

私立東海大學資訊工程與科學研究所

碩士論文

指導教授：石志雄

視角規劃對立體模型細部全彩貼圖
精確度及效率探討



研究生：楊遠凡

中華民國 98 年 7 月 7 日

摘要

三度空間立體全彩模型重建是非常吸引人但是卻需要非常繁複的步驟和時間去實現，擁有一個真實世界的三維模型並自動化進行紋理貼圖是相當有挑戰性的課題，在本研究就是想實現三維模型貼圖的自動化和縮短其建模貼圖時間為研究重點。

我們使用最佳視角演算法去對三維模型進行計算，結果會得到以最少的拍攝張數和最佳拍攝角度去包含所有三維模型的面，如此可以讓擷取模型紋理相片時省去繁雜的拍攝步驟和多餘的紋理計算，並可以加速整體三維自動化貼圖的過程，提高貼圖工作的效率。

在此研究中我們需以人工方式為 3D OBJ 模型和相片紋理進行少部分控制點的對應，而以直接線性轉換理論擷取相機的外方位和內方位位置參數，最後使用透視投影法去將模型上的點和相片上的位置去進行自動化的對應以完成細部三維全彩模型。

而全彩的三維模型已經可以建立，高度精準的貼圖技術也已經存在，但本研究的目的要直接減少數位三維模型貼圖所需的人力和增加其生產力。

目次

摘要.....	i
目次.....	ii
圖次.....	iv
表次.....	vii
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究成果與背景.....	2
1.3 論文架構.....	6
第二章 文獻探討.....	7
第三章 最佳視角拍攝.....	13
第四章 直接線性轉換.....	27
第五章 實驗過程與結果.....	35
5.1 實驗過程.....	35
5.2 實驗結果.....	40
5.2.1 模擬六角錐紋理.....	40
5.2.2 彩色六角錐相片紋理.....	41
5.2.3 彩色相片分割結果分析.....	43

5.2.4	L 形積木貼圖紋理	44
5.2.4.1	最大紋理進行貼圖實驗結果.....	44
5.2.4.2	最佳視角合併進行貼圖實驗結果.....	46
5.2.5	中國銀行貼圖紋理	49
5.2.5.1	最佳視角規劃結果	49
5.2.5.2	貼圖結果.....	50
5.2.6	T 形積木.....	51
5.2.6.1	視角規劃.....	51
5.2.6.2	貼圖結果.....	52
第六章	結論	53
參考文獻	54

圖次

圖 1 貼圖流程圖	5
圖 2 CMM 測量儀(左)，LiDAR 系統(右).....	8
圖 3 環繞計算被攝物體最佳角度示意圖	13
圖 4 視角規劃流程圖	15
圖 5 載入視角規劃正六角錐模型	16
圖 6 視角規劃結果等高線圖	17
圖 7 正六角錐規劃後三維分布圖	17
圖 8 正六角錐最佳拍攝視角	18
圖 9 L 形積木和它的三維模型	18
圖 10 L 形積木二維等高線圖一	19
圖 11 L 形積木二維等高線圖二	19
圖 12 L 形積木可見面分布圖一	20
圖 13 L 形積木可見面分布圖二	20
圖 14 BOC 第一次視角規劃結果	21
圖 15 BOC 第二次視角規劃結果	22
圖 16 BOC 可見面圖示 1	22
圖 17 BOC 可見面圖示 2	23

圖 18 T 形積木視角規劃情形一	24
圖 19 T 形積木視角規劃情形二	25
圖 20 T 形積木視角規劃情形三	26
圖 21 三維空間與二維平面的關係.....	27
圖 22 投影與三維空間域關係	28
圖 23 投影與影像平面關係	28
圖 24 計算出的最佳視角	36
圖 25 以最佳視角進行拍攝(模擬).....	36
圖 26 三維點對應二維材質之位置.....	36
圖 27 細分後立體貼圖成像(模擬材質).....	39
圖 28 對應點計算結果(模擬相片).....	40
圖 29 真實材質未細分之三維貼圖成像.....	41
圖 30 未細分之錯誤對應關係	41
圖 31 細分次數一次之計算對應情形.....	42
圖 32 彩色相片與分割次數誤差趨勢圖	44
圖 33 L 形積木兩個單一平面角	45
圖 34 點對應關係.....	45
圖 35 L 形積木依視角規劃結果拍攝真實紋理相片	46
圖 36 最佳的視角	47

圖 37 合併平面後計算對應點情形.....	47
圖 38 合併平面後貼圖情形	48
圖 39 BOC 之視角規劃結果	49
圖 40 BOC 擷取之紋理	49
圖 41 BOC 貼圖結果.....	50
圖 42 規劃結果第一面和其紋理.....	51
圖 43 規劃結果第二面和其紋理.....	51
圖 44 規劃結果第三面和其紋理.....	51
圖 45 T 形積木貼圖結果.....	52

表次

表 1 各貼圖方法比較	10
表 2 細分次數誤差與距離關係圖	38
表 3 細分次數與誤差關係(模擬相片)	40
表 4 未細分之誤差	42
表 5 分割一次與誤差關係	43
表 6 分割次數與誤差關係	43
表 7 誤差圖表	47

第一章 緒論

1.1 研究動機

隨著空間數位化的時代來臨，地理資訊系統逐漸的取代傳統紙本資訊，而對於城市的數位化在都市計劃的規劃和管理扮演很重要的角色；三維化的數位城市地圖更符合人類思考的邏輯，讓使用者作出更精準的決策。

太空技術的進步，時時刻刻都有衛星環繞在地球的上空，在 Google 的創新思維以及雄厚財力下，推出了 Google Earth 這套世界級的地理資訊軟體，而 Google Earth 讓使用者擁有和以往更不一樣的視野。

Google Earth 是由從衛星在太空上環繞地球以地毯式拍攝整個地球陸地的紋理，再藉由拼接技術組合成完整地球陸地的紋理，基於 Google Earth 的架構讓使用者在上面發揮創意及任何地理資訊的創建。

如今 Google Earth 的目標為建構世界上所有建築物的三維實體模型，目前的方式是以 Google SketchUp 與 Google Earth 結合，經由人工托、拉的方式去產生建築物模型，再以人工對各別的面去做紋理敷貼，這種方式雖然可以達成三維建模的目的，但如果是要建構一個數

位城市來輔助都市設計的話，這將是一個非常耗時耗力的工作。

本研究使用基礎的三維模型檔，再運用最佳視角程式去判斷，針對建築物的最佳視角進行各別拍攝紋理相片，所謂的最佳視角則是以最少的拍攝張數去決定所拍攝的角度以涵蓋建築物最多的面，這個方式可以解決光影效應的現象，而且不會對同一個平面去做同樣的紋理重覆貼圖，減少重覆紋理的運算量，也減少拍攝時間和進行貼圖時的複雜度，再基於影像運用直接線性轉換(Direct Linear Transform) 將三維點座標對應至貼圖紋理座標，利用這種方法可以讓三維建築物的貼圖紋理更加精準，而且所需要的人力時間比起傳統貼圖方式會大幅降低。

快速精準的三維貼圖模型可以快速的建立都市實景模型，讓使用者可以針對更完整的三維資訊做任何分析工作，讓數位城市更具有實用的價值。

1.2 研究成果與背景

為了使三維數位城市的實現，可以讓原本的二維城市轉換成三維的立體資訊包含更多空間資訊，讓使用者有更進一步的體驗和運用，而目前所運用建立三維建築的研究或方法[24]，都需要昂貴的器材設備、繁雜的步驟冗長的運算時間，因此決定研究如何以更便宜的設備、

簡單的步驟和較短的運算時間來達到更好的建築貼圖的精準度和品質。

在本研究中，我們首先載入模型檔以程式去計算出整體的模型所要拍攝的最佳角度和張數，而此最佳角度定義為以最少的張數去包含最多的面紋理，由此可以用最少的拍攝張數去得到建築物紋理，比其它研究[20,21]以特定角度去拍攝不僅過程繁雜，也增加了後續計算處理的時間。

而相片紋理的取得本研究使用 Nikon D200 DSLR 加上 AF-S VR Zoom-Nikkor 18-200mm 鏡頭，焦距範圍 18mm-200mm，包含廣角到望遠端，這樣可以更有利於紋理的拍攝，機身所擁有(3872×2592 約一千萬像素)，可以讓每一張相片擁有許多面的豐富紋理資訊，讓之後的拍攝簡化，貼圖紋理更加地細緻。

在[23]中對相機的量測性探討中，以非量測性(Non-metric)的相機去做測量，在本研究中是使用 Nikon D200 數位單眼相機當作非量測性相機進行拍攝，因為其觀景窗有標框，所以構圖起來可以更加精確，以 CMOS 感光元件擷取影像去除了底平整片的問題，也可以直接以數位的方式進行研究，最後還有一個鏡頭畸變的問題，[23]提出解決鏡頭畸變的問題，解決畸變問題可以讓控制點和計算後的控制點更加精準。

得到的紋理相片再去和原有的三維模型檔以人工的方式去配對六個控制點，配對完成後會將所有部分模型上的點經由直接線性轉換 (Direct Linear Transform-DLT) 去計算出所有的模型點在相片紋理上的位置。

而在計算 DLT 的過程中，若所選擇的控制點多數在共平面上的話，所計算出來的 DLT 轉換方程式會較不精準，在[21]中也提到所計算出的方程式誤差會因為所選擇點位置而有所不同，而愈分散在各別平面上的控制點會計算出愈佳的 DLT 方程式。

以 DLT 方程式計算得到模型上各點在相片紋理上的位置後，使用 DirectX 進行貼圖，可以得到最後擁有精確貼圖紋理的三維立體建築模型。

研究方法流程圖



圖 1 貼圖流程圖

1.3 論文架構

本論文內容簡述如下：

第一章介紹研究的動機、目的和簡述研究方法及成果。

第二章將進行相關研究論文探討，並針對其它論文和本研究方法比較，並提出改善方法。

第三章說明如何最佳視角去決定相機拍攝角度，並進行最佳角度的拍攝。

第四章為直接線性轉換(Direct Linear Transform-DLT)的理論基礎，並將之應用在決定二維貼圖座標轉換上。

第五章是以本研究實驗結果，運用最佳視角及 DLT 並進行三維全彩模型貼圖，並就研究結果去分析，產生並展示最終的實驗結果。

第六章將本研究做總結和敘述本研究之未來的展望。

第二章 文獻探討

自動化三維模型貼圖仍為開放議題[1]，在三維模型貼圖上為周期性步驟，分為四個常見步驟，如視角規劃、拍攝紋理、登入控制點和整合，而視角規劃問題可由下面幾個領域來進行分類：例如物體的表面、物體的體積、或其它非物理性地屬性，常見的是以表面為基礎的規劃方式，利用開發遮蔽邊的方式進行規劃[6]，常見的立體幾何演算法被用於探知包括模型容積的三維物體屬性[11]。以模型為基礎來進行觀測規劃，擁有避免使用精確測量以進行場景研究，由於精確測量，通常表示需要昂貴的儀器，因此屬於一個有用的特性[8]。

對於 3D 立體物的全彩未知模型的重建一般採用兩種工作流程：第一種是使用非接觸式或接觸式之距離感測器如 Coordinate Measuring Machine(CMM)三度座標量床(針對小型物體)，及 Light Detection And Ranging (LiDAR)(針對大型物體)長程雷射掃描器來獲得 3D 立體尺寸範圍資料(圖 2)，這些點雲資料再經由整合程式轉換成一連續之三維網格體[4]。接下來程序是將被掃描過的 3D 立體網格模型置入表面材質，一般於這個階段採用間接 uv 人工對應程序。另一種工作流程為照相測量(photogrammetry)塑模程序，細節可參考[2]。



圖 2 CMM 測量儀(左)，LiDAR 系統(右)

由這些步驟可知人工敷貼步驟可說極為繁複，即使以一已簡化之模型仍需耗費數日時間，進行影像剪輯及 uv 對位之工作。但可獲得一相當清楚及精確之敷貼品質。

另一傳統之模型重建採用純影像之技術來建構立體資訊及表面敷貼，以下簡單介紹：

主要使用之技術為(攝影測量) Photogrammetry。此一技術係使用 2 維平面影像以獲取 3 維實物之外形尺寸及建構 3 維全彩模型。精確的校正及對位程序為此一技術成功的要素。一般而言此一技術可分為以下 4 階段 — 1. 設計 (Design) 2. 量測 (Measurement) 3. 結構化及建模 (Structuring / Modeling) 4. 視覺化 / 分析 (Visualization / Analysis)。其中設計指的是相機感測參數及幾

何資料計算而量測指的是使用感測參數以測量點及線位置尺寸。結構化及建模指的是建立模型拓樸關係及貼圖 (Texturing)。最後視覺化及分析則是指檢視模型及分析精確度等。

雖然相機校正程序影響最後之建模精準度，校正程序也可能相當繁複，相當多商業軟體已可提供相當可靠及簡易之校正程序，校正結果也已至可接受之程度，在這裡使用了一套低成本 photogrammetry 系統 — photo modeler 以進行相機校正程序。

程序可分為三大步驟，首先是相機校正，接著是建築物取景，然後是影像建模。

相機校正程序可分為本機校正以供獲取相機內在參數，如焦距及鏡頭扭曲參數 (lens distortion coefficient)，影像面積 (image size)，解析度等。細節可參考[10]。

建築物校正之後的程序便是實際取景以重建大型景觀之 3 維模型。實際取景之程序如下，由於多數之大型景觀多是由數個大面積之平面或曲面所構成，在這裡研發了一取景原則以作為拍攝視角規劃 (view planning) 指導原則。在進行實際拍攝前，先將三維模型載入程式進行模擬，計算出最佳地拍攝角度，經由此指導原則可濾除一些多餘拍攝角度，最後以最少的像片數即可涵蓋整體之主構面 [9, 16]。以進行模型重建。

	置入 材質 方法	貼圖精確 度	貼圖所 需時間	最適模 型建立 大小	視角規 劃	軟硬體 成本
CMM	人工	高	長	小	無	高
LiDAR	人工	高	長	大	無	高
PhotoModeler	人工	高	中	通用	無	中
Maya	人工	高	長	通用	無	中
Nedal^[25]	人工	高	長	通用	無	中
Lin^[18]	自動	高	中	大	無	低
Chen^[21]	自動	中	短	小	無	低
Hanusch^[12]	自動	高	中	通用	無	中
this	自動	高	短	通用	有	低

表 1 各貼圖方法比較

表 1 列舉出常見的三維模型紋理貼圖的方式，CMM 和 LiDAR 採用雷射進行物體掃描，而它們置入材質的方式是相片經由影像處理軟體修正，再以人工的方式去對應每個點每個面的表面材質，人工對應的精確度都很高，但所耗費的時間長，而且所需要的硬體成本都過高；Maya 的貼圖方式與 CMM、LiDAR 類似，也以人工去進行對應，遇到多構面的物體，假設一個四邊形面需要對應四個點，若是一個立方體，五個面需對應二十個點，故所耗時間因此增長；而 PhotoModeler，本在在建模的時候就需要以人工的方式去對應模型，在模型建置完成即可產生相對應的紋理；以上的方法都並未使用視角規劃，PhotoModeler 則是每一個建築構面

都需要在不同兩個角度的相片才能建模，其紋理需每個點都需人工去選取對應，每個點都是以人工選取，所以精確度也是很高。

在[25]中，作者拍攝紋理的正射影像進行敷貼並以 SketchUp 結合 Photoshop 去進行材質處理及敷貼的工作，此類貼圖流程極為繁複；自動化貼圖的方法[18]需搭配數值地形模型(Digital Terrain Model)，相片紋理需要和所有地數值地形上參考點進行對應，所需要對應的數量則依據數值地形的複雜度而提高。

[21]是自動化尋找特徵點，但在進行特徵點選取的動作，也需要進行複雜的前處理才會有較好的效果，影像擷取的方式為物體置於暗房，每旋轉 90 度角來擷取物體所有的紋理，但此方式只式用於凸形物件，不然會有遮蔽面沒辦法擷取到，另外，此方法使用旋轉片台和暗房裡針對小形物體進行建模貼圖；但在[12]中是以許多細微的三維網格為基礎，並對所擷取到的相片的相機外方位和三維模型去做比對，比對出此相片可以包含完整三維網格的哪些三角形紋理，可以針對建模之後沒有形成紋理的部分再去做拍攝的動作，但這個方法做用到非常細微的三角形網格，比對若稍有失誤就會有明顯

地不和諧，所以只適用於物體材質相近之物體，像用砂石所製做的佛像，表面為砂粒狀，就不會有不和諧的情形發生，然而因為需要計算非常多細微的三角形網格，所以在計算上也會花上一段時間。

本論文則是以六個控制點對應，經由 DLT 計算出轉換矩陣，再將所有點代入轉換矩陣計算 u, v 值，再配合視角規劃可以使擷取紋理時可以免去拍攝到多餘的相片，所以在材質貼圖上除了對應點選取之外，紋理 u, v 值皆是自動化產生，也省去所有點人工對應時間，大幅減少貼圖所需的時間，而精確度雖然沒有前面幾項人工對應的精度高，但是在精確度上也有不錯的表現，本論文所使用的為一般高畫質單眼數位相機，與前幾項所需要的硬體設備來說，成本可以算是相當地便宜。

第三章 最佳視角拍攝

在許多研究中[20, 21]，在得到最終要產生模型之前表面紋理的部分，大多使用環繞攝影的方式去拍攝模型紋理，也就是以固定的角度，沿著被攝物體三百六十度進行拍攝[20]；或是沒限制，但也沒有決定如何去進行拍攝[22]，這幾種方式會產生多餘的紋理，而這些多餘的紋理會因為數量多而造成更多的運算部分；在這裡我們提出最佳視角規劃去對被攝模型計算以哪種角度拍攝，可以最少的張數去包含所有的紋理，這樣可以減少之後要進行合成的運算，和重疊面的計算，用

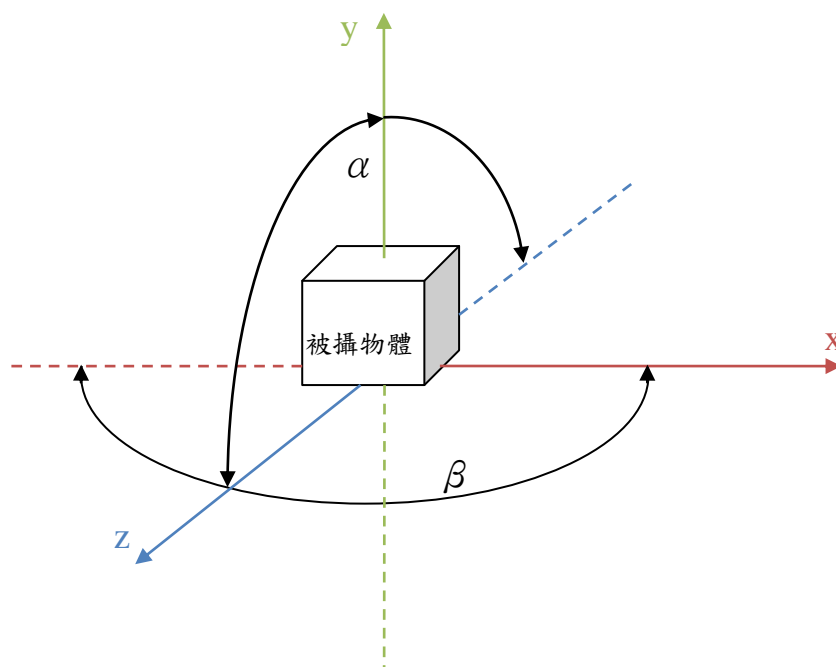


圖 3 環繞計算被攝物體最佳角度示意圖

這個方式去除一些多餘的拍攝角度，達到以更少的時間和更少的運算量去創建相同的模型，以下說明最佳視角規劃的方法圖 3、圖 4。

視角規劃首要目的是收集所有可看見相同模型面的視角區域見圖 3，將水平方向 β 角(-90度到90度)和垂直方向 α 角(-90度到90度)，由此兩個角度可以去包含地表上半圓形球體空間，每間隔10度去計算包含最多面之最佳角度。

第二部分，在每一個角度使用Z-buffer去計算出當時角度所有可見面，再由這些可見面像素決定可見面大小組合，並將計算結果值加入待分析陣列中，直到目標物所有角度的可視面量值，而這些量值可以繪製成等高線如圖 6，而從這裡面可以找到極值，而這個極值就是視角規劃的結果，也就是最佳視角，找到最佳視角後，需把目前最佳視角角度下看得到的可見面都設為不可見，剩餘的模型再下去執行最佳視角規劃，直到所有面都被設為不可見，則之前所有找到的視角為此模型的最佳視角規劃結果。

但在之前的研究 [17]提到若控制點都選在共平面上，或是大部分在共平面上會造成轉換矩陣計算的不正確，為了解決最佳視角計算出來為單一平面，若有其它計算出來的最佳角度為單一平面，又兩個最佳視角的平面為相鄰，則將它們合併為一個視角，而視角為兩個最佳視角的中間值；以這個方法可以使得計算出來的最佳視角在做控制點

選取的時候有更多不同平面上的點可做選取，使得計算出來的轉換矩陣更加精確。

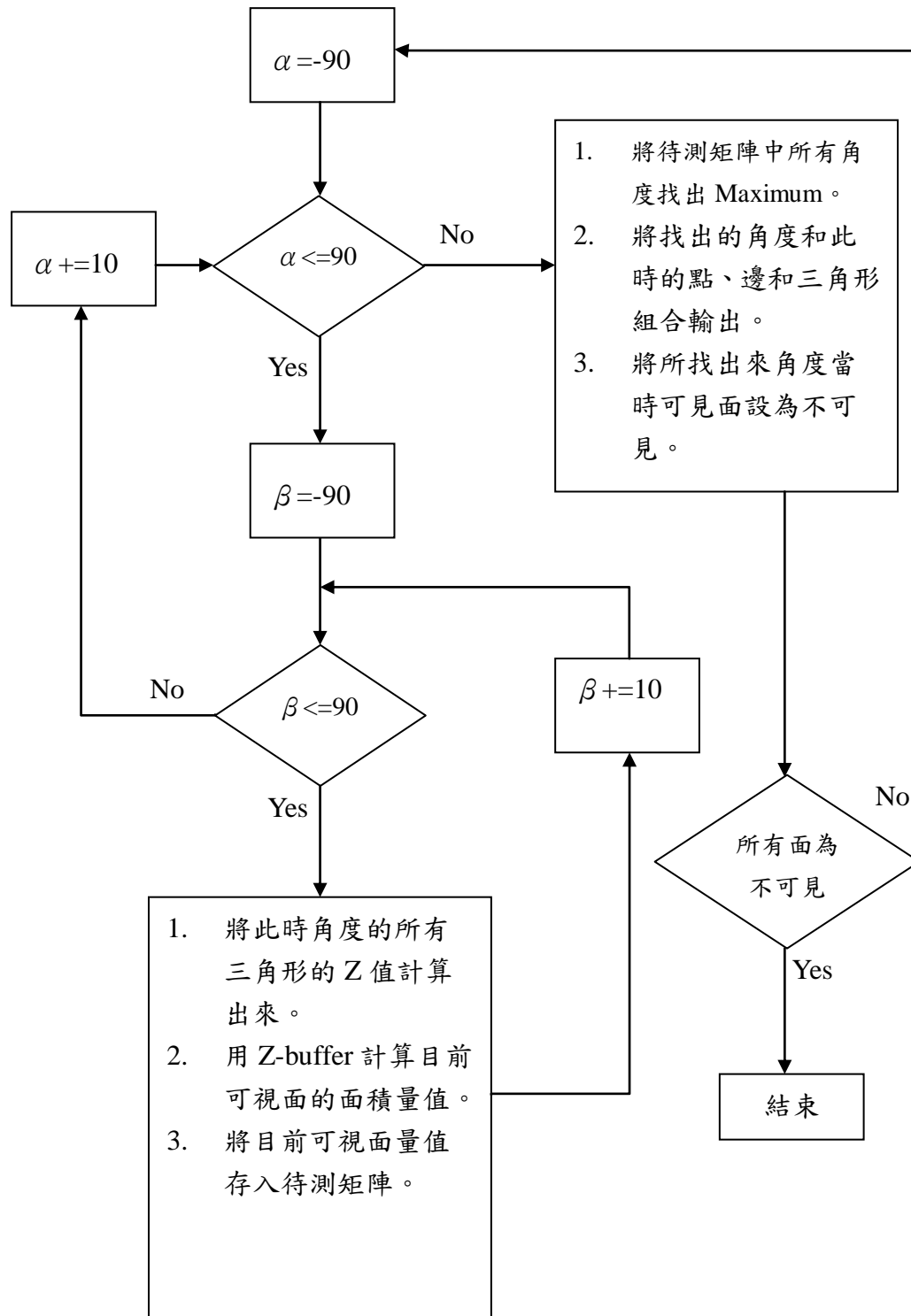


圖 4 視角規劃流程圖

最佳視角實驗結果

建築物大多是大面積平面，且相互垂直，這邊以正六角錐和 L 型積木進行視角規劃模擬：

正六角錐如圖 5 載入視角規劃正六角錐模型，若要以最少的張數包含所有可見面，顯而易見最好的視角就是由角錐的正上方往下進行拍攝，一張照片就可以包含所有六個面的紋理，而將模型檔載入最佳視角規劃，計算出各角度區域分布如圖 6，可以見到在接近垂直面所計算得到包含面的值為最大，以三維分布圖如圖 7，可以更清楚得看出，在頂點的部分值為最大，故此正六角錐的最佳視角為 α 、 β 各為 90 度角，所以拍攝的最佳視角為圖 8，相片以此角度構圖可以得到完成的正六角錐紋理資訊。

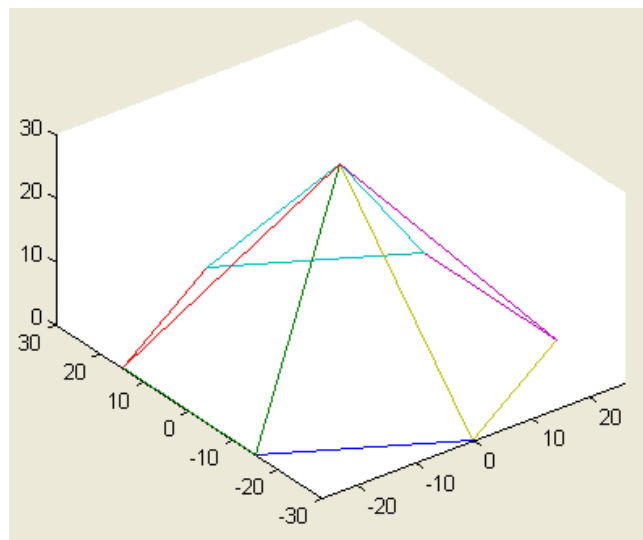


圖 5 載入視角規劃正六角錐模型

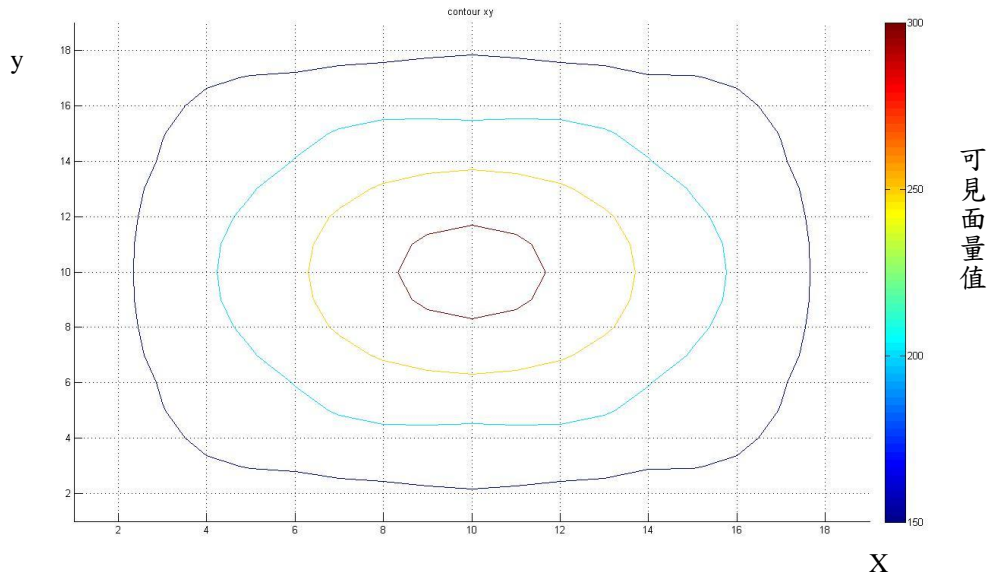


圖 6 視角規劃結果等高線圖

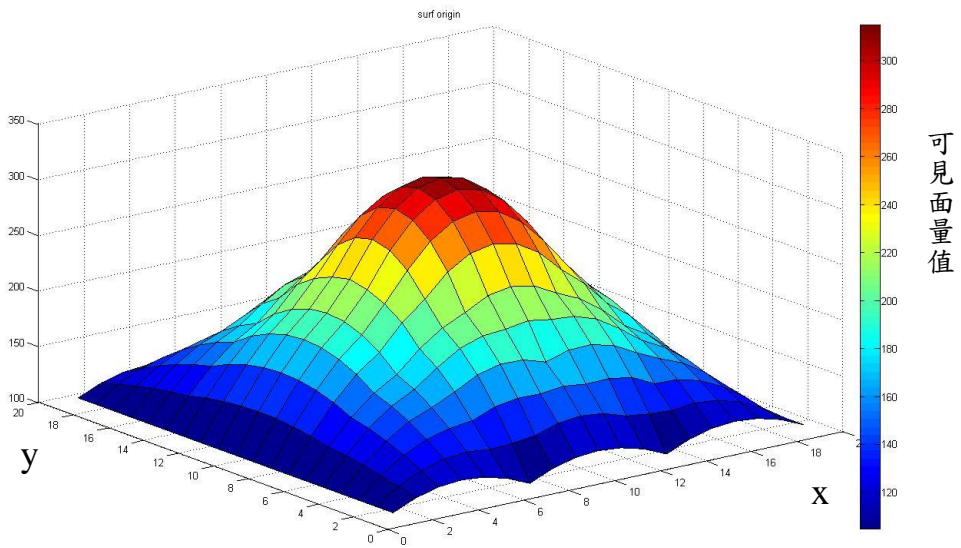


圖 7 正六角錐規劃後三維分布圖

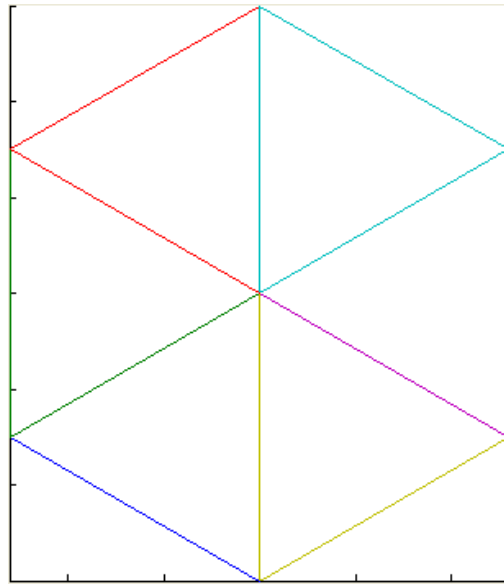


圖 8 正六角錐最佳拍攝視角

L 形積木如圖 9，載入最佳視角規劃程式，計算出來的等高線為圖 10，可以見到等高線的分布一個最大值，所以計算出來結果為最大值的角度可以包含此模型所有紋理，所以這較複雜的 L 形積木只需要兩張相

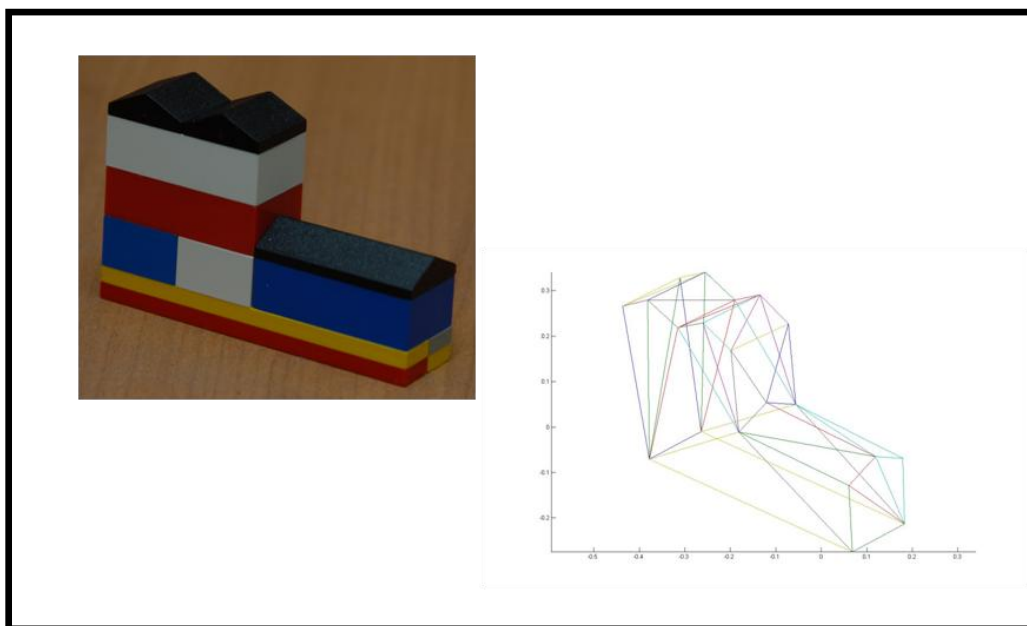


圖 9 L 形積木和它的三維模型

片既可做所有面的紋理數貼，圖 12 圖 13 可看見計算後可以見的分
布情形，得到了最佳視角的方位，既可按照計劃去進行拍攝之工作。

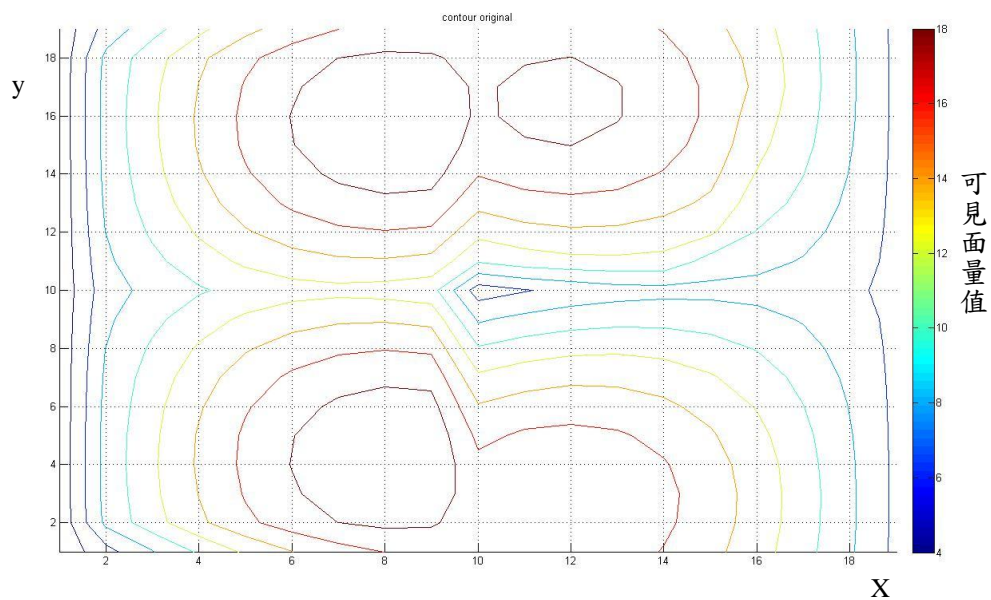


圖 10 L 形積木二維等高線圖一

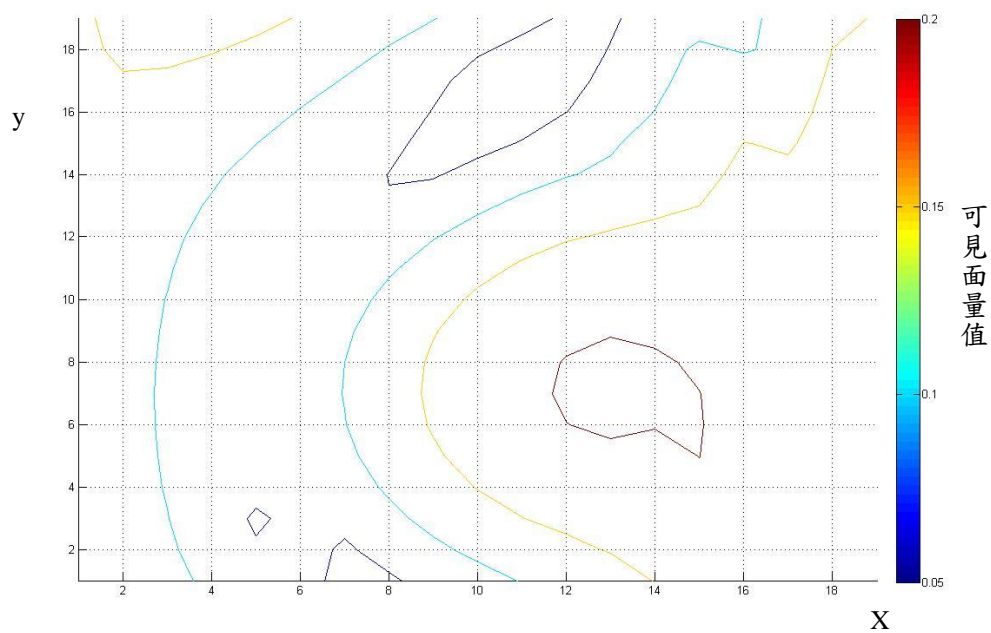


圖 11 L 形積木二維等高線圖二

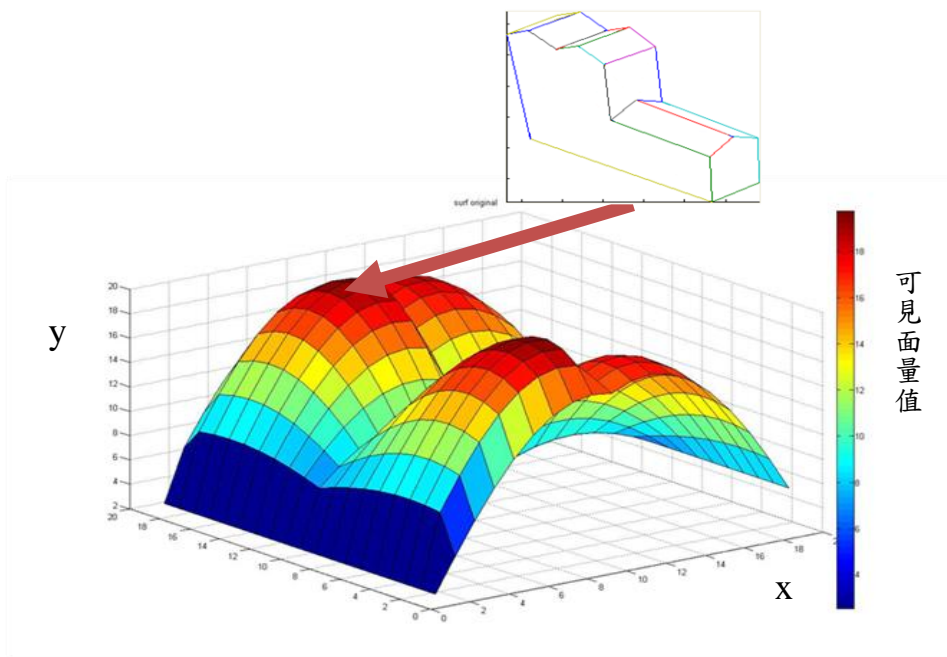


圖 12 L 形積木可見面分布圖一

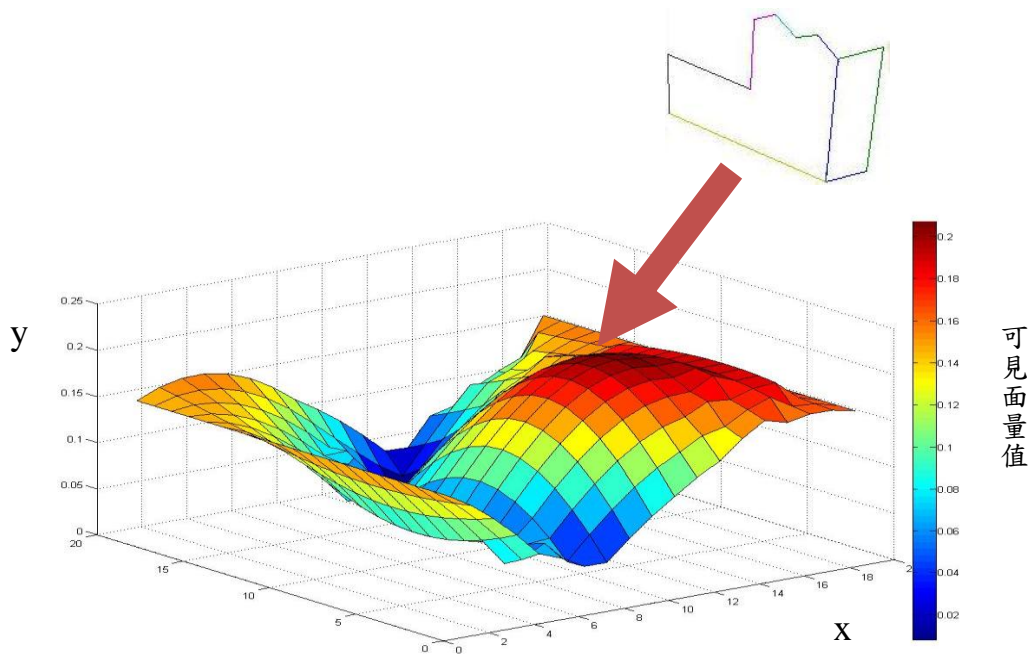


圖 13 L 形積木可見面分布圖二

中國銀行

將中國銀行模型載入視角規劃，進行第一次視角規劃角度結果如圖 14，將第一次視角規劃之可見面設為不可見，再進行第二次視角規劃角度結果如圖 15，其兩次計算出來之模型分別為圖 16、圖 17，再藉由這兩個角度去擷取紋理以進行之後的實驗步驟。

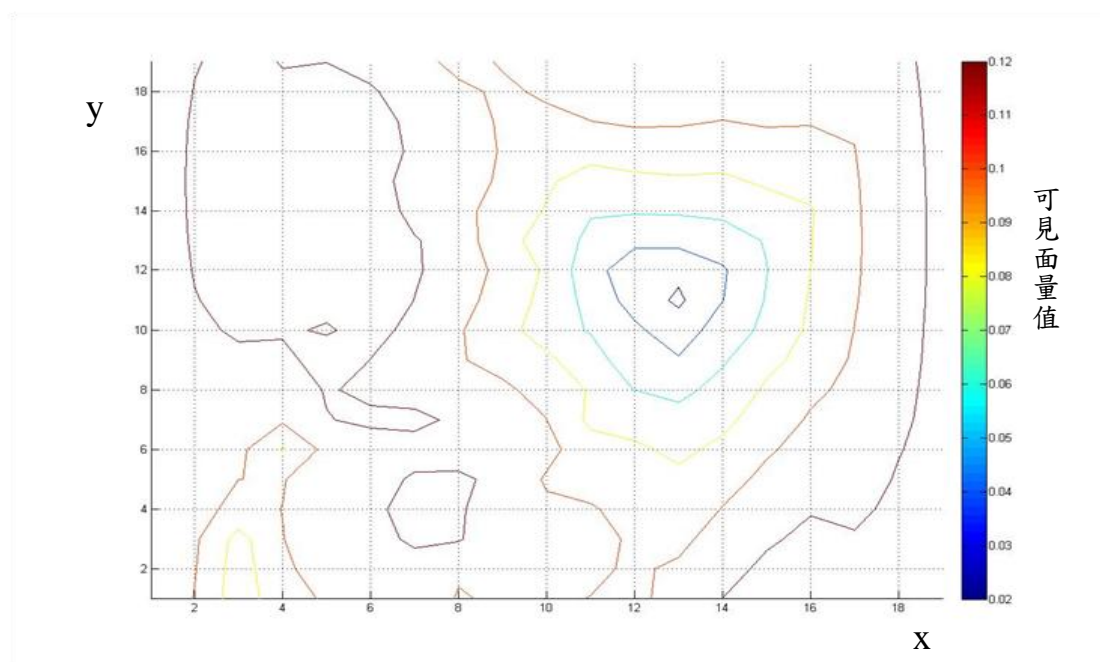


圖 14 BOC 第一次視角規劃結果

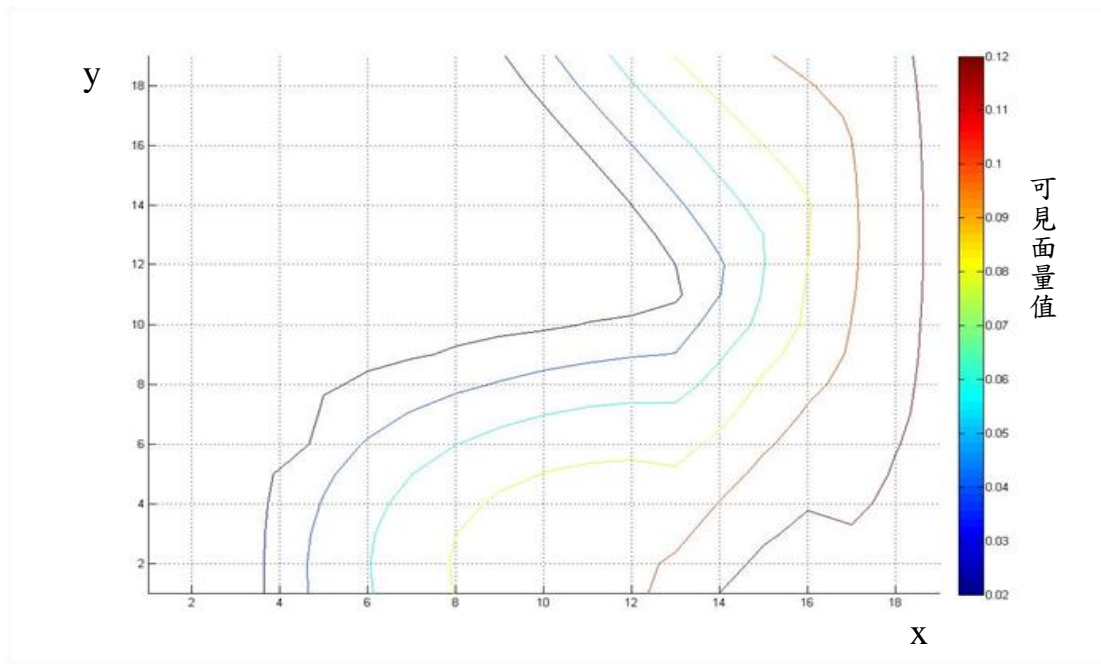


圖 15 BOC 第二次視角規劃結果

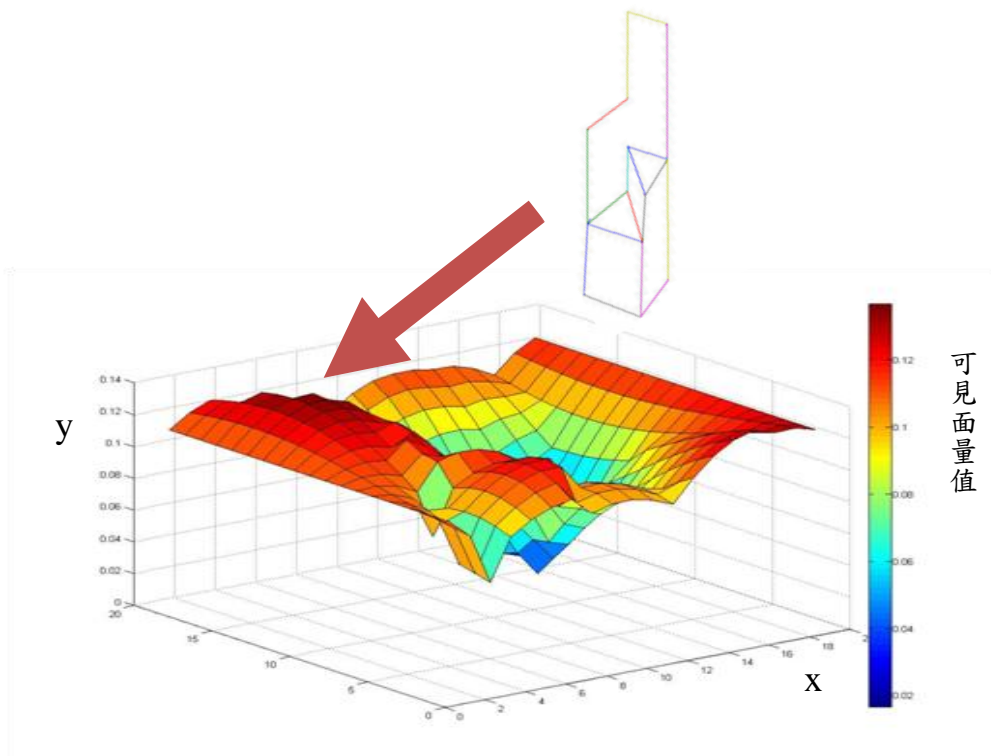


圖 16 BOC 可見面圖示 1

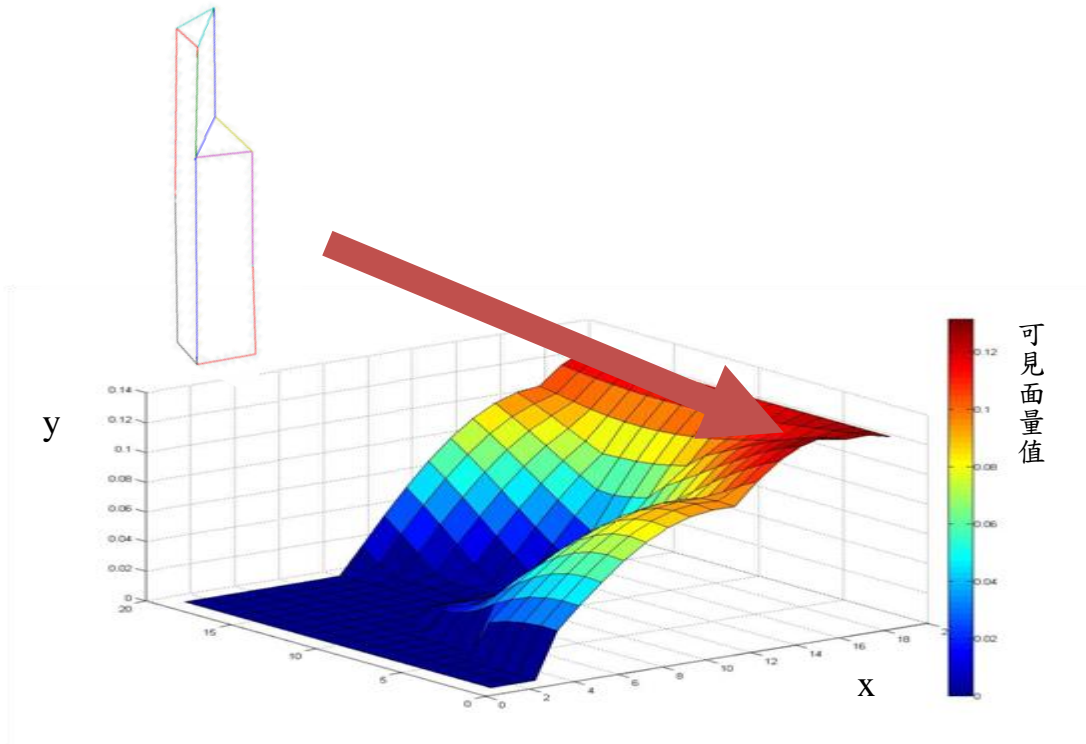


圖 17 BOC 可見面圖示 2

T 形積木

將 T 形積木載入視角規劃結果圖 18、圖 19、圖 20：

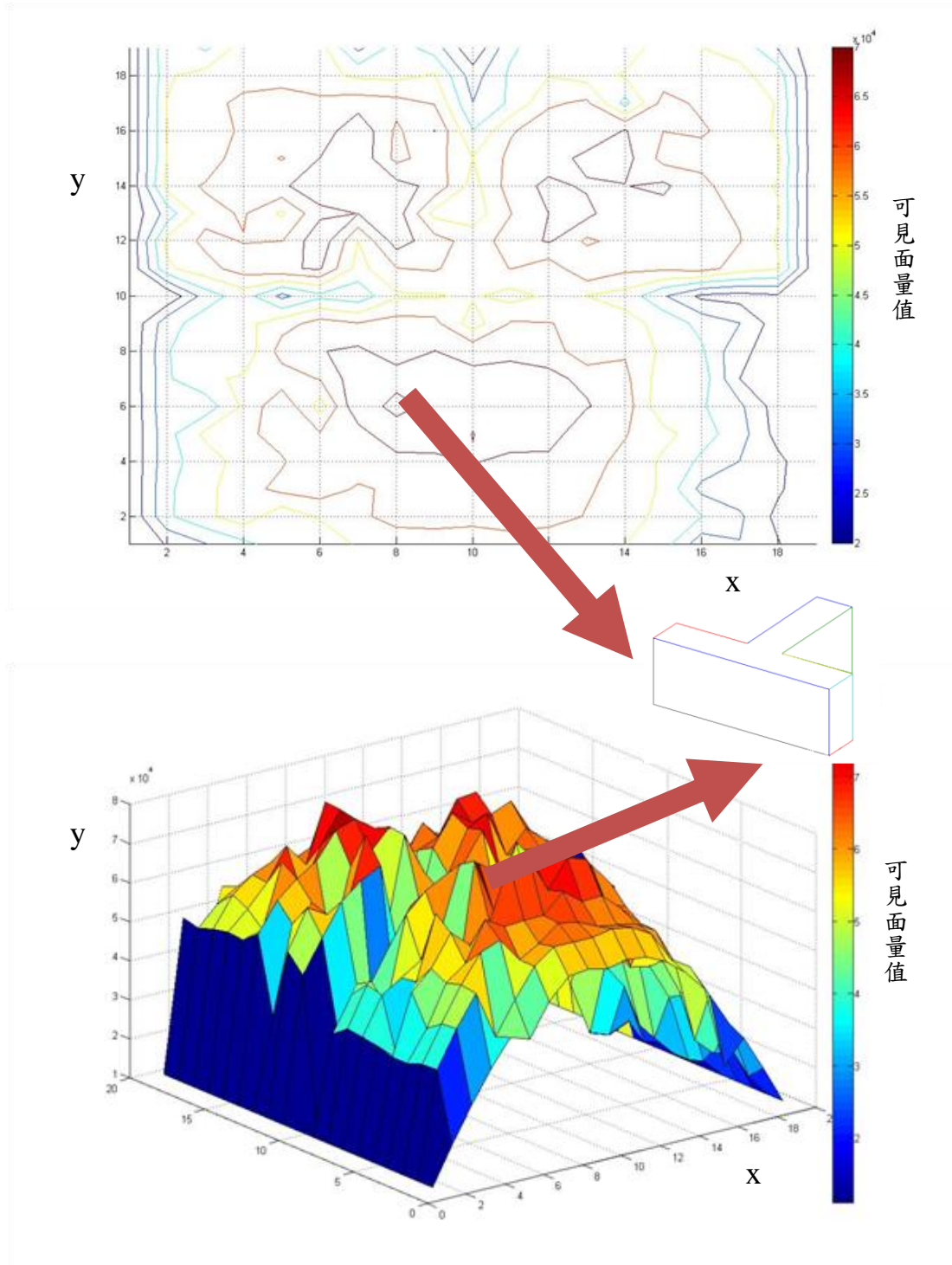


圖 18 T 形積木視角規劃情形一

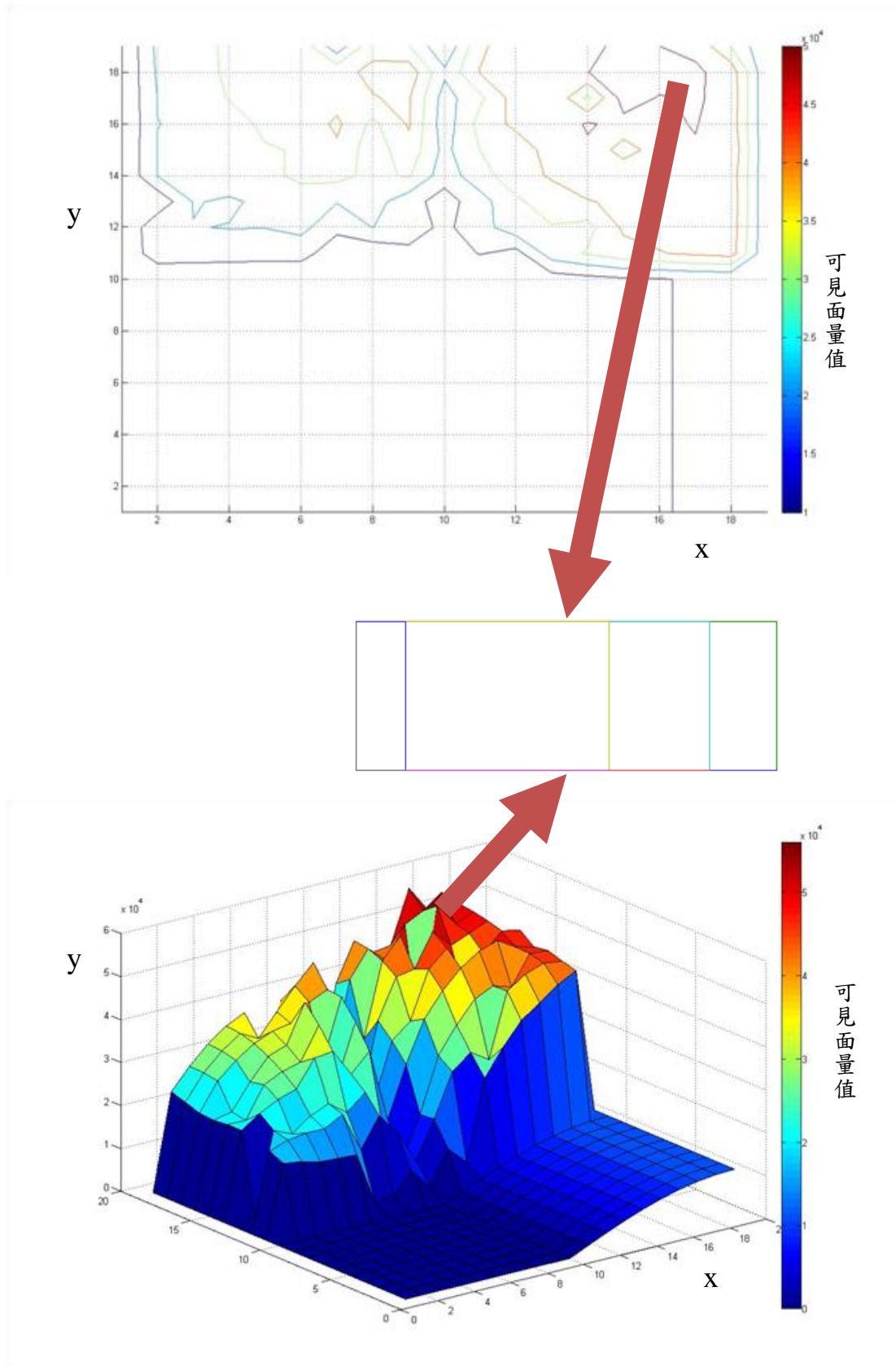


圖 19 T形積木視角規劃情形二

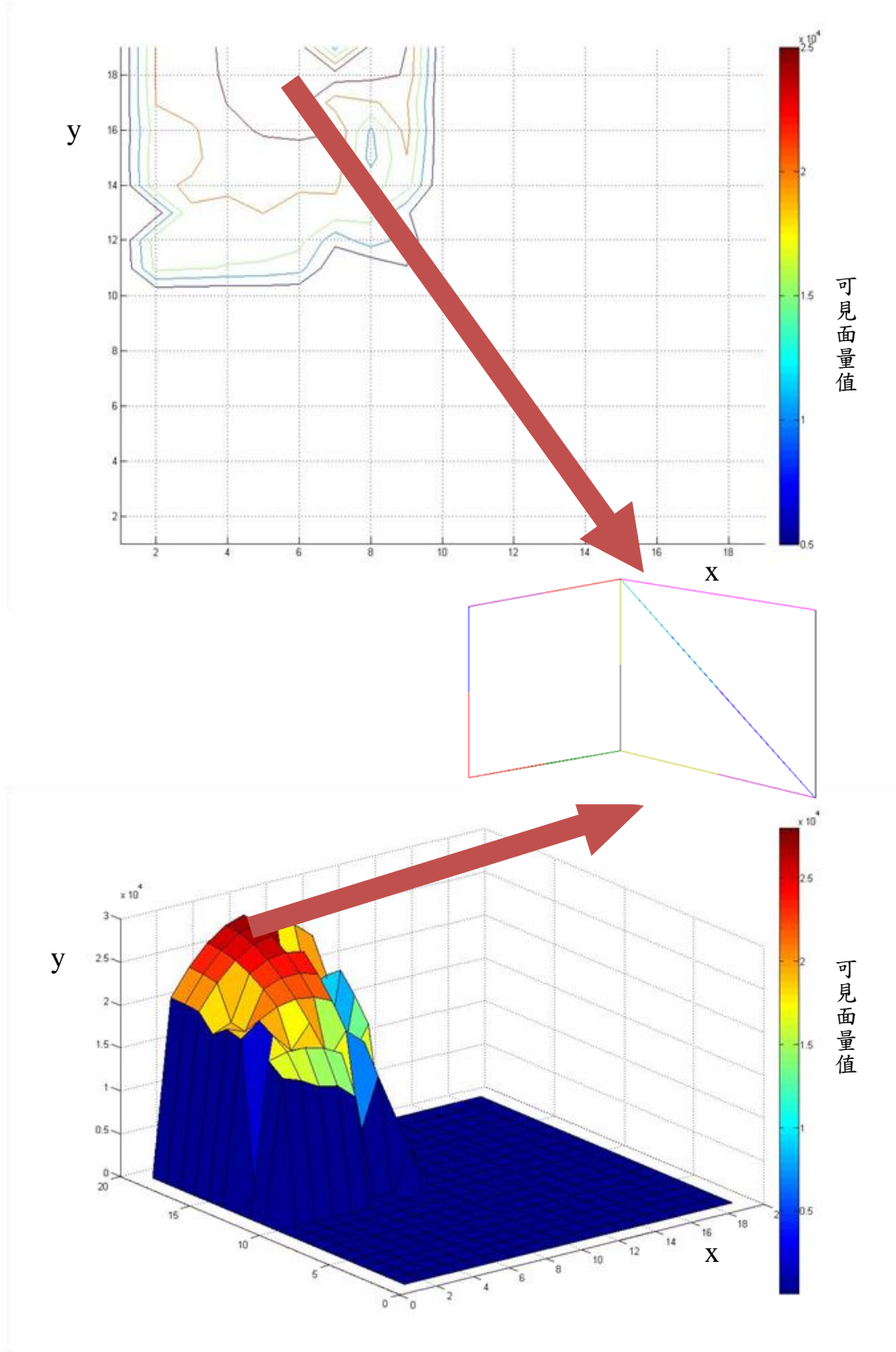


圖 20 T形積木視角規劃情形三

第四章 直接線性轉換

DTL 直接線性轉換

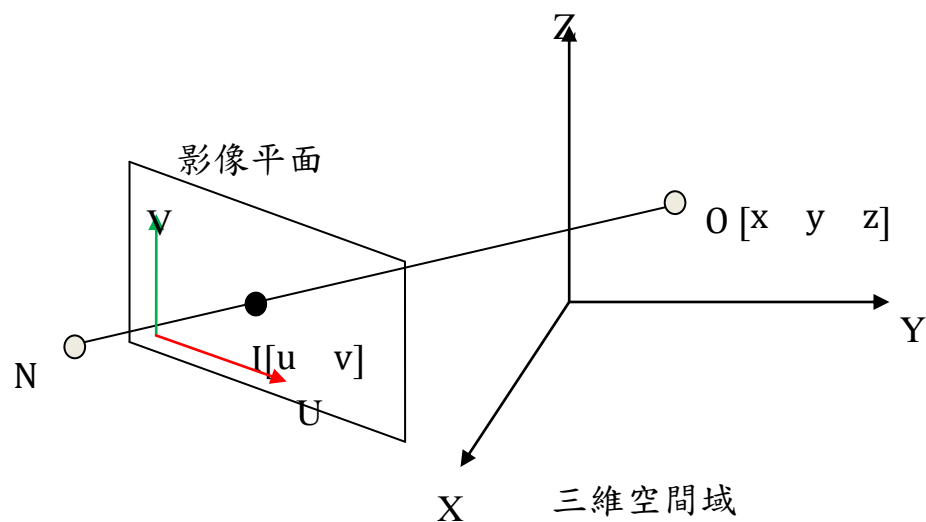


圖 21 三維空間與二維平面的關係

三維空間座標系為 $[X Y Z]$ ，影像平面座標系為 $[U V]$

O 為三維空間域中物體的位置 $[x y z]$ ，與投影中心 N 連線相交於影像平面中 $I[u v]$ 。則點 O, N, I 共線，此共線關係是 DLT 的基礎準則。

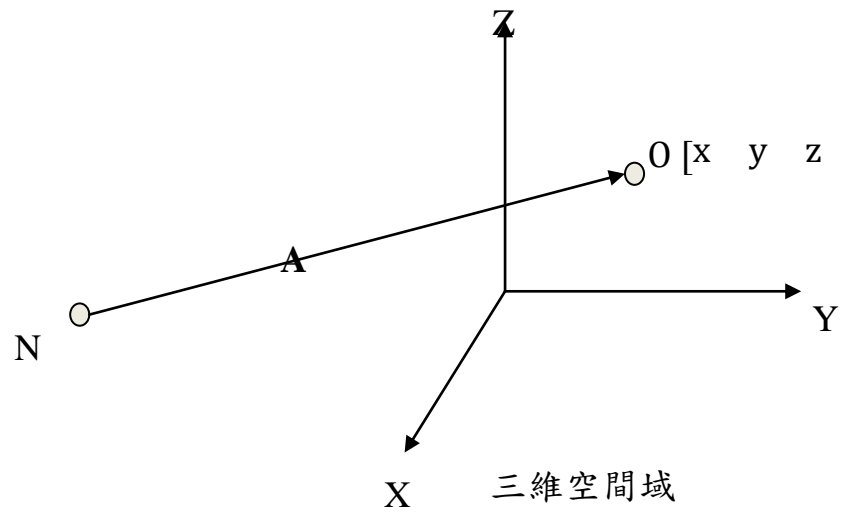


圖 22 投影與三維空間域關係

把 N 置於三維空間中的座標為 $[x_0 \ y_0 \ z_0]$ ，向量 A 起點為 N 終點為 O，則 $A = [x - x_0 \ y - y_0 \ z - z_0]$

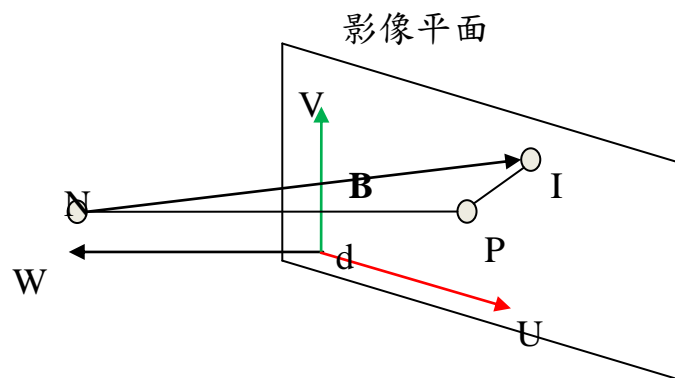


圖 23 投影與影像平面關係

增加二維平面上的第三軸 W ，任何在二維平面上點的 W 座標都為 0，所以 $I = [u \ v \ 0]$ ，由投影中心畫一條平行 W 軸並通過平面的軸稱為基礎軸(Principle axis)，基礎軸與平面相交對為基礎點，投影中心 N 到基礎點 P 之距離為基礎距離 d ，則基礎點 $P = [u_0 \ v_0 \ 0]$ ，投影中心 $N = [u_0 \ v_0 \ d]$ ，點 $I = [u \ v \ 0]$ 。

圖一的點 O 、 I 、 N 共線，向量 A ， B 因共線關係可表示為：

$$A = cB \quad (1)$$

c 為縮放倍數。

而 A ， B 表示的座標系為三維空間座標系和加了 W 軸的影像參考座標系，為了要將此二種座標系建立關聯，將 A 轉換為影像參考座標系：

$$T_{I/O} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

$$A^{(1)} = T_{I/O} \cdot A^{(0)} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot A^{(0)} \quad (2)$$

$A^{(1)}$ 為 A 向量在影像平面座標表示之座標， $A^{(0)}$ 為 A 向量在空間平面座標表示之座標， $T_{I/O}$ 為轉換空間座標與平面座標之轉換矩陣。將式 (2) 代入式 (1)：

$$\begin{bmatrix} u - u_0 \\ v - v_0 \\ -d \end{bmatrix} = c \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

整理可得：

$$\begin{aligned} u - u_0 &= c[r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) + r_{13}(z - z_0)] \\ v - v_0 &= c[r_{21}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) + r_{23}(z - z_0)] \\ -d &= c[r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)] \quad (4) \end{aligned}$$

整理式(4)：

$$c = \frac{-d}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)} \quad (5)$$

將式(5)代入(4)：

$$\begin{aligned} u - u_0 &= -d \frac{r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) + r_{13}(z - z_0)}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)} \\ v - v_0 &= -d \frac{r_{21}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) + r_{23}(z - z_0)}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)} \end{aligned} \quad (6)$$

影像平面使用真實的長度單位，如公分，但在這個系統中可能是使用不同的長度單位，如 Pixel，故：

$$u - u_0 \Rightarrow \lambda_u (u - u_0)$$

$$v - v_0 \Rightarrow \lambda_v (v - v_0)$$

$$\begin{aligned}
u - u_0 &= -\frac{d r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) + r_{13}(z - z_0)}{\lambda_u r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)} \\
v - v_0 &= -\frac{d r_{21}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) + r_{23}(z - z_0)}{\lambda_v r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)}
\end{aligned}
\tag{7}$$

式(7)可重整如下：

$$\begin{pmatrix} x & y & z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & ux & uy & uz \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & y & z & 1 & vx & vy & vz \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_{11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}
\tag{8}$$

當 λ_u 和 λ_v 分別為 U, V 軸可約分因子，因此在(7)中 u, v, u_0, v_0 可為最小單位，重新排列(7)中 x, y 和 z 可得：

$$\begin{aligned}
u &= \frac{L_1x + L_2y + L_3z + L_4}{L_9x + L_{10}y + L_{11}z + 1} \\
v &= \frac{L_5x + L_6y + L_7z + L_8}{L_9x + L_{10}y + L_{11}z + 1}
\end{aligned}
\tag{9}$$

當

$$\begin{aligned}
[d_u, d_v] &\equiv \left[\frac{d}{\lambda_u}, \frac{d}{\lambda_v} \right] \\
D &\equiv -(x_0r_{31} + y_0r_{32} + z_0r_{33}) \\
L_1 &= \frac{u_0r_{31} - d_ur_{11}}{D} \\
L_2 &= \frac{u_0r_{32} - d_ur_{12}}{D} \\
L_3 &= \frac{u_0r_{33} - d_ur_{13}}{D}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
L_4 &= \frac{(d_u r_{11} - u_0 r_{31})x_0 + (d_u r_{12} - u_0 r_{32})y_0 + (d_u r_{13} - u_0 r_{33})z_0}{D} \\
L_5 &= \frac{v_0 r_{31} - d_v r_{21}}{D} \\
L_6 &= \frac{v_0 r_{32} - d_v r_{22}}{D} \\
L_7 &= \frac{v_0 r_{33} - d_v r_{23}}{D} \\
L_8 &= \frac{(d_v r_{21} - v_0 r_{31})x_0 + (d_v r_{22} - v_0 r_{32})y_0 + (d_v r_{23} - v_0 r_{33})z_0}{D} \\
L_9 &= \frac{r_{31}}{D} \\
L_{10} &= \frac{r_{32}}{D} \\
L_{11} &= \frac{r_{33}}{D}
\end{aligned}
\tag{10}$$

在(10)中，係數 L_1 到 L_{11} 為 DLT 參數，這些參數可以反應出三維空間域和二維影像空間之間的關係。

當我們給定 N 對空間點與影像點對應關係，把 N 個空間點為 X ， N 影像點為 Y ，DLT 參數可以由最小平方差法算出：

$$\begin{aligned}
X \cdot L &= Y \\
(X^t \cdot X) \cdot L &= X^t \cdot Y \\
(X^t \cdot X)^{-1} \cdot (X^t \cdot X) \cdot L &= (X^t \cdot X)^{-1} (X^t \cdot Y) \\
L &= (X^t \cdot X)^{-1} \cdot (X^t \cdot Y)
\end{aligned}
\tag{11}$$

由(9)，當 $x=x_0, y=y_0, z=z_0$ 時，對應的 $u=0, v=0$ ，所以：

$$\begin{aligned}
L_1 x_0 + L_2 y_0 + L_3 z_0 &= -L_4 \\
L_5 x_0 + L_6 y_0 + L_7 z_0 &= -L_8 \\
L_9 x_0 + L_{10} y_0 + L_{11} z_0 &= -1
\end{aligned}
\tag{12}$$

或

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} L_1 & L_2 & L_3 \\ L_5 & L_6 & L_7 \\ L_9 & L_{10} & L_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -L_4 \\ -L_8 \\ -1 \end{bmatrix} \\
\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} L_1 & L_2 & L_3 \\ L_5 & L_6 & L_7 \\ L_9 & L_{10} & L_{11} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -L_4 \\ -L_8 \\ -1 \end{bmatrix}
\end{aligned}
\tag{13}$$

同理，由(9)：

$$\begin{aligned}
L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2 &= \frac{1}{D^2} [r_{31}^2 + r_{32}^2 + r_{33}^2] = \frac{1}{D^2} \\
D^2 &= \frac{1}{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2}
\end{aligned}
\tag{14}$$

和

$$\begin{aligned}
(DL_1)(DL_9) + (DL_2)(DL_{10}) + (DL_3)(DL_{11}) &= u_0 [r_{31}^2 + r_{32}^2 + r_{33}^2] - d_u [r_{11}r_{31} + r_{12}r_{32} + r_{13}r_{33}] = u_0 \\
(DL_5)(DL_9) + (DL_6)(DL_{10}) + (DL_7)(DL_{11}) &= v_0 \\
u_0 &= D^2(L_1L_9 + L_2L_{10} + L_3L_{11}) = \frac{L_1L_9 + L_2L_{10} + L_3L_{11}}{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2} \\
v_0 &= D^2(L_5L_9 + L_6L_{10} + L_7L_{11}) = \frac{L_5L_9 + L_6L_{10} + L_7L_{11}}{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2}
\end{aligned}
\tag{15}$$

由(9)：

$$T_{I/O} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = D \cdot \begin{bmatrix} \frac{u_0 L_9 - L_1}{d_u} & \frac{u_0 L_{10} - L_2}{d_u} & \frac{u_0 L_{11} - L_3}{d_u} \\ \frac{v_0 L_9 - L_5}{d_v} & \frac{v_0 L_{10} - L_6}{d_v} & \frac{v_0 L_{11} - L_7}{d_v} \\ L_9 & L_{10} & L_{11} \end{bmatrix} \quad (16)$$

在(15)去求出轉置矩陣。根據(15)，則可以算出 d_u 和 d_v ：

$$\begin{aligned} d_u^2 &= D^2 \left[(u_0 L_9 - L_1)^2 + (u_0 L_{10} - L_2)^2 + (u_0 L_{11} - L_3)^2 \right] \\ &= \frac{(u_0 L_9 - L_1)^2 + (u_0 L_{10} - L_2)^2 + (u_0 L_{11} - L_3)^2}{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2} \\ d_v^2 &= \frac{(v_0 L_9 - L_5)^2 + (v_0 L_{10} - L_6)^2 + (v_0 L_{11} - L_7)^2}{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2} \end{aligned} \quad (17)$$

給定 N 對之對應 x, y, z 及 u, v 。式(9)可表達如下：

$$\begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & u_1 x_1 & u_1 y_1 & u_1 z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 & v_1 x_1 & v_1 y_1 & v_1 z_1 \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ x_N & y_N & z_N & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & u_N x_N & u_N y_N & u_N z_N \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_N & y_N & z_N & 1 & v_N x_N & v_N y_N & v_N z_N \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_{11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \bullet \\ \bullet \\ u_N \\ v_N \end{pmatrix} \quad (18)$$

計算出 L_1 到 L_{11} 即可得到轉換方程式(9)，由(9)可代入任何空間模型

中的 x, y, z 而計算出對應影像中的 u, v 值。

第五章 實驗過程與結果

5.1 實驗過程

首先將三維模型檔載入「最佳視角計算」程式中，計算能以最少次包含最多面且包含整個模型相機外參數及其角度下的三維模型可見面的三維模型，得到一個或數個各別模型的空間點座標、三維空間中三角形的組成序列及各別角度模型的旋轉角度，經由拍攝角度和三維模型投影至二維空間平面上會得到拍攝的最佳視角，並使用高畫質相機以相同視角去拍攝物體，得到影像貼圖所需的材質相片。

將「最佳視角計算」中產生的空間座標經由旋轉角代入空間中旋轉公式進行各別面模型正規化的動作，先前所拍攝的相片與相同角度下的三維模型進行人工比對，依序比對六個控制點(Control Points)，將此六個二維空間點和三維空間點以「直接線性轉換」(Direct Linear Transform)計算出轉換方程式，將空間座標代入轉換方程式可以計算出三維空間對應到二維相片上所有對應點，並對相片做正規化的動作以進行貼圖；將所有三維模型點、三角形序列和所有相片上的對應點座標代入「建模程式」產生以影像依據的三維全彩模型。

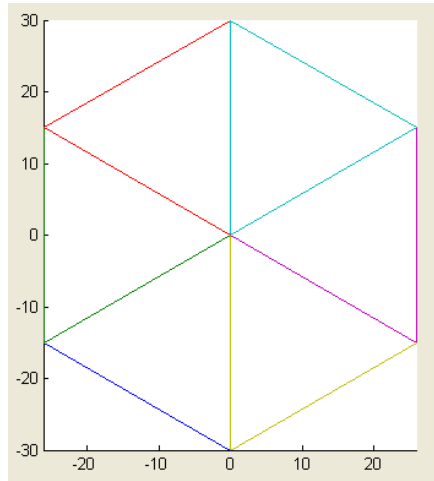


圖 24 計算出的最佳視角

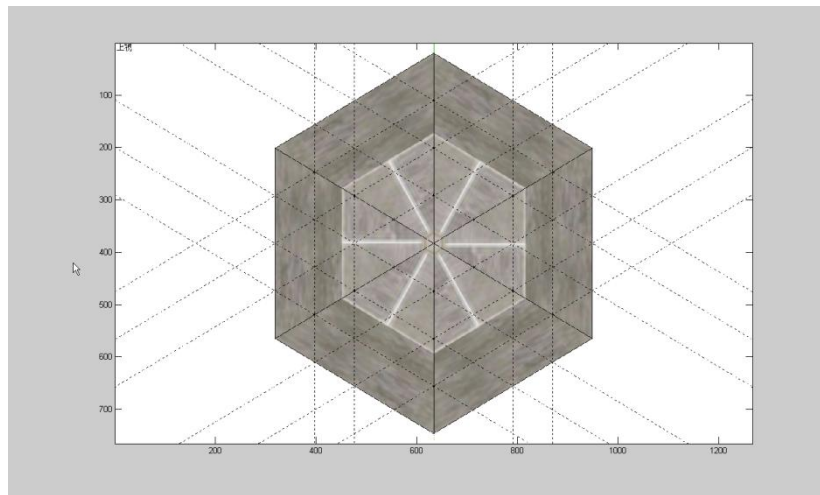


圖 25 以最佳視角進行拍攝(模擬)

d:\tout{1,1}						
d\tout{1,1} <7x5 double>						
	1	2	3	4	5	6
1	-26	-15	0	0.2536	0.7405	
2	0	-30	0	0.5018	0.9709	
3	0	0	30	0.9395	0.9453	
4	-26	15	0	0.2501	0.2701	
5	0	30	0	0.4964	0.0302	
6	26	15	0	0.7454	0.2631	
7	26	-15	0	0.7472	0.7334	
8						
9						
10						

圖 26 三維點對應二維材質之位置

已知問題：

選取控制點不能為同一平面。

控制點能均勻分布在三維空間中計算出來的轉換方程式才精準，這個例子五個點同平面，加一個不同平面點，所計算出來對應的二維對應點誤差非常大。

為解決控制點在共平面問題，必需先將八角錐進行細化的動作，這次細化二階，以增加可選擇控制點的空間分布，再進行二維相片與三維空間的控制點對應，再經由 DLT 所算出來的轉換方程式計算出所有三維點在二維相片上的位置，和第一次沒細分時所計算出的結果，準確性相當地高，貼圖也更加精準表 2。

誤差的定義：

誤差是由二維紋理相片中的理論點位置與經由轉換矩陣計算出來的 u, v 值之距離，理論點可以經由影像處理軟體去擷取每個頂點或交點在影像上的像素位子，誤差為兩者的像素距離。

細分次數與貼圖準確性的關係

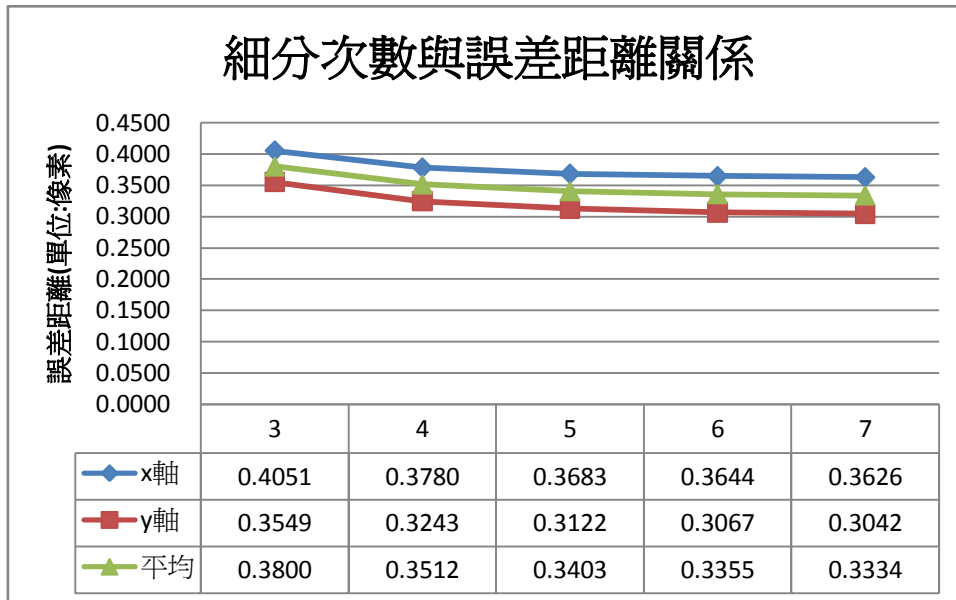


表 2 細分次數誤差與距離關係圖

細分三次貼圖結果

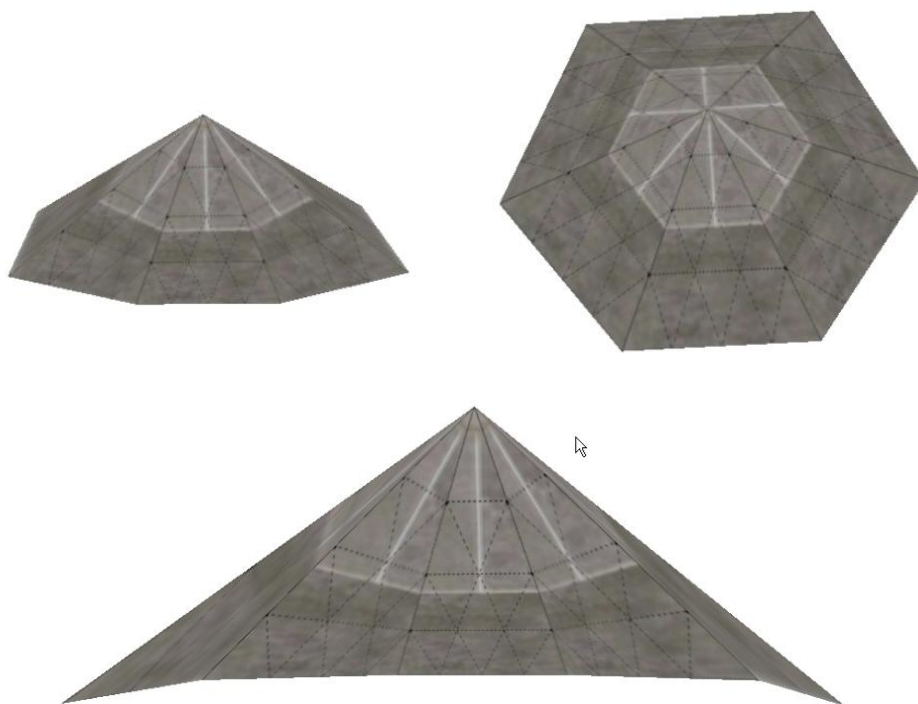


圖 27 細分後立體貼圖成像(模擬材質)

5.2 實驗結果

5.2.1 模擬六角錐紋理

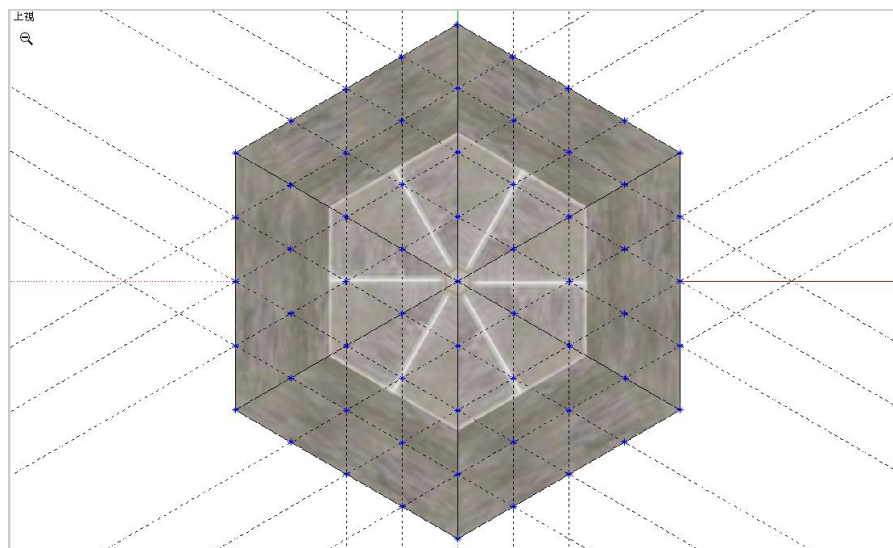


圖 28 對應點計算結果(模擬相片)

以 SketchUP 產生立體等角視圖模擬，以增加二維相片精確度來進行實驗，實驗結果為表 3，從表可得知分割越次數越多次所得對應點的平均誤差距離會越小。

細分次數	水平方向誤差	垂直方向誤差	平均誤差
3	0.4051	0.3549	0.3800
4	0.3780	0.3243	0.3512
5	0.3683	0.3122	0.3403
6	0.3644	0.3067	0.3355
7	0.3626	0.3042	0.3334

表 3 細分次數與誤差關係(模擬相片)

(單位：像素)

5.2.2 彩色六角錐相片紋理

5.2.2.1 模型未細分結果：

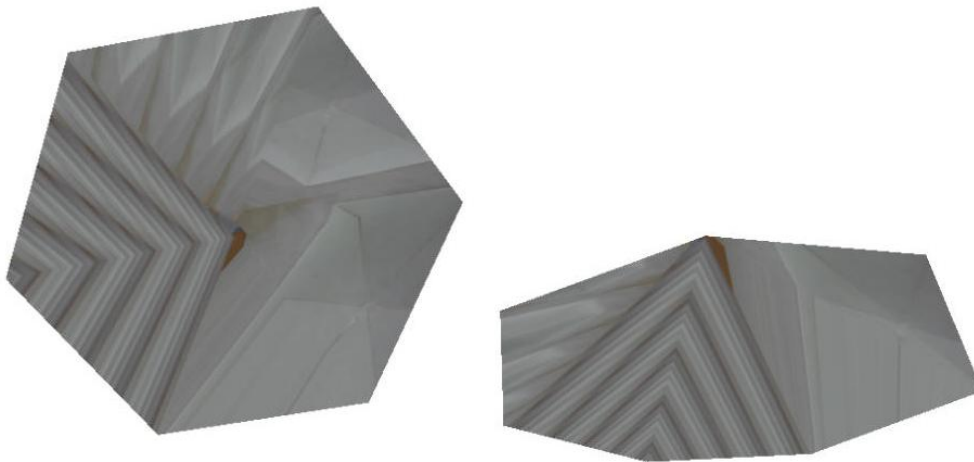


圖 29 真實材質未細分之三維貼圖成像

貼圖是以相機所拍攝的真實相片紋理圖，而在未進行細化的情形下選擇共平面五個點和頂點第六點去進行 DLT 計算得到轉換矩陣所計算出來的相片對應位置如圖 30，可見計算出來的矩陣非常不正確，誤差平均高達 5138 個像素距離，表 4。

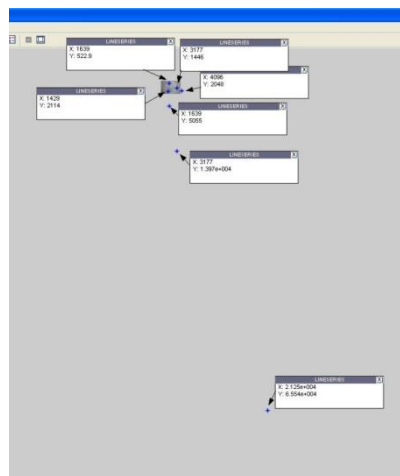


圖 30 未細分之錯誤對應關係

	水平方向誤差	垂直方向誤差	平均誤差
誤差距離	8640.081	1636.708	5138.395

表 4 未細分之誤差

(單位:像素)

5.2.2.2 細分次數 1 次：

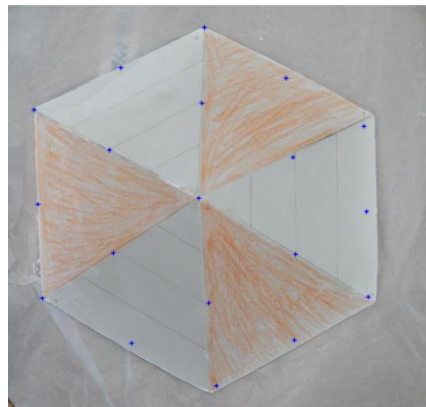


圖 31 細分次數一次之計算對應情形

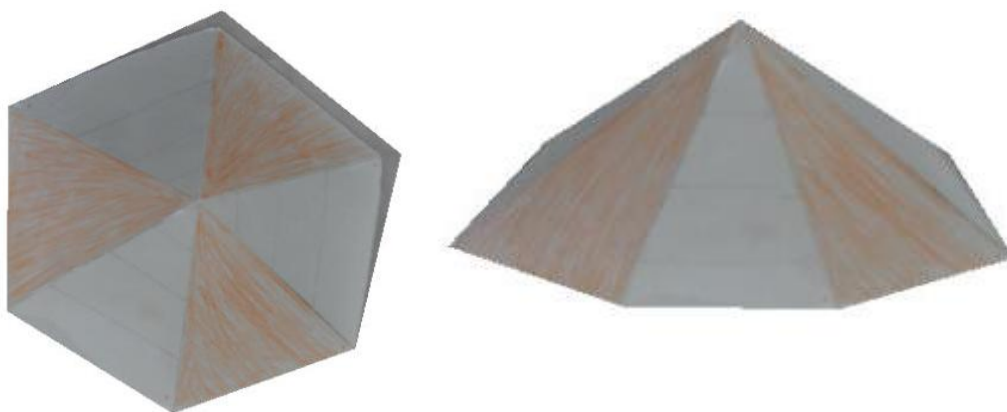


圖 31 為細分一次後計算對應的結果，選擇點為分布於三個不同平面高度的六個對應點，其計算結果相對於選取五個共平面點所計算出來

的轉換方程式有非常大的改善，由表 5 可以看出計算後的平均誤差大幅降低。

	水平方向誤差	垂直方向誤差	平均誤差
誤差距離	25.47978	26.36209	25.92093

表 5 分割一次與誤差關係

(單位:像素)

5.2.3 彩色相片分割結果分析

模型切割次數與計算 DLT 誤差關係見表 6，由表可見分割次數越多所得的誤差越低，但是隨著分割次數越多，所需的運算時間也就相對增加，圖 32 可以看出平均誤差會趨於 22 像素值，而以時間來說，分割 4 或 5 次就足夠了。

細分次數	水平方向誤差	垂直方向誤差	平均誤差
1	25.47978	26.36209	25.92093
2	23.5244	23.72421	23.6243
3	22.91129	22.59501	22.75315
4	22.67197	22.18451	22.42824
5	22.60979	22.03575	22.32277
6	22.59044	21.98059	22.28552

表 6 分割次數與誤差關係

(單位:像素)

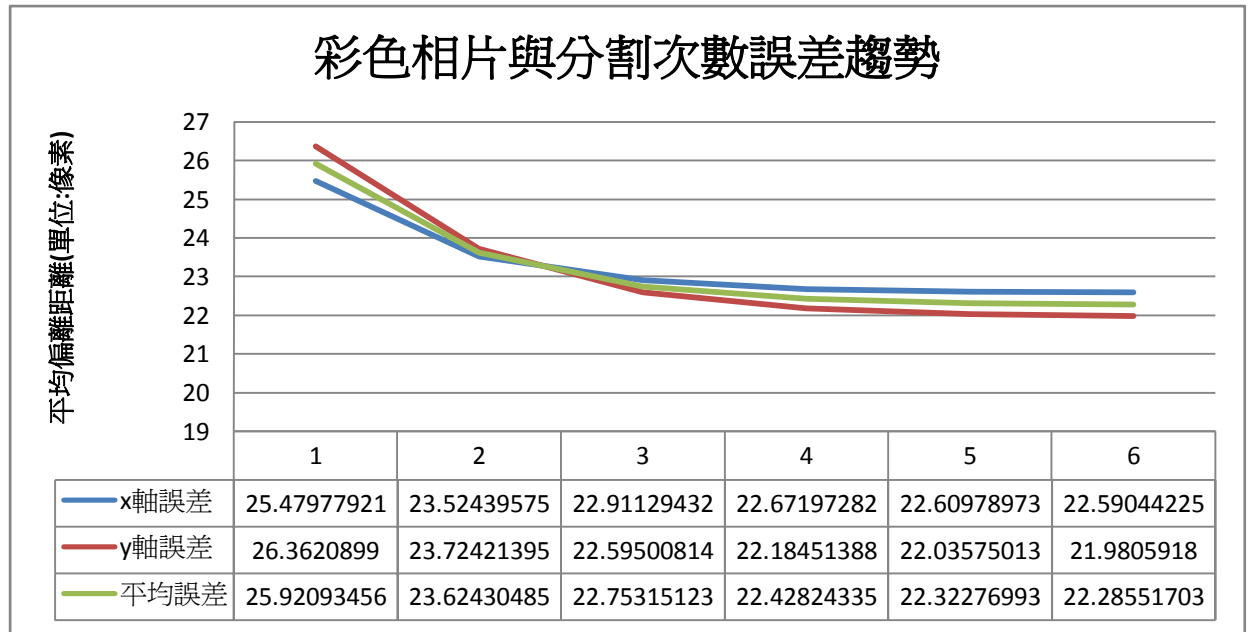


圖 32 彩色相片與分割次數誤差趨勢圖

5.2.4 L 形積木貼圖紋理

5.2.4.1 最大紋理進行貼圖實驗結果

在第三章已經為 L 形積木進行最佳視角規劃，但在這邊不使用最佳視角規劃，而是使用包含最大面積紋理進行拍攝，我們使用**錯誤!**找不到參照來源。，兩個平面做拍攝，再各別由這兩個平面去進行對應點選取和轉換矩陣的計算，對應出來的結果，計算出來的平均誤差為 54.1517(像素)，由**錯誤!**找不到參照來源。可以見到有許多點偏離正確點，在[17]中說明若控制點選擇在同一平面上所計算出來的矩陣會不精確。

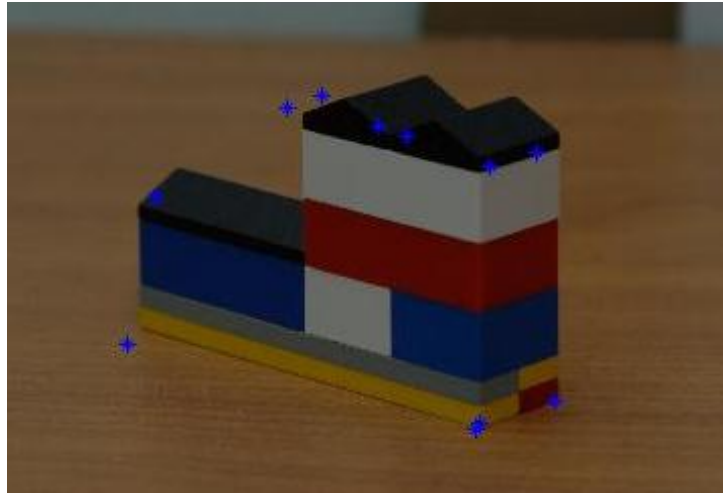


圖 34 點對應關係

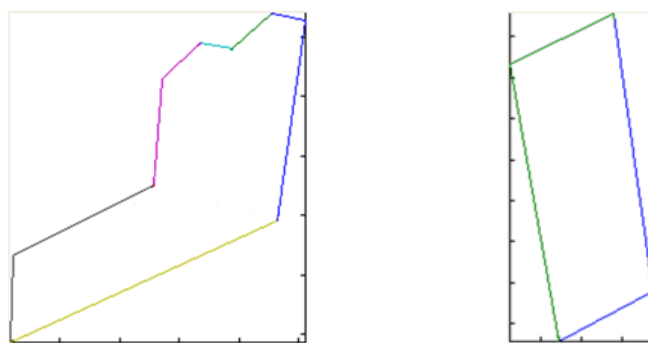


圖 33 L 形積木兩個單一平面角

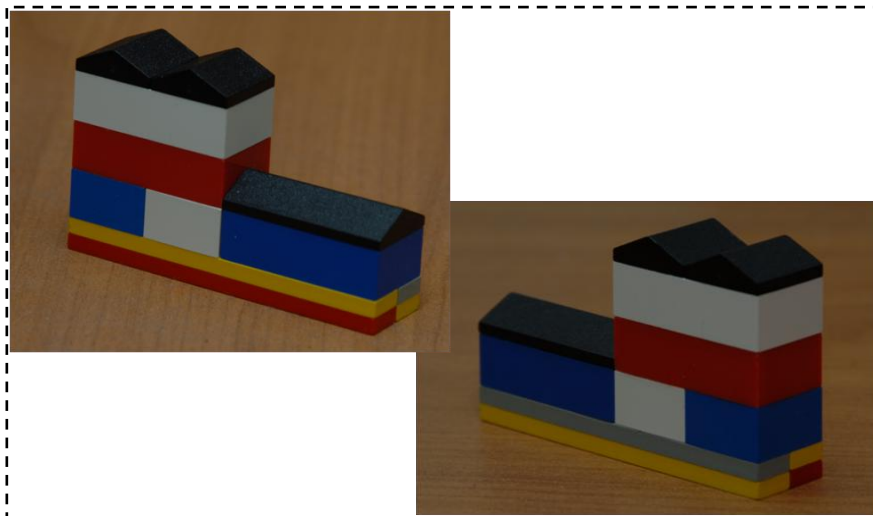


圖 35 L 形積木依視角規劃結果拍攝真實紋理相片

5.2.4.2 最佳視角合併進行貼圖實驗結果

上個實驗以兩個單一平面去做控制點的選取，其經過 DLT 計算出來的基礎矩陣會不精確，在前一個正六角錐實驗見圖 30 也可以看得出來計算出來的誤差將非常的大，所以將相鄰單一平面角度規劃結果合併，產生新的視角圖 36，再由此視角去做控制點的選取，再去經由計算出來的轉換矩陣去計算對應的 uv 值見圖 37，所計算出來的誤差為 9.724(像素)，可以見得減少了誤差表 7，使得貼圖更加精準而以此結果去進行三維貼圖結果也得到很不錯的表現見圖 38。

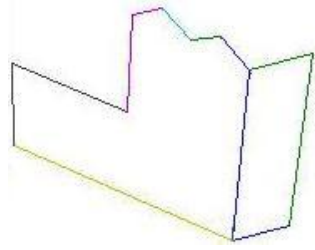


圖 36 最佳的視角

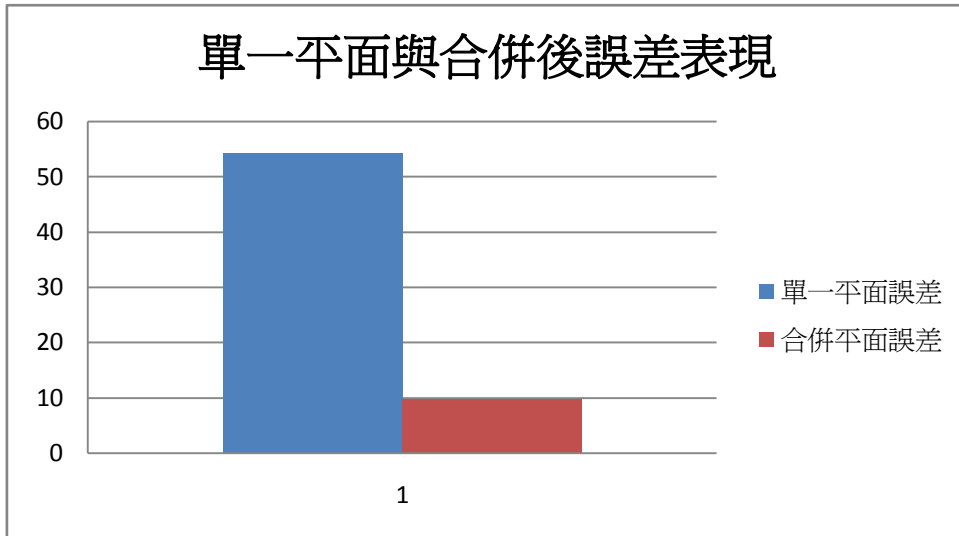


表 7 誤差圖表

(單位：像素)

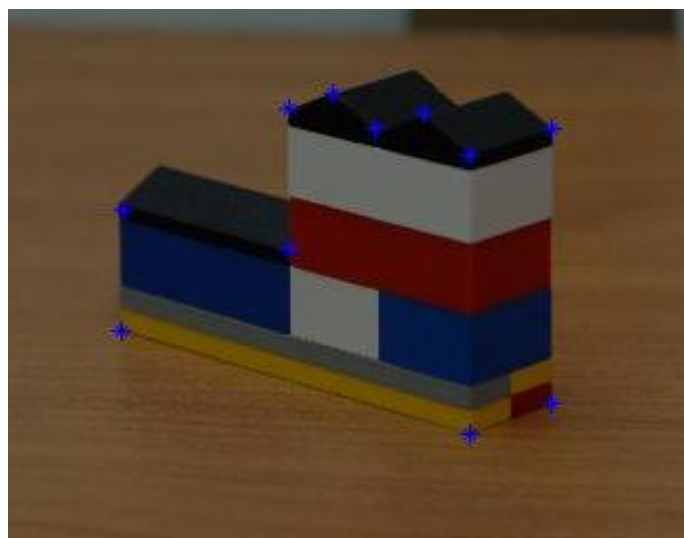


圖 37 合併平面後計算對應點情形

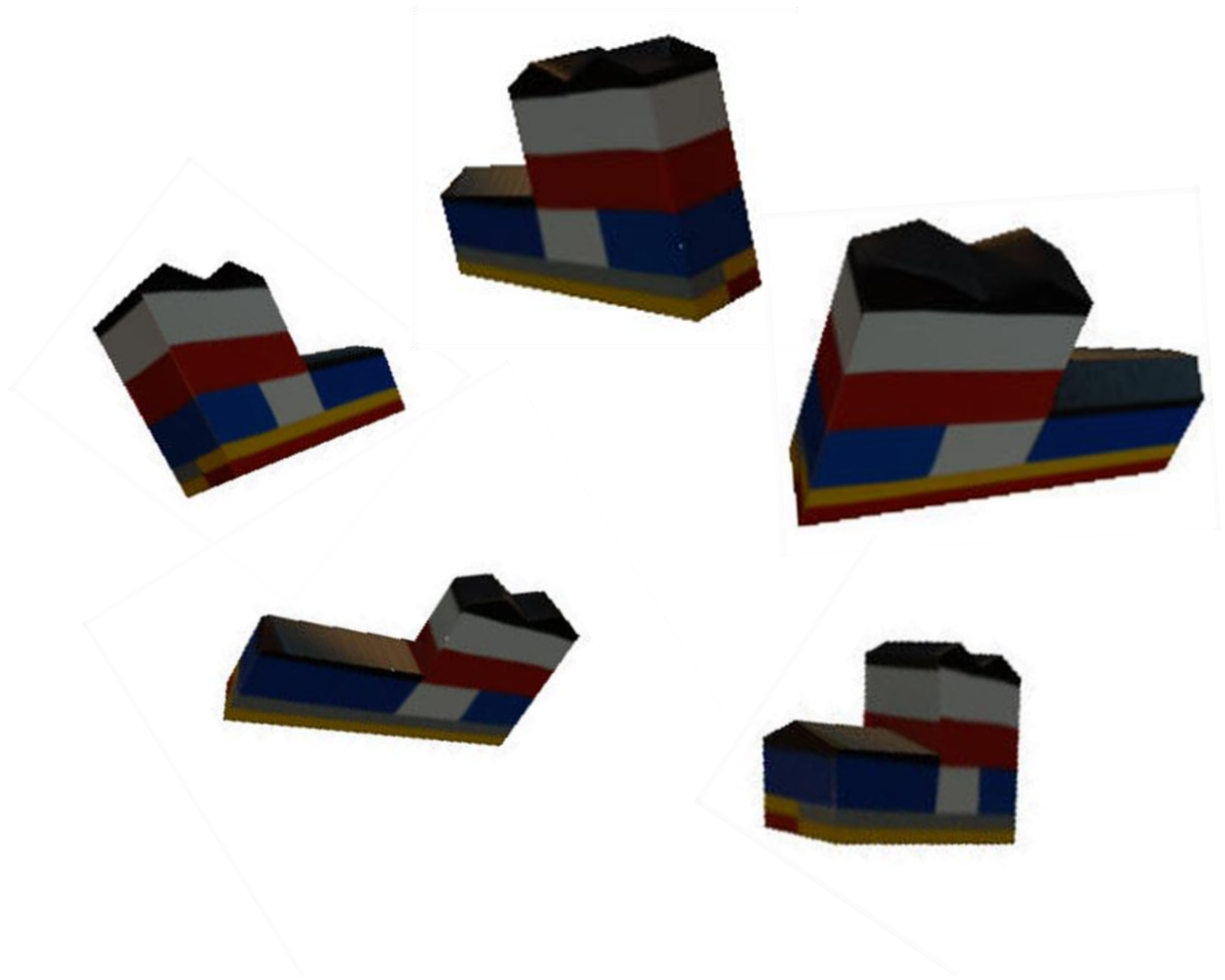


圖 38 合併平面後貼圖情形

5.2.5 中國銀行貼圖紋理

5.2.5.1 最佳視角規劃結果

將 Bank of China(BOC)之 obj 模型檔案載入最佳視角規劃程式進行

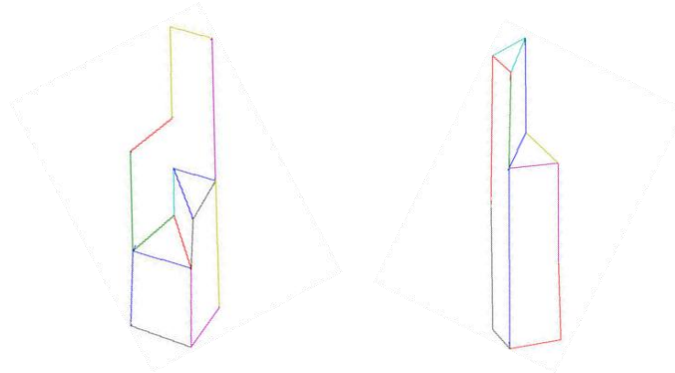


圖 39 BOC 之視角規劃結果

視角規劃，得到兩個結果如圖 39，經由此劃劃結果進行拍攝工作，擷取到紋理兩張。

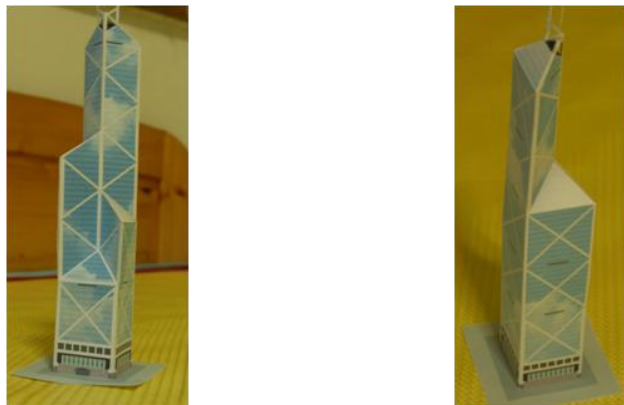


圖 40 BOC 擷取之紋理

5.2.5.2 貼圖結果

BOC 貼圖重建結果如圖 41，在三維貼圖後成像品質良好且準確，而在 2592x7744 影像中，計算出來各點對應正確 u, v 位置的平均誤差為 7.623，也相當精準，而建置此三維模型流程所花費的時間為十五分鐘，大大縮短建模所以需的時間，提高數位城市建造效率。



圖 41 BOC 貼圖結果

5.2.6. T 形積木

5.2.6.1. 視角規劃

以 T 形積木模型為基礎，將所屬的三維模型檔(obj)載入視角規劃程式，T 形模型不能使用兩個角度就包含所有的面，程式計算結果理應需要超過兩個角度，計算出來的結果為三個角度才能包含所有的面圖 42、圖 43、圖 44，而第三面頂點只有五個，但需要六個對應點，所以將其細分四次以對應更多點，將三個面各別對應六個點即可進行計算。

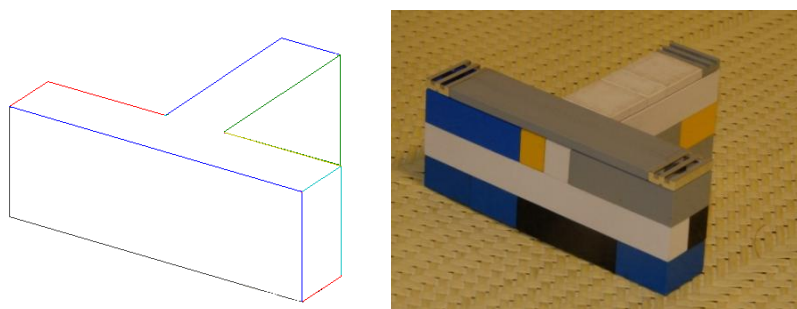


圖 42 規劃結果第一面和其紋理

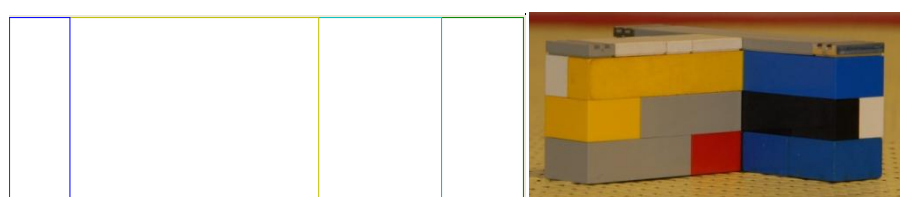


圖 43 規劃結果第二面和其紋理

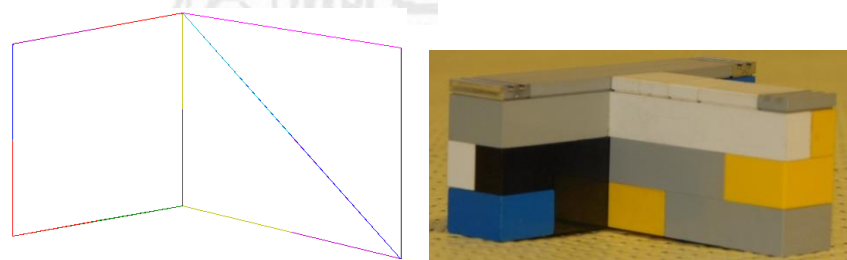


圖 44 規劃結果第三面和其紋理

5.2.6.2. 貼圖結果

進行 DLT 計算將三個構面所有對應點計算出來以一千萬像素相片紋理誤差僅 3.07(像素)實為相當精準，對應點計算出來即可進行貼圖程序，貼圖時會將三個面組合起來並產生三維模型結果如圖 45：

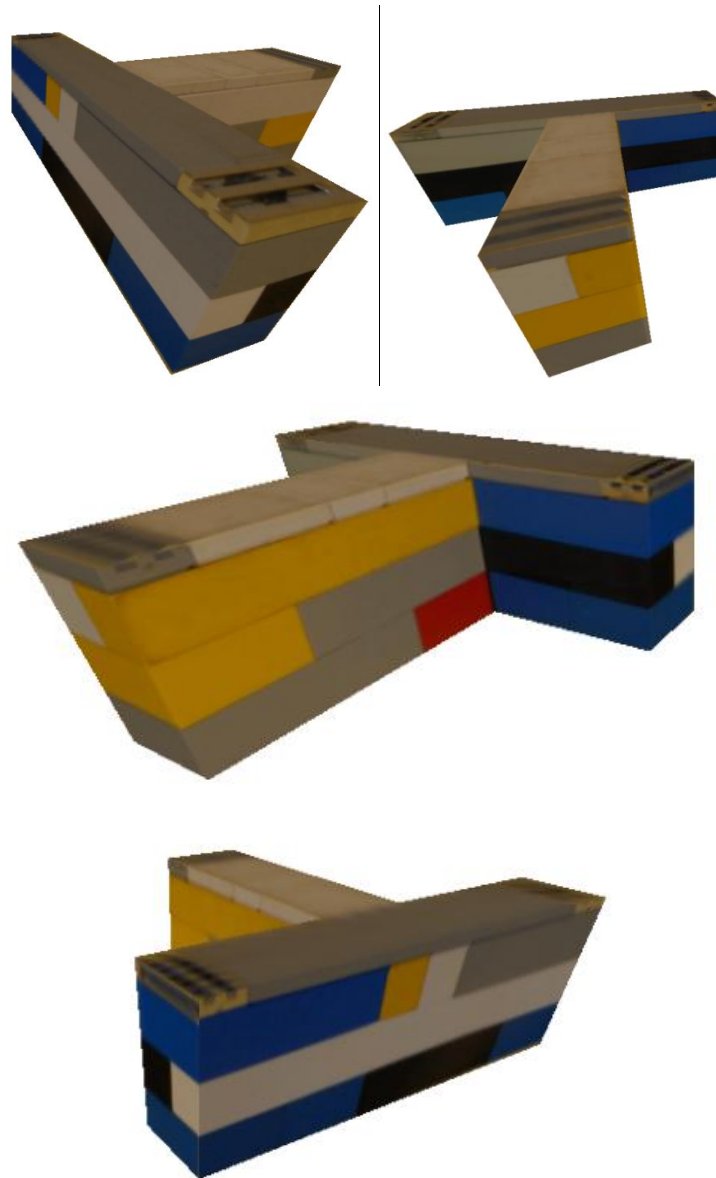


圖 45 T 形積木貼圖結果

第六章 結論

本論文提出以最佳視角決定紋理的拍攝角度，藉此可以減少擷取紋理所需要的張數，也以最少的張數擷取到最完整的紋理資訊，此外也可以免去重複紋理之計算量以減少貼圖建模所需要的時間，用六個控制點與最佳視角模型作對應，再經由 DLT 得到轉換矩陣並計算，可以得到模型上每個網點所對應在二維相片紋理上的 u, v 值，得到所有的對應座標就可以建出完整且準確地全彩三維模型。

而建模的結果，也達到了精確度的提昇和效率的增加，如此可以減少人力和時間的成本，並達到所要的目標，所以最佳視角配合 DLT 計算增加貼圖精確度和提高效率視為有效的方式。

未來可以在三維模型的部分結合極線幾何自動化建模；控制點對應也可以導入自動程序，使整個三維模型貼圖更加自動化，最後也要再對演算法或程式碼的部分去做優化，除了建模步驟簡化之外，更要使程式運行的速度加快，讓效率更高，甚至可以移植到自動化嵌入式系統，使機器人可以代替人類去進行此方面的工作。

参考文献

- [1] Beasley, J., and P. Chu. "A genetic algorithm for the set covering problem." *European Journal of Operational Research*, 1995: 392-404.
- [2] EOS. 2000. <http://www.photomodeler.com>.
- [3] FunkhouserThomas. Texture Mapping. 2000.
- [4] JonesD., 且 MalikJ. "Computational framework for determining stereo correspondance from a set of linear spatial filters." *Image and Vision Computing*. 1992. 699-708.
- [5] NicolaD'Apuzzo. "Modeling Human Faces with Multi-Image Photogrammetry." SPIE. California, 2002.
- [6] P.J.Besl, 且 H.D.McKay. "A method for registration of 3d shapes." *ZEEE Trans.*, 239-256.
- [7] SchrotterGerhard. "Realistic Body Modeling out of Video Sequences: First."
- [8] ScootW., RothG., 且 Rivest.J.-F. "Performance-oriented view planning for automatic mode acquisition." *Znt. Symposium on Robotics*. 2000. 314-319.

- [9] SenS. “Minimal cost set covering using probabilistic methods.”
ACM Symp. 1993. 157-164.
- [10] ShihS.Chihhsiong, 且 GerhardtLester. “Three dimensional
inspection of sculptured surface using non-uniform sampling and
view planning.” Machine Vision Applications in Industrial
Inspection VIII. 2000. 68-81.
- [11] StamosI., 且 AllenP. “Interactive sensor planning.” IEEE Conf.
Santa Barbara, 1998. 489-494.
- [12] T.Hanusch. “A NEW TEXTURE MAPPING ALGORITHM FOR
PHOTOREALISTIC RECONSTRUCTION OF 3D OBJECTS.”
- [13] TarabanisK., AllenK.P., 且 TsaiY.R. “A survey of sensor planning
in computer vision.” IEEE Trans. Robotics and Automation. 1995.
86-104.
- [14] TarboxG., 且 GottschlichS. “Planning for complete sensor
coverage in inspection.” Computer Vision and Image
Understanding. 1995. 84-111.
- [15] Vladimir, A Knyaz. "Accurate photorealistic texture mapping for
metric 3D models."
- [16] WhaiteP., 且 FerrieP.F. “Autonomous exploration:Driven by

- uncertainty.” IEEE Trans. PAMI. 1997. 193-205.
- [17]丁彥宏. “從未校正影像序列做三維建築物重建.” 2005.
- [18]林后駿. “三維房屋模型實景紋理影像製作與敷貼之研究.”
2005.
- [19]林宏明, 張羊進, 且 張舜孔. “2006.” 岩盤工程研討會論文集.
2006. 589-598.
- [20]胡佩晴. “使用多視角影像做強健式三維立體重建.” 2006.
- [21]陳冠臻. “以影像為依據建立三維立體模型.” 2001.
- [22]饒見有, 張智安, 陳良健, 蔡富安, 蕭國鑫, 且 徐偉城. “建構
像真城市模型之研究.” 台灣地理資訊學會年會暨學術研討會.
2005.
- [23]龔健彬, 且 史天元. “Kodak DSC210 數位相機量測特性之探
討.”
- [24]徐明福, 林宜君, 且 吳宗江. “The Study for Digital Archives of
the Wood Carving in the Traditional Architecture.”
- [25]Nedal Al-Hanbali, 且 Bashar Awamleh “Texture Mapping and
Implementation Aspects for 3D GIS Applications.”

私立東海大學

資訊工程研究所

碩士論文

視角規劃對立體模型細部全彩貼圖精確度及效率探討

(97)

研究生：楊遠凡撰