1的像素點，其餘 Im 為0的像素點則被視為背景的一部份，一個取得前景遮罩影像的例子如圖3.5所示。

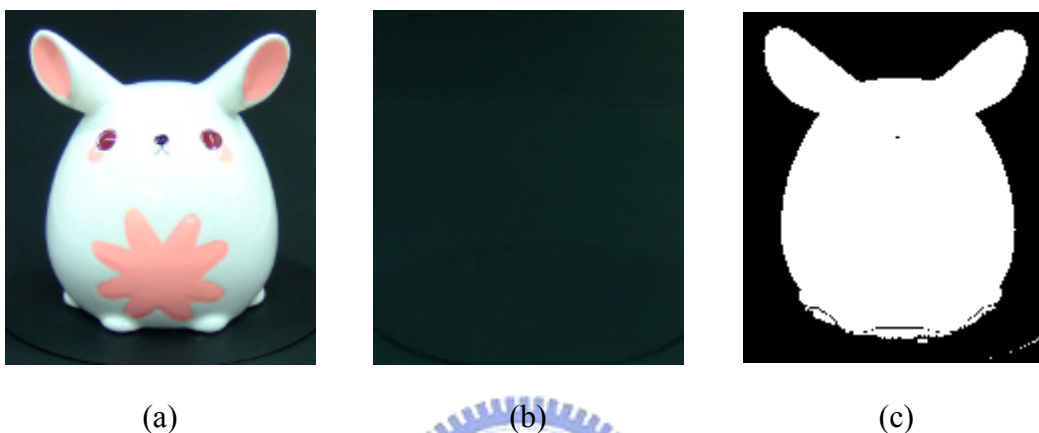


圖 3.5 建立前景遮罩影像的圖例。(a) 輸入影像；(b) 背景影像；(c) 前景遮罩。

背景相減法運算後結果如圖3.6所示，邊緣陰影尚未慮除乾淨，且有雜訊產生，透過式子(2.10)至式子(2.13)，將其色彩空間RGB轉換成HIS色彩空間，進行臨界值法運算，可得新前景 Iq ，定義如下：

$$Iq(u,v) = \begin{cases} 0, & \text{if } \tau_1 < H(u,v) < \tau_2 \text{ and } \tau_3 < I(u,v) < \tau_4 \\ Ip(u,v), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.11)$$

其中 τ_1 、 τ_2 、 τ_3 、 τ_4 為臨界值。



圖 3.6 背景相減法運算後結果。



圖 3.7 臨界值法運算後結果。

臨界值法運算後結果如圖 3.7 所示，影像中產生空洞，將影像二值化，如圖 3.8(a)所示，進行型態學運算可消除影像中的空洞及填滿空隙，如圖 3.8(b)所示，最後進行邏輯運算得到影像分割結果，如圖 3.9 所示。



圖 3.8 二值化影像。(a) 型態學運算前；(b) 型態學運算後。



圖 3.9 影像分割結果。

3.4 立體像素可見度

在第二章曾經介紹過遮蔽對三維模型重建的影響，而立體像素可見度為處理遮蔽的方法。在參考文獻[7]中提到的相機配置方式，有助於處理遮蔽，而相機排列的方式有兩種，第一種方式，相機環狀排列，拍攝方向向下，適用於物體重建，如圖 3.10(a)所示；第二種方式，相機球狀排列，向四面八方拍攝，適用於場景重建，如圖 3.10(b)所示。本篇論文所採用的相機配置方式為前者，物體與相機的世界座標關係如圖 3.11 所示。



圖 3.10 相機配置方式。(a) 適用於物體重建；(b) 適用於場景重建。

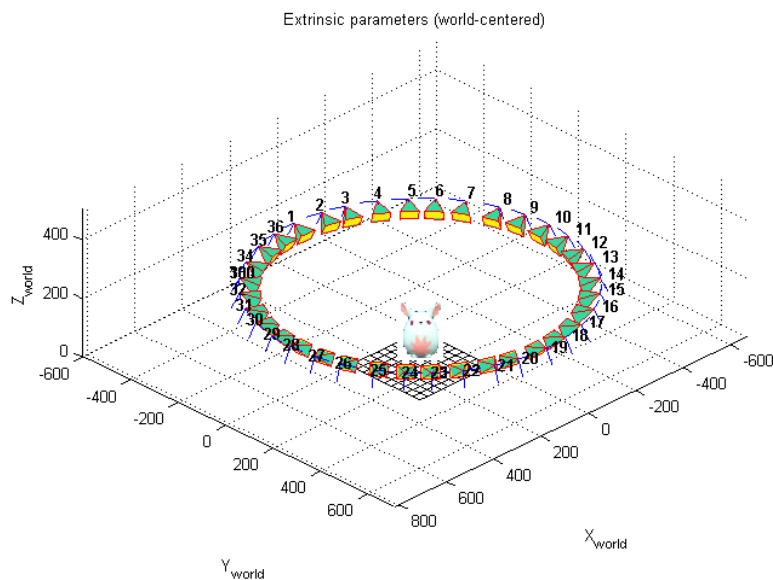


圖 3.11 物體與相機的世界座標關係。

由於相機排列的方式，在上層的立體像素必定會遮蔽住下層的立體像素，因此立體像素的重建順序也是由高至低。考慮立體像素 P 與立體像素 Q 發生遮蔽，如圖 3.12 所示，因為立體像素的重建順序是由高至低，因此立體像素 P 會先被重建，當重建到立體像素 Q，在找尋相機影像平面投影範圍時必須捨棄與立體像素 P 重疊部分，因此對相機影像平面上的每一個像素定義一個 I 值，I 值只為 0 或 1，且初始為 0，如圖 3.13(a)所示。當立體像素 P 重建後，對其投影範圍內每一個像素的 I 值改為 1，如圖 3.13(b)所示；當重建到立體像素 Q 時，檢查投影範圍內像素的 I 值，若 I 值為 0，代表此像素從未被選取，則可以選取；若 I 值為 1，代表此像素在先前已被選取，則不選取。因此就算發生了遮蔽，也可以正確的找到投影範圍。

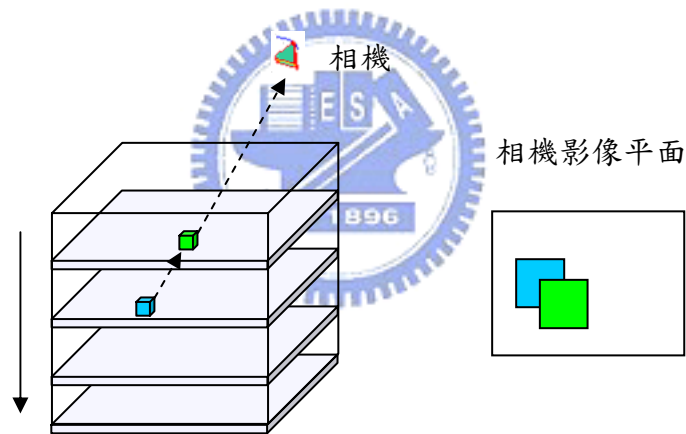


圖 3.12 序數可見性。

0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

(a)

0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0	0	0
0	0	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

(b)

圖 3.13 相機影像平面 I 值。(a) 初始化；(b) 立體像素 P 重建之後。

3.5 色彩一致性

第二章曾經介紹在這個重建系統中，物體表面上的立體像素在不同相機所看到的色彩較為一致，而判斷色彩是否一致的方法為色彩一致性。在參考文獻中常見的色彩一致性方法有單一臨界值法、適應臨界值法及直方圖法，以及本篇論文採用的密度基礎群聚法，這些方法將會在 3.5.1 至 3.5.4 節中介紹。

3.5.1 單一臨界值法

在參考文獻[7]提到，在色彩一致性比對時，使用一個不變的值來做比較為單一臨界值法，表示如下：

$$S_{\pi^k} < \tau \quad (3.12)$$

其中 π^k 為立體像素 k 投影到所有相機影像平面上之像素集合， S_{π^k} 為此集合之標準差， τ 為一臨界值。



3.5.2 適應臨界值法

在參考文獻[15]，Slabaugh 提出了一個新的色彩一致性比對方法，稱為適應臨界值法。由於物體表面特性不同，有時物體表面顏色變化大，需要較大的臨界值方能重建；相反的，當物體表面顏色變化不大的時候，較小的臨界值可減少浮動的(floating)立體像素產生，因此提出了適應臨界值法。

為了證實適應臨界值法是適當的，考慮幾種重建時情形，如圖 3.14 所示。在此之前，先對相關符號做基本定義，若有一個立體像素 k 在進行重建， π^k 為立體像素 k 投影到所有相機影像平面上之像素集合， S_{π^k} 為此集合之標準差， π_i^k 為立體像素 k 投影到第 i 張相機影像平面上之像素集合， $S_{\pi_i^k}$ 為此集合之標準差， \bar{S} 為 $S_{\pi_i^k}$ 之平均值。

若立體像素 k 在物體表面，會有兩種情況發生， S_{π^k} 值和 \bar{S} 值都為小，或是 S_{π^k} 值和 \bar{S} 值都為大，如圖 3.14(a)-3.14(c)所示；若立體像素 k 不在物體表面，則 S_{π^k} 值大， \bar{S} 值小，如圖 3.14(d)所示。因此可看出若立體像素在物體表面上， S_{π^k} 和 \bar{S} 正相關，證實適應臨界值法是適當的。適應臨界值法的數學表示如下：

$$S_{\pi^k} < \tau_1 + \tau_2 \bar{S} \quad (3.13)$$

其中 τ_1 、 τ_2 為適當臨界值。

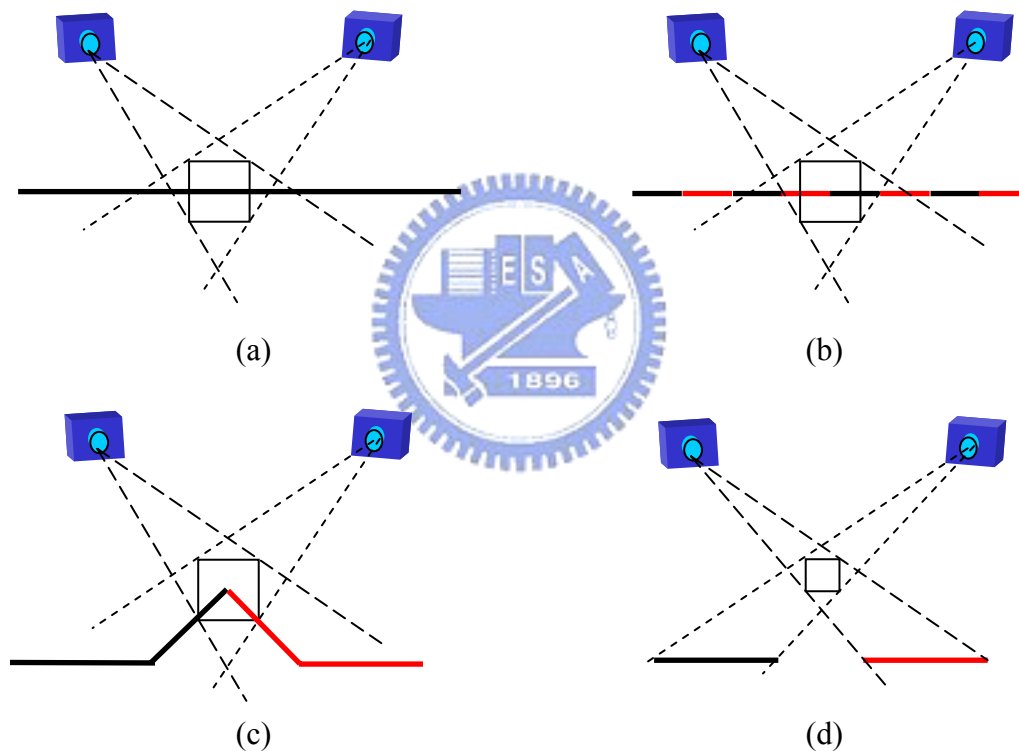


圖 3.14 立體像素與表面。(a) S_{π^k} 小， \bar{S} 小；(b) S_{π^k} 大， \bar{S} 大；(c) S_{π^k} 大， \bar{S} 大；(d) S_{π^k} 大， \bar{S} 小。

3.5.3 直方圖法

在參考文獻[16]，Stevens 提出了直方圖法，回顧先前提到的方法，都需要至少一個臨界值，而臨界值的選取往往必須靠實驗來求得，直方圖法可避免此困難。

在先前曾提到 RGB 色彩空間中，顏色是由 R 、 G 、 B 三個分量組成，若將每個分量劃分為八等分，則總共可以量化為 $512(8 \times 8 \times 8)$ 等分，此等分也稱為 color bin，則 RGB 為基礎的彩色直方圖可表示如下：

$$Hist(R, G, B) = (R/8) \times 64 + (G/8) \times 8 + (B/8) \quad (3.14)$$

若考慮立體像素 k 投影到 n 張相機影像平面，則直方圖法可表示如下：

$$Hist(\pi_p^k) \cap Hist(\pi_q^k) \neq 0, \quad p \neq q, \quad p, q = 1, 2, \dots, n \quad (3.15)$$

其中 π_p^k 為立體像素 k 投影到第 p 張相機影像平面之像素集合， π_q^k 為立體像素 k 投影到第 q 張相機影像平面之像素集合， $Hist(\pi_p^k)$ 為 π_p^k 之直方圖， $Hist(\pi_q^k)$ 為 π_q^k 之直方圖。

在參考文獻[16]中也提到，若有兩個像素，RGB 之 R 分量分別為 15 與 31，由於 15 與 31 都位於 0~31 中，被分在同一個 color bin 之中，在直方圖法中會有交集，判定為色彩一致；若此兩個像素，RGB 之 R 分量分別為 31 與 32，由於 31 位於 0~31，32 位於 32~63，則被分在不同的 color bin 之中，因此在直方圖法中為空集合，判定為色彩不一致。後者較相似卻被判定為色彩不一致，這是由於分量值落位於邊界附近，為了改善此情況，將邊界擴張彼此重疊 20%，則可以改善此缺點。

3.5.4 密度基礎群聚法

本篇論文採用密度基礎群聚法來實現色彩一致性，稱為密度基礎群聚色彩一致性法，其流程如圖 3.15 所示。首先，利用相機校正的內、外部參數，可以計算立體像素投影到每張相機影像平面的投影範圍，再考慮遮蔽發生，配合立體像素可見度的方法，可以得知立體像素正確的投影範圍，將投影範圍內的全部像素當作一個像素集合，計算像素集合分布的影像平面個數 I ，再利用密度基礎群聚法將像素集合分群，計算最大群聚像素集合分布的影像平面個數 I' ，判斷 $I=I'$ 是否成立。若成立，則進行立體像素重建；若不成立，則立體像素不重建。

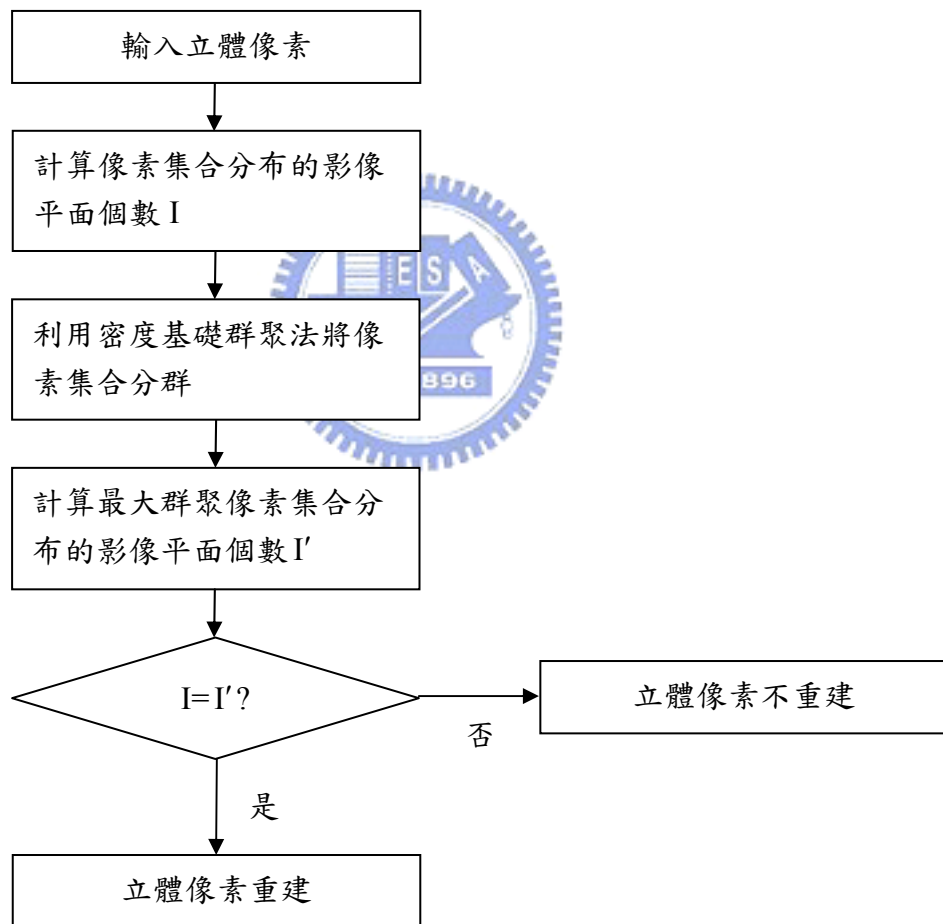


圖 3.15 密度基礎群聚色彩一致性法流程圖。

密度基礎群聚法依據資料點的分佈密度將資料群聚，而在群聚內的資料分佈的密度應該大於群聚外資料分佈的密度，而未在任何群聚內的資料點視為雜訊。經過密度基礎群聚法將像素集合分群後，找出群聚中的最大群聚，將最大群聚內的全部像素當作最大群聚像素集合，計算最大群聚像素集合分布的影像平面個數 I' ，當 I 與 I' 相等時，立體像素重建； I 與 I' 不相等時，立體像素不重建。

若有一個立體像素 k 投影到六張相機影像平面，如圖 3.16 所示，對每一個投影範圍內的像素做登記，除了紀錄顏色資訊 RGB 值，也紀錄了像素出現在影像平面上的 ID，若像素是出現在第一張影像平面，則 ID 為 1，依此類推。

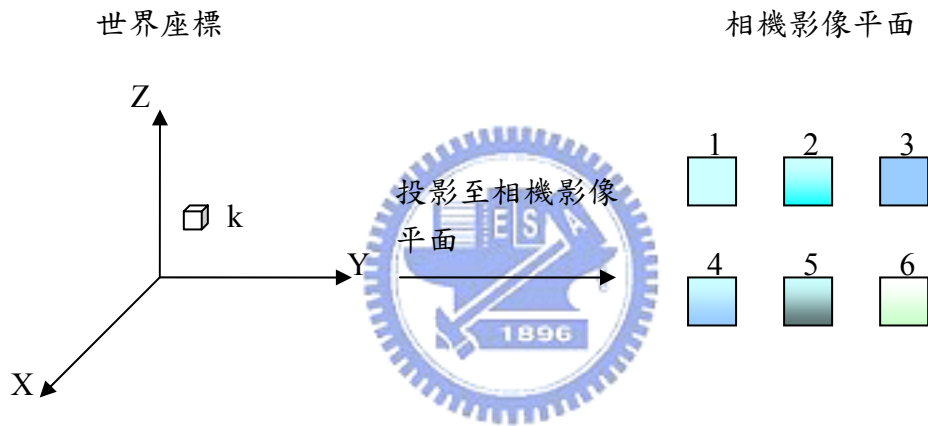


圖 3.16 立體像素投影到相機影像平面。

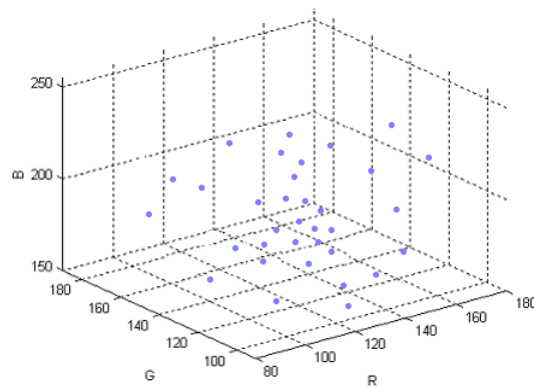


圖 3.17 像素集合 RGB 色彩空間資料分布。

紀錄完成後，利用密度基礎群聚法將像素集合分群，密度基礎群聚法分群前的像素集合之 RGB 色彩空間資料分布如圖 3.17 所示，密度基礎群聚法分群結果如圖 3.18 所示，找出群聚中的最大群聚，若最大群聚像素集合 ID 包含 1、2、3、4、5、6，則此立體像素重建；若並非包含 1、2、3、4、5、6，則立體像素不重建。

在第二章中曾介紹，物體表面上的立體像素在不同相機所看到的色彩一致，而判斷色彩是否一致為色彩一致性的工作。若經過色彩一致性方法判定為色彩一致，代表立體像素為物體表面上的立體像素，立體像素可以重建。而判斷資料群內資料點是否一致的其中一個方法就是對資料點進行分群，因此將群聚法應用在色彩一致性方法中。在密度基礎群聚色彩一致性方法中，立體像素重建的條件為最大群聚像素集合分布在所有的相機影像平面上，代表立體像素在各張相機影像平面上的顏色有相同成分存在，因此判定立體像素在不同相機所看到的色彩一致，而立體像素為物體表面上的立體像素，立體像素可以重建，實驗結果將在第四章中介紹。

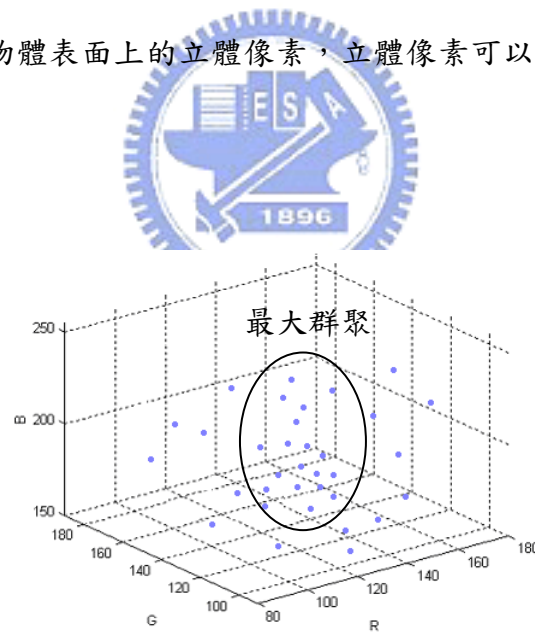


圖 3.18 密度基礎群聚法分群結果。

3.6 顯示介面

三維模型重建後的資料，儲存的是立體像素的顏色與位置，此資料可表示為一個三維模型，透過 VC++ 程式及 OpenGL 函式庫，可多方位觀看。物體透過相機顯示在相機影像平面上，經過相機校正得到相機內、外部參數，以及影像前處理之後，利用立體像素色彩法的技術重建出三維模型，三維模型就如同真實存在空間中之物體，OpenGL 提供的功能就像電腦內的虛擬相機一般，而相機位置可以任意調整，最後輸出顯示在電腦螢幕上，如圖 3.19 所示。

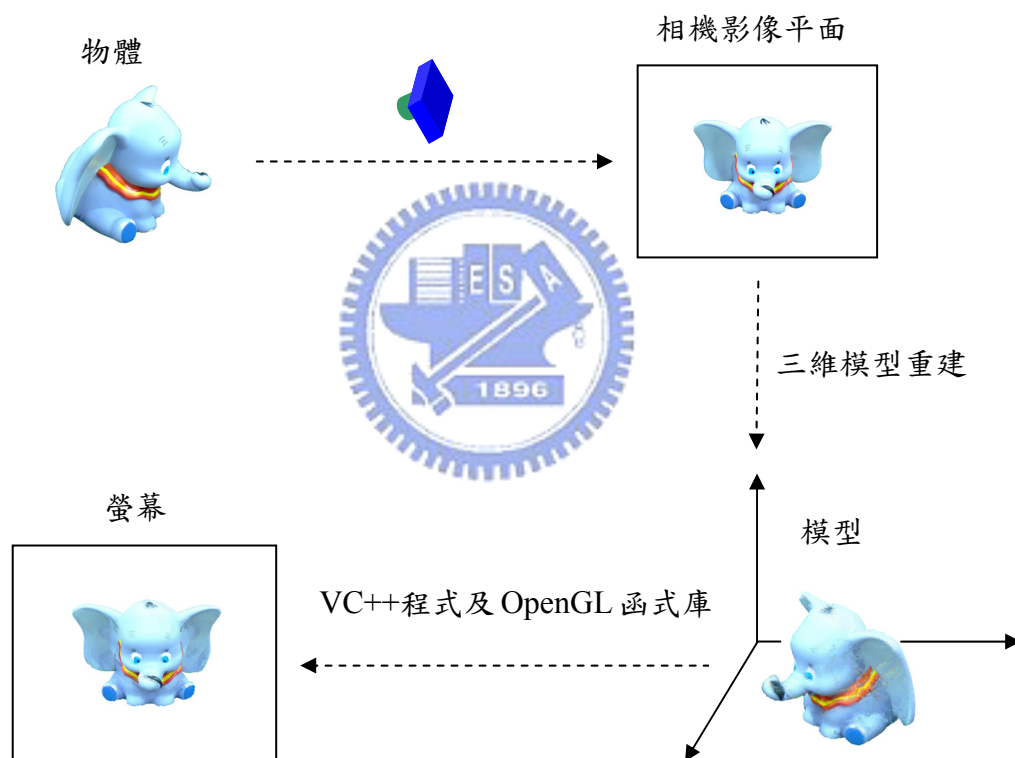


圖 3.19 拍攝至顯示介面流程。

第四章

實驗結果與分析

本篇論文所採用密度基礎群聚法來實現色彩一致性的實驗結果將會在本章與其它色彩一致性方法的實驗結果作比較，在 4.1 節中會說明用來測試系統效能所採用的實驗機制，在 4.2 節中會顯示實驗的結果，在 4.3 節中會對實驗結果作分析。

4.1 實驗機制

本篇論文改善了色彩一致性的方法，而色彩一致性對以立體像素為基礎的三維模型重建影響很大，有使用到色彩一致性方法重建出的物體表面較接近真實的物體表面，因為色彩一致性方法給了以立體像素為基礎的三維模型重建有所限制，有無使用到色彩一致性所重建出的表面如圖 4.1 所示。

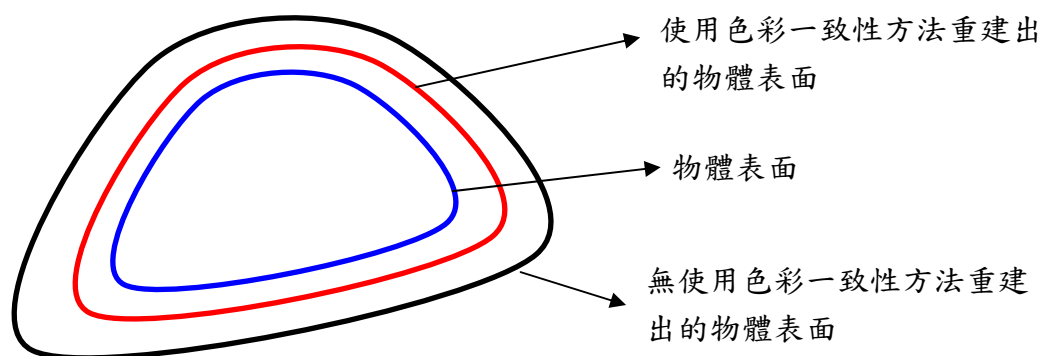


圖 4.1 三維模型重建使用色彩一致性方法與無使用色彩一致性方法。

本篇論文使用了兩個實驗機制來對三維模型進行評估，第一個實驗機制為**峰值訊噪比**(peak signal-to-noise ratio, PSNR)，將重建出的三維模型投影回二維影像平面，比較與原始影像的相似度。第二個實驗機制為**投影誤差**(projection error)，以立體像素為基礎的三維模型重建可以得到各個立體像素的位置與顏色，因此將各個立體像素投影到原始影像上計算投影誤差。

4.1.1 峰值訊噪比

峰值訊噪比常用來當作還原影像品質優劣的一個參數，公式定義如下：

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{255^2}{MSE} \quad (4.1)$$

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \left(I(x, y) - \hat{I}(x, y) \right)^2 \quad (4.2)$$

其中 I 為原始影像， \hat{I} 為還原影像， M 與 N 代表影像的寬度與高度， MSE 為 I 與 \hat{I} 的均方誤差。而峰值訊噪比值越高，則表示還原影像品質越好，一般而言，當峰值訊噪比值高於 30db 時，人類眼睛是很難分辨出處理前後兩張影像的差異。

4.1.2 投影誤差

根據參考文獻[17]，可由投影誤差來比較三維模型的優劣，較好的重建模型有較小的投影誤差。若 V 為一個立體像素， V_r 、 V_g 與 V_b 分別為立體像素的紅色、綠色與藍色分量， A 為 V 的投影區域， A_r 、 A_g 與 A_b 為投影區域像素的紅色、綠色與藍色分量，則投影誤差的定義可表示如下：

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{P_i} \left((V_r - A_r(j))^2 + (V_g - A_g(j))^2 + (V_b - A_b(j))^2 \right)}{\sum_{i=1}^M P_i}} \quad (4.3)$$

其中 P 為投影區域上像素的個數， M 為影像平面的個數， i 為第 i 張影像平面， j 為第 j 個投影像素。

4.2 實驗結果

第一個實驗對象為塑膠材質，原圖如圖 4.2(a)所示，單一臨界值法、適應臨界值法、直方圖法與本篇論文所採用的密度基礎群聚法的實驗結果如圖 4.2(b)-4.2(e)所示。

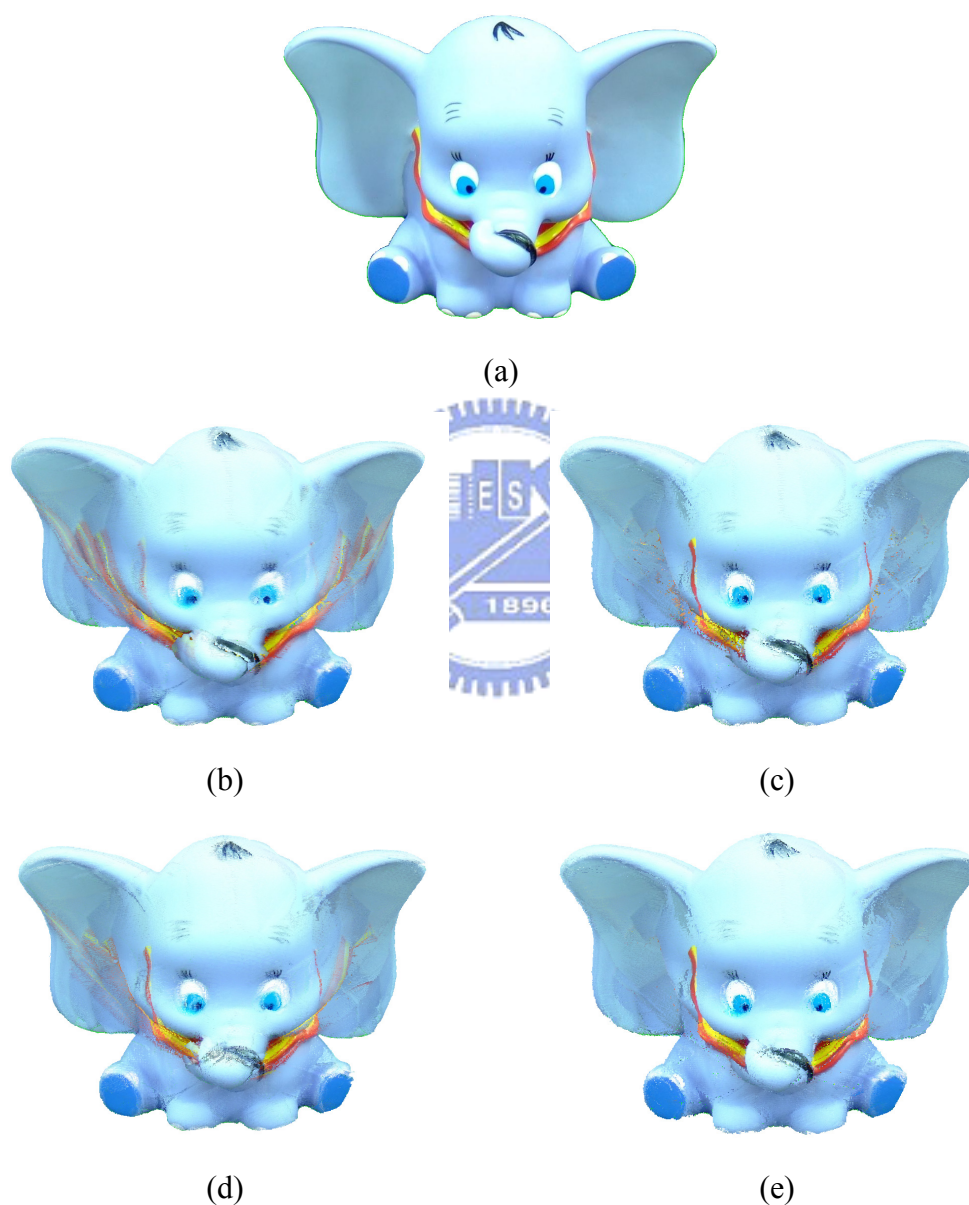


圖 4.2 大象模型。(a) 原圖；(b) 單一臨界值法重建結果；(c) 適應臨界值法重建結果；(d) 直方圖法重建結果；(e) 密度基礎群聚法重建結果。

這個實驗對象的主要特色是結構形狀有凹陷，凹陷的部位在耳朵與身體之間，如圖 4.3(a)所示，圖 4.3(b)為凹陷部位放大，而單一臨界值法、適應臨界值法、直方圖法與本篇論文所採用的密度基礎群聚法的實驗結果如 4.3(c)-4.3(f)所示。

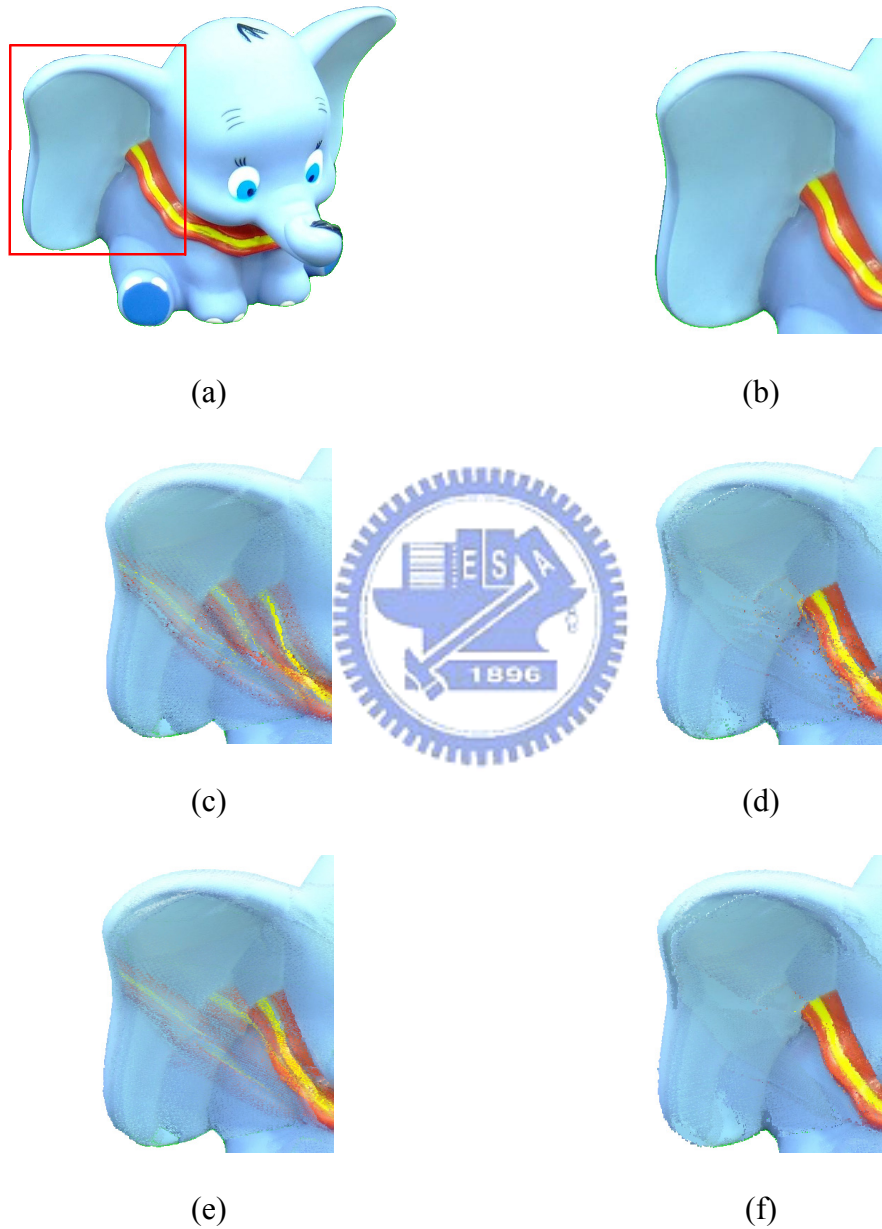


圖 4.3 大象模型凹陷部位。(a) 原圖；(b) 凹陷部位放大；(c) 單一臨界值法重建結果；(d) 適應臨界值法重建結果；(e) 直方圖法重建結果；(f) 密度基礎群聚法重建結果。

除了凹陷部位，此外選擇細微部位來比較，例如眼睛部位，如圖 4.4(a)所示，圖 4.4(b)為眼睛部位放大，而單一臨界值法、適應臨界值法、直方圖法與本篇論文所採用的密度基礎群聚法的實驗結果如圖 4.4(c)-4.4(f)所示。

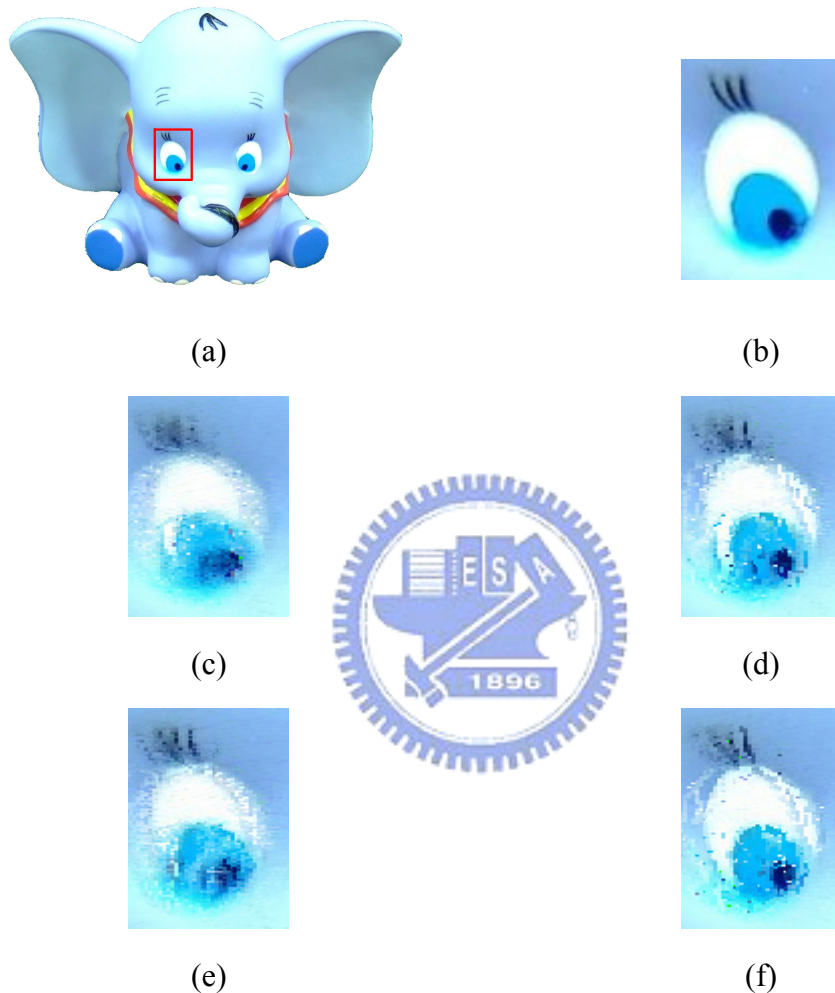


圖 4.4 大象模型眼睛部位。(a) 原圖；(b) 眼睛部位放大；(c) 單一臨界值法重建結果；(d) 適應臨界值法重建結果；(e) 直方圖法重建結果；(f) 密度基礎群聚法重建結果。

由圖 4.3 與圖 4.4 中可以看出，不管在凹陷部位，或是細微部位，本篇論文所採用的密度基礎群聚法的實驗結果都較好，適應臨界值法次之，而單一臨界值法與直方圖法較差。

在這個實驗中使用十二張影像來進行重建，這十二張影像稱為**重建影像** (reconstructing image)，其餘沒使用到的影像稱為**鑑定影像**(verification image)，實驗結果如下，重建影像的 PSNR 值如表 4.1，角度如表 4.2；鑑定影像的 PSNR 值如表 4.3，角度如表 4.4。由表 4.1 與表 4.3 可看出，本篇論文所採用的密度基礎群聚法的實驗結果與原圖最相似。

表 4.1 重建影像 PSNR 平均值。

	單一臨界值法	適應臨界值法	直方圖法	密度基礎群聚法
PSNR	30.00069	30.64503	30.25926	30.81258

表 4.2 重建影像角度。

No. image	1	2	3	4	5	6
Angle	0°	30°	60°	90°	120°	150°
No. image	7	8	9	10	11	12
Angle	180°	210°	240°	270°	300°	330°

表 4.3 鑑定影像 PSNR 平均值。

	單一臨界值法	適應臨界值法	直方圖法	密度基礎群聚法
PSNR	27.43565	27.95311	27.62139	28.12585

表 4.4 鑑定影像角度。

No. image	1	2	3	4	5	6
Angle	10°	20°	40°	50°	70°	80°
No. image	7	8	9	10	11	12
Angle	100°	110°	130°	140°	160°	170°
No. image	13	14	15	16	17	18
Angle	190°	200°	220°	230°	250°	260°
No. image	19	20	21	22	23	24
Angle	280°	290°	310°	320°	340°	350°

表 4.5 投影誤差。

Voxel dimensions	160^3	320^3	480^3
單一臨界值法	15.8703	14.8614	14.2053
適應臨界值法	12.3325	9.7087	8.5267
直方圖法	14.8255	13.9920	13.6186
密度基礎群聚法	11.5436	9.2485	8.1891

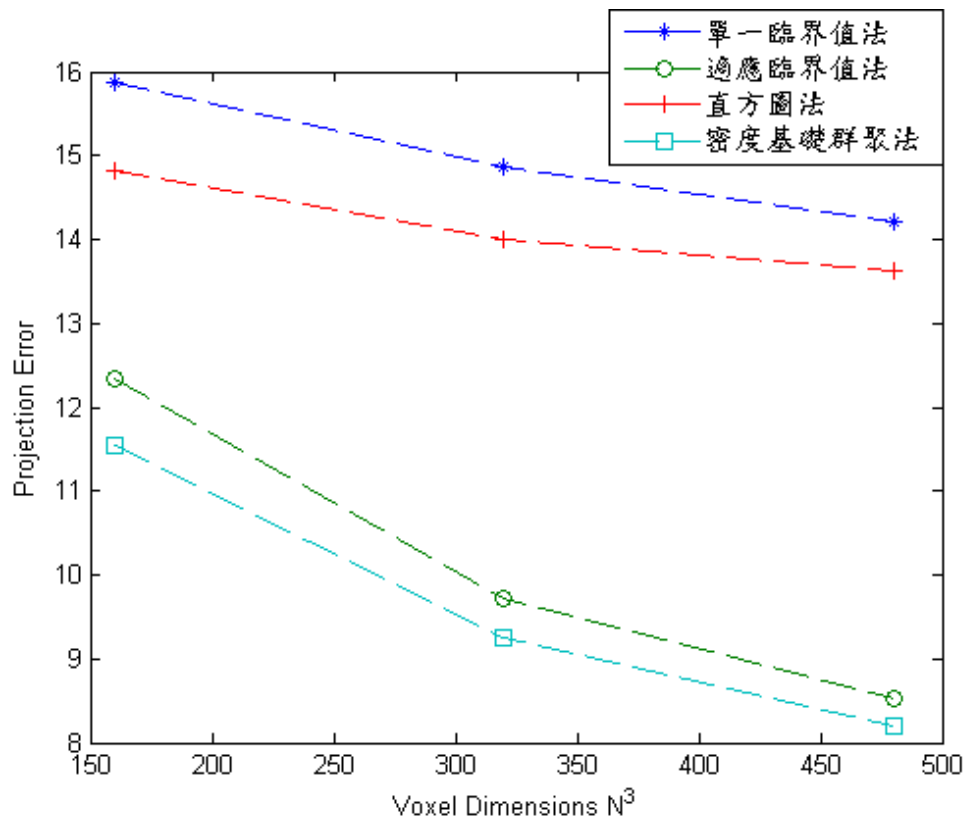


圖 4.5 投影誤差曲線。

表 4.6 時間(秒)。

Voxel dimensions	160 ³	320 ³	480 ³
單一臨界值法	126.8	681.1	2194.8
適應臨界值法	143.0	745.9	2248.9
直方圖法	278.4	963.8	2531.5
密度基礎群聚法	393.3	1011.7	2596.8

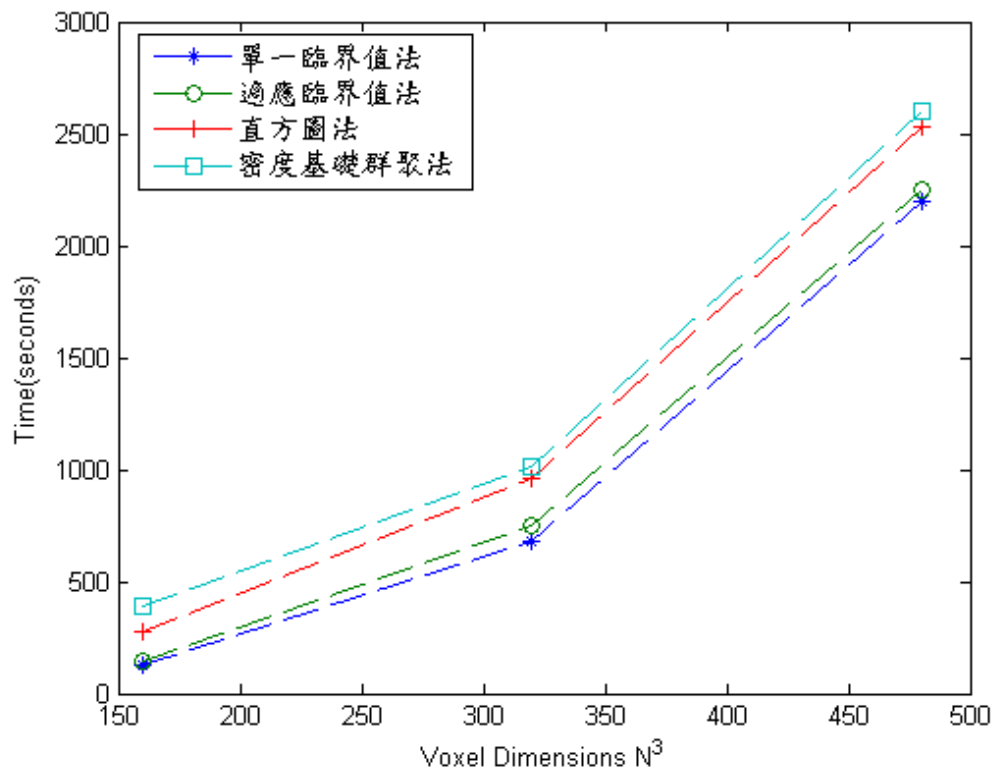


圖 4.6 時間曲線。

第二個實驗對象為陶瓷材質，如圖 4.7(a)所示，單一臨界值法、適應臨界值法、直方圖法與本篇論文所採用的密度基礎群聚法的實驗結果如圖 4.7(b)-4.7(e)所示。



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

圖 4.7 熊模型。(a) 原圖；(b) 單一臨界值法重建結果；(c) 適應臨界值法重建結果；(d) 直方圖法重建結果；(e) 密度基礎群聚法重建結果。

這個實驗對象的主要特色是表面顏色種類多，且表面紋理複雜，選擇細微部位來比較，例如肚子部位，如圖 4.8(a)所示，圖 4.8(b)為肚子部位放大，而單一臨界值法、適應臨界值法、直方圖法與本篇論文所採用的密度基礎群聚法的實驗結果如圖 4.8(c)-4.8(f)所示。

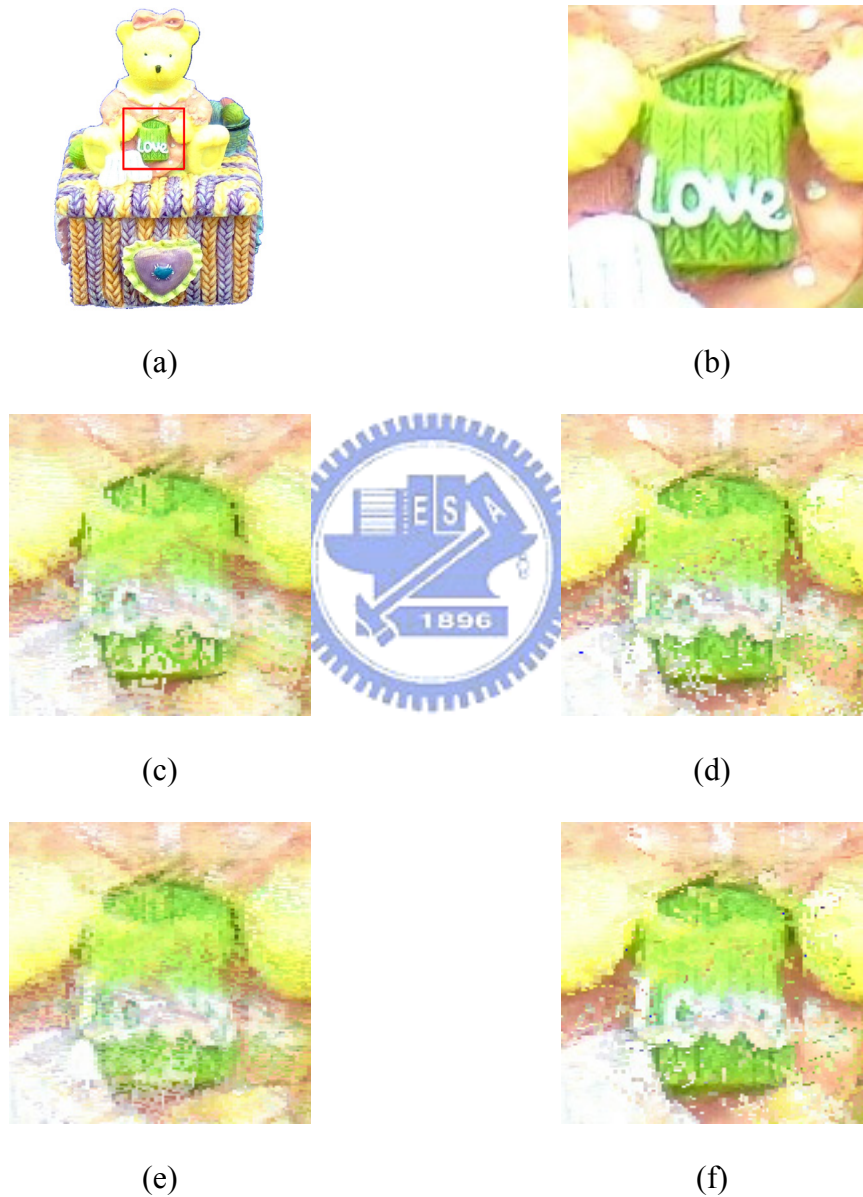


圖 4.8 熊模型肚子部位。(a) 原圖；(b) 肚子部位放大；(c) 單一臨界值法重建結果；(d) 適應臨界值法重建結果；(e) 直方圖法重建結果；(f) 密度基礎群聚法重建結果。

由圖 4.8 中可以看出，本篇論文所採用的密度基礎群聚法的實驗結果較好，適應臨界值法次之，而單一臨界值法與直方圖法較差。而在這個實驗中使用十二張重建影像來進行重建，實驗結果如下，重建影像的 PSNR 值如表 4.7，角度如表 4.8；鑑定影像的 PSNR 值如表 4.9，角度如表 4.10。由表 4.7 與表 4.9 可看出，本篇論文所採用的密度基礎群聚法的實驗結果與原圖最相似。

表 4.7 重建影像 PSNR 平均值。

	單一臨界值法	適應臨界值法	直方圖法	密度基礎群聚法
PSNR	30.10503	30.25852	30.02641	30.46581

表 4.8 重建影像角度。

No. image	1	2	3	4	5	6
Angle	0°	30°	60°	90°	120°	150°
No. image	7	8	9	10	11	12
Angle	180°	210°	240°	270°	300°	330°

表 4.9 鑑定影像 PSNR 平均值。

	單一臨界值法	適應臨界值法	直方圖法	密度基礎群聚法
PSNR	27.23184	27.41967	27.03415	27.73540

表 4.10 鑑定影像角度。

No. image	1	2	3	4	5	6
Angle	10°	20°	40°	50°	70°	80°
No. image	7	8	9	10	11	12
Angle	100°	110°	130°	140°	160°	170°
No. image	13	14	15	16	17	18
Angle	190°	200°	220°	230°	250°	260°
No. image	19	20	21	22	23	24
Angle	280°	290°	310°	320°	340°	350°

表 4.11 投影誤差。

Voxel dimensions	130^3	260^3	390^3
單一臨界值法	27.7588	24.3108	21.6055
適應臨界值法	27.5119	23.2382	19.6460
直方圖法	28.2192	24.8699	22.7412
密度基礎群聚法	26.0299	19.2434	15.1482

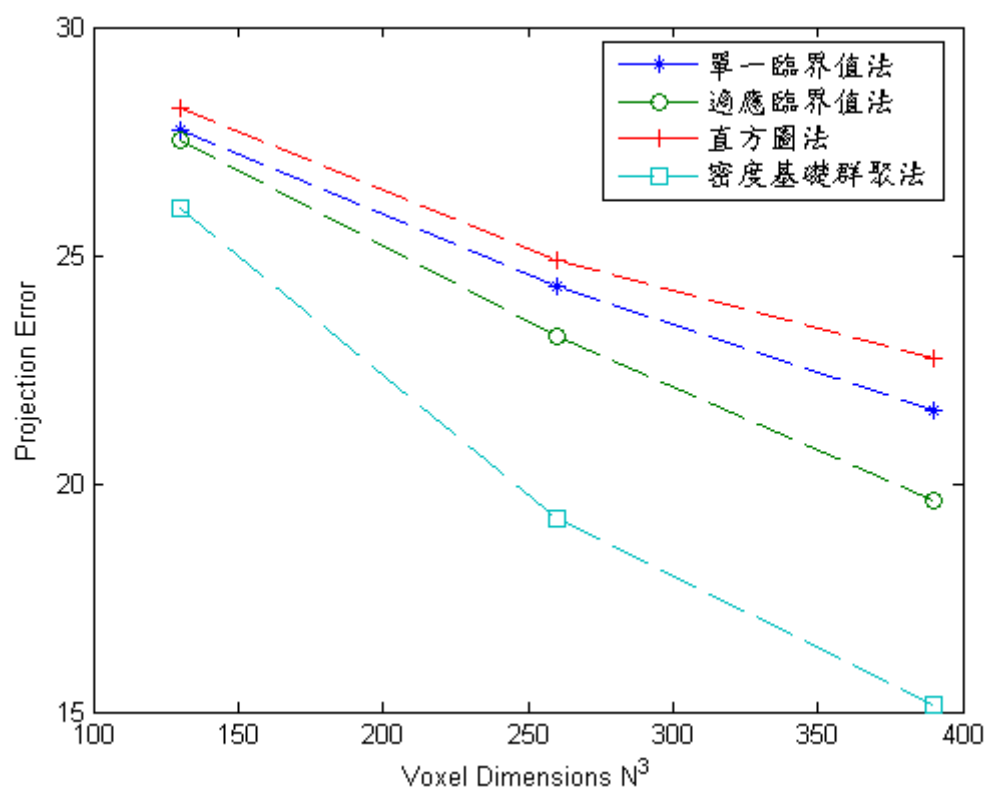


圖 4.9 投影誤差曲線。

表 4.12 時間(秒)。

Voxel dimensions	130 ³	260 ³	390 ³
單一臨界值法	96.8	574.1	1732.8
適應臨界值法	121.0	632.9	1889.4
直方圖法	199.1	751.3	2119.8
密度基礎群聚法	232.5	793.1	2230.3

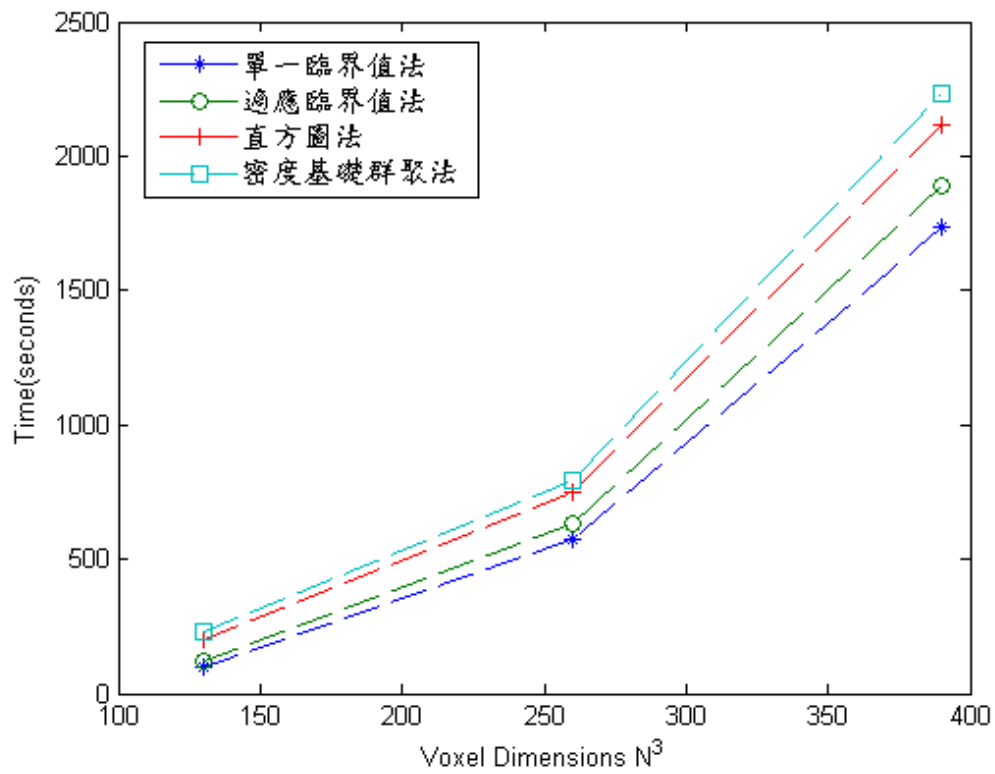


圖 4.10 時間曲線。

第三個實驗對象為玻璃材質，如圖 4.11(a)所示，單一臨界值法、適應臨界值法、直方圖法與本篇論文所採用的密度基礎群聚法的實驗結果如圖 4.11(b)-4.11(e)所示。

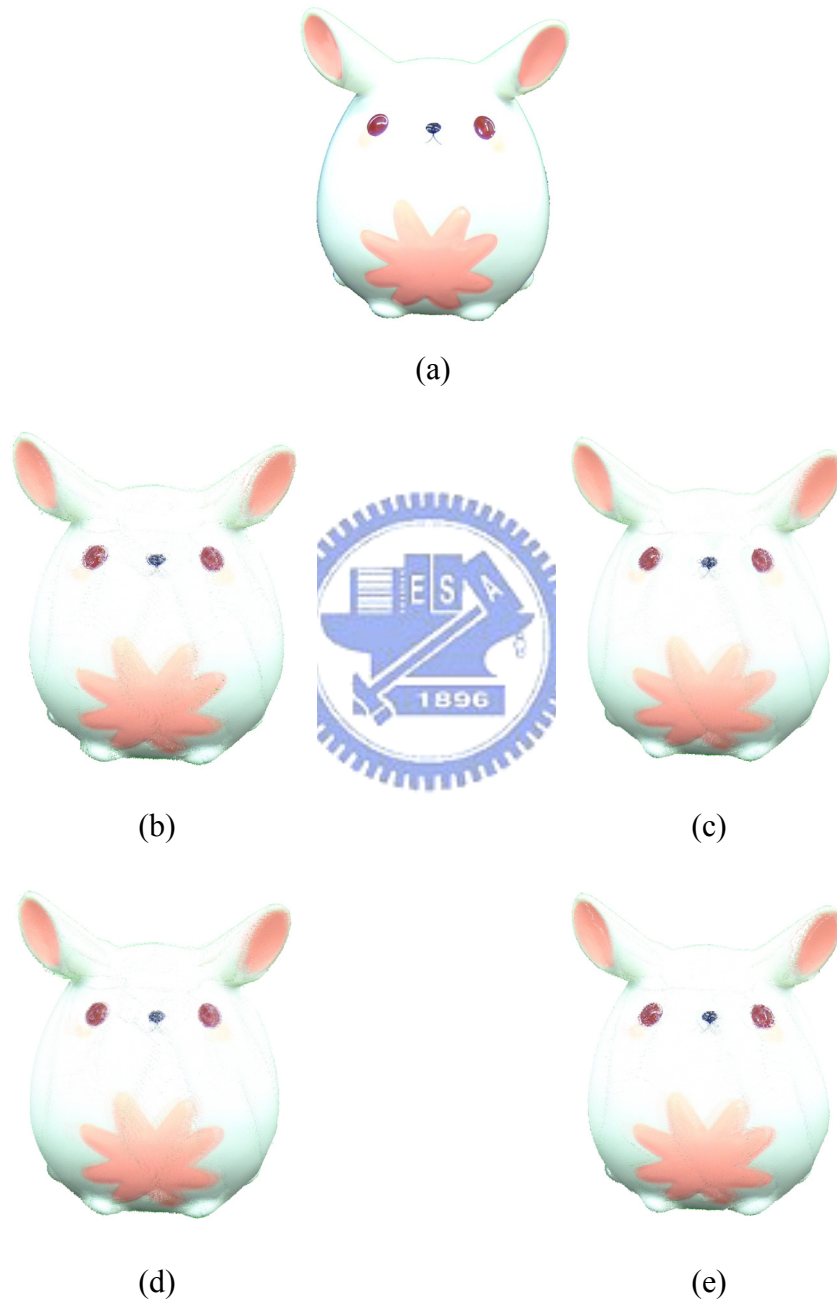


圖 4.11 老鼠模型。(a) 原圖；(b) 單一臨界值法重建結果；(c) 適應臨界值法重建結果；(d) 直方圖法重建結果；(e) 密度基礎群聚法重建結果。

這個實驗對象的主要特色是有明顯的表面光澤變化，選擇光澤變化最明顯的部位來比較，為眼睛部位，如圖 4.12(a)所示，圖 4.12(b)為眼睛部位放大，而單一臨界值法、適應臨界值法、直方圖法與本篇論文所採用的密度基礎群聚法的實驗結果如圖 4.12(c)-4.12(f)所示。

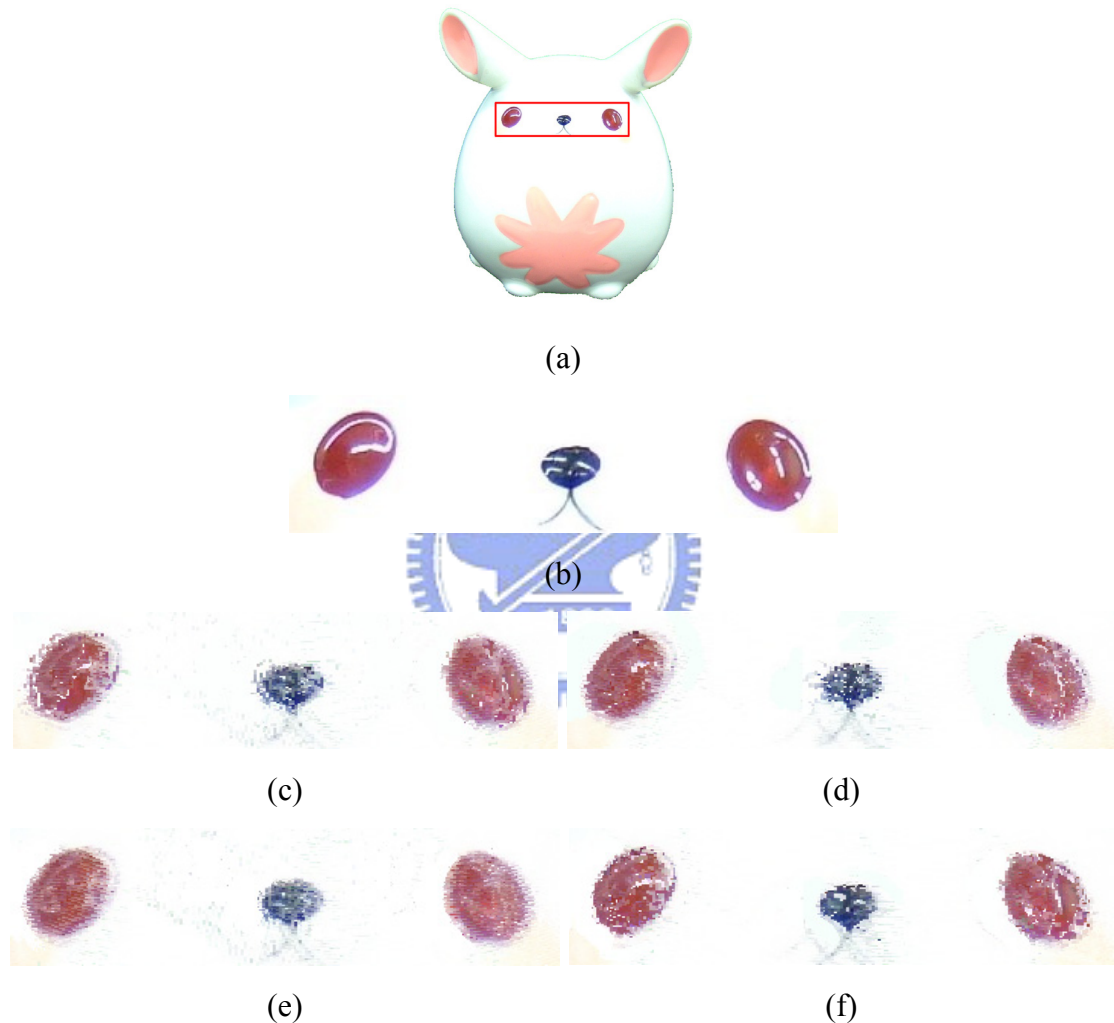


圖 4.12 老鼠模型眼睛部位。(a) 原圖；(b) 眼睛部位放大；(c) 單一臨界值法重建結果；(d) 適應臨界值法重建結果；(e) 直方圖法重建結果；(f) 密度基礎群聚法重建結果。

由圖 4.12 中可以看出，各方法的實驗結果差異不大，而本篇論文所採用的密度基礎群聚法與適應臨界值法的實驗結果較好，單一臨界值法與直方圖法較差。

而在這個實驗中使用十二張重建影像來進行重建，實驗結果如下，重建影像的 PSNR 值如表 4.13，角度如表 4.14；鑑定影像的 PSNR 值如表 4.15，角度如表 4.16。由表 4.13 與表 4.15 可看出，本篇論文所採用的密度基礎群聚法的實驗結果與原圖最相似。

表 4.13 重建影像 PSNR 平均值。

	單一臨界值法	適應臨界值法	直方圖法	密度基礎群聚法
PSNR	32.32055	32.44431	32.01378	32.44938

表 4.14 重建影像角度。

No. image	1	2	3	4	5	6
Angle	0°	30°	60°	90°	120°	150°
No. image	7	8	9	10	11	12
Angle	180°	210°	240°	270°	300°	330°

表 4.15 鑑定影像 PSNR 平均值。

	單一臨界值法	適應臨界值法	直方圖法	密度基礎群聚法
PSNR	28.57556	28.73290	28.11793	28.87308

表 4.16 鑑定影像角度。

No. image	1	2	3	4	5	6
Angle	10°	20°	40°	50°	70°	80°
No. image	7	8	9	10	11	12
Angle	100°	110°	130°	140°	160°	170°
No. image	13	14	15	16	17	18
Angle	190°	200°	220°	230°	250°	260°
No. image	19	20	21	22	23	24
Angle	280°	290°	310°	320°	340°	350°

表 4.17 投影誤差。

Voxel dimensions	140 ³	280 ³	420 ³
單一臨界值法	7.7808	6.7464	6.4551
適應臨界值法	7.4994	6.2872	5.4039
直方圖法	7.8773	7.0977	6.7642
密度基礎群聚法	7.1069	5.6862	4.8074

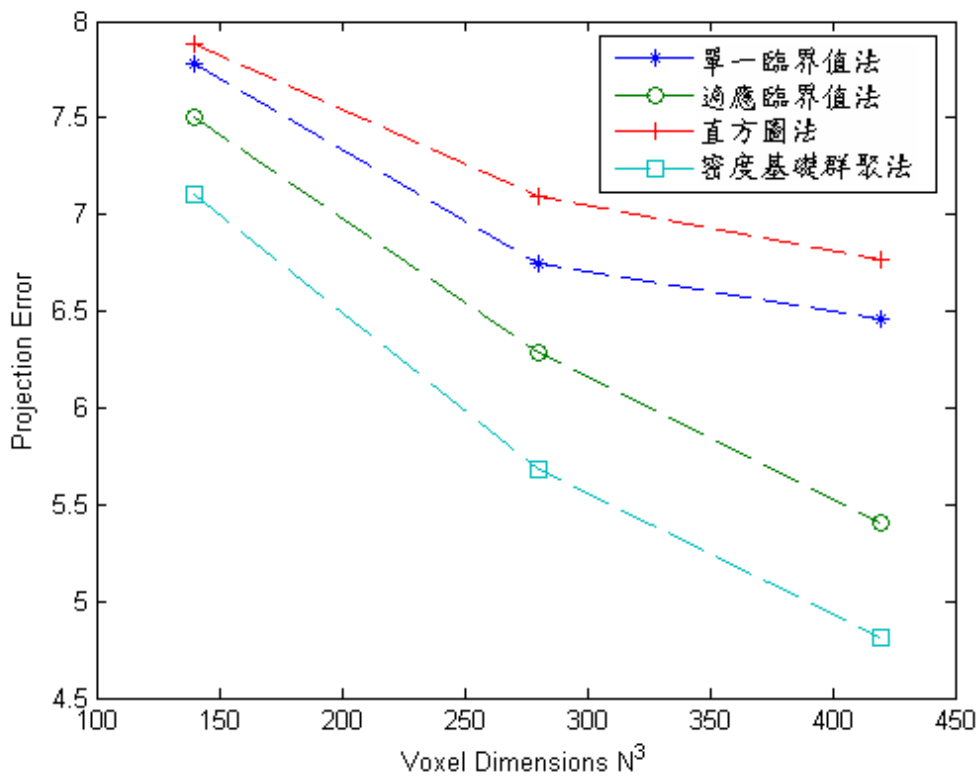


圖 4.13 投影誤差曲線。

表 4.18 時間(秒)。

Voxel dimensions	140 ³	280 ³	420 ³
單一臨界值法	123.3	671.3	2120.8
適應臨界值法	134.7	718.6	2197.9
直方圖法	203.9	794.3	2465.4
密度基礎群聚法	251.8	876.4	2506.3

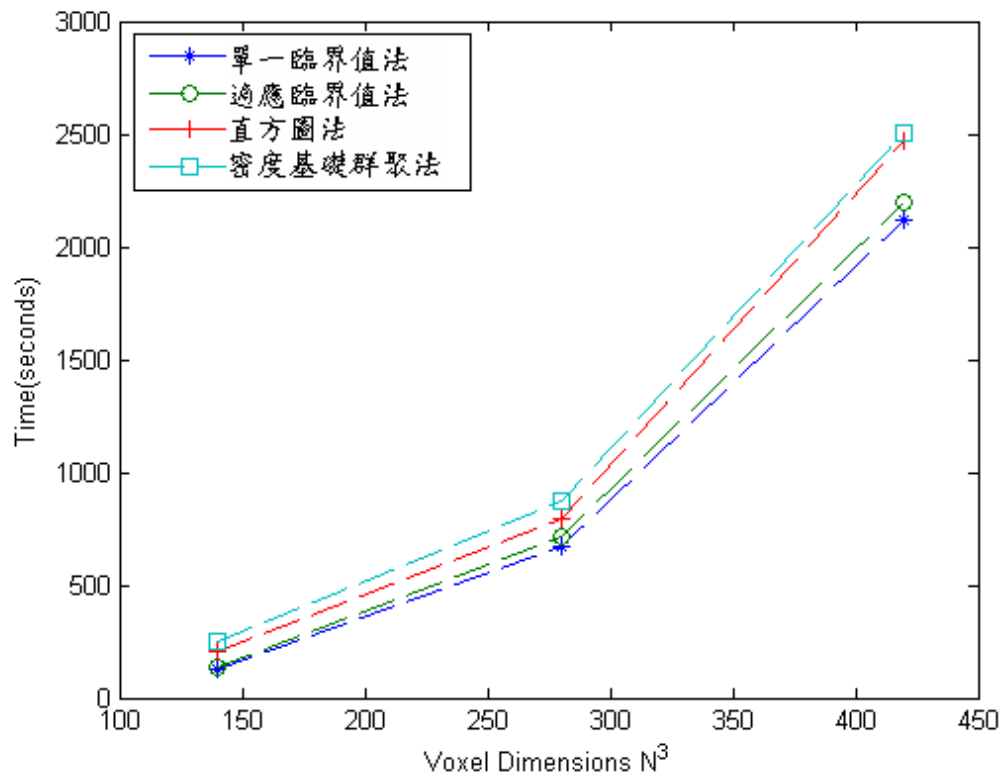


圖 4.14 時間曲線。

第四個實驗對象為水晶材質，如圖 4.15(a)所示，單一臨界值法、適應臨界值法、直方圖法與本篇論文所採用的密度基礎群聚法的實驗結果如圖 4.15(b)-4.15(e)所示。

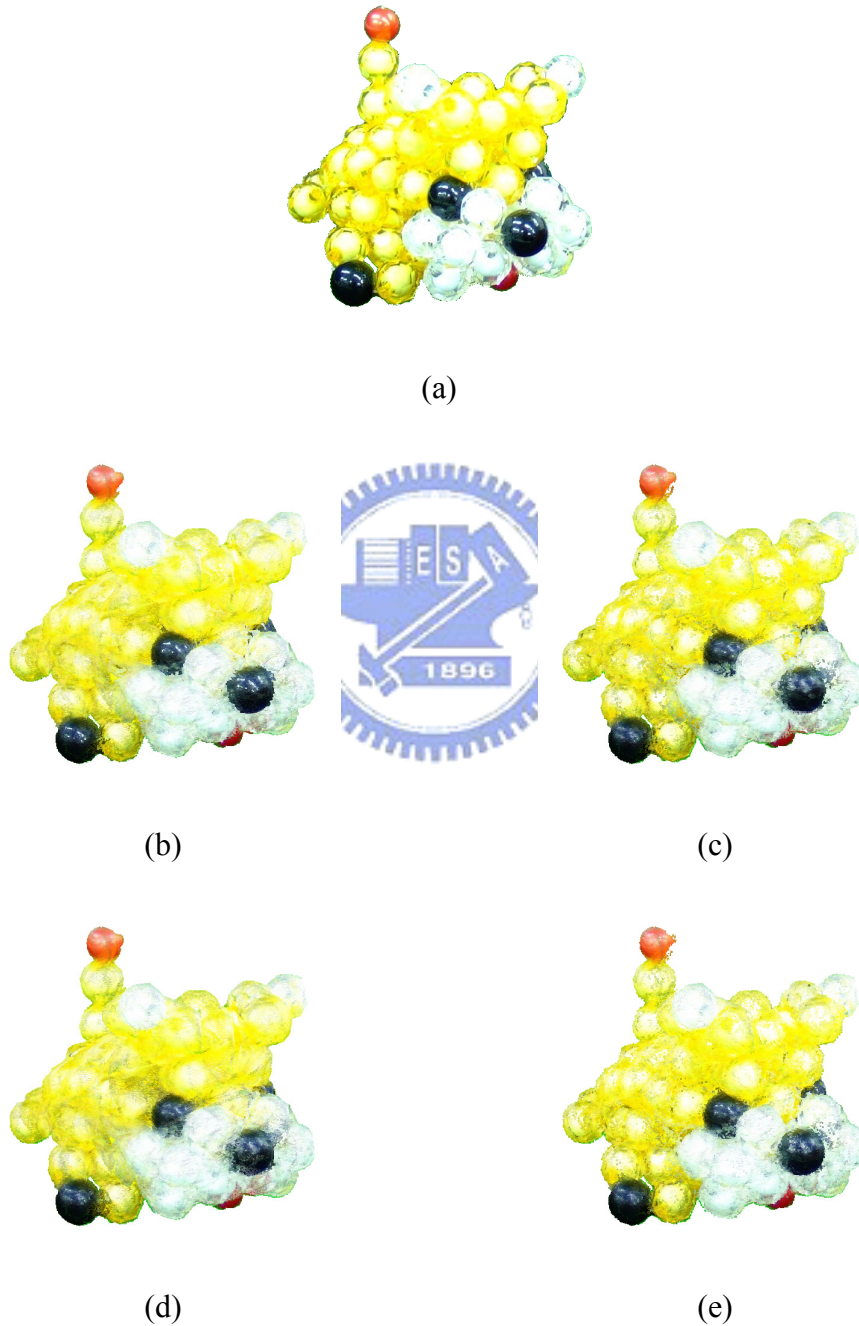


圖 4.15 狗模型。(a) 原圖；(b) 單一臨界值法重建結果；(c) 適應臨界值法重建結果；(d) 直方圖法重建結果；(e) 密度基礎群聚法重建結果。

這個實驗對象主要特色是有鏤空的結構，選擇鏤空部位來比較，如圖 4.16(a) 所示，圖 4.16(b)為鏤空部位放大，而單一臨界值法、適應臨界值法、直方圖法與本篇論文所採用的密度基礎群聚法的實驗結果如圖 4.16(c)-4.16(f)所示。

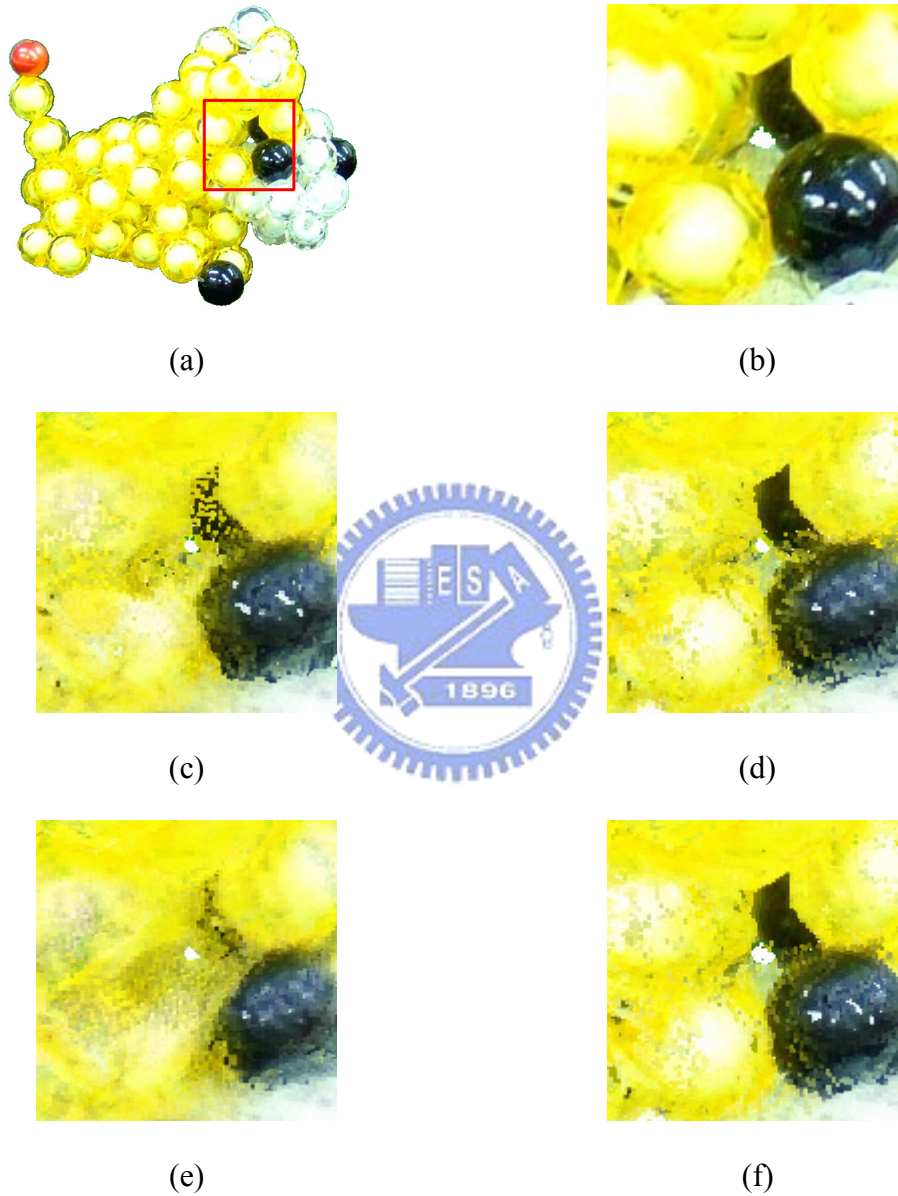


圖 4.16 狗模型鏤空部位。(a) 原圖；(b) 鏤空部位放大；(c) 單一臨界值法重建結果；(d) 適應臨界值法重建結果；(e) 直方圖法重建結果；(f) 密度基礎群聚法重建結果。

此外，這個實驗對象還有凹陷的部位，凹陷的部位在舌頭與臉之間，如圖 4.17(a) 所示，圖 4.17(b)為凹陷部位放大，而單一臨界值法、適應臨界值法、直方圖法與本篇論文所採用的密度基礎群聚法的實驗結果如圖 4.17(c)-4.17(f)所示。

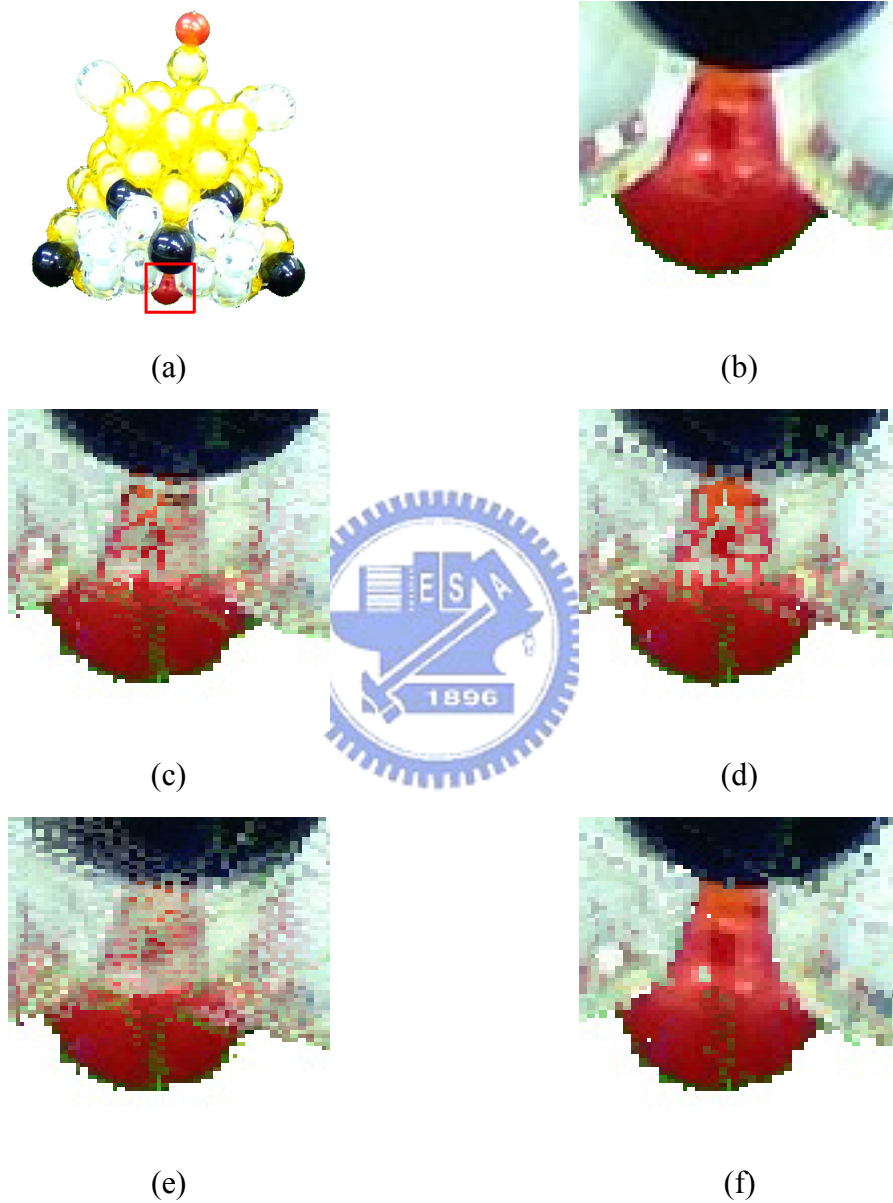


圖 4.17 狗模型凹陷部位。(a) 原圖；(b) 凹陷部位放大；(c) 單一臨界值法重建結果；(d) 適應臨界值法重建結果；(e) 直方圖法重建結果；(f) 密度基礎群聚法重建結果。

由圖 4.16 與圖 4.17 中可以看出，本篇論文所採用的密度基礎群聚法的實驗結果較好，適應臨界值法與單一臨界值法次之，而直方圖法較差。在這個實驗中使用十二張重建影像來進行重建，實驗結果如下，重建影像的 PSNR 值如表 4.19，角度如表 4.20；鑑定影像的 PSNR 值如表 4.21，角度如表 4.22。由表 4.19 與表 4.21 可看出，本篇論文所採用的密度基礎群聚法的實驗結果與原圖最相似。

表 4.19 重建影像 PSNR 平均值。

	單一臨界值法	適應臨界值法	直方圖法	密度基礎群聚法
PSNR	29.89799	30.38442	29.49787	30.82052

表 4.20 重建影像角度。

No. image	1	2	3	4	5	6
Angle	0°	30°	60°	90°	120°	150°
No. image	7	8	9	10	11	12
Angle	180°	210°	240°	270°	300°	330°

表 4.21 鑑定影像 PSNR 平均值。

	單一臨界值法	適應臨界值法	直方圖法	密度基礎群聚法
PSNR	26.89814	27.23512	26.63218	27.51520

表 4.22 鑑定影像角度。

No. image	1	2	3	4	5	6
Angle	10°	20°	40°	50°	70°	80°
No. image	7	8	9	10	11	12
Angle	100°	110°	130°	140°	160°	170°
No. image	13	14	15	16	17	18
Angle	190°	200°	220°	230°	250°	260°
No. image	19	20	21	22	23	24
Angle	280°	290°	310°	320°	340°	350°

表 4.23 投影誤差。

Voxel dimensions	140 ³	280 ³	420 ³
單一臨界值法	31.1598	26.9024	23.1229
適應臨界值法	30.5064	23.3805	18.2219
直方圖法	32.5930	30.2035	28.8543
密度基礎群聚法	28.3141	19.5708	15.4479

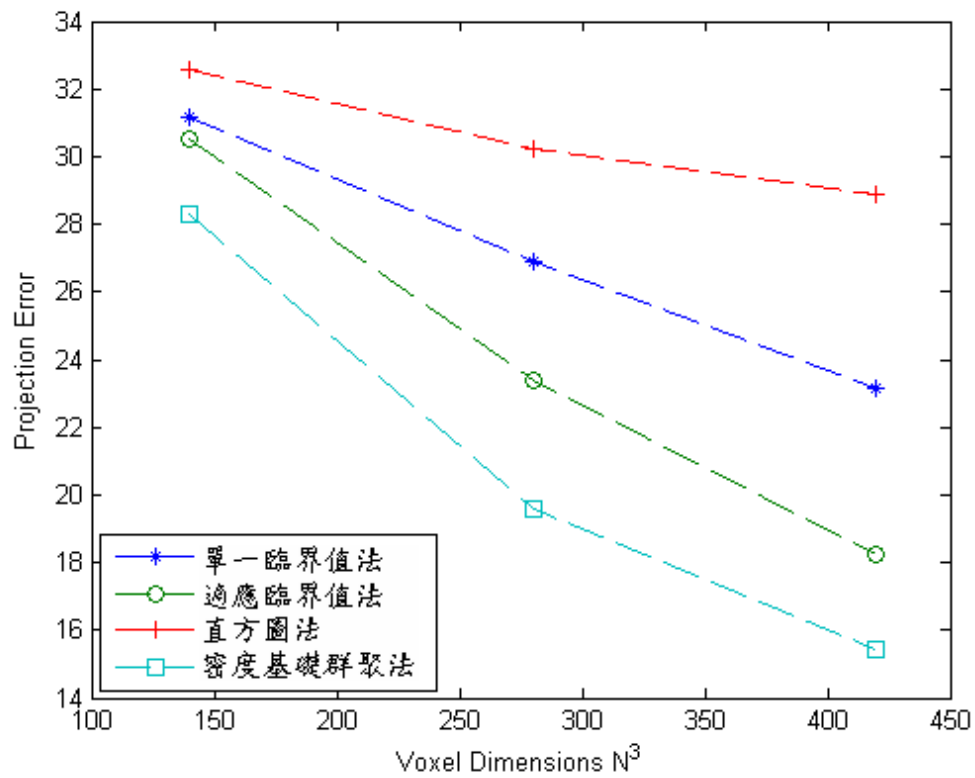


圖 4.18 投影誤差曲線。

表 4.24 時間(秒)。

Voxel dimensions	140 ³	280 ³	420 ³
單一臨界值法	82.9	465.4	1428.2
適應臨界值法	92.3	482.3	1450.7
直方圖法	111.6	512.8	1532.0
密度基礎群聚法	136.1	552.4	1627.0

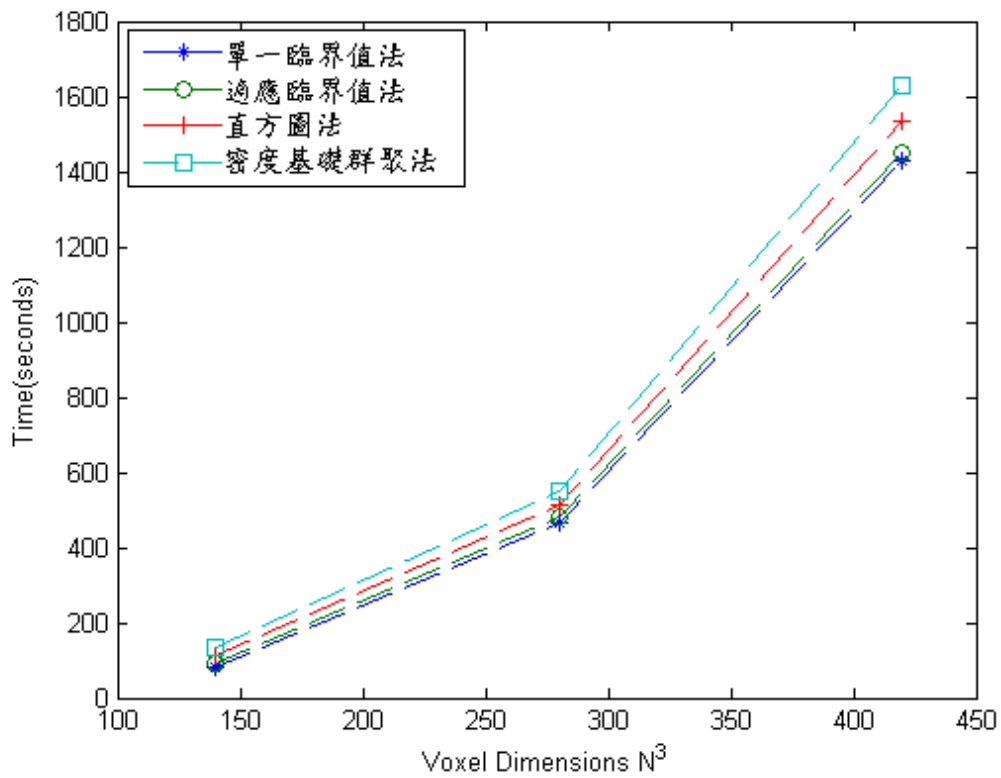


圖 4.19 時間曲線。

第五個實驗對象也為水晶材質，如圖 4.20(a)所示，單一臨界值法、適應臨界值法、直方圖法與本篇論文所採用的密度基礎群聚法的實驗結果如圖 4.20(b)-4.20(e) 所示。

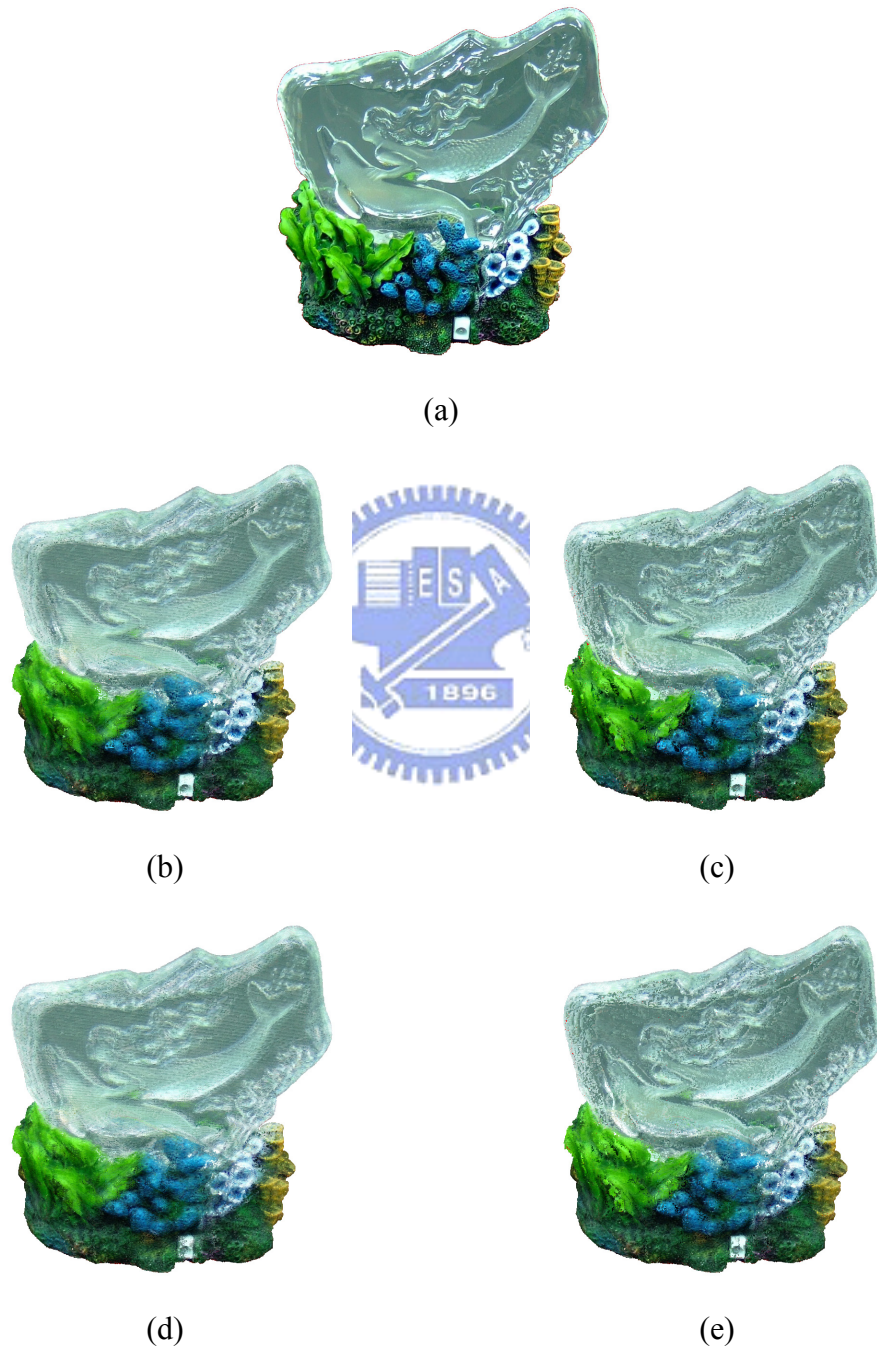
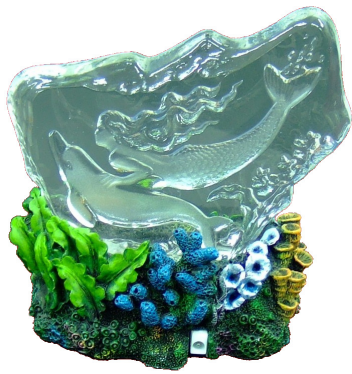
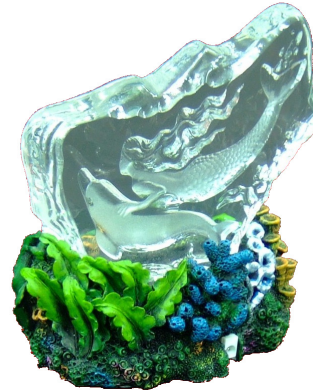


圖 4.20 魚模型。(a) 原圖；(b) 單一臨界值法重建結果；(c) 適應臨界值法重建結果；(d) 直方圖法重建結果；(e) 密度基礎群聚法重建結果。

這個實驗對象的主要特色是表面光澤變化大，且有雕刻的表面紋理，雕刻的表面紋理在模型的正面，為凹陷的結構，如圖 4.21(a)所示，而模型原圖的其它角度如圖 4.21(b)-4.21(l)所示。



(a)



(b)



(c)



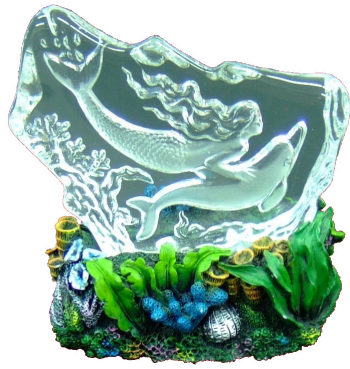
(d)



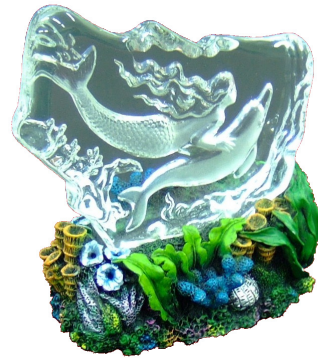
(e)



(f)



(g)



(h)



(i)



(j)



(k)



(l)

圖 4.21 魚模型原圖。(a) 角度 0 度；(b) 角度 30 度；(c) 角度 60 度；(d) 角度 90 度；(e) 角度 120 度；(f) 角度 150 度；(g) 角度 180 度；(h) 角度 210 度；(i) 角度 240 度；(j) 角度 270 度；(k) 角度 300 度；(l) 角度 330 度。

由於這個實驗對象的材質為半透明的水晶，且有凹陷雕刻的表面紋理，對模型重

建造成一定影響，選擇可以明顯看出各方法差異的影像來比較，為角度 180 度時的影像，如圖 4.22(a)所示，而單一臨界值法、適應臨界值法、直方圖法與本篇論文所採用的密度基礎群聚法的實驗結果如圖 4.22(b)-4.22(e)所示。

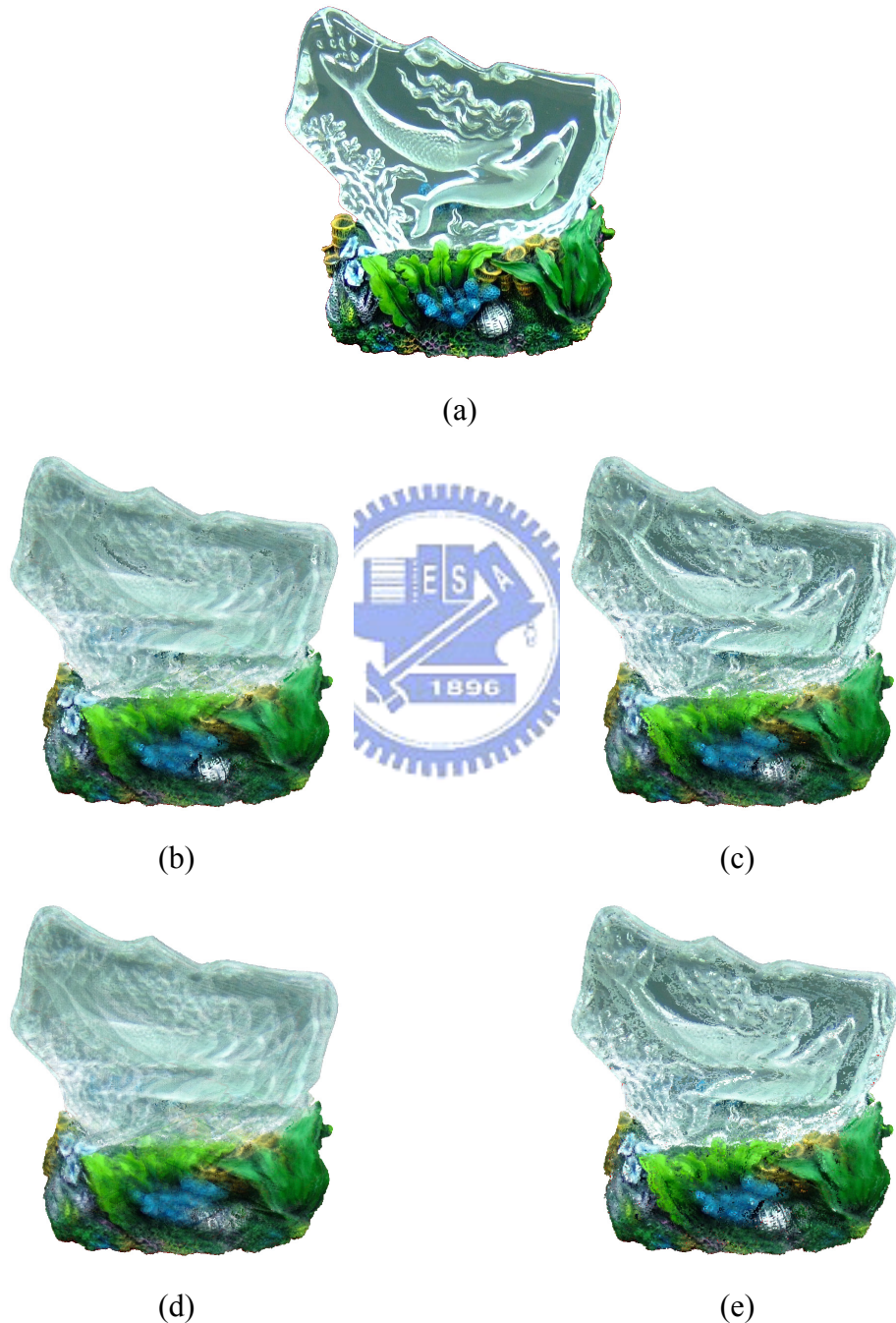


圖 4.22 魚模型反面。(a) 原圖；(b) 單一臨界值法重建結果；(c) 適應臨界值法重建結果；(d) 直方圖法重建結果；(e) 密度基礎群聚法重建結果。

由圖 4.22 中可以看出，本篇論文所採用的密度基礎群聚法與適應臨界值法的實驗結果較好，而單一臨界值法與直方圖法較差。在這個實驗中使用十二張重建影像來進行重建，實驗結果如下，重建影像的 PSNR 值如表 4.25，角度如表 4.26；鑑定影像的 PSNR 值如表 4.27，角度如表 4.28。由表 4.25 與表 4.27 可看出，本篇論文所採用的密度基礎群聚法的實驗結果與原圖最相似。

表 4.25 重建影像 PSNR 平均值。

	單一臨界值法	適應臨界值法	直方圖法	密度基礎群聚法
PSNR	27.48483	28.45487	27.07186	28.88160

表 4.26 重建影像角度。

No. image	1	2	3	4	5	6
Angle	0°	30°	60°	90°	120°	150°
No. image	7	8	9	10	11	12
Angle	180°	210°	240°	270°	300°	330°

表 4.27 鑑定影像 PSNR 平均值。

	單一臨界值法	適應臨界值法	直方圖法	密度基礎群聚法
PSNR	25.7947	26.2147	25.5587	26.5153

表 4.28 鑑定影像角度。

No. image	1	2	3	4	5	6
Angle	10°	20°	40°	50°	70°	80°
No. image	7	8	9	10	11	12
Angle	100°	110°	130°	140°	160°	170°
No. image	13	14	15	16	17	18
Angle	190°	200°	220°	230°	250°	260°
No. image	19	20	21	22	23	24
Angle	280°	290°	310°	320°	340°	350°

表 4.29 投影誤差。

Voxel dimensions	140 ³	280 ³	420 ³
單一臨界值法	35.9111	32.6525	31.2344
適應臨界值法	35.4387	27.8270	22.6132
直方圖法	38.0343	35.0954	33.7425
密度基礎群聚法	34.8568	25.5548	19.8687

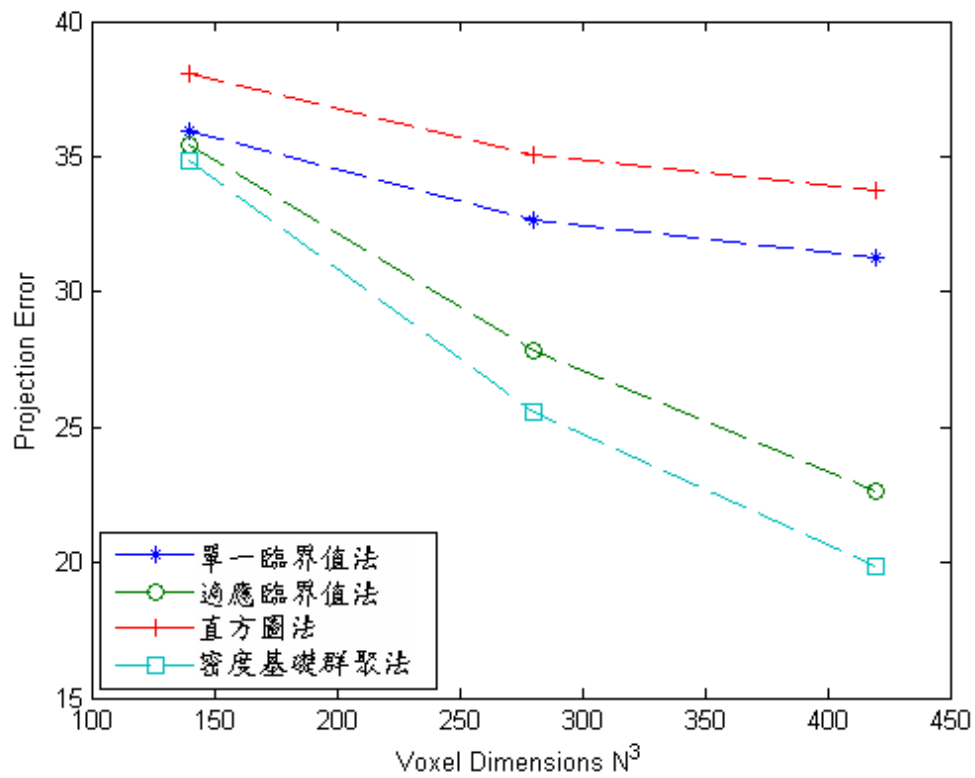


圖 4.23 投影誤差曲線。

表 4.30 時間(秒)。

Voxel dimensions	140 ³	280 ³	420 ³
單一臨界值法	88.4	463.4	1424.8
適應臨界值法	102.7	495.1	1481.2
直方圖法	109.7	551.6	1587.1
密度基礎群聚法	125.6	589.8	1711.3

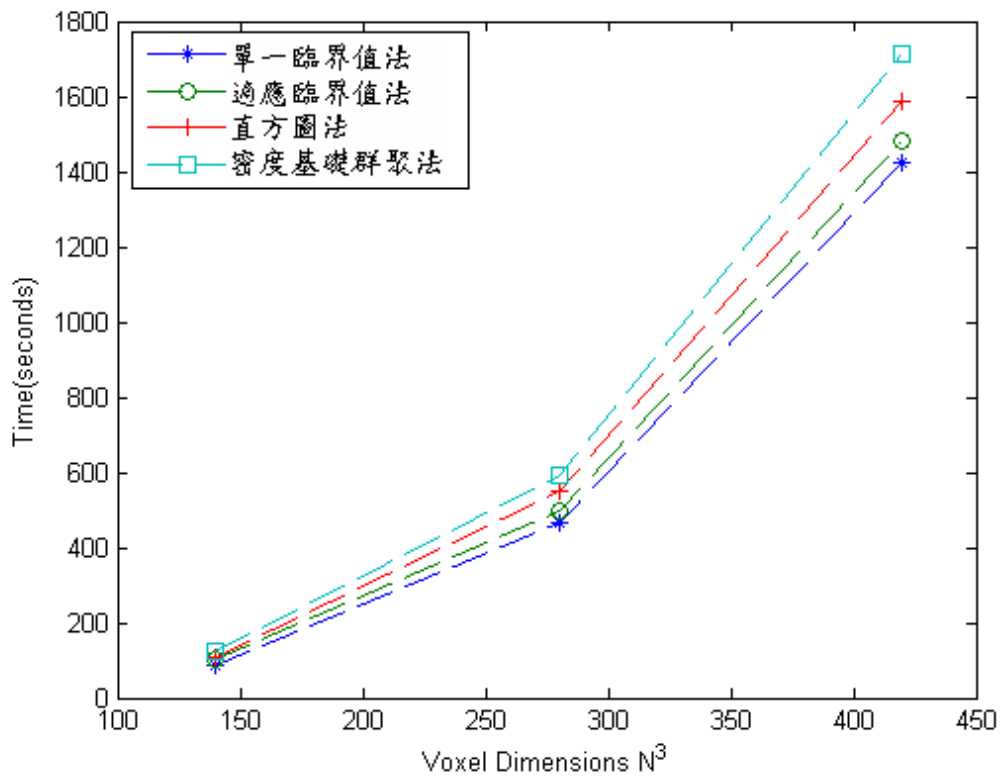
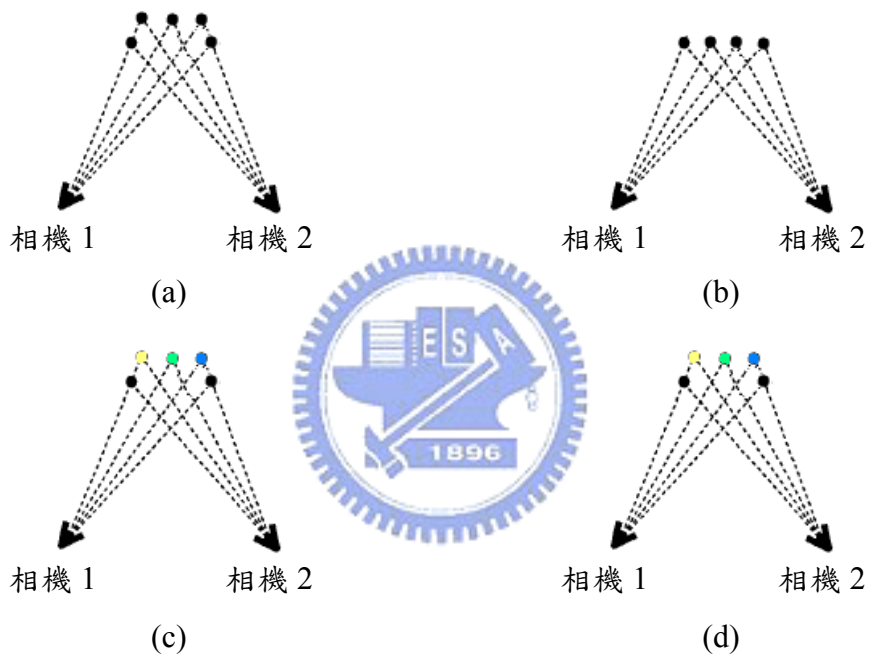


圖 4.24 時間曲線。

4.3 實驗分析

凹陷的表面結構的重建對於以立體像素為基礎的三維模型重建方法一直是個難題，在圖 4.3 中可以看出，若物體表面結構形狀有凹陷，不同的色彩一致性方法所得到的實驗結果差異很大。舉例來說，若凹陷的表面如圖 4.25(a)所示，則重建結果如圖 4.25(b)所示；若凹陷的表面如圖 4.25(c)所示，則重建結果如圖 4.25(d)所示。同樣的表面結構，因為立體像素的顏色不同而有不同的重建結果。



4.25 凹陷的表面結構與重建結果。(a) 凹陷表面 1；(b) (a)之重建結果；(c) 凹陷表面 2；(d) (c)之重建結果。

重建物體凹陷表面有時有相當的難度存在，也許在凹陷表面中的立體像素彼此之間顏色差異不大，而色彩一致性方法必須有較高的靈敏度將些許的差異區分出來，因此好的色彩一致性方法通常有嚴謹的條件，當條件太寬鬆時，會重建出許多不該存在的立體像素，導致重建結果不如預期；但在條件太嚴格時，可能會減少許多應該存在的立體像素，而無法重建出完整的三維重建模型。

此外，大部分的物體表面都為朗伯表面(lambertian surface)，朗伯表面也可稱

為均等擴散面，只要照度越大，表面的亮度也就越大。所以就算模型表面顏色很均勻，受到表面結構與光線的關係影響到照度後，表面的亮度不同，使得表面顏色差異變大。在三維模型重建過程中，在重建某些部位時，色彩一致性的條件要嚴格，例如在凹陷的部位；在某些部位，色彩一致性的條件卻不能嚴格，例如在物體的凸面，由於受到光線影響，讓本來很均勻的表面顏色產生了極大的差異，因此色彩一致性的方法必須要有適應性。

在幾個實驗之後得到的結論，單一臨界值法的實驗結果往往是較差的，由於只使用一個參數，所以缺乏適應性，當參數選擇過大時，會重建出許多不該存在的立體像素；當參數選擇過小時，可能會減少許多應該存在的立體像素，而無論參數如何調整，都無法得到最佳的實驗結果，經過幾個實驗下來，發現參數調整介於 50 至 70 之間，會有較佳的實驗結果。此外，單一臨界值法的優點是只使用到一個參數，降低了參數調整的難度，且重建過程所需的時間最短。

適應臨界值法使用了兩個參數，改善了單一臨界值法缺乏適應性的問題，所以實驗結果都會優於單一臨界值法。由於有兩個參數，兩個參數彼此又互相影響，因此參數調整不易。經過幾個實驗下來，發現 τ_1 介於 10 至 20 之間，而 τ_2 介於 1.5 至 3.5 之間時，會有較佳的實驗結果。此外，適應臨界值法在某些情況下，例如 S_{π^k} 值和 \bar{S} 值都為大時，如圖 4.26 所示，無法區分出立體像素為物體表面上的立體像素，如圖 4.26(a)所示，或是非物體表面上的立體像素，如圖 4.26(b)所示，此為適應臨界值法的缺點。

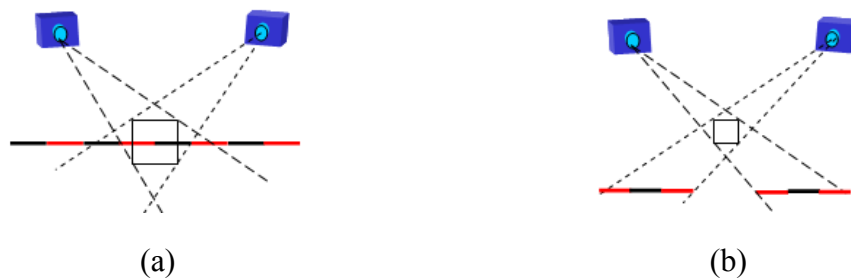


圖 4.26 S_{π^k} 值大和 \bar{S} 值大的情形。(a) 立體像素在表面；(b) 立體像素不在表面。

直方圖法的重建條件最為嚴格，因為直方圖法要求所有的直方圖彼此之間不為空集合，這點在理論上是合理的，但在本篇論文的實驗之中，在使用 512(8×8×8) 個 color bin 的情形下，模型均無法順利重建，重建的結果是模型產生破碎，這是由於表面結構與光線的關係影響到照度後，表面的亮度不同，使得表面顏色差異變大，因而直方圖彼此之間產生了空集合，而立體像素無法重建。為了尋求完整的模型，合理的將 color bin 降低為 64(4×4×4) 個，模型可以順利重建，但是降低了 color bin，使得直方圖法的重建條件降低許多，反而重建出許多不該存在的立體像素，所以實驗結果不如預期。

最後是本篇論文所採用的密度基礎群聚法，此方法中使用了兩個參數，分別為 Eps 和 MinPts，兩個參數會互相影響，因此參數的調整不易，與適應臨界值法相同。經過幾個實驗下來，發現 Eps 介於 20 至 50 之間，而 MinPts 介於 4 至 7 之間時，會有較佳的實驗結果。此外立體像素重建的條件要求最大群聚內的資料點必須分散在所有的相機影像平面上方能重建，與直方圖法原理相似，且因為有將資料點利用密度基礎群聚的方式分類，因此比直方圖法更有彈性。總結上述的分析與實驗結果，本論文所使用的密度基礎群聚法能比其它方法更有效率且更真實的將三維模型重建出來。

此外，在實驗之後發現，材質並非為影響重建結果的絕對因素，影響重建結果的主要原因有兩個，表面結構以及表面光澤。當物體有凹陷的表面結構時，模型重建的結果會不理想，鏤空也算是一種凹陷的表面結構。對以立體像素為基礎的三維模型重建來說，簡單的表面結構意義為物體有較少的凹陷結構，若物體的表面結構越簡單，模型重建的結果會越好。當物體表面有光澤時，模型重建的結果會不理想，因為光澤會造成物體表面顏色差異變大，而光澤的產生與物體的表面材質有關。對以立體像素為基礎的三維模型重建來說，當物體表面越不容易產生光澤時，模型重建的結果會越好。

第五章

結論與未來發展

色彩一致性在以立體像素為基礎的三維模型重建中是很重要的一環，因為色彩一致性讓三維模型更接近真實。在本篇論文中，採用密度基礎群聚法來實現色彩一致性，與單一臨界值法、適應臨界值法及直方圖法比較，本篇論文所採用的密度基礎群聚法所重建出的三維模型較好，根據實驗的結果，以密度基礎群聚法為色彩一致性方法可以減少重建錯誤的立體像素，使得三維模型更接近真實。

在未來，以立體像素為基礎的三維模型重建仍有改善的空間，像是容易產生光澤的物體表面，在目前重建上仍有困難，也許在未來，可以找到更佳的色彩一致性方法來處理這些問題。而在進行相機校正時，選取轉角點無法很精確，所以相機校正參數存在微小的誤差，當三維模型重建解析度高時，會造成相當的影響，因此降低相機校正誤差，可提升重建模型的品質，這方面也是值得發展。而物體表面一般為朗伯表面，表面受到的照度越大，亮度越大，不同角度下，物體表面受到的照度不同，而在相機影像平面上產生差異，因此若能降低朗伯表面在拍攝時光線造成的影響，對三維模型重建有相當幫助。

參考文獻

- [1] M. Levoy, "The Digital Michelangelo project: 3D scanning of large status," in *Proc. SIGGRAPH 2000*, pp. 134-141, 2000.
- [2] Z. Chen, S. Y. Ho, and D. C. Tseng, "Polyhedral face reconstruction and modeling from a single image with structured light," *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 23, no. 3, pp. 864-872, 1993.
- [3] G. Hu and G. Stockman, "3-D Surface Solution Using Structured Light and Constraint Propagation," *IEEE Trans. on Pattern Analysis Machine Intelligence*, vol. 11, no. 4, pp. 390-402, 1989.
- [4] Y. F. Wang, A. Mitiche, and J. K. Aggarwal, "Computation of surface orientation and structure of objects using grid coding," *IEEE Trans. on Pattern Analysis Machine Intelligence*, vol. 9, no.1, pp. 129-137, 1987.
- [5] T. S. Huang and A. N. Netravali, "Motion and structure from feature correspondences: A review," *Processing of IEEE*, vol. 82, no. 2, pp. 251-268, 1994.
- [6] B. Garcia and P. Brunet, "3D Reconstruction with projective Octrees and Epipolar Geometry," *Computer Vision 1998. Sixth International Conference*, pp. 1067-1072, 1998.
- [7] S. M. Seitz and C. R. Dyer, "Photorealistic scene reconstruction by voxel coloring," in *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1067-1073, 1997.
- [8] R. Y. Tsai, "A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine

vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses,” *IEEE Trans. Robotic and Automation*, vol. 3, no. 4, pp. 323-444, 1987.

- [9] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.
- [10] K. N. Kutulakos and S. M. Seitz, “A theory of shape by spacing carving,” *Int. J. of Computer Vision*, vol. 38, no. 3, pp. 199-218, 2000.
- [11] W. B. Culbertson and T. Malzbender, “Generalized voxel coloring,” in *Proc. ICCV Workshop, Vision Algorithms Theory and Practice, Springer Verlag Lecture Notes in Computer Science*, pp. 100-115, 2001.
- [12] J. Yin and J. R. Cooperstock, “A new photo consistency test for voxel coloring,” *Computer and Robot Vision, 2005. Proceedings. The 2nd Canadian Conference on* Volume , Issue , pp. 566-570, 2005.
- [13] H. P. Kriegel, J. Sander, and X. Xu, “A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise,” In *Proc. 1996 Int. Conf. Knowledge Discovery and Data Mining (KDD’96)*, pp. 226-231, Portland, OR, 1996.
- [14] J. Y. Bouguet, [Online]. Available: <http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/>
- [15] G. G. Slabaugh, W. B. Culbertson, T. Malzbender, M. R. Stevens, and R. W. Schafer, “Method for volumetric reconstruction of visual Scenes,” *Int. J. of Computer Vision*, vol. 57, no. 3, pp. 179-199, 2004.
- [16] M. R. Stevens, B. Culbertson, and T. Malzbender, “A histogram-based color consistency test for voxel coloring”, in *Proc. IEEE Conf. Pattern Recognition*, vol. 4, pp. 118-121, 2002.
- [17] G. G. Slabaugh, T. Malzbender, W. B. Culbertson, and R. W. Schafer, “Improved voxel coloring via volumetric optimization,” *Center for Signal and Image Processing Technical Report TR3, Georgia Institute of Technology*, 2000.

- [18] C. Zhao and W. Xiao, "A Parallelizing and Improving on Voxel Coloring Technology for 3D Reconstruction Based on Images," in *Proc. IEEE Conf. Pattern Recognition*, vol. 4, pp. 118-121, 2002.

