

立體山石之中國山水畫 皴法模擬合成

研究生: 江俊菘

指導教授: 施仁忠 教授

國立交通大學資訊科學研究所

中文摘要

中國國畫具有悠久的歷史，而山水畫於東晉時期萌芽，經一千六百多年眾名家不斷傳承創新下，累積了無數的技術經驗。由於它的技法複雜、山川變化大、題材多，光是運筆用墨上，便需很多時間磨練。所用紙張易於吸墨，畫錯一筆，整幅作品便前功盡棄，因此更需純熟精練的技術，於一氣呵成下運筆墨於紙上表現出濃淡乾濕的效果。故強調線條美與墨采變化的山水畫可說是國畫最難的一科。

在本篇論文中，我們提出一個山石場景的三維幾何分析與水墨畫模擬合成系統，自動畫出俱山水畫風格的山岩作品。透過使用者給予的山岳模型組合場景，經系統的三維幾何分析出山岳輪廓與石質紋理的數據參數後，隨即套入水墨模擬模組中，便能自動產生出電腦影像的山水畫作品。如此使用者只需安排組合出想要的立體山岳場景，即使完全不懂筆墨技法與皴法技巧之下，也能彈指之間創作出一幅大好河山。

The Synthesis of Rock Textures in Three - Dimensional Chinese Landscape Painting

Student: Chun-Sung Chiang

Advisor: Dr. Zen-Chung Shih

Institute of Computer and Information Science

National Chiao Tung University

ABSTRACT

Chinese ink painting has rather a long history. Burgeoned with landscaping painting in East Chin Dynasty, legacy has been passed down through many masters over more than sixteen centuries, accruing tremendous technique and experience. Given the complexity of the technique, the diversity of the subject matters involved, the manipulation of brushes and ink alone require much practice. The quick water absorbency nature of the paper dictates sure, skillful command of technique; there is simply no room for mistakes. It is only so, can the tonality of ink in a single brush stroke be rendered to marvel. Therefore, linear beauty and ink variety of landscape painting can be the most difficult in Chinese ink painting.

In this thesis, we propose a three-dimensional geometric analysis of landscape scene and ink painting simulation synthesizing system for automatic rendering of rocks in landscape painting style. Through the composite of mountain model assigned by the user and the system's 3D geometric analysis of scene contours and rock textures, all the aforesaid digital data input into the ink painting simulation model will be able to produce computer imagery of landscape painting automatically. With arranging 3D landscape scenes, even a layman, entirely ignorant of the complexity of the technical skill, will be able to produce a beautiful landscape ink painting.

致謝

首先我要感謝指導教授 施仁忠教授的教導與指引，才能完成此一架構流程。還要感謝電腦圖學實驗室所有朋友的適時幫忙，讓我能順利解決一些生疏的事務與困惑。再來感謝室友任星明、吳博舜的鼓勵與建議，使我能完成這本論文著作。也感謝許許多多曾經幫忙我的朋友。最後我要感謝我的母親與家人的支持與鼓勵，讓長子的我能不用擔心家中的事務，專心於論文研究。非常感謝大家！

目錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
致謝	iii
目錄	iv
附圖檢索	vi
第一章 序論	1
1.1 中國山水畫發展簡史.....	1
1.2 論文動機與目標	2
1.3 系統技術概觀與討論.....	2
1.3.1 系統技術討論	3
1.3.2 系統流程簡述	5
1.4 論文貢獻及優點	7
1.5 章節提要	7
第二章 相關研究	9
第三章 表面區域擴展	13
3.1 識別參考影像與隱蔽點刪除	17
3.1.1 識別參考影像	17
3.1.2 隱蔽點刪除	17
3.2 特殊隱蔽面刪除法	20
3.3 可見表面區域擴展與分析	23
3.3.1 鍍法區域	24

3.3.2 輪廓的判斷	28
A. Silhouette	28
B. Boundary	31
第四章 水墨的筆觸與皴法	33
4.1 輪廓筆觸軌跡	33
4.2 斧劈皴法筆觸軌跡	35
4.3 染墨機制	37
第五章 水墨畫模組	39
5.1 毛筆模組	39
5.2 毛筆運行機制	43
5.3 水墨筆觸模擬機制	47
5.3.1 墨色的淡化	48
5.3.2 水墨特性	49
A. 水墨集中效果(Concentration)	49
B. 筆毛的水墨相異性(Difference)	50
C. 筆毛斷水機制(Discontinuity)	50
5.3.3 中鋒與側鋒的壓力機制	50
A. 中鋒	51
B. 側鋒	53
第六章 實作與實驗結果	55
第七章 結論	60
參考文獻	62

附圖檢索

圖 1 系統流程圖	6
圖 2 (a)山岩照片, (b)利用大斧劈皴所畫出之山水畫。	14
圖 3 經幾何分析後的結果。	16
圖 4 識別參考影像。	17
圖 5 共同擁有頂點的所有三角形。	18
圖 6 影像失真問題.....	19
圖 7 屬於不可見三角形的特殊情況。	21
圖 8 隱蔽面刪除, (a)刪除後之外觀, (b)為上轉 30 度, (c)為左轉 30 度, (e)為右轉 30 度。	23
圖 9 區域擴展時, 所得區域內的各三角形, 其與 P_{start} 的法向量夾角必須低於門檻值 r_0 。	25
圖 10 被遮蓋部分使表面區域擴展終止。	26
圖 11 區域擴散時, Silhouette 的辨別。綠色線段為該視角下模型的 Silhouette,	30
圖 12 輪廓筆觸路徑.....	34
圖 13 皴法走勢	35
圖 14 將 G 正交投影至平面 P 上, 求得的皴法走勢 G' 。	36
圖 15 以筆觸運行方向 D 為基準, 平行與垂直掃描面塊區域, 求得長與寬。	36
圖 16 斧劈皴法之筆觸軌跡。	37
圖 17 線性平滑化濾波器。	37
圖 18 染墨模擬結果, 有染墨之處渲染了原筆觸之墨色。	38

圖 19 側鋒筆觸是將筆管傾斜所畫的效果。	40
圖 20 毛筆接觸面以同心橢圓架構模擬，A、B 軸控制整體的外形比例。	41
圖 21 將橢圓等角度切割成數個區域	42
圖 22 毛筆與畫布接觸時，筆毛接觸點分布的情況。	42
圖 23 (a)黑色點為控制點，線段代表各點的相連關係，(b)為筆觸軌跡的內 插曲線。	44
圖 24 毛筆壓力線性變化結果。	45
圖 25 毛筆的軸向，(a)固定軸向，(b)對齊軌跡曲線的切線方向。	46
圖 26 毛筆隨筆觸曲線的切線向量 T_k 所留的墨點隨筆觸曲線.....	47
圖 27 小斧劈皴筆觸。	48
圖 28 筆觸的墨色變化，(a)全筆濡清水，(b)筆尖蘸墨，(c)在碟邊輕壓筆側， 使筆尖的墨與筆上的清水漸漸融合，成為由深至淺的色階，(d)所畫出 之筆觸會有深到淺的墨色變化。	48
圖 29 墨色淡化的效果	49
圖 30 墨色在垂直於路徑軌跡的方向上作線性變化，並加入筆觸淡化效 果。	49
圖 31 各筆毛的墨色不一致所產生的筆觸特色。	50
圖 32 斷水筆觸的模擬。	50
圖 33 毛筆壓力與接觸面積成正比。	51
圖 34 加入壓力效果的中鋒筆觸，壓力變化： P 漸由 $0 \rightarrow 1 \rightarrow 0$ 。	52
圖 35 側鋒接觸面是由單邊提起。	53
圖 36 側鋒筆觸的壓力表現，(a)小斧劈皴，(b)大斧劈皴。	54
圖 37 山石皴法結果一。	56
圖 38 山石皴法結果二。	57
圖 39 山石模型(圖 37)在不同視角下的結果。	58
圖表 40 山石模型(圖 38)在不同視角下的結果。	59

第一章

序論

1.1 中國山水畫發展簡史

中國山水畫在魏晉之前僅是道釋人物畫的背景，直至東晉山水畫鼻祖顧愷之的名作「女史箴圖」強調山川之美後，逐漸為各名流隱士所重視。先有南北朝謝赫創立六法，後有唐朝的李思訓父子創「金碧山水」及王維創「水墨山水」，自此，可以說山水畫法已全，宗主既分，後世董奇昌以李思訓為北宗之祖，王維為南宗之祖，並大事貶北尊南，(亦有人稱北宗為工筆山水，南宗為寫意山水)。由此可看出王維純水墨風格，為後世帶來鉅大影響，使水墨山水畫成為國畫主流，其被稱為水墨山水畫之鼻祖。

至宋代乃傾向水墨山水的發展，名家輩出，兩宋可說是山水畫顛峰期，有北宋的李成、范寬、董源三大家鼎力，南宋的馬遠、夏珪。馬、夏初期拜李唐為師亦工青綠，而後一變為水墨大筆作畫，所以馬、夏為融合南北宗之畫家。元、明、清臨摹風氣極盛，運用前人技法發揮至極緻。但臨摹而不拘泥於古者，當中以黃公望為首四人，世稱為元四大家。近代風氣自明、清之衰弱至今而轉盛，有徐悲鴻、黃濱虹、張大千 等眾名家，為中國山水畫打開新局面與新路向。

明朝文人王世貞說：「山水到大小李(唐朝李思訓父子)為一變，荆、關、董、巨為一變，李成、范寬為一變，劉(劉松年)、李(李唐)、馬、夏為一變，到大癡、黃鶴(元朝黃公望、王蒙)又一變」，清初名畫家石濤也說：「筆墨當隨時代走」。由此可知

中國山水畫歷史，可以說是山水畫技法的發展改革史。

1.2 論文動機與目標

中國山水畫是國畫最難的一科，是極具寫意與美的一項藝術。在山水畫中山石佔了極重要的地位，山可以表現整幅畫的氣勢及畫風，像是莊重雄偉的山、尖銳而聳立的斷崖，綿互遙長的山脈，或是寧靜村落旁的土山。

然而由一千六百多年的發展史可知，其所發展筆墨技法相當複雜，光是基本運筆的勾勒皴擦與用墨的濃淡乾濕便是門學問。如果要創作山水畫，還得必須花好一段時間研究古今各種筆法。作畫時間也長，若是過程中稍一疏失，由於國畫所用紙張極易吸水，可不能像油畫般能用疊或刮的方式彌補，在此情況下，整幅作品勢必做廢而功虧一簣。

著眼於以上種種的困難，本篇論文提出一套自動作畫系統，可以根據輸入的山石場景，在使用者不需具任何筆墨技法、皴法技巧之下，不用親自動筆畫，我們的系統便能畫出具山水畫風格的山岩。在此特點下，使用者只需定義重要特徵參數，電腦便能依其所想要的效果，自動完成所有繪畫過程。

1.3 系統技術概觀與討論

電腦圖學自三十多年以前首批先鋒研究以來，追求逼真一直是不變的目標。所以圖學界各學家不斷研究演算法或模式(Model)，以更接近真實與具物理特性的運作環境。而追求逼真的目標之餘，有些效果卻是連真實世界都無法呈現的。此即是電腦圖學的一分支領域所專注之處，有別於前者，此領域名稱取為NPR(Non-Photorealistic Rendering)。NPR的目標其中包括了模擬人類各種繪畫風格。人類文明自有繪畫以來，手繪技術未因照相機的出現而沒落。其特點之一就是，畫作強烈的顯示創作者想表達的主觀意念，讓觀賞者看了之後能一目瞭然畫家想表

達甚麼，而這有時連言語也無法傳達的。由前例就可知道 NPR 有 PR(Photorealistic Rendering)所不能取代的優點，近幾年已有越來越多人投入此領域研究。

以下將分兩小節，簡述本篇論文的核心技術之討論，與系統流程概觀。

1.3.1 系統技術討論

目前有許多 NPR 的研究論文[11, 15, 17, 20, 21, 22]都著重在西畫的模擬，這些演算法利用不斷地放置相同的圖案(Pattern)或是一樣大小或形狀的畫筆筆觸(Brush Stroke)，最後建立出具油畫、水彩的手繪效果影像。但是中國山水畫卻非常強調一筆線條中，力與美及墨韻的變化，故著重筆、墨、水、路徑軌跡的毛筆筆觸無法用上述演算法逼真的模擬出。因此為了模擬中國水墨畫，在[14, 25]論文研究中，提出一個水墨模擬演算法，將毛筆一筆畫下去時，所產生的經過點、墨印大小、墨色的情況都考慮進去。在電腦要畫出畫中所有筆觸時，上述情況被當成演算法的必要資料，最後輸出效果很好的水墨畫來。本篇論文即參考該演算法，不過該演算法著重於毛筆的中鋒模擬，而我們系統所著重的山石皴紋是兩大類皴法中的斧劈皴類，此皴法是用與其大相徑庭的側鋒畫出。此類皴法很重視力及筆觸破筆飛白的表現，所以我們系統便加入一些具物理特性的參數，並改變與改良其演算法，以模擬中鋒與側鋒不同的感覺，符合系統所需效果。

我們系統的前半部分，依據畫山水畫所需之資料，必須找出三維場景中各模型的幾何特徵，包括模型物體的輪廓(Outlines)、表面石質紋理的皴法區域。到目前為止，以三維幾何分析的 NPR 相關論文中[10, 18, 19]，著重在畫出輪廓白描[18]，或是模擬鋼筆畫風格[10]，或是加強物體外型的視覺效果，以增加複雜模型的主要特徵對比度，使觀察者能輕易地了解其結構特性[19]。然而山水畫除了描繪山石的輪廓特徵外，更注重山岩表面所呈現凹凸不平的感覺，所以得根據物體表面幾何特性找出皴法區域。這不能用大多數演算法所用的表面著色演算法(Surface-rendering model)或直線相交法(Cross hatching)去模擬斧劈皴法的效果，因為山水畫家是以極具寫意的方式，以側鋒方式揮大筆畫於紙上，用筆觸所呈現的飛白模樣，表現山岩表面的凹凸不平；而平順的著色方式或交錯線條將無法達到此效果。觀察此皴法效

果，可看出石質皺紋是二維紋理的表現，因此我們系統提出區域(Region)結構方式，來表現與模擬畫家所畫的側鋒筆觸之軌跡、大小，且利用此區域結構所發展的演算法就可找出輪廓及皺法區域兩類型的幾何特徵。以區域結構找尋幾何特徵的演算法即是系統前半的重點所在，將於下段中概略介紹。

在 NPR 相關論文中找模型的三維幾何特徵可分兩類方法，其一從影像(Image based)去處理，另一從模型所在三維空間(Object space)著手。前者代表的論文研究有 Saito and Takahashi [19]，此類方法的優點是能避免複雜的可見度問題(Visibility problem)。缺點是較不精確，且較不適合具連續性的手繪筆觸，其根本原因在於被處理的資料本身是影像圖素(Pixel)，已失去三維模型的幾何資訊。例如：輪廓曲線的相連性資訊已失去，變為一個個獨立的 pixel，不容易套入毛筆筆觸去描繪物體正確的連續曲線。因此 Curtis[9]提出一個方法，將這些分散的輪廓圖素連接成一條條的筆觸(Strokes)；但根本問題依然存在，圖素本身已是失真的資料，無論用何法連成筆觸將只是近似，非實際具正確連續性之輪廓線條；再者，為了近似原來的輪廓，做了多重的過濾影像處理(Multipass filtering)，稍稍抵觸了此類方法所注重的簡單快速也能表現很好的優點。追根究底，此類方法適合用在以圖素為繪畫單位的應用上，如 Saito and Takahashi [19]在醫學影像方面輪廓突顯的應用，對於如山水畫的連續性筆觸較不適合。後者(三維空間處理)的，優點是精確，保持輪廓線條連貫性，適合任何畫筆的連續筆觸(Brush stroke)；缺點是問題複雜、處理時間很長，有可見度問題(Visibility problem)要解決。由於我們系統為了找輪廓及皺法區域，得需要解決隱蔽線(Hidden line)及隱蔽表面(Hidden surface)的消除，又山水畫只重視一筆的連續線條美，不重視頭尾的精確性，故不太適合用此方法。於是為了兼顧前面兩者的優點，相關論文研究[18]提出新方法，利用識別參考影像(ID reference image)解決隱蔽線移除(Hidden line removal)，又能保持三維空間的正確資訊。但前一段已提到此法亦著重在找輪廓線條，故我們勢必得改變其演算法；且其雖有筆觸控制點的精確三維資訊，在連接筆觸路徑的找尋上，依然是在二維處理，如此將可能發生連接錯誤的輪廓邊(當兩輪廓線的某邊在影像上非常接近時)，失去正確的筆觸連貫性。所以我們系統取其識別參考影像的雙重優點，發展出另一套適合手繪筆觸的表面區域擴展(Surface Region Growing)演算法。

我們的表面區域擴展演算法有六項特點：

- 一、 結合了影像方法的優點與三維幾何方法的精確性。
- 二、 不需像[18]得再配合費時的輪廓邊找尋法(Silhouette Edge Detection)。
- 三、 符合模型幾何上的相連性關係，不像[18]找的路徑會略為失真。
- 四、 找 **Silhouette** 和 **Boundary** 兩種不同輪廓線，只需一次處理過程(One pass)。
- 五、 可在另一相同於前項的處理下，找出山水畫所需的皴法區域。
- 六、 執行之前，已先用識別參考影像技術，去掉佔大部分的不可見(Invisible)三角形，在多模型的複雜場景下，將節省大量的幾何分析時間。

1.3.2 系統流程簡述

本篇論文提供一個系統，根據使用者輸入的多個山石模型之組合場景，配合各模型的三角形相鄰資訊(前置處理)，就可以自動找出場景的複雜輪廓與重要的表面石質紋理特性，隨後套入水墨畫模組中畫出。

系統處理流程條列於下：

1. 利用場景的識別參考影像，配合我們定的隱蔽點刪除法，決定各模型所有的頂點(Vertex)的可見度。
2. 由前項之結果，依照本系統因應山水畫風格而立之定義，提出特殊隱蔽面刪除法，去掉所有不可見的三角形。
3. 執行「表面區域擴展」演算法，將所有模型的可見三角形掃描過，分析出所要的幾何特徵：輪廓的 Silhouette、Boundary，石質紋理的皴法區域。
4. 將前項所得的四種原始資料集合做處理，整理出具連續性的毛筆筆觸路徑，及水墨畫模組所需的重要參數。
5. 套入水墨畫模組中，畫出所有筆觸，完成一幅具山石皴法效果的山水畫。

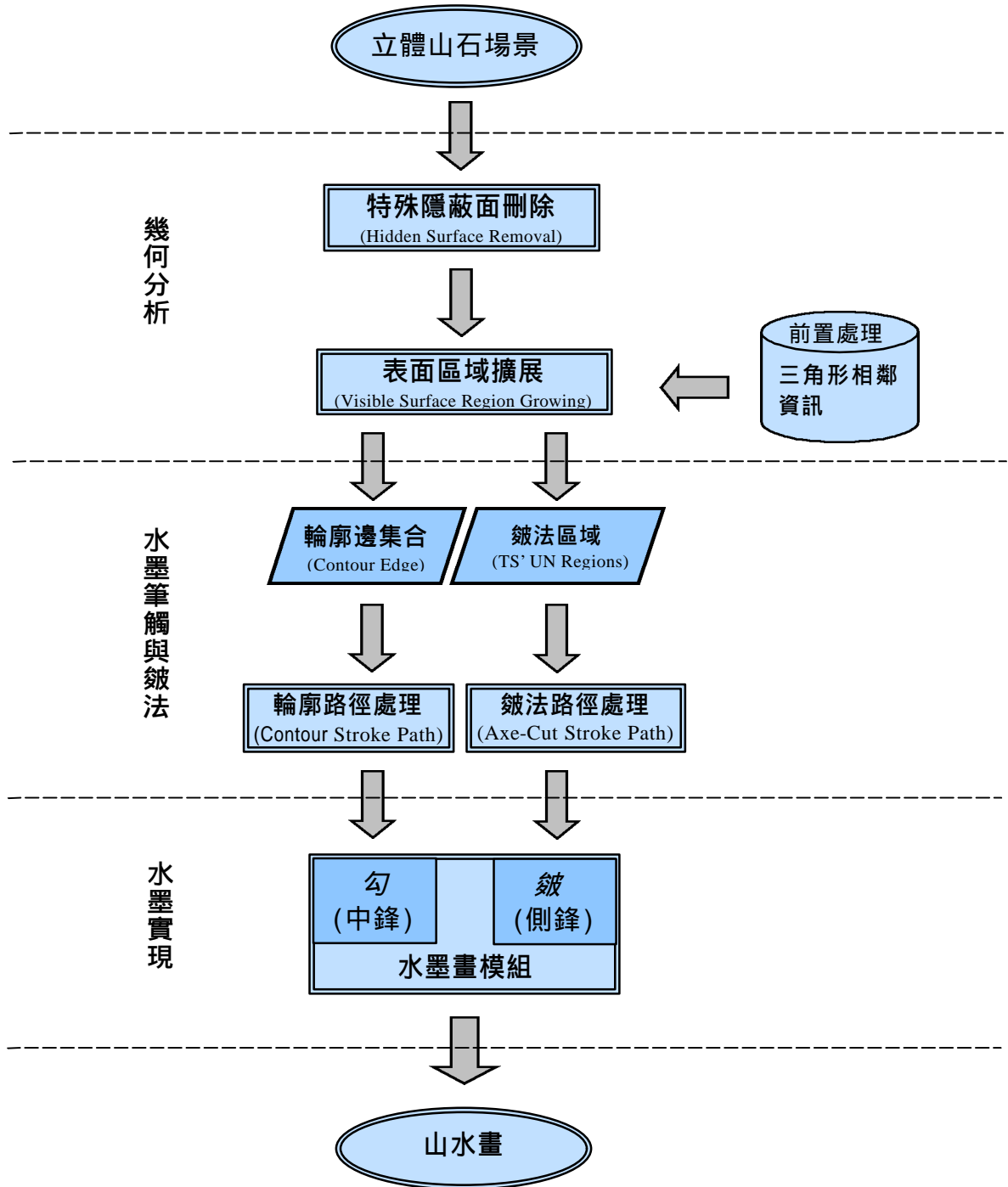


圖 1 系統流程圖

1.4 論文貢獻及優點

- 表面區域擴展法可以找出重要的輪廓曲線 Silhouette、Boundary，以及本篇論文重點所在，石質紋理的皴法區域。
- 我們系統所找出之幾何特徵曲線，相連性正確，適合具連貫性的自然筆觸。
- 識別參考影像係利用 OpenGL 的 Z 緩衝區技術及硬體加速畫出，配合特殊隱蔽面刪除法，無論多複雜的場景可見度問題，皆可快速輕易的解決。
- 由前項知可快速解決費時的可見度問題，再加上線性時間複雜度的表面區域擴展法，整個分析幾何特徵過程將非常快速，故可讓使用者先瀏覽場景各角度位置的特徵曲線，滿意整體配置感覺後，再套入水墨畫模組畫出。
- 由於區域擴展法是在三維模型表面的擴散延展，三維幾何特徵尋找與擷取均侷限於其所屬之模型物件範圍內，此舉在複雜的多模型場景下，可大量減少無謂的搜尋。
- 水墨畫模組可任意改變毛筆的外型與密度，以模擬中鋒與側鋒效果，也加入一些重要的物理特性，使筆觸更多變化，如：可模擬中側鋒自然的飛白效果。
- 系統模組架構分明，可藉由更改流程中某物件模組的功能，來模擬各種風格迥異的山石皴法，達到重複使用系統模組的功用。

1.5 章節提要

本文架構共分七章，其內容概述如下：

第一章：簡介山水畫發展史、說明本篇論文動機與目的，以及系統技術的討論，與系統流程說明。

第二章：介紹 NPR 領域的相關研究。

第三章：識別參考影像與頂點可見度之決定、特殊隱蔽面刪除、可見表面區域擴展演算法。

第四章：水墨的筆觸與皴法：輪廓筆觸路徑的鏈結、皴法筆觸走勢之決定、像素染墨機制。

第五章：水墨畫模組，包含有毛筆模組，毛筆運行機制，水墨筆觸模擬機制。

第六章：實作與實驗結果。

第七章：結論。

第二章

相關研究

本章將介紹與本論文相關之 NPR 研究，分成兩類來敘述，第一類[10, 11, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 24, 25]係參考所輸入的影像或三維場景，配合使用者事先定義好的紋理材質、交叉線條、或黑白色階圖案，按照演算法所找出的位置、方向，將材質圖案貼於其上，將其轉成卡通、素描、鋼筆畫、油畫..等等的非相片質感影像。

Saito and Takahashi [19]發展一套全新 Rendering 技術，產生具視覺理解力的立體影像。他們認為加強物體某些幾何特徵，可以讓外形特徵被突顯出來。為此所發展之繪圖演算法著重在輪廓外形、內部邊緣線、裂痕的加強表現。他們導入了幾何緩衝區(Geometric Buffers)，利用二維影像處理那些幾何緩衝區得到所要之特徵資訊。幾何緩衝區共有九個，每個紀錄不同的表面幾何特性於像素點中，例如對應物體的深度或法向量或物體的空間位置。每一個幾何緩衝區都是繪圖流程的中間產物，整個流程被分成三段：幾何處理(geometry processes)、物理光學處理(physical processes，例如 shading 或貼圖)、特效處理 (artificial processes)。這可以讓使用者在第三個流程嘗試不同特效的組合，以得到最佳的視覺加強影像，而不需過度的重複計算。此技術可以被應用在邊緣加強、醫學影像、表面分析..等等。

Litwinowicz [16]以影片當成輸入，將其轉成手繪的連續動畫。此方法著重在連續畫面之間的一致性。筆觸分布位置用 jittered grid 方法，筆觸顏色以原始影像在該位置區域的顏色決定，筆觸的方向為垂直於該位置的顏色梯度(intensity gradient)，但是筆觸寬度都是一樣的。此方法首次將連續影片的一致性與筆觸位置、方向相關

聯。

Hertzmann [11]使用多層次影像(layers), 組合成一輸出影像。每一層次內的各筆觸寬度都相同, 由底層往上, 越上面的筆觸越小。由於各層的筆刷大小、長度都不同, 所畫出的影像與其他方法相比之下較令人滿意。但他的筆觸僅考慮顏色與大小, 與真實筆觸特性差異很大, 例如: 筆刷的物理特性。

對於只有黑白顯示之硬體裝置, 都需要 halftoning 處理, 以往演算法只是逼近像素值, 而失去了影像的重要資訊。Veryovka[24]為改進此缺點, 將 halftoning 技術加入了三維幾何的訊息, 以加強影像的顯示效果。演算法主要著眼在 halftoning 材質紋理的產生方法, 配合[19]所提出的幾何緩衝區, 能控制材質的外觀、大小、方向與對比度。其所產生的兩色影像, 使用了幾何、位置與反射亮度(Intensity)資訊, 讓使用者能更容易看出模型的重要特徵。

中國水墨畫鬼斧神工的技巧, 使得近幾年很多學者研究其相關的技術, 如毛筆的特性、紙張的渲染過程。Weng [25]將一個已存在的水墨畫影像作為輸入, 而將其自動轉成其他技巧效果的水墨畫。他提出一個筆觸資訊的找尋演算法, 以螢幕像素點為單位, 掃描每一點並依情況擴散, 找出原筆觸軌跡與大小, 將那些資訊套入毛筆模型, 完成水墨畫作。著眼於中國水墨畫重視筆墨技巧, 他導入了二維的毛筆模型, 筆毛的位置為同心圓方式平均分布於筆刷中。該模型加入一些物理特性, 例如: 毛筆的轉筆或是墨水量的衰減, 以模擬平順且真實的筆墨效果。在繪畫過程中, 筆刷中心沿著筆觸軌跡點移動, 並將印記留於經過點, 最後畫布就出現效果不錯的毛筆墨跡。它具有計算快速且效果不錯的特點。整個流程, 只需要少數的使用者設定參數, 其他部分均為電腦自動解析與繪畫。我們系統的水墨畫模組, 參考 Weng 的毛筆模型部分, 並將其改良以適合技法多變的山水畫。

Northrup[18]提出一套演算法, 針對三角形網格(Triangle mesh)的模型當參考物體, 畫出具藝術性的 Silhouette 輪廓筆觸。Silhouette 筆觸路徑的找尋過程中, 它集合了影像處理方法的優點與三維空間方法的精確性, 在找出 Silhouette 後, 再利用識別參考影像, 找出所有部分可見(partially visible)之 Silhouette 線段。然後將螢幕影像上相鄰 Silhouette 線段連接成一段長的路徑, 當成筆觸經過點。而其筆觸是以

OpenGL API 中的 Triangle strip 型式即時畫出，其優點在於筆觸路徑中各點寬度可自由設定，兼顧筆觸不規則外貌及場景的 render 速度。也加入一些特殊效果，例如：手繪透視法，讓較遠場景或模型之筆觸寬度較細。

Kowalski[15]使用事先定義好的筆觸，模擬畫出具手繪卡通效果的影像。他們利用 GL 中的 triangle strip 或是曲線，模擬三維場景的毛、草、樹葉..等等模型表面之重要元件。藉著 Salisbury [20]所用的灰階參考影像方法，決定筆觸區域及方向，再將使用者定義的元件結構貼於對應的表面位置，表現出物體的外貌。並提供一自動化機制，控制元件結構的詳細程度，(只畫出 triangle strip 的骨幹、邊緣或是填滿多邊形)，使其不需要清楚描繪內容，亦能呈現場景的重要表面特徵。

在 Shiraishi[21, 22]兩篇論文中，提出一個模擬油畫的演算法。此方法能參考任意二維影像，例如照片，自動合成出具油畫效果的影像。他們利用一筆矩形筆觸去近似原來影像的局部區域特徵。而筆觸位置、方向、大小的決定，是將原影像依法撒點，每個點即是筆觸的位置，該位置再配合使用者給定的邊長，得到正方形的區域影像，利用色差方法與 Image Moment[13]，算出該區域影像主要顏色的矩形範圍與走勢(即筆觸的大小與方向)。第二篇類似其他重視幾何資訊的 NPR 研究論文，[22]加入場景模型的深度資訊，決定筆觸的繪出之順序與調整筆觸區域的邊長，可讓物體邊緣更讓人滿意。但輸入為二維影像，所以深度資訊影像需要使用者另外給定。此方法的矩形筆觸大小可改變，但區域邊長固定之下，所找出之筆觸大小的變化被侷限住，故沒有深度值輔助，則失去些許意義。

Deussen[10]提供一個方法，能夠自動畫出各種類樹木或灌木叢的鋼筆畫效果。該系統以三維模型當參考物體，以兩個檔案方式讀入，分別是樹幹分支的幾何資訊、樹葉位置及法向量。分析輸入模型之輪廓及亮度，再依該數據畫出樹幹及抽象視覺效果的樹葉(類似卡通樹，只畫出重要特徵)。樹幹及樹枝部份以輪廓曲線配合黑暗部分的交叉線條來表現。每片樹葉外形，則用多邊形不同的九個視角下的外觀為樣本，以自身的法向量去線性內插求得。該多邊形為使用者事先定義，它可被允許是各種元件(圓形、橢圓或各式多邊形)，如此可得到多樣化之樹葉，以模擬各種類的植物。此系統著重在植物的視覺表現，故可讓使用者很容易看出樹的特徵，不致被結構複雜的樹迷失了焦點。

第二類[8, 12, 23, 25]專注於精確模擬出藝術家所用之畫筆模型。為了產生出逼真的畫筆筆觸，他們加入畫筆許多的物理特性，故計算量隨之變大，與前一類比較下，此類計算時間非常久，但效果也非常吸引人。由於我們系統是模擬毛筆，所以下將針對毛筆模型[12, 23, 25]做介紹（[25]歸類在前一類介紹）。

中國水墨畫注重筆墨表現，所以好的毛筆模型是模擬水墨畫先決條件。Strassmann[23]提出了最基本的毛筆模型，它具有毛筆的部分物理特性，筆毛是直線排列的，每一根筆毛有墨含量與位置。繪畫時，一維的筆毛列垂直沿著曲線前進(曲線為毛筆移動路徑)，曲線上的控制點描述了墨水留在畫布上的量，也描述毛筆在該點的壓力。

Horace and Helena[12]的毛筆模型同樣也模擬物理特性，他們著重在中國書法應用上的模擬。他們用三維圓錐體模擬毛筆外形，並可動態移動。當在畫圖時，毛筆在畫布上的接觸面為橢圓形，以模擬毛筆形變的影響。其動態變化的參數有：水墨量、接觸面外形、及毛筆移動速度。他們的方法特別強調在筆觸轉彎與結尾時的效果，以模擬真實的中國書法字體。

第三章

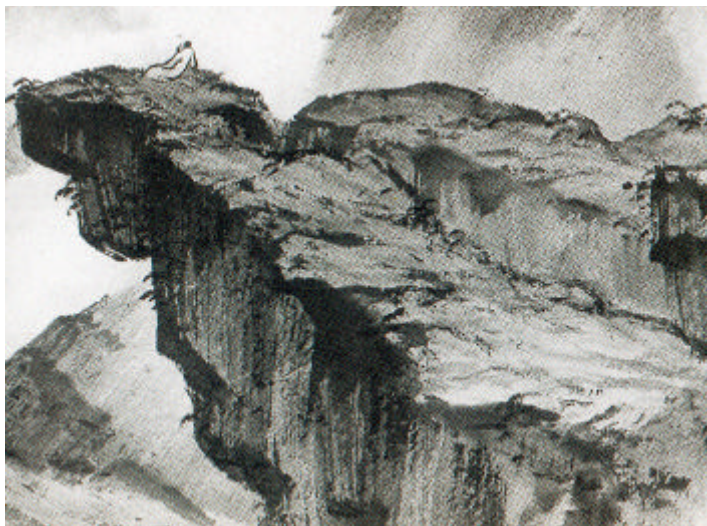
表面區域擴展

「皴」原意是皮膚上起小疙瘩，但是後來又引申為皮膚受寒而凍裂的現象，也就因為皴可以形容皮膚的裂紋質理，所以到了北宋的郭熙，在他的「林泉高致集」中，引用「皴」來形容畫山石紋理結構的技法。山水畫的皴法表現山的形勢脈絡，從陰暗處著筆，顯現山石紋痕的特徵與陰陽向背表現。世界上的山大概可分為兩種——石質的山與土質的山。皴法種類繁多，但仔細觀察皴法的組合情形，大致可分為兩類，即是表現石山大塊面形態的斧劈皴類，及以曲線畫出土山立體感的披麻皴類。例如就地質而言，花崗、玄武等，易成柱狀及方塊狀節理的石質，適於以斧劈皴來表現。水成岩、沉積岩等易成鬆軟的土坡，適於以披麻皴表現。其他的皴法皆能以此兩種衍生變化而得到。

我們的焦點放在斧劈皴法的模擬，因為斧劈皴是山水畫皴法中最重要的皴法之一，它是陽剛性的皴法代表，其他的面類皴法皆能由此皴法衍生出，例如：釘頭皴、括鐵皴 等是斧劈皴的變體。在山水畫中，岩石大部分需此皴法，例如堅實的大霸尖山。斧劈皴形如其名，像鐵斧劈木材時，在剖面上所留下的劈痕。畫家畫斧劈皴時，是將毛筆橫臥，側筆而下，如斧劈木石般快速橫掃，整筆力道的變化是首重尾輕，而側鋒是畫出面的筆觸，容易乾枯而呈現大片飛白的墨跡，整體筆觸充滿力與面的陽剛之美，畫家們常用來描寫堅硬挺拔的岩石塊狀。圖 2 上為實際山岩照片，下為利用大斧劈皴所畫出之山水畫，由懸崖的峭壁處可看出斧劈皴能表現出大塊平面斷裂之特色。



(a)



(b)

圖 2 (a)山岩照片，(b)利用大斧劈皴所畫出之山水畫。

由懸崖的峭壁處可看出斧劈皴能表現出大塊平面斷裂之特點。

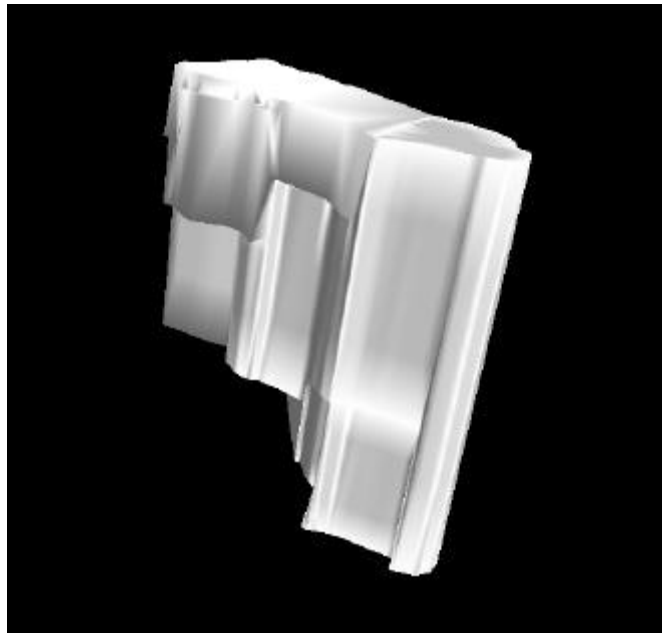
山水畫的山石畫法是用中鋒勾勒出山石輪廓線，確定山石的外形後，再以側鋒或長或短地皴畫出山石黑暗部分的表面紋理。而這些輪廓及紋理的筆觸都需有軌跡控制點與參數資訊，例如：控制點位置、毛筆與紙的接觸面形狀與大小、力量、水及墨量 等等。所以我們將系統分成三個流程，首先分析山石的三維幾何資料，

得到所需數據—輪廓邊及皴法區域，再將之整理成為毛筆筆觸所需的參數資訊，最後將筆觸資訊輸入水墨畫模組中，畫出山水畫。

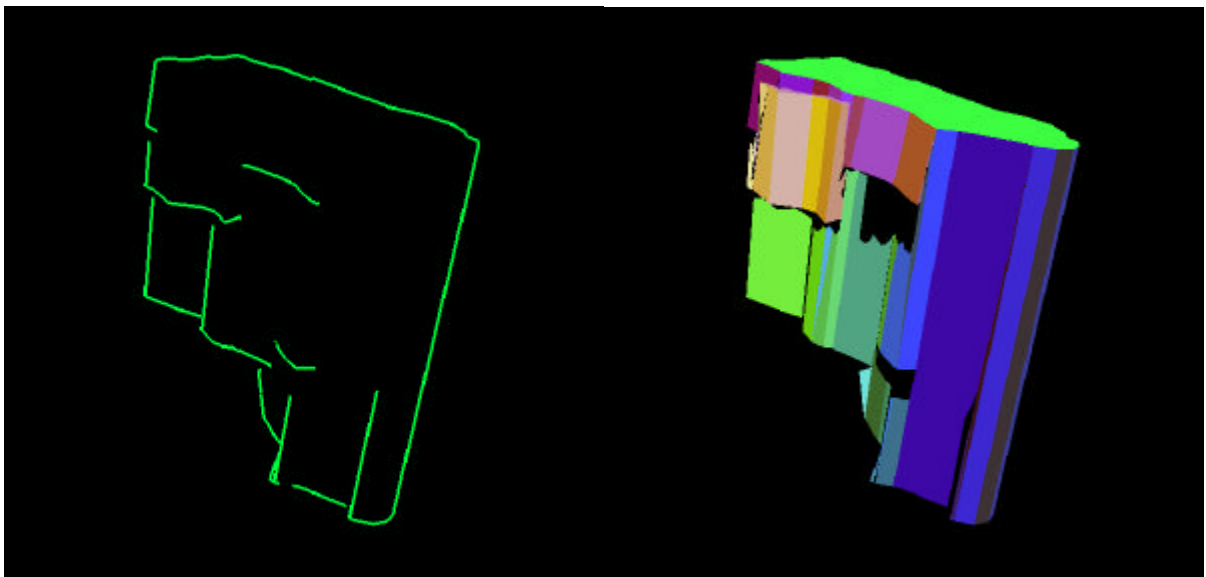
畫家於畫山石時，將所看到的外形輪廓與表面紋理以筆觸描繪之，他們用斧劈皴筆法描繪山石大塊平面的陰暗表現，因此在幾何分析流程中，我們分析出山石模型的可見表面上各個面塊組織，而後在計算水墨的筆觸與皴法流程中，進一步決定它的走勢。我們提出特殊隱蔽面刪除法分析出模型的可見表面部分，並提出表面區域擴展法找出可見表面上每一塊平坦區域。我們的方法，如同水滴在紙上時的暈開擴散過程，以幅射狀不斷往外擴散，直到遇上紙的邊緣，或水量低於門檻值(threshold)為止。在水停止擴散後，其所涵蓋的邊緣可能是紙張的邊緣或是乾濕的交界線。相同地，我們的演算法也是幅射狀擴散，直到三角形至擴展起始點之間的法向量夾角大於門檻值或是遇上表面的輪廓邊緣為止，如此找出的區域即是一平坦的面塊區域。而區域的邊緣可在擴散時決定是否為模型的輪廓邊緣。

我們的方法是在可見表面上進行，如此才能找出畫家所見的面塊區域，並在可見與不可見表面之交界邊停止時，依狀況條件決定該擴展停止邊是否為模型的輪廓邊緣。本篇論文的幾何分析流程如下：首先畫出識別參考影像，依影像值及景深值決定頂點的可見度。再依照多邊形的三個端點可見度，進行特殊的隱蔽面刪除。最後，於所有模型的可見表面上進行區域擴展。圖 3 展示模型經區域擴展分析後的結果，(a)為模型外觀。(b)為分析後所獲得之輪廓邊緣集合。(c)是斧劈皴的面塊區域分佈。

在 3.1 節，我們提出識別參考影像技術決定頂點可見度的方法。因應山水畫手繪風格，在 3.2 節中，定下系統基本定義，作為表面區域擴展的基礎與判斷依據。而表面區域擴展與分析將在 3.3 節討論。



(a)



(b)

(c)

圖 3 經幾何分析後的結果。

(a)模型外觀。

(b)輪廓邊集合，此圖是將每個輪廓邊直接用線段方式，畫出之結果。

(c)斧劈皺的區域分佈，相同顏色為同一區域。

3.1 識別參考影像與隱蔽點刪除

Northrup [18]利用識別參考影像，解決輪廓邊的可見度問題，該影像是以畫出所有邊及面之識別顏色所成。我們參考 Northrup 的方法，改變其演算法，並加入失真補償的方法，以應用在頂點的可見度問題上。

3.1.1 識別參考影像

頂點可見與否，我們可用參考影像的識別顏色決定，影像中每一個三角形的顏色都是唯一的，可作為判別頂點可見度的識別訊息。我們以 R 顏色值來區別各模型，在模型中的三角形以 G、B 顏色值作為區別。圖 4 為圖 3(a)模型的識別參考影像。

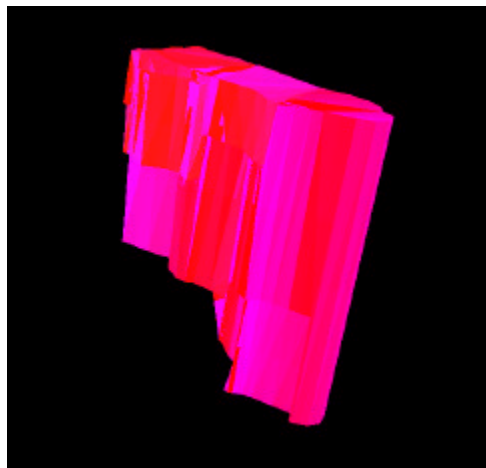


圖 4 識別參考影像。

3.1.2 隱蔽點刪除

畫出場景的識別參考影像，我們參考其顏色與景深緩衝區內容 (Color Buffer, Depth Buffer)，進行頂點可見性的判斷。

在本篇論文中，我們取出頂點 V 在識別影像位置上的顏色 C ，將 C 與共同擁有 V 的所有三角形一一比對識別顏色，若有符合者，其意味著 V 所在的表面出現於影像中，即頂點在此視角下是可見的。舉例來說，圖 5 為模型在頂點 V 處的網格表面。深灰色部分之三角形，於此視角下，屬於模型背面，識別顏色必定不會出現在影像中。而淺灰色三角形在 V 附近的部分，若未被前方物體遮蓋，則會出現在影像中，我們只要根據頂點 V 在參考影像上之位置，取出顏色 C ，與所有淺灰色三角形的識別顏色比對，若有符合者，則 V 為可見。

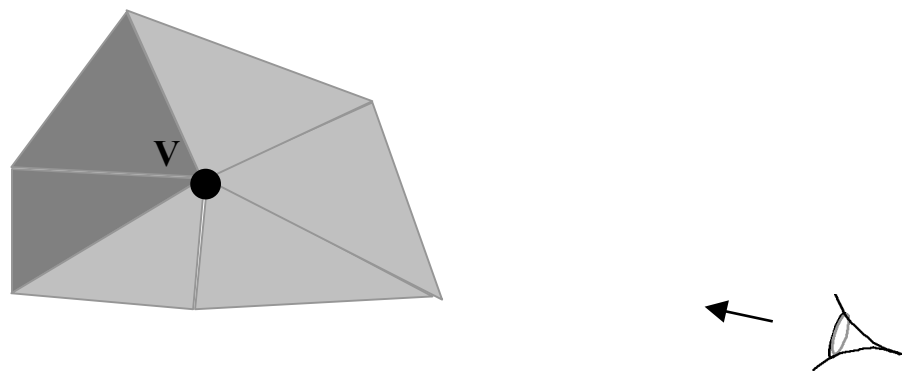


圖 5 共同擁有頂點的所有三角形。

由於螢幕像素點是離散的，所以參考影像會失真。如圖 6(a)箭頭所指之處，該頂點所屬的所有三角形環繞著它，因此識別顏色判別法不會誤判，此為正常的情況。然而頂點周圍有缺洞或是在邊緣時，可能因失真造成該點像素漏失原所屬三角形的識別顏色，變為後方物體的顏色。如圖 6(b)範例所示，箭頭所指的白點，(為了容易觀測，point size 設為 2)，為三角形頂點所在，深色部分為三角形的識別顏色，由圖可知識別顏色在參考影像中所佔範圍未達到白點所在，而略為失真，進行識別顏色判別時，系統會誤以為頂點被它物所遮而判別為不可見。在圖 6(b)中，三角形的法向量與視角方向接近垂直，且頂點都屬於邊緣，造成畫出時右上和左下的頂點失真。

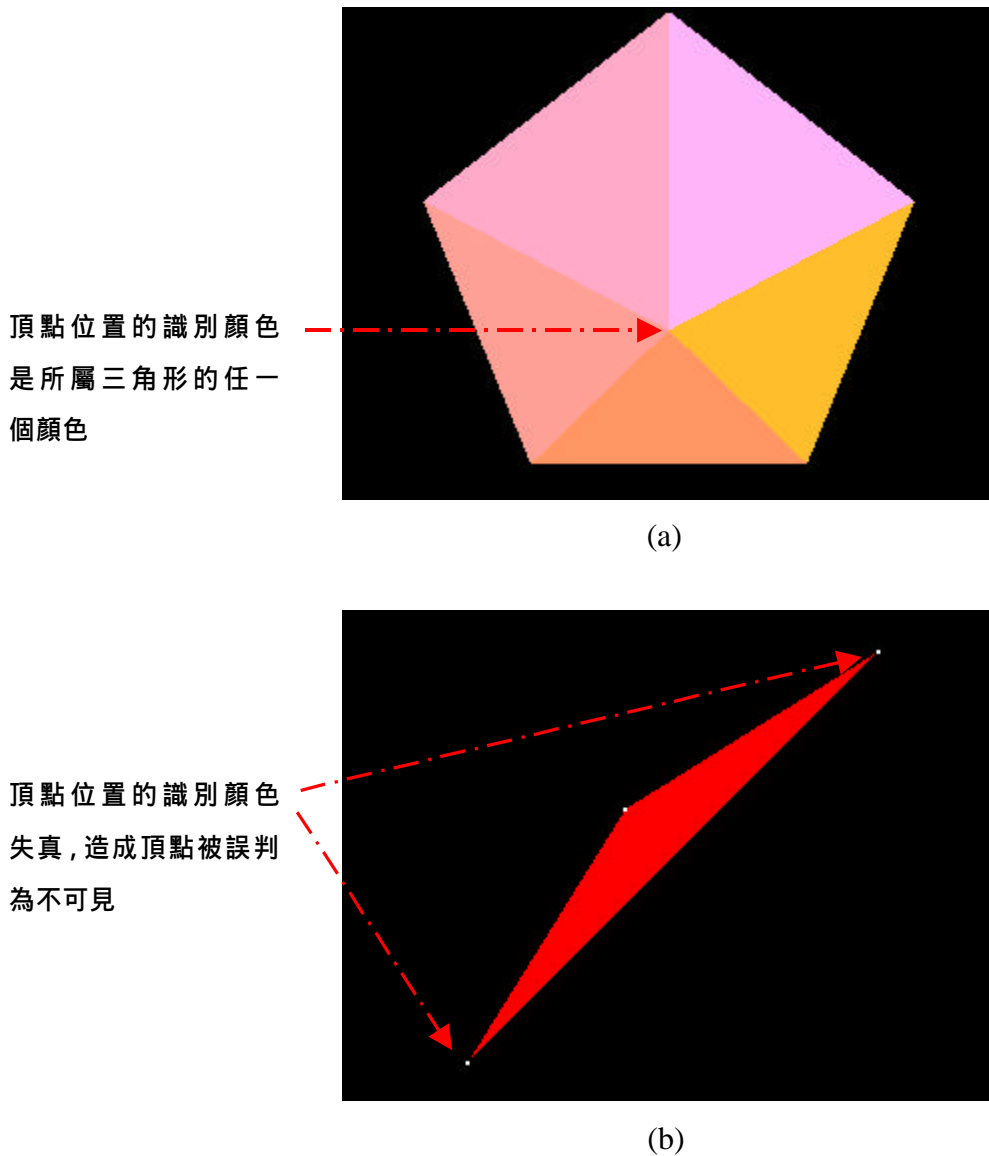


圖 6 影像失真問題

由於影像失真問題，所以我們提出景深緩衝區的輔助判別法，參考頂點 V 在景深緩衝區相對位置的景深值 Z ，若 Z 大於頂點 V 的景深值 Z_v ，則代表在識別參考影像中，該位置的像素值是 V 後方物體的識別顏色。這情況在實際場景是不可能的，因為若是其他物體遮蓋了 V ，必是在前方，即景深值較小，而非較大。所以該點識別顏色失真，頂點 V 為可見。

3.2 特殊隱蔽面刪除法

為了在可見表面上擴展，本篇論文利用頂點的可見度結果，在能保持模型幾何的連續性及主要特徵之下，執行快速的隱蔽面移除。我們根據山水畫 NPR 特性，設下系統定義，作為隱蔽面移除的根據。

在系統中，面的可見度用在區域擴展機制上。而加入部分可見的多邊形，或去掉部分不可見的多邊形，皆不會讓區域擴展後的山水畫皴法筆觸有多少改變，所以在符合 NPR 特性下，我們不深入篩選，而利用面的三個端點決定其可見度。系統中，面的可見度定義是：

若面的任一端點為不可見，則面為不可見。 (定義一)

按照面(三角形)上的三個端點可見度，有四種情況，即頂點可見的多寡數目來區別。但有一種特殊情況，命名為情況 S，是在三個端點均為可見下，其三角形卻為不可見，如圖 7 所示，此類三角形的三個頂點皆在模型輪廓邊緣，三角形本身在模型背面。若不排除此三角形，將造成區域擴展時，會在模型背面進行擴展，得到不想要的區域及輪廓邊。因此，在進行隱蔽面刪除時，以三角形之法向量與視線向量的內積值加以區分排除：

$$\vec{h} \cdot \vec{V} \leq 0 \quad (3.1)$$

其中

\vec{h} 為三角形之法向量，
 \vec{V} 為視線向量(line-of-sight vector)。

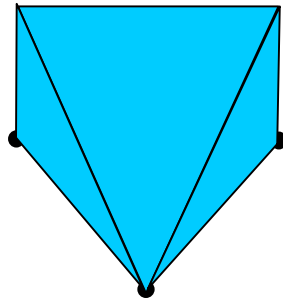


圖 7 屬於不可見三角形的特殊情況。

由隱蔽面之定義可區分出三類型，作為區域擴展之依據：

- (1) 類型 1：除情況 S 之外的三端點可見之三角形(P)，按定義一，P 屬可見三角形。區域擴展是在可見表面上進行，表面上的每個可見三角形皆為擴展種子，因此，此類型屬於擴展種子區。
- (2) 類型 2：情況 S 與兩端點可見之三角形，稱為 P。若有擴展類型 1 之三角形 (P') 與 P 相連，則 P 上唯一的可見邊(E)必為 P 與 P' 的相連邊，這代表著 E 為可見與不可見表面的交界邊。當 P' 將區域擴展至 P 時，已不在可見表面範圍，故停止擴展 P。此類三角形屬於擴展終止區，而 E 可能為 Silhouette 輪廓邊，於 3.3.2 節討論。
- (3) 類型 3：為兩端點以上不可見之三角形(P)。與 P 相連的三個三角形(P')，必定也是不可見三角形，(因至少 P 的一個不可見端點也是相連三角形的端點，所以依定義一，它們皆為不可見三角形)，因此不會經由 P' 擴展到 P，故此類屬於擴展絕緣區。

隱蔽面刪除過程，係將所有三角形掃描過。按照定義一，若有頂點不可見，則三角形不可見，若其頂點皆可見，再以 3.1 式過濾掉情況 S，最後即可獲得模型的

可見三角形集合，作為區域擴展種子。下方為虛擬程式碼：

```
for (所有三角形) {  
    if(三角形的任一頂點不可見)  
        三角形不可見;  
    else if( $\vec{h} \cdot \vec{V} \leq 0$ )  
        三角形不可見;  
    else  
        三角形可見 ;  
}
```

圖 8 為執行隱蔽面刪除之後的結果，(a)為圖 3(a)模型執行隱蔽面刪除演算法後，可見三角形所組成的模型表面，(b)、(c)、(d) 為觀察(a)的可見表面狀況，分別為向上、向左、向右轉 30 度。

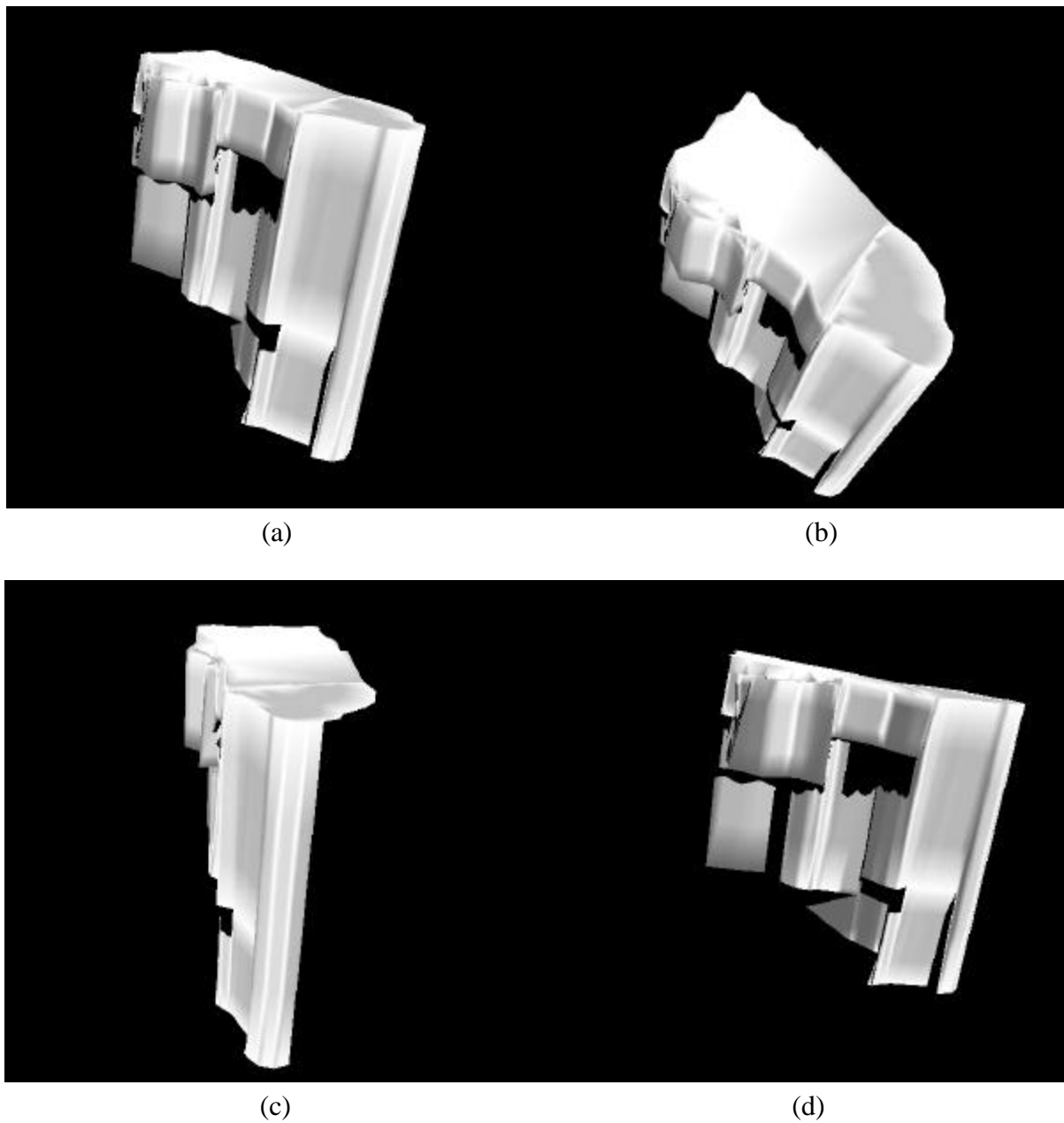


圖 8 隱蔽面刪除，(a)刪除後之外觀，(b)為上轉 30 度，(c)為左轉 30 度，(e)為右轉 30 度。

3.3 可見表面區域擴展與分析

畫家利用斧劈皴法模擬石質山石的面塊特性，每一筆皴法模擬平面背光時的表現，因此本篇論文依據此特性，尋找模型上一塊塊平坦的區域。依此觀點，我們利

用區域擴展，由一個三角形擴展出一個平坦的區域面。在模型輪廓邊的找尋上，例如：Silhouette 的定義是 front face 和 back face 的相連邊，故找尋 Silhouette 必須將所有邊掃描過，以找出符合定義的邊。而本篇論文在區域擴展過程中，利用擴展至下個三角形時，依照其本身的可見度，可判斷出交界邊是否 Silhouette。在各子節中，我們將詳細討論皺法區域的找尋與輪廓邊的判斷。

在表面區域擴展時，我們需要每一三角形相連的資訊。由於這和視點位置及視角無關(view independent)，所以將相連資訊在前置階段處理，區域擴展時便能快速執行三角形的三邊擴展生長程序。

3.3.1 皺法區域

斧劈皺法用以描繪山石的面塊結構，所以我們依此理念，利用區域擴展，在場景所有模型的可見表面上，分出一塊塊平坦的區域。用起點三角形 P_{start} ，將它所在位置的平坦區域結構找出來，我們利用如水滴在紙上的擴散原理，將那附近的平面結構經由表面區域擴展分析出來，就如同水滴暈開的範圍是跟紙張特性與水量多寡有關，區域擴展範圍跟模型的可見表面結構特性與想找的平坦程度有關。

也就是說水停止擴散與最低水量門檻值有關，而我們系統要尋找的是一塊平坦的區域，那麼區域所能容忍的角度差上限的門檻值 θ_r ，(區域的起點三角形 P_{start} 的法向量與區域內任何三角形的法向量所夾的角都小於 θ_r)，就是表面區域擴展的主要停止條件，列於 3.2 式：

$$\frac{\vec{h}_{start}^p \cdot \vec{h}^p}{\|\vec{h}_{start}^p\| \|\vec{h}^p\|} \leq \cos \theta_r \quad (3.2)$$

其中

\vec{h}_{start}^p 為區域的起點三角形 P_{start} 之法向量，

\vec{h}^p 為區域內任何三角形之法向量。

如下圖所示：紅色箭頭為法向量 \vec{h}_{start}^p ，黑色箭頭為其他藍色三角形的法向量，圖中所有法向量與 \vec{h}_{start}^p 的夾角 都未超過 θ_r ，也就是圖中其他三角形皆與 P_{start} 同屬一個區域，粉紅色線段為此區域的邊界，邊界以外的三角形都使向量夾角大於門檻值。

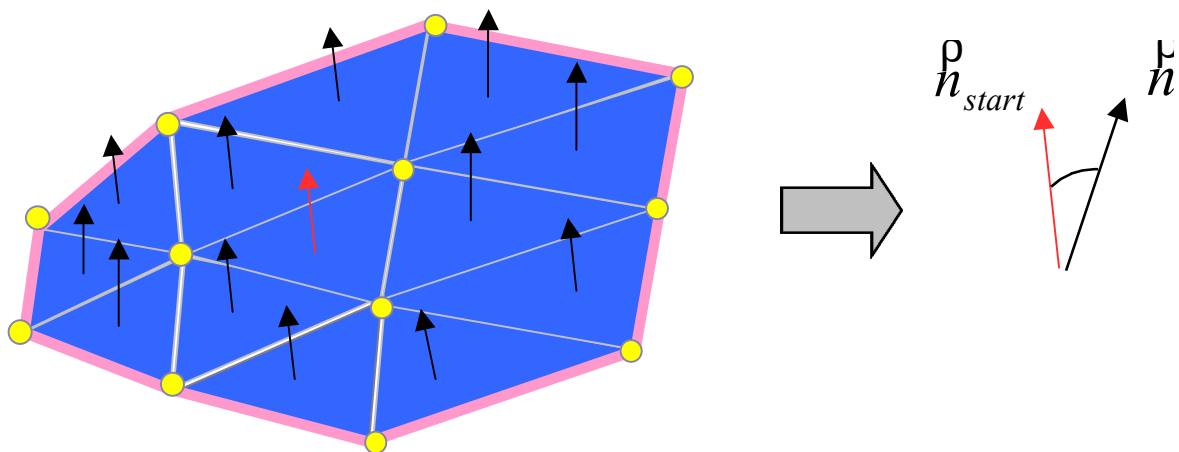


圖 9 區域擴展時，所得區域內的各三角形，其與 P_{start} 的法向量夾角必須低於門檻值 θ_r 。

另外區域擴展也會被可見表面之範圍所侷限，也就是說可見表面的邊界亦是區域的邊界；就如同水的擴散亦侷限於紙張的範圍大小，若紙被剪成星狀，而水量門檻值不限制時，則水最多擴散成星狀。可見表面範圍由模型的輪廓外形與物體遮蔽決定，這可由隱蔽面刪除法處理。例如，當三角形網格被前方物體遮到一部份時，被遮部分之邊緣三角形(淺灰色)就是上節所說的擴展終止區(類型 2)，也就是區域擴展的終止點。如圖 10 所示，黃色頂點代表可見的點，紅色頂點代表視線被物體遮住而不可見的點，因此藍色表面按照隱蔽面刪除的定義，為可見三角形網格表面，而三種不同灰階色三角形為不可見表面，其中灰階由淺至深顯示其不可見端點個數的多寡。於圖 10(b)中，黑色箭頭表示執行表面區域擴展時，擴展到淺灰色區域，因三角形不可見而停止之情況，箭頭代表擴展方向，此時系統便可得知，箭頭所跨

越的終止邊 E 為區域邊界，而那些淺灰色三角型是表面區域擴展的擴展終止區。內部兩種灰色較深的三角形區域，為 3.2 節所分析的類型 3—擴展絕緣區。

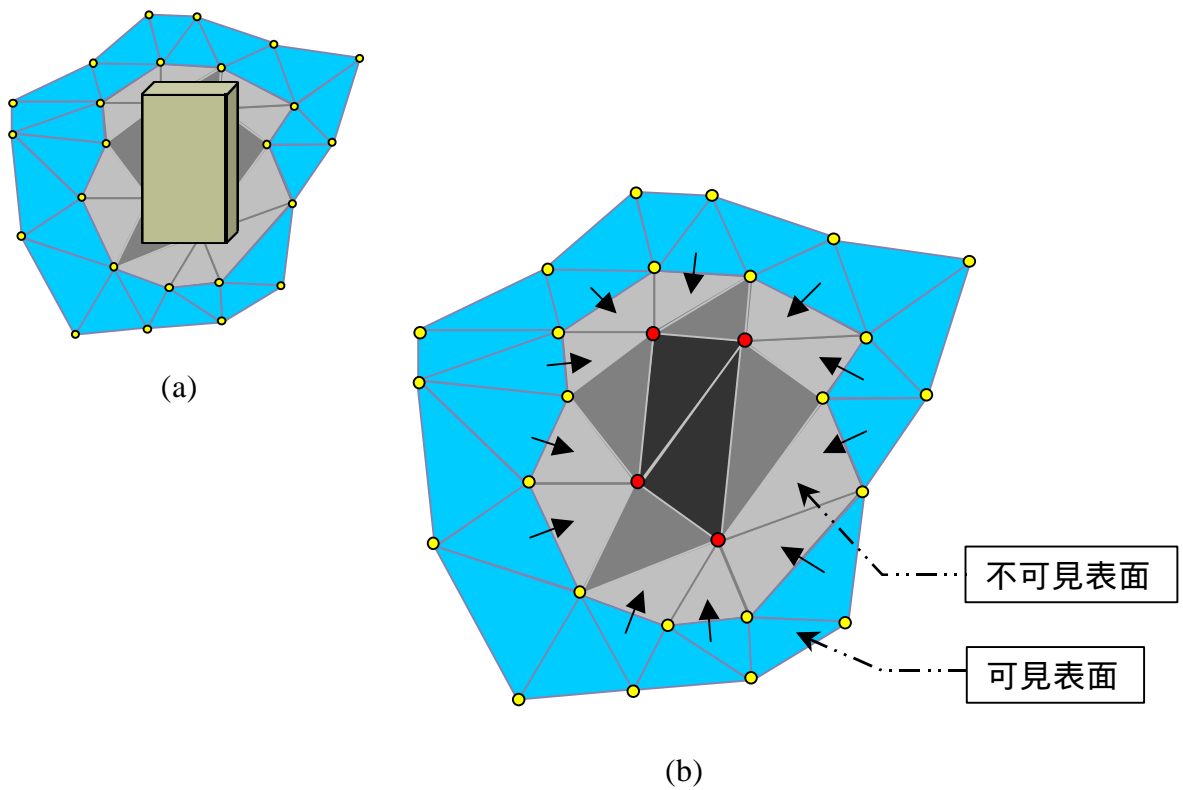


圖 10 被遮蓋部分使表面區域擴展終止。

(a) 前方物體擋住模型表面中央。

(b) 區域擴展因為不可見三角形而終止。

其中，紅色點因被遮蓋住而為不可見的頂點，
黃色點為可見表面的頂點。

皺法面塊的區域擴展流程：將各個模型依序進行區域擴展法，直到模型的所有可見三角形擴展過為止，即完成一模型可見表面的面塊分析。首先，我們巡視所有可見三角形，若它未擴展過，則開始一個新面塊區域(R)，該三角形則為 R 的擴展起始點 P_{start} 。從 P_{start} 向三邊擴展至相連三角形(P_d)，再將 P_d 擴展至與自己相連的三

角形，若目前將向周圍擴展的 P_d 之狀況為下列任一個條件時，停止擴展：

- (1) P_d 是不存在的。
- (2) P_d 不可見。
- (3) P_d 與 P_{start} 的法向量夾角大於 θ_0 。
- (4) P_d 已被擴展過。

若皆非上述終止條件，則 P_d 加入區域 R ，並擴展 P_d ，如此不斷遞迴執行 **growing()**，而使得 R 不斷擴大範圍，直到區域內的三角形均不能向周圍擴展後，則完成 R 的區域擴展。再依序搜尋未擴展過的三角形，當作新區域的起點三角形 P_{start} ，並且如前述動作擴展新區域，如此不斷執行，直到該模型的所有可見三角形都擴展過之後，便完成一模型的可見表面的面塊區域分析，獲得想要的面塊組織。

下方為 **growing()** 之虛擬程式碼：

```

growing (  $P_d$  )
{
  if (  $P_d$  不存在 ) {
    停止  $P_d$  擴展;
  }
  else if (  $P_d$  不可見 ) {
    停止  $P_d$  擴展;
  }
  else if (  $\frac{\vec{h}_{start} \cdot \vec{h}}{\|\vec{h}_{start}\| \|\vec{h}\|} \leq \cos \theta_r$  ) { //超過所能承受的區域平面角度差  $\theta_r$ 
    停止  $P_d$  擴展;
  }
  else if (  $P_d$  已被擴展過 ) {
    停止  $P_d$  擴展;
  }
}

```

```

}
else { // Pd 皆不為上述終止條件往三方向擴散
    R = R ∪ {Pd};
    for ( Pd 的所有相連三角形 P' )
        region_growing( P' );
}
}

```

3.3.2 輪廓的判斷

在山石模型中，我們要找的輪廓特徵有：Silhouette、Boundary，可在表面區域擴展過程中，由兩個相連三角形的關係，區分其相連邊是否為輪廓邊，我們將一一分析，最後總結說明擴展分析過程。

A. Silhouette

由隱蔽面定義所區分的類型二中，該三角形(P_d)至少有一可見邊 E ，當 E 的另一側三角形為可見時，必會擴展到 P_d ，因 P_d 不可見而終止，此時 E 可為 Silhouette 或是區域的邊界。我們於下面分析。

在多邊形網格中，Silhouette 包含所有連接 back-facing 多邊形與 front-facing 多邊形的邊。而 back-facing 多邊形為不可見的，front-facing 多邊形則在可能情況下可見。也就是說 Silhouette 一定屬於可見三角形與不可見三角形的交界邊。利用此特性，我們在表面擴展時，在可見三角形區域進行，當它擴展至不可見三角形時終止，而不可見三角形可能是 front-facing 或 back-facing，利用 3.3 式判別：

$$\begin{cases} \text{front - facing} & , \quad \vec{h} \cdot \vec{V} > 0 \\ \text{back - facing} & , \quad \vec{h} \cdot \vec{V} \leq 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

其中

\vec{h} 為三角形在視角座標下之法向量，

\vec{V} 為視線向量(line-of-sight vector)。

根據方程式 3.3，辨別出 back-facing 三角形，在這情況下，按 Silhouette 定義，在 front 與 back face 的相連邊 E 即為 Silhouette，將它加入區域的 Silhouette 集合。例如圖 11 所示，依此圖的視點位置看模型，圖中綠色線段為該視角下模型的 Silhouette，黃色頂點為可見點，紅色頂點為不可見點。其中 A(藍色區域)，是模型的前半面(front-facing)，為可見三角形集合而成的表面區域。而 B~D(灰色區域)為模型的後半面(back-facing)，為不可見表面，其中灰階值由淺至深表示端點可見數的多寡，B 為只有單一端點不可見，C 的兩端點不可見，D 則三個端點皆不可見。圖中藍色區域的黑色箭頭為可見三角形進行擴展的方向，實線的箭頭所跨越之邊 E 為擴展終止邊，也就是說當 A 區域來源三角形(設為 P_s)擴展至 B 區的三角形(設為 P_d)時，判斷 P_d 是不可見的屬性，故不執行 P_d 的區域擴展，此時接著以 3.3 式判斷 P_d ，得出它為 back-facing，也就是該終止邊 E 為我們想要找的 Silhouette。同樣為不可見的灰色三角形但卻是 front-facing 的情況時，則是被前方物體遮蓋而產生的區域邊緣，在繪畫時並不重要，因為前方物體的輪廓線已描繪出後方物體表面被遮蓋的情形，見圖 10 (a)之遮蓋景況。

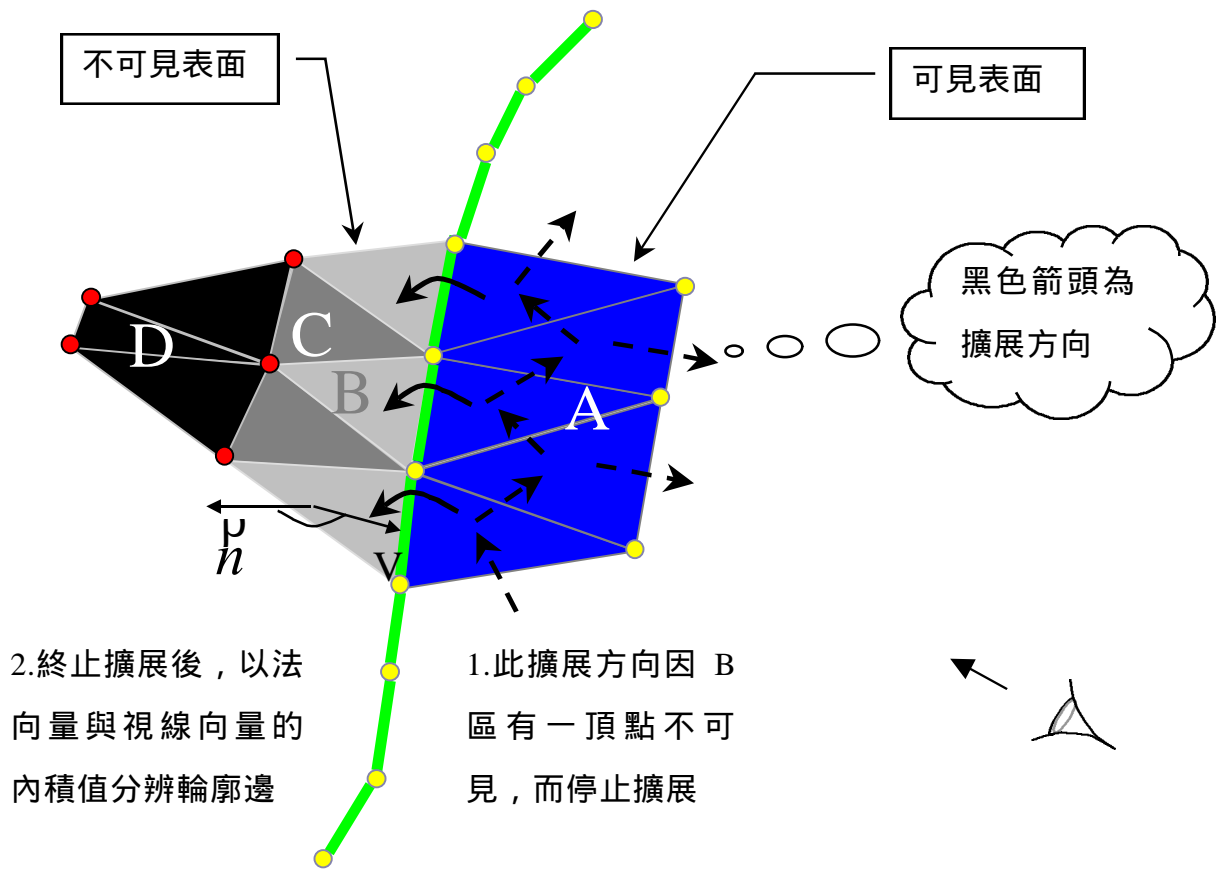


圖 11 區域擴散時，Silhouette 的辨別。綠色線段為該視角下模型的 Silhouette，黃色為可見點，紅色為不可見點。

下面是判斷 Silhouette 的演算法：

```

if ( Pd 不可見 ) {
    if (  $\vec{h} \cdot \vec{V} \leq 0$  ) { //back face
        Ps 與 Pd 的相連邊 E 為 Silhouette;
    }
    else{
        E 為區域邊界;
    }
}
}

```

B. Boundary

Boundary 在多邊形網格中為模型的邊界，例如玻璃杯子的開口。Boundary 之特徵為只有一個三角形(P_s)擁有它，所以只要從 P_s 區域擴展至相連三角形時，因邊的另一側沒有三角形，而停止擴展，分析出 Boundary。

C. 總結說明

分析輪廓的區域擴展法與皺法的終止條件略不同。為找出可見表面的輪廓邊集合，不限制區域平坦門檻值 r ，而是不斷往外擴展，直到可見表面內的所有三角形都擴展過為止。如此所找到的各種輪廓邊集合，是以可見表面為集合範圍，因此連接線段成筆觸軌跡時，不需額外考慮表面與表面以點相接時的特殊狀況，(此狀況將使輪廓邊的鏈結上出問題，在鏈結成輪廓筆觸路徑時討論)。所以輪廓尋找與皺法面塊分析，個別執行。

在尋找輪廓特徵的演算法中，跟皺法面塊的分析過程類似，只有區域擴展終止條件略為不同。其中 Special_growing() 的 silhouette 部分多了判斷式，決定終止邊是 silhouette 或只是區域邊界，並去除區域平坦之門檻值 r 之限制。

Special_growing (P_d , P_s)

```
{
  if (  $P_d$  不存在 ) { //boundary case
     $P_s$  與  $P_d$  的相連邊 E 為 Boundary;
  }
  else if (  $P_d$  不可見 ) { //Silhouette case
    if (  $\vec{h} \cdot \vec{V} \leq 0$  ) {
       $P_s$  與  $P_d$  的相連邊 E 為 Silhouette;
    }
    else{
      E 為區域邊界;
    }
  }
}
```

```
else if ( Pd 已被擴展過 ) {  
    停止 Pd 擴展;  
}  
else { // Pd 皆不為上述終止條件往三方向擴散  
    for ( Pd 的所有相連三角形 P' )  
        Special_growing (P', Pd);  
}  
}
```

第四章

水墨的筆觸與皴法

經區域擴展分析之後，我們將所獲得之輪廓邊集合鏈結成許多長且連續的筆觸路徑，使所畫之水墨筆觸，能表現出毛筆具連續性的筆觸線條美與墨色變化。在 4.1 節我們討論輪廓邊的鏈結方法。而所獲得之皴法面塊區域，我們利用三維幾何資訊分析出斧劈皴之走勢與範圍，以產生出側鋒筆觸，於 4.2 節中提出。最後，4.3 節提出了以濾波器模擬畫布渲染效果的特別方法，以像素染墨法強化山石立體感。

4.1 輪廓筆觸軌跡

有了輪廓邊集合，我們可以利用邊的三維相連資訊，產生具連續性的筆觸軌跡控制點，控制點為水墨畫模組的筆觸運行依據，討論於 5.2 節。

按 3.2 節隱避面定義，可見表面由完整可見的三角形組成，故所找出之輪廓邊亦為完整可見的，不會有部分可見邊的狀況發生。在此之下，鏈結成一連續輪廓路徑時，除路徑頭尾會因為屏除部分可見問題，產生相接上的空隙(一個三角形的差距)之外，此一路徑能清楚表現模型之輪廓線條，並符合正確之相連性。見圖 3(a)及(b)，表面互相遮蔽，造成輪廓線擋住另一線條的走勢，而兩輪廓線條間並無三維上的相連性，故非同一輪廓線條；3.2 節中所述定義是為了面的可見問題而立，此定義下的可見表面所成之輪廓線條，符合手繪藝術的寫意特性，輪廓線條的頭尾不需要細微描述與其他線條相交之狀況，此特性使得畫面不致於太紛亂，又能表達出模型的重要外型特徵，具有手繪藝術簡潔不失清晰的特性。

在系統中，模型可被視點所看見的部分，可以被區分成一塊塊表面，每一塊表面內的三角形彼此相連，即可經由一三角形擴展到達表面上任何其他三角形，(兩塊表面以點相接時不符合，因只共點不共邊)。每塊表面上的輪廓曲線為模型上的完整具相連性的一輪廓線條，故我們以可見表面作為分群依據，將擴展分析所獲得之輪廓邊集合，相連成之輪廓筆觸路徑，可表現模型的輪廓外型，並且相連性正確不致讓線段相連至另一表面上，而成為不自然的筆觸線條。因此以表面為集合單位，將輪廓邊串連，我們鏈結方法係利用邊在三維空間的相連性，將相連之輪廓邊鏈結成盡可能長且連續的筆觸路徑，使所畫出之水墨筆觸，能表現出毛筆筆觸的線條美與墨色變化。輪廓邊的鏈結流程如下：

1. 從該集合 S 中亂數選取一未被鏈結之邊 E 當起始處。
2. 向 E 的兩端點遞迴延伸出去，尋找可能的輪廓邊串連成一長的路徑。
3. 直到路徑盡頭已無可能之輪廓邊與其相連，則鏈結完成一筆觸路徑。
4. 重複執行 1~3 步驟，直到集合 S 內皆已被鏈結成筆觸軌跡。

路徑上各邊的端點即為筆觸控制點，將其轉換為螢幕畫布的座標位置，輸入水墨畫模組中畫出，圖 12 為鏈結成筆觸路徑的結果。

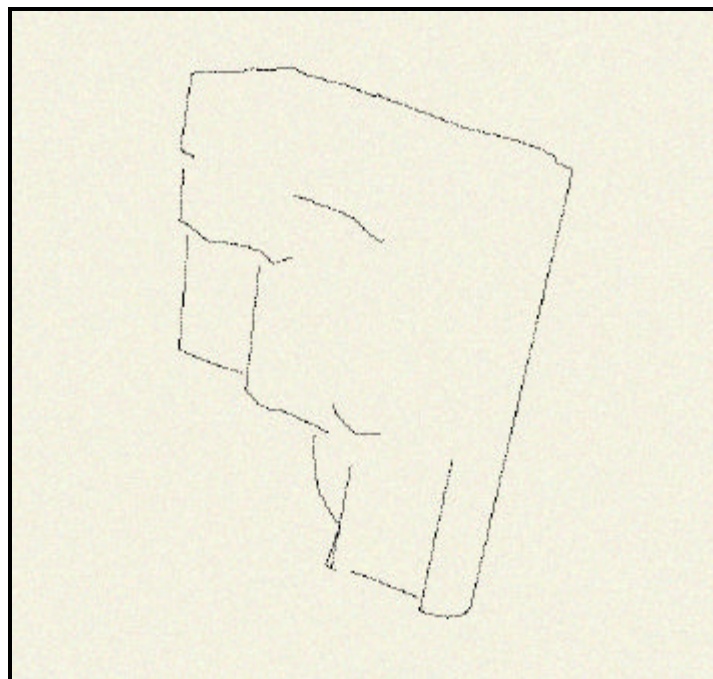


圖 12 輪廓筆觸路徑

4.2 斧劈皴法筆觸軌跡

用側鋒皴畫出山石紋理時，皆順著表面由上往下刷，如圖 13 斧劈皴之走勢皆沿著壁面畫下，表現出崖壁陡峭的斷面紋路。因此側鋒皴法走勢有兩項重要關鍵：

1. 貼著表面行走，可用表面法向量控制此特性。
2. 往下(地表)之趨勢，以重力向量 G 主控此特性。

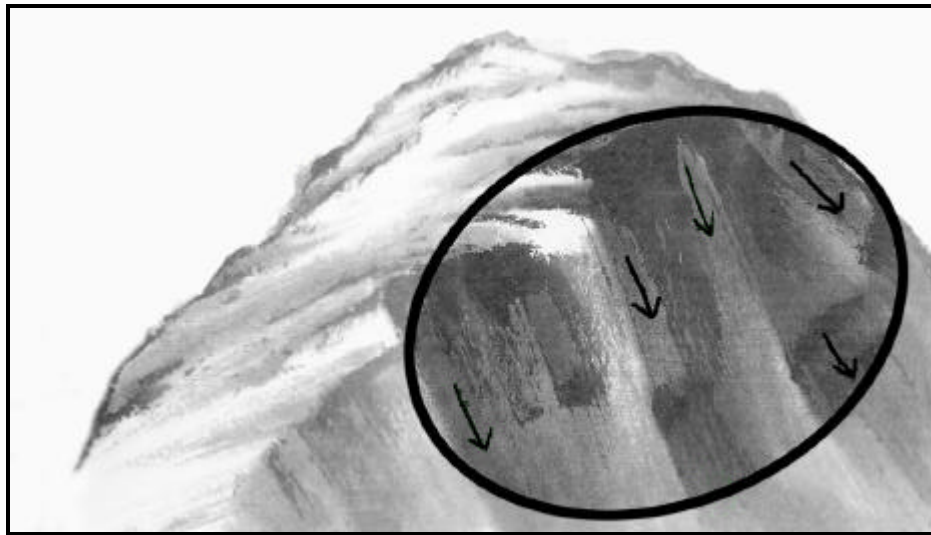


圖 13 皴法走勢

利用影響走勢的兩項關鍵因素決定筆觸的運行方向，並利用此運行方向求得皴法之寬度與長度，作為水墨畫模組的參數依據，方法流程如下：

1. 對區域擴展分析出面塊區域 R ，求得該皴法面塊的平均法向量 N ：

$$N = \sum_{i=1}^k n_i \quad \text{其中 } n_i \text{ 為面塊區域的三角形法向量。}$$

2. 將重力向量 G 正交投影(Orthogonal projection)至法向量 N 所成之平面 P 上，(P 近似於面塊區域 R)，求得 G 在平面 P 上的分量 G' ，如圖 14 所示。

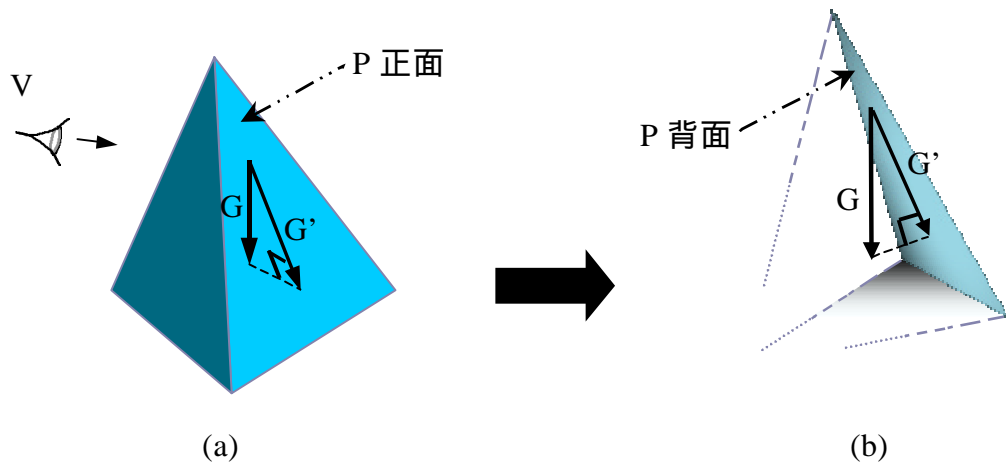


圖 14 將 G 正交投影至平面 P 上，求得的綴法走勢 G' 。

(a)三角椎體，(b)從視點 V 透視三角椎，觀察平面 P 的背面。

3. 將 G' 向量投影至螢幕座標系統，求得面塊區域 R 在畫布上筆觸走勢 D 。
4. 平行於筆觸走勢 D 掃描 R 在畫布上的範圍，求得該區域的平均長度，與垂直於 D 再掃描一次，求得平均寬度，如 圖 15 所示。

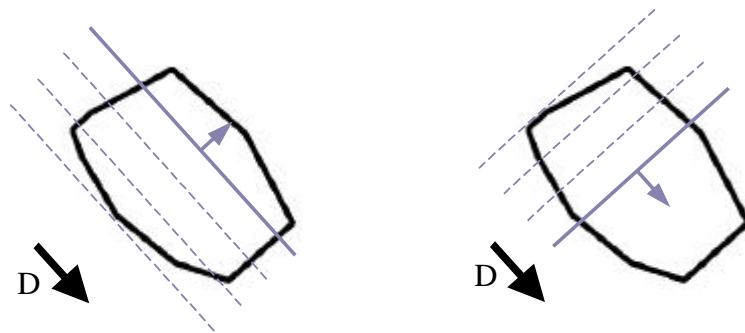


圖 15 以筆觸運行方向 D 為基準，平行與垂直掃描面塊區域，求得長與寬。

我們利用獲得之長度算出筆觸軌跡之起點與終點，而寬度則為毛筆側壓於畫布上的接觸面主軸 B 值，水墨畫模組依照這些參數資訊，畫出一筆沿著壁面往重力方向刷的側鋒筆觸，圖 16 顯示模型表面各面塊的側鋒筆觸軌跡。

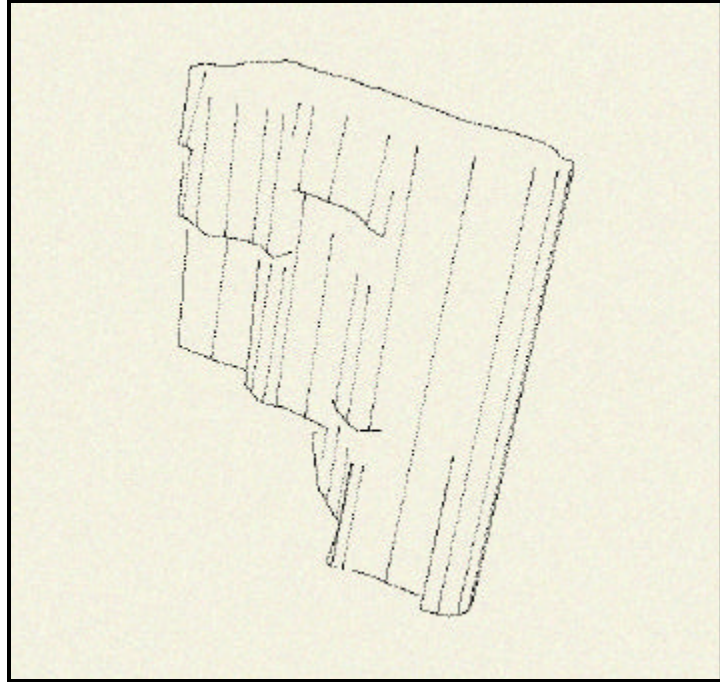


圖 16 斧劈皴法之筆觸軌跡。

4.3 染墨機制

像素染墨法用以表現山石形體的明暗，使墨色有別於皴法筆觸，讓山水畫墨色不致單調，而有深淺層次。在分析出輪廓與皴法區域之軌跡後，為使所畫影像鮮明不單調，加入額外的染墨機制，以加強立體感覺。染墨機制以模型表面的光強度 (intensity) 當作參考，對光強度作過濾，並乘上縮小係數，得出淡墨色澤。染墨係利用濕筆畫成，有暈開效果。因此考慮畫布吸水效果，我們使用線性平滑化濾波器模糊畫布上原有的筆觸墨色，以模擬染墨後的渲染效果。例如圖 17 所示：使用 3×3 遮罩算出畫布像素 (i,j) 渲染後的墨色，遮罩中央為像素 (i,j) ，數字代表加權係數。

1	1	1
1	1	1
1	1	1

圖 17 線性平滑化濾波器。

線性平滑化濾波器：

$$g(i, j) = \left\{ \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 f(i+m, j+n) \right\} / 9 \quad (6.1)$$

其中

$g(i, j)$ 為新墨色值，

$f(i, j)$ 為舊墨色值。

圖 18 之結果為對山石形體較暗之處染上淡墨，使得原筆觸軌跡墨色也被渲染開，也強化了山石形體的明暗對比。

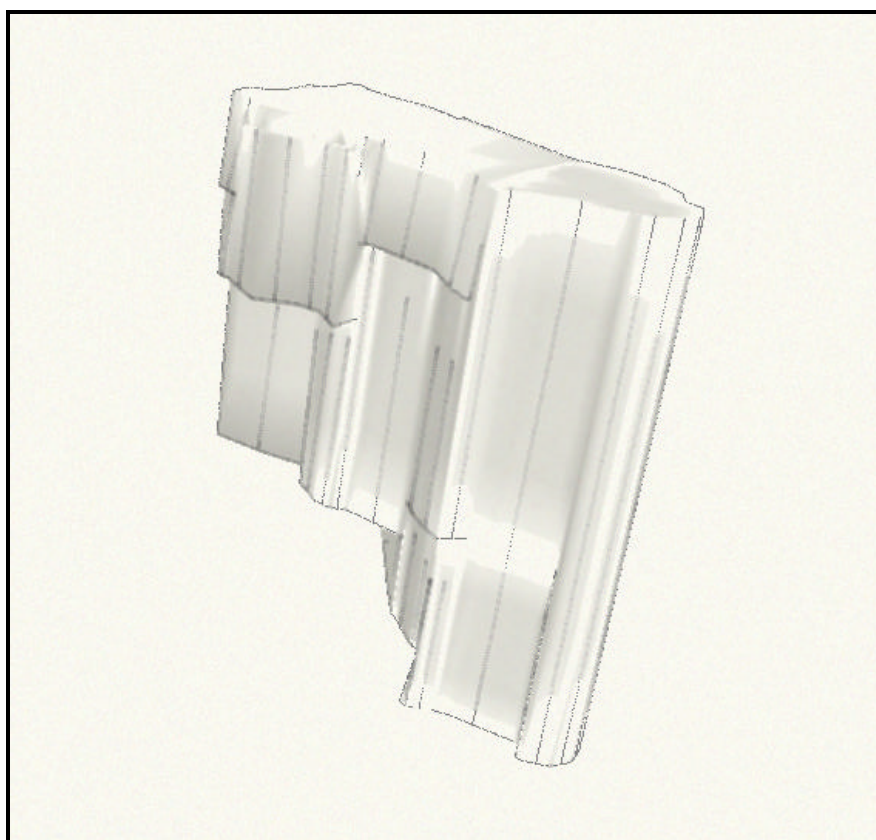


圖 18 染墨模擬結果，有染墨之處渲染了原筆觸之墨色。

第五章

水墨畫模組

在分析出筆觸軌跡後，本章說明我們的繪畫演算法，以模擬出山水畫筆觸的水墨效果。為了模擬毛筆筆觸，繪畫演算法必須注重毛筆與墨水的特性，考慮這些物理特性，我們加入一些機制以模擬水墨筆觸的效果。

在我們的演算法中，包含了三個部分：毛筆模組，毛筆的移動控制機制，水墨筆觸模擬機制。毛筆模組描述毛筆與紙張接觸的形狀、及其內部筆毛的分佈與數量。毛筆的運行機制，描述了在繪畫時毛筆的位置、壓力與軸向。水墨筆觸模擬機制則控制模擬水墨筆觸的效果，例如：墨色及墨水量的變化與分布、斷水機制、毛筆壓力影響 等等。

在繪畫時，我們將毛筆模組(brush model)依循筆觸軌跡行走，並將筆毛墨跡依照水墨控制機制，將其留於畫布上。在 5.1 節我們導入一可變形的毛筆模組架構。5.2 節討論毛筆模組的移動、壓力變化、轉筆的控制機制。最後於 5.3 節中，提出水墨筆觸模擬的重要機制。

5.1 毛筆模組

Horace and Helena[12]使用三維的毛筆模組，並以橢圓形模擬毛筆與畫布的接觸形狀，因此他能夠模擬逼真的書法字體。而水墨畫並不像書法強調毛筆轉筆的效

果，所以 Weng [25]以二維圓形架構模擬毛筆與畫布的接觸形狀。Weng 主要注重在中鋒筆觸的模擬，但在山水畫中，側鋒筆觸是不可或缺的，尤其是本篇論文所要模擬的斧劈皴法是側鋒手法。不同於中鋒，側鋒是將筆管傾斜，其接觸面似橢圓，而行筆時，筆尖都在筆觸的一邊，如圖 19 所示。

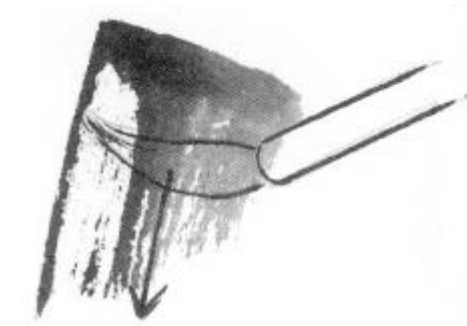


圖 19 側鋒筆觸是將筆管傾斜所畫的效果。

為了表現側鋒與中鋒筆觸，我們以可變的橢圓架構去模擬毛筆與畫布接觸的區域，此架構可靠著改變長短軸比例，模擬各式毛筆，側筆時不同軸比例的橢圓接觸面，也可成為 Weng's model 的中鋒圓形接觸面。如圖 20 所示，以 O 為橢圓中心點，筆毛在畫布上的接觸點以同心橢圓的方式分布。並將最外圍橢圓(E_I)作為基準，其它橢圓以等比例方式分布於其內。我們統一將 E_I 的 Y 方向橢圓軸定為主軸(B)，以作為軸長基準，而 X 方向橢圓軸為副軸(A)。各橢圓的軸長以 5.1 式定義之：

$$\begin{aligned} a_i &= A \times \frac{i}{I} \\ b_i &= B \times \frac{i}{I} \end{aligned} \tag{5.1}$$

其中

a_i 、 b_i 、 A 、 B 分別為 E_i 與基準橢圓 E_I 的副軸與主軸，
 I 為橢圓總數，
 i 為橢圓索引。

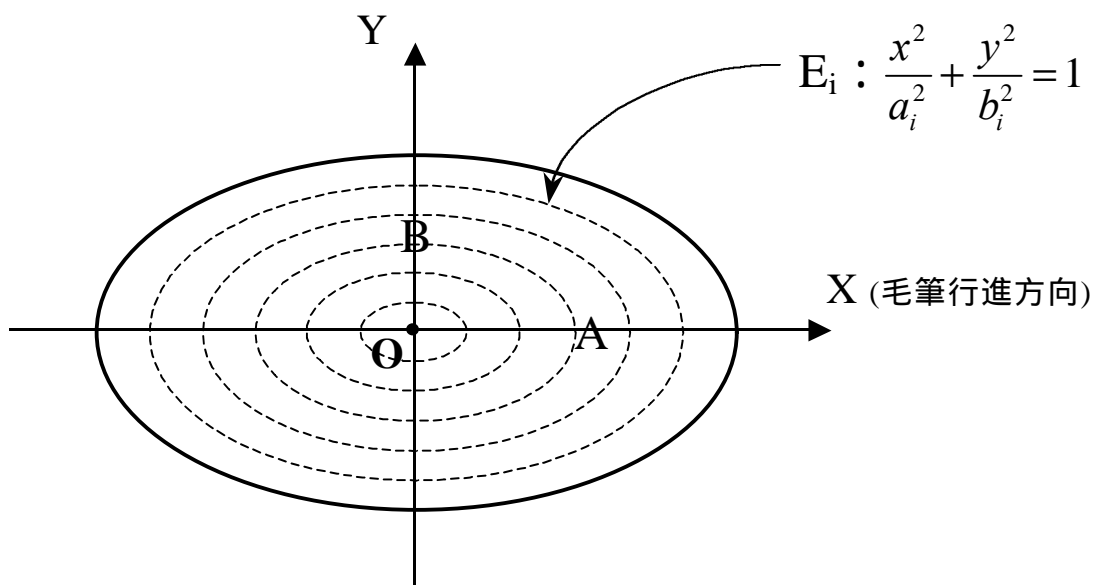


圖 20 毛筆接觸面以同心橢圓架構模擬，A、B 軸控制整體的外形比例。

各橢圓 E_i 的參數方程式為：

$$\begin{aligned} x_i &= a_i \cos u \\ y_i &= b_i \cos u \end{aligned} \quad u \in [0, 2\pi] \quad (5.2)$$

接觸面內部，各筆毛與畫布的接觸位置，可從 O 點輻射出的直線，與同心橢圓之交點得到。如圖 21，每一條輻射線段等角分割橢圓，(輻射線段稱作區域 R_j)，輻射線段與 X 軸的角度可用 5.3 式得到。

$$\theta_j = 2\pi \times \frac{j}{J} \quad (5.3)$$

其中

$0 \leq \theta_j < 360$ 為 X 軸與 $\overline{Oh_{i,j}}$ 的夾角。

J 為分割的區域總數，

j 為區域索引

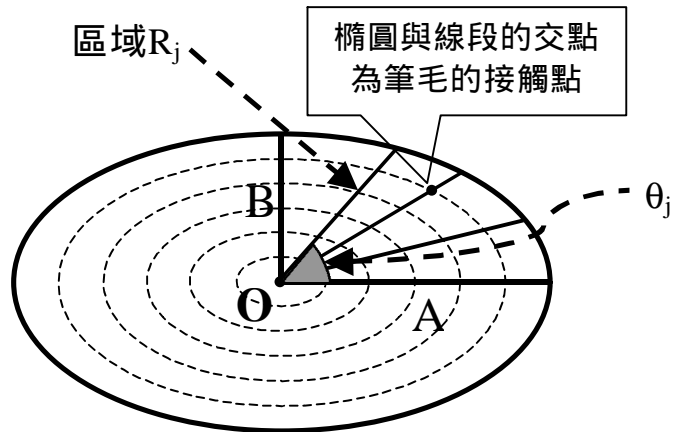


圖 21 將橢圓等角度切割成數個區域

因此，筆毛接觸位置即為區域 R_j 與橢圓 E_i 的相交之處。如圖 22， E_i 與 R_j 交點處的筆毛 $h_{i,j}$ 位置，我們以 O 為原點的極座標表示：

$$h_{i,j} = (d_{i,j}, \theta_j) \tag{5.4}$$

其中

i 為橢圓的索引，

j 為區域的索引，

$d_{i,j}$ 為 $h_{i,j}$ 至原點 O 的距離。

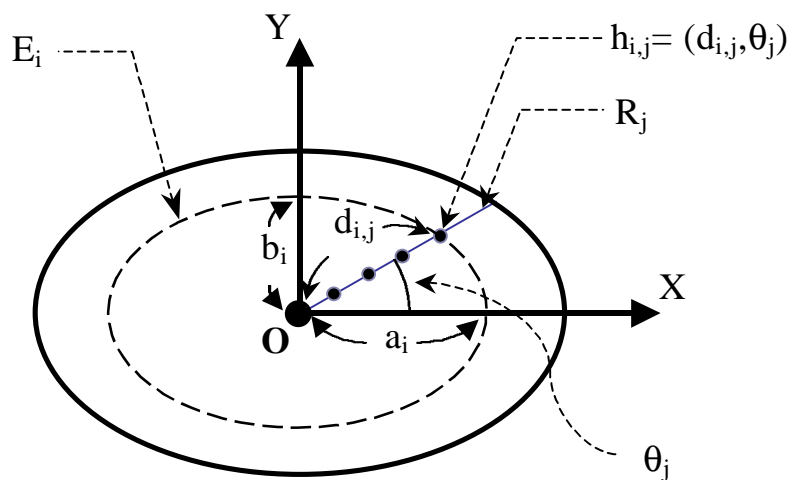


圖 22 毛筆與畫布接觸時，筆毛接觸點分布的情況。

$d_{i,j}$ 可由 5.2 及 5.1 式推得：

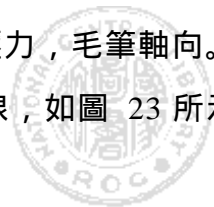
$$d_{i,j} = \sqrt{\left(A \times \frac{i}{I} \times \cos q_j\right)^2 + \left(B \times \frac{i}{I} \times \sin q_j\right)^2} \quad (5.5)$$

毛筆模組的 A、B 參數控制整個毛筆的接觸形狀與範圍，其中副軸 A 在我們的系統中以主副軸的比例(R)代替之，(A=R × B)，因此利用 B 決定毛筆接觸面的大小，軸比例 R 決定接觸面外形。I 則控制同心橢圓的數量、J 控制區域分割數，這兩者皆關係筆毛的分布密度。有了毛筆模組的筆毛接觸點定義後，我們就可利用 B、R、I、J 四個參數，決定毛筆與畫布接觸的外形、大小與筆毛接觸點數量，畫出想要的筆觸效果，以模擬出中、側鋒兩種不同的筆觸。

5.2 毛筆運行機制

在繪畫過程中，每一筆觸的墨跡是利用毛筆模組沿著軌跡所畫出的結果，每一軌跡點為毛筆模組 O 點所在位置，而軌跡點的資訊則參考前一章的筆觸控制點資訊計算獲得，此節我們將說明毛筆的運行機制。

我們模擬毛筆運行過程，包含有三個：毛筆位置，毛筆壓力，毛筆軸向。其中筆觸軌跡點是以 Cardinal Spline 建立而成，即毛筆的運行曲線，如圖 23 所示，是參考控制點序列所內插得到的筆觸曲線。



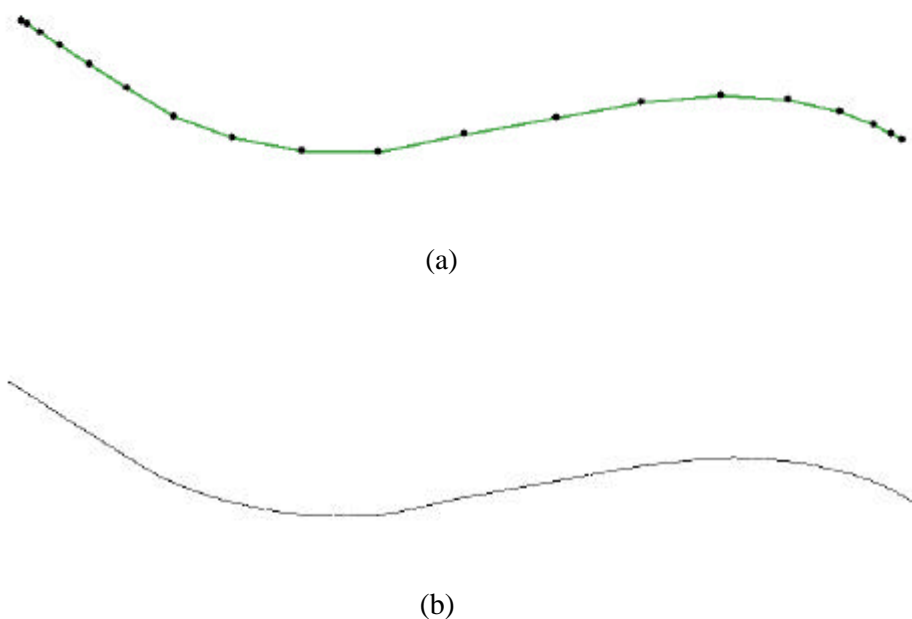


圖 23 (a)黑色點為控制點，線段代表各點的相連關係，(b)為筆觸軌跡的內插曲線。

在繪畫筆觸時，將毛筆模組中心點 O 沿著 Cardinal Spline 所建立的曲線點行走，周圍筆毛則隨之留下墨跡於經過之處。假設毛筆中心點 O 在畫布上的 (O_x, O_y) 處，則筆毛 $h_{i,j}$ 在畫布上接觸的座標位置，以 5.6 式定義如下：

$$\begin{aligned}
 h_{i,j,x} &= h'_{i,j,x} + O_x = \left(A \times \frac{i}{I} \times \cos \mathbf{q}_j \right) + O_x \\
 h_{i,j,y} &= h'_{i,j,y} + O_y = \left(B \times \frac{i}{I} \times \sin \mathbf{q}_j \right) + O_y
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

其中

$h'_{i,j}$ 為 $h_{i,j}$ 在毛筆模組的區域座標位置，

$h_{i,j,x}$ 、 $h_{i,j,y}$ 、 $h'_{i,j,x}$ 、 $h'_{i,j,y}$ 分別代表 $h_{i,j}$ 與 $h'_{i,j}$ 的 x 、 y 座標位置。

運行毛筆時，毛筆的壓力影響了毛筆與畫布的接觸面積大小，也影響毛筆的墨水滲出量，此部份留至下節的壓力機制時討論。而曲線上各點的毛筆壓力值，為了使壓力在兩控制點間自然平順的變化，我們利用相鄰的兩控制點之線性內插算出。圖 24 為系統所畫出壓力影響接觸面的筆觸，下筆壓力由小至大，最後迅速提筆。

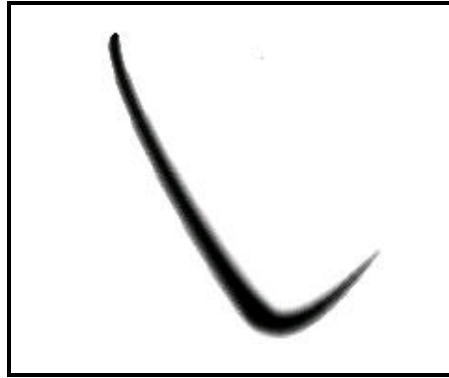


圖 24 毛筆壓力線性變化結果。

如範例所示：

假設有 $n+1$ 個曲線控制點 $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n, c_{n+1}$ ，將此曲線分成 n 個線段 $s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$ 。

則在線段 s_i 中的一內插點 d 上，我們可用下式得到該點的壓力：

$$\frac{p_d - p_{c_i}}{p_{c_{i+1}} - p_{c_i}} = \frac{u_d - u_{c_i}}{u_{c_{i+1}} - u_{c_i}} \quad (5.7)$$

其中

$0 \leq p_t, p_{c_i}, p_{c_{i+1}} \leq 1$ 分別為 t, c_i, c_{i+1} 的壓力值，

$0 \leq u_t, u_{c_i}, u_{c_{i+1}} \leq 1$ 分別為 t, c_i, c_{i+1} 的 Cardinal Spline 參數。

毛筆循著軌跡曲線行進時，若毛筆的軸向始終固定，則筆毛相對位置亦固定。當曲線的切線方向一變化，每根筆毛所留下墨跡曲線就會彼此交錯，而成為不自然的筆觸，如圖 25(a)所示。Weng[25]利用毛筆軸向對齊曲線的切線方法，得到自然的筆觸，如圖 25(b)。

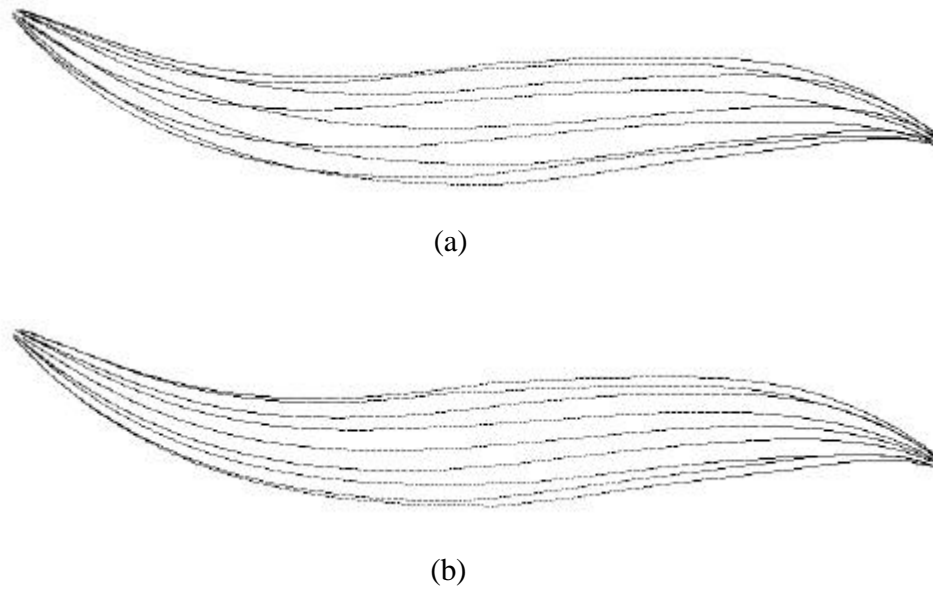


圖 25 毛筆的軸向，(a)固定軸向，(b)對齊軌跡曲線的切線方向。

因此我們參考他的方法，在毛筆運行時，將軸向對齊筆觸曲線的切線方向。如圖 26，筆觸沿著軌跡線行走，在第 k 個軌跡點(d_k)時，利用 d_k 斜率算出切線向量 T_k 與 X 軸的夾角：

$$T(x_k, y_k) = \frac{y_k - y_{k-1}}{x_k - x_{k-1}}$$

$$f_k = \tan^{-1}(T(x_k, y_k)) \quad (5.8)$$

其中

$T(x_k, y_k)$ 為切線向量 T_k 的斜率，

f_k 為 T_k 與 X 軸的夾角。

將 f_k 減去前一點的 f_{k-1} ，得出 d_{k-1} 到 d_k 的毛筆旋轉角度。依 θ 值將毛筆模組旋轉，如此便可使橢圓 A 軸對齊該點的切線向量 T_k 。圖 26 中的紅點為顯示筆毛移動旋轉之前與之後的位置，依照 5.6 式及 θ 值，筆毛旋轉後的新座標為：

$$\begin{aligned} h_{i,j,x} &= (A \times \frac{i}{l} \times \cos q_j \times \cos q - B \times \frac{i}{l} \times \sin q_j \times \sin q) + O_x \\ h_{i,j,y} &= (A \times \frac{i}{l} \times \cos q_j \times \sin q + B \times \frac{i}{l} \times \sin q_j \times \cos q) + O_y \end{aligned} \tag{5.9}$$

其中

θ 為軌跡點 d_k 與 d_{k-1} 的角度差。

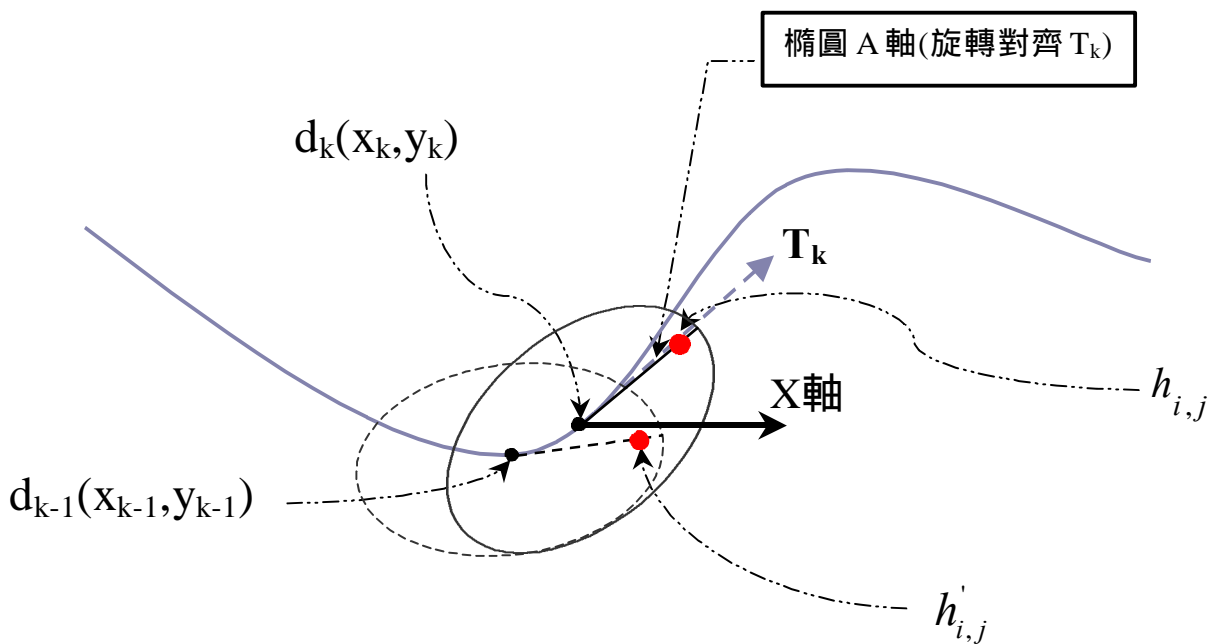


圖 26 毛筆隨筆觸曲線的切線向量 T_k 所留的墨點隨筆觸曲線

5.3 水墨筆觸模擬機制

在 Weng's model[25]中，以參數控制筆毛於畫布上滲出之墨水量，其模擬水墨筆觸效果很好。但要模擬山水畫斧劈皴筆觸，需要加入其他的機制才行。Weng's

model 將墨水量與墨色視為相同，使得無法模擬在墨色濃但墨水量少下的斧劈皴法，例如圖 27 的小斧劈皴筆觸的飛白效果。

因此我們將墨色值與墨水量分開。將 Weng's model 的 Decreasing 參數模擬墨水量減少所產生的墨色變化，更改為水與墨的濃度不同所產生的墨色變化，將說明於 5.3.1 節。我們參考 Weng's model 參數所表現的水墨效果，於 5.3.2 節中簡述。為了模擬逼真的斧劈皴法與輪廓筆觸，我們增加一些機制，於 5.3.3 節中提出。

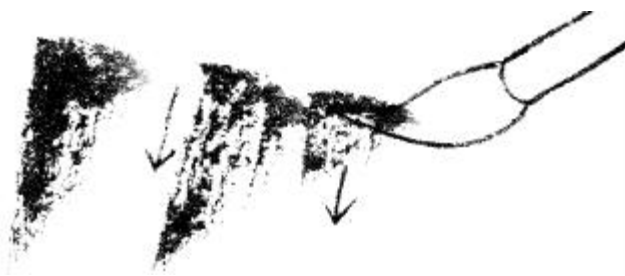


圖 27 小斧劈皴筆觸。

5.3.1 墨色的淡化

如圖 28 中顯示的，毛筆所畫之墨色由水與墨的混和比例決定，若整支筆先沾滿水後，於筆尖沾墨，則筆尖之墨會與水漸漸融合，於是所畫出之筆觸便由深至淺變化。為了模擬這效果，我們額外加入墨色控制的參數，並設定筆觸的起始墨色與結尾墨色值，以線性內插方式模擬筆觸墨色的變化。

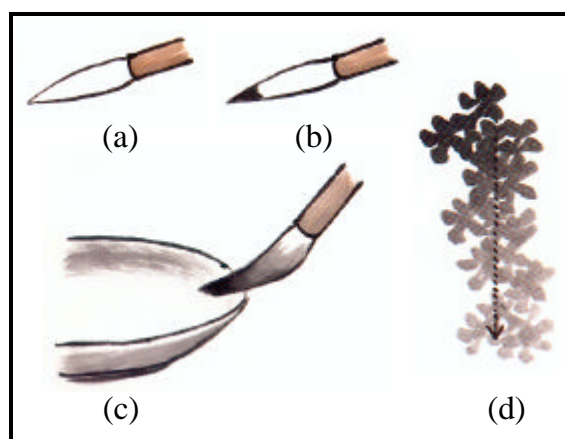


圖 28 筆觸的墨色變化，(a)全筆濡清水，(b)筆尖蘸墨，(c)在碟邊輕壓筆側，使筆尖的墨與筆上的清水漸漸融合，成為由深至淺的色階，(d)所畫出之筆觸會有深到淺的墨色變化。

圖 29 考慮墨色淡化的結果。



圖 29 墨色淡化的效果

5.3.2 水墨特性

我們參考 Weng's model 的 Concentration、Difference 及 Discontinuity 參數。利用 Concentration、Difference 控制墨色及墨水量的分佈，Discontinuity 機制則模擬墨水量不足時產生之斷水效果，將簡介於下：

A. 水墨集中效果(Concentration)

在毛筆與紙的接觸面上，筆毛所留下的墨色並不一致，可能因墨水本身之故，或是畫家用的技法所致，例如畫竹子的主幹時，畫家用此效果描繪其表面的明暗。Weng 在此處提出了四種墨色分布，其墨色分布是以其接觸面的 y 方向上作線性的灰階變化結果。此效果與其他參數配合可產生出多變的筆觸風格。

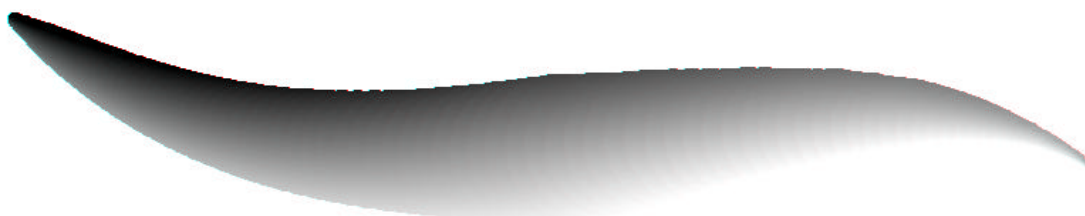


圖 30 墨色在垂直於路徑軌跡的方向上作線性變化，並加入筆觸淡化效果。

B. 筆毛的水墨相異性(Difference)

Weng 提供一亂數陣列(difference[])，陣列內的所有值從正負相同區間內亂數取得。當毛筆模組建立時，每根筆毛依照其 y 值對應陣列的某一位置，以取得不同的數值，將使不同 y 值的筆毛有不同的墨色擾亂程度，最後筆觸效果便如圖 31 所展現的。



圖 31 各筆毛的墨色不一致所產生的筆觸特色。

C. 筆毛斷水機制(Discontinuity)

在繪畫時，毛筆的墨水量會逐漸減少，於墨水量不足的情況下，會畫出斷斷續續的筆觸墨色。為了模擬此種效果，定義了 discontinuity[]陣列，與 difference[]做法相同，每根筆毛求得在陣列中的值，做為筆毛發生斷水長度的上限(max_gap)。當筆毛墨水量不足時，亂數產生不大於 max_gap 的斷水長度(gap_size)，使筆毛在該段距離內不留下墨跡。

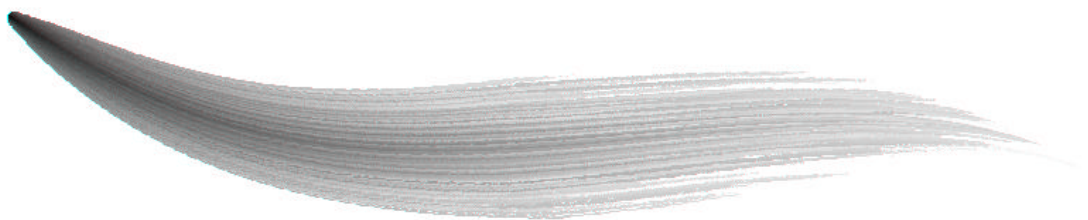


圖 32 斷水筆觸的模擬。

5.3.3 中鋒與側鋒的壓力機制

對同一毛筆而言，會因為壓在畫布上力的不同，產生不同大小的接觸面。另外

不只是毛筆的剩餘墨水量會影響滲出的墨水量，壓力也影響該滲出量。因為中鋒與側鋒下筆方式不同，因此我們分別提出兩者的壓力控制機制。

A. 中鋒

中鋒直筆而下，壓力的大小，影響毛筆接觸面大小及墨水滲出量，如圖 33 所示，墨色填滿部份為毛筆有接觸畫布之部份，其它則否，而墨色深淺表示每根筆毛墨水滲出的加權數 W_p 高低。圖 33(a)及(b)為同一毛筆下壓力之比較，(b)的壓力較(a)大，所以接觸面積大，墨水量滲出多，故筆毛較不易產生斷水。我們利用條件式 5.10 定義 W_p ：

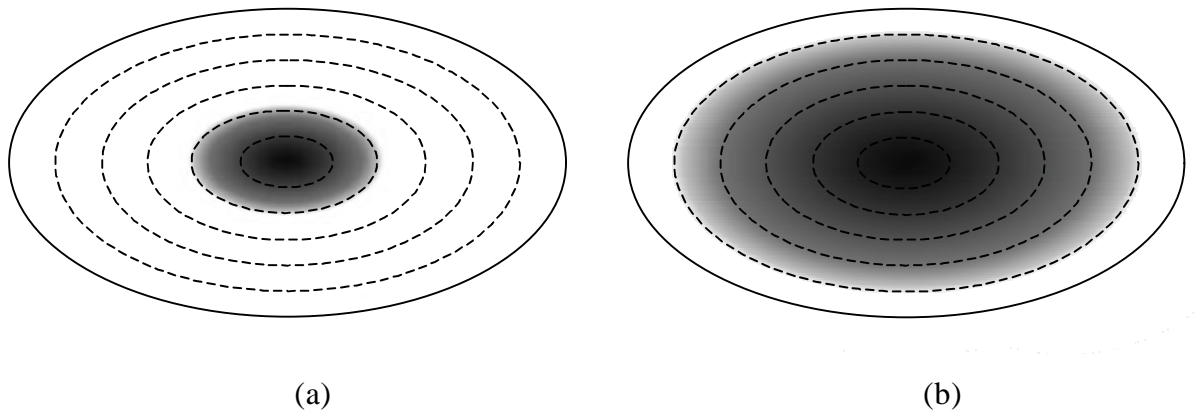


圖 33 毛筆壓力與接觸面積成正比。

$$W_p = \begin{cases} \text{no touch} & , \frac{d_{i,j}}{d_{I,j}} > p \\ \sqrt{\left(\left(1 - \frac{d_{i,j}}{d_{I,j}}\right) \times p + p\right) / 2} & , \frac{d_{i,j}}{d_{I,j}} \leq p \end{cases} \quad (5.10)$$

其中

$d_{i,j}$ 為 $h_{i,j}$ 距圓心 O 的距離，

$d_{I,j}$ 為 $h_{I,j}$ 距圓心 O 的距離，

$0 < p < 1$ 為毛筆的壓力值。

由 5.5 式可以得出：

$$d_{i,j} = d_{i,j} \times \frac{i}{I} \quad (5.11)$$

因此 5.10 可以簡化為：

$$W_p = \begin{cases} \text{no touch} & , \frac{i}{I} > p \\ \sqrt{((1 - \frac{i}{I}) \times p + p) / 2} & , \frac{i}{I} \leq p \end{cases} \quad (5.12)$$

我們利用 Weng's model 的水墨特性參數算出筆毛 $h_{i,j}$ 之墨水量值後，乘上加權數 W_p ，可以模擬出力量變化的筆觸。圖 34 為 P 由 0 增大至 1，再逐漸減少至 0 的筆觸。其模擬繪畫時，畫家逐漸壓下毛筆，至轉折點時整個壓下，而後逐漸提起毛筆所成之筆觸。圖 34(a)與(b)為不同大小毛筆所畫之筆觸。

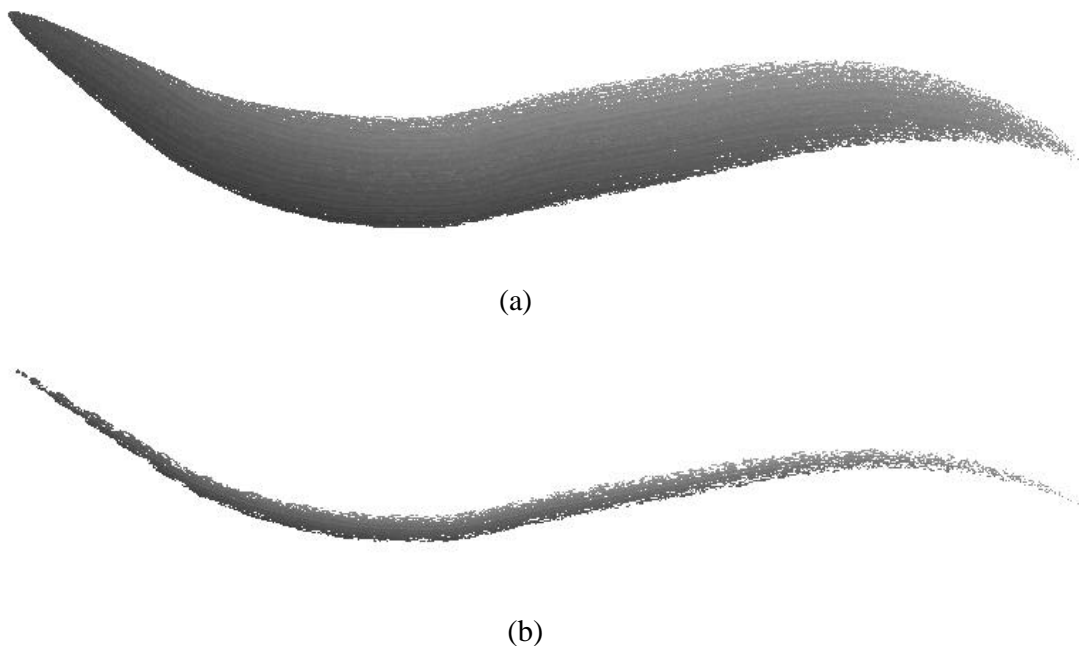


圖 34 加入壓力效果的中鋒筆觸，壓力變化： P 漸由 0 1 0。

(a)、(b)所用毛筆模組參數不同。

(a) $B = 40$ ， $R = 1$ ， $I = 80$ ， $J = 30$ 。

(b) $B = 10$ ， $R = 1$ ， $I = 20$ ， $J = 5$ 。

B. 側鋒

畫側鋒筆觸時，是斜筆而下，如 5.1 節之圖 19 所示的。所以毛筆提起時，接觸範圍便由單邊開始逐漸往筆尖縮小。如圖 35 所示，因(a)之毛筆壓力較(b)小，意味著(a)之毛筆提起較多，故接觸面縮小較多。側鋒的各筆毛壓力加權數 W_p 以條件式 5.13 定義之：

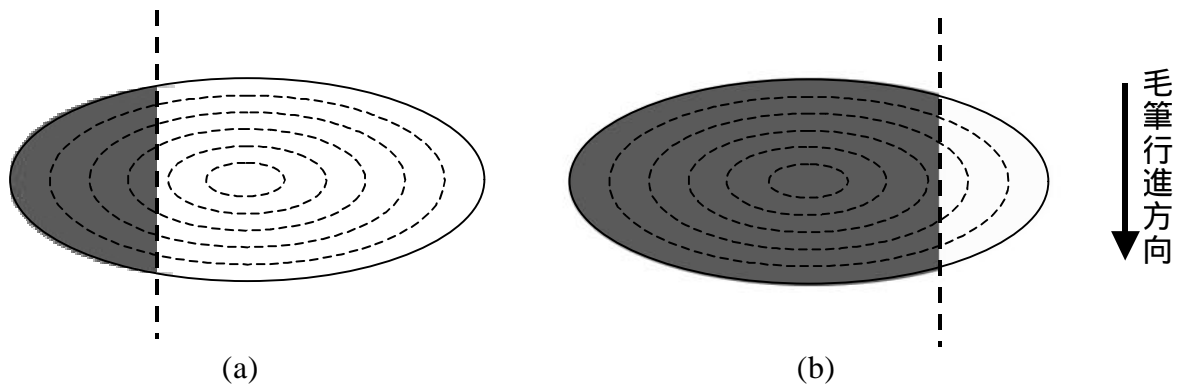


圖 35 側鋒接觸面是由單邊提起。

$$W_p = \begin{cases} \text{no touch} & , \frac{h_{i,j,y} + B}{2B} > p \\ P & , \frac{h_{i,j,y} + B}{2B} \leq p \end{cases} \quad (5.13)$$

其中

$h_{i,j,y}$ 為 $h_{i,j}$ 的 Y 座標值。

我們依據 5.13 式，模擬出毛筆側鋒單邊拉起的效果，在圖 35 中，毛筆模組為順著斧劈皴下拉筆觸，將行進的軸向(X 軸)朝下，當毛筆壓力漸小時，接觸面在 Y 軸方向上逐漸向筆尖縮小。圖 36 為斧劈皴的壓力表現結果，(a)在前段上急速提筆，使得毛筆接觸範圍快速減少，後段則是緩緩將筆提起所成之筆觸，(b)則是由頭至尾

逐漸將筆提起的效果。斧劈皴是毛筆快速運行所成之筆觸，所以其飛白線痕有鐵鑄刀銷的感覺，其原因在於繪畫時，側鋒接觸面，於毛筆模組的 Y 軸方向之墨水量差異性大，因此我們將 Difference 參數之影響力加大，以模擬斧劈皴的飛白效果。

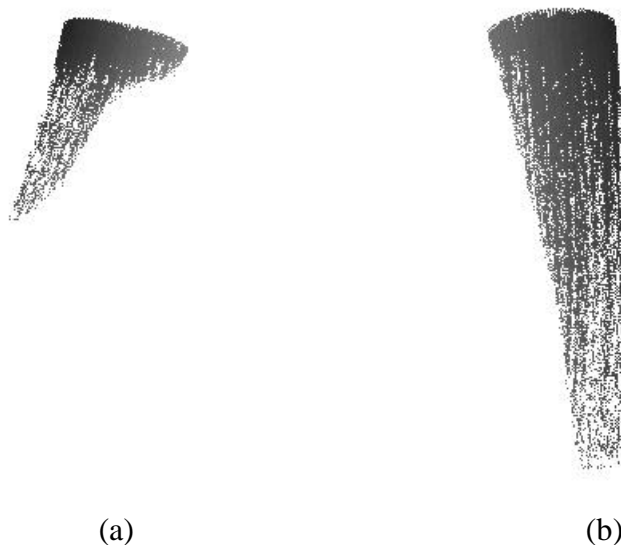


圖 36 側鋒筆觸的壓力表現，(a)小斧劈皴，(b)大斧劈皴。

(a)毛筆的軸比例 $R = 0.2$ ，(b) $R = 0.3$ 。

第六章

實作與實驗結果

這一章中，我們將呈現出實作結果。我們的系統是以 C++ 物件導向語言及 OpenGL API 實作出，山水畫作結果皆在配備為 PIII 800 CPU 及 256 MB RAM 的 PC 平臺上，執行中國山水畫皴法模擬的流程。

圖 37 及 38 分別為不同山岩模型在山水畫山石皴法下之結果，上方為立體山石的幾何模型，下方則為輸出結果。其中圖 37 因染墨後，皴紋變薄，故繪畫流程除了勾、皴、染之外，最後再重複皴畫加深墨色。圖 38 結果顯示，因染墨機制，使影像中輪廓(勾)、皴的筆觸墨色皆有渲染開之效果。圖 39 與 40 分別為圖 37、38 之山岩模型在不同視角下的山水畫作結果。我們所提出的演算法流程，找出之輪廓筆觸具有正確連貫性，因此在各個結果中，皆顯示出輪廓筆觸清楚描繪出山岩的主要形體，使畫作不會產生不自然筆觸混亂了外型曲線。

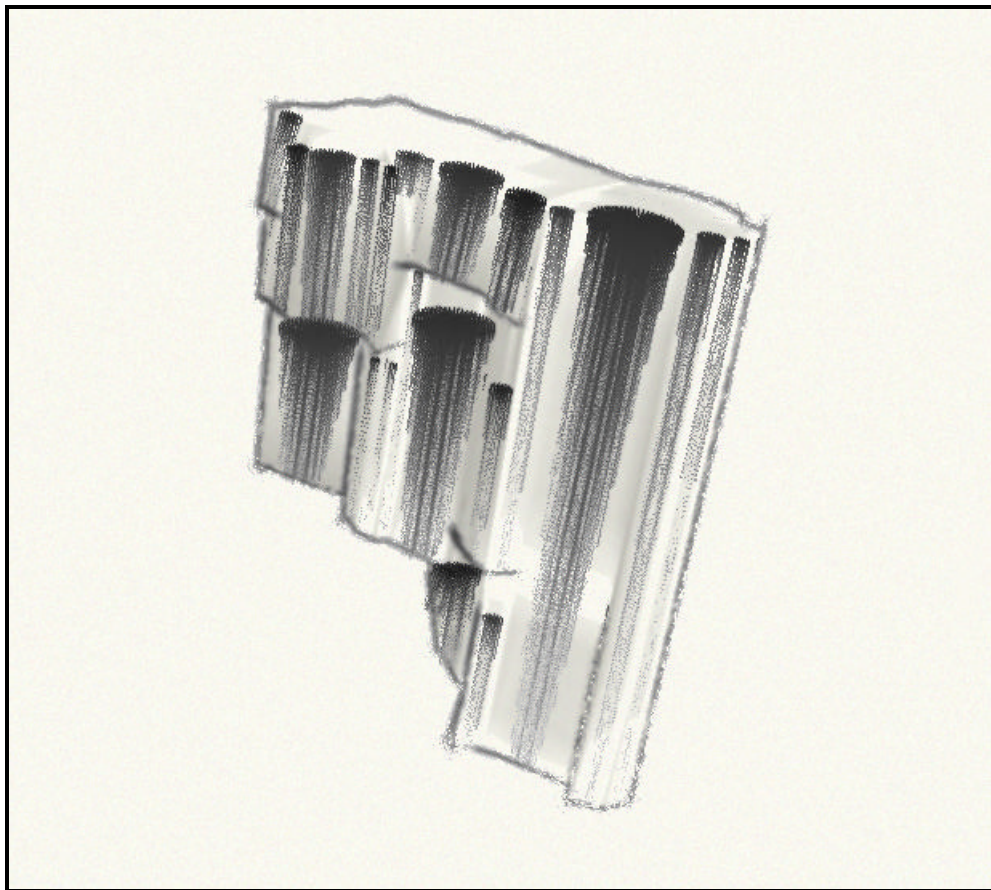
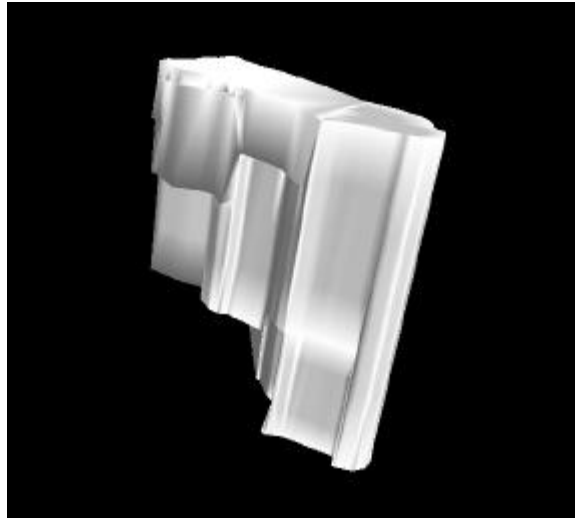


圖 37 山石皴法結果一。

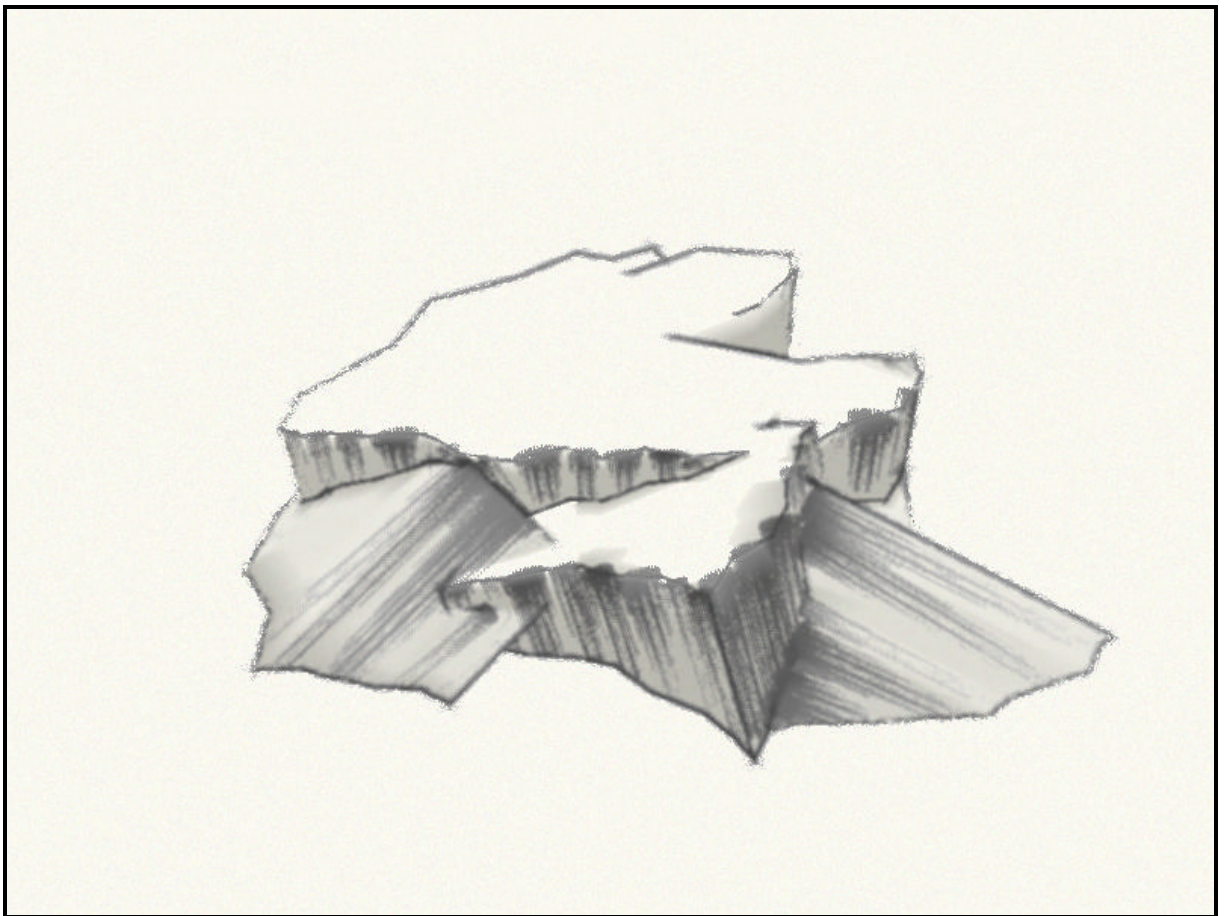
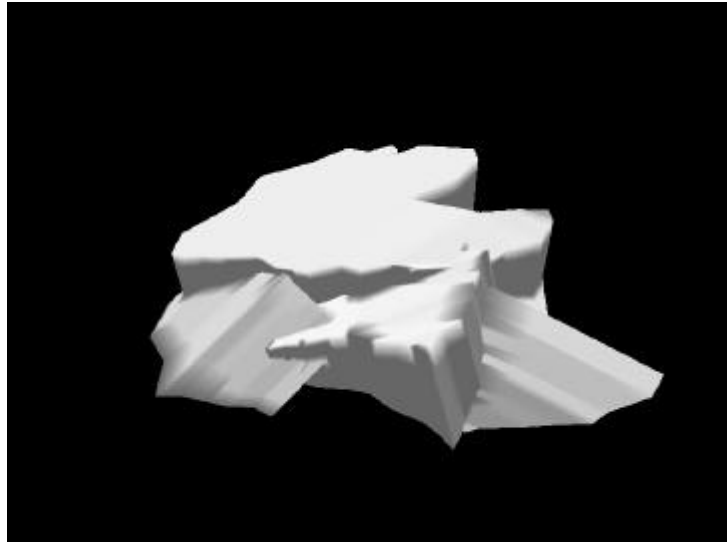


圖 38 山石皴法結果二。

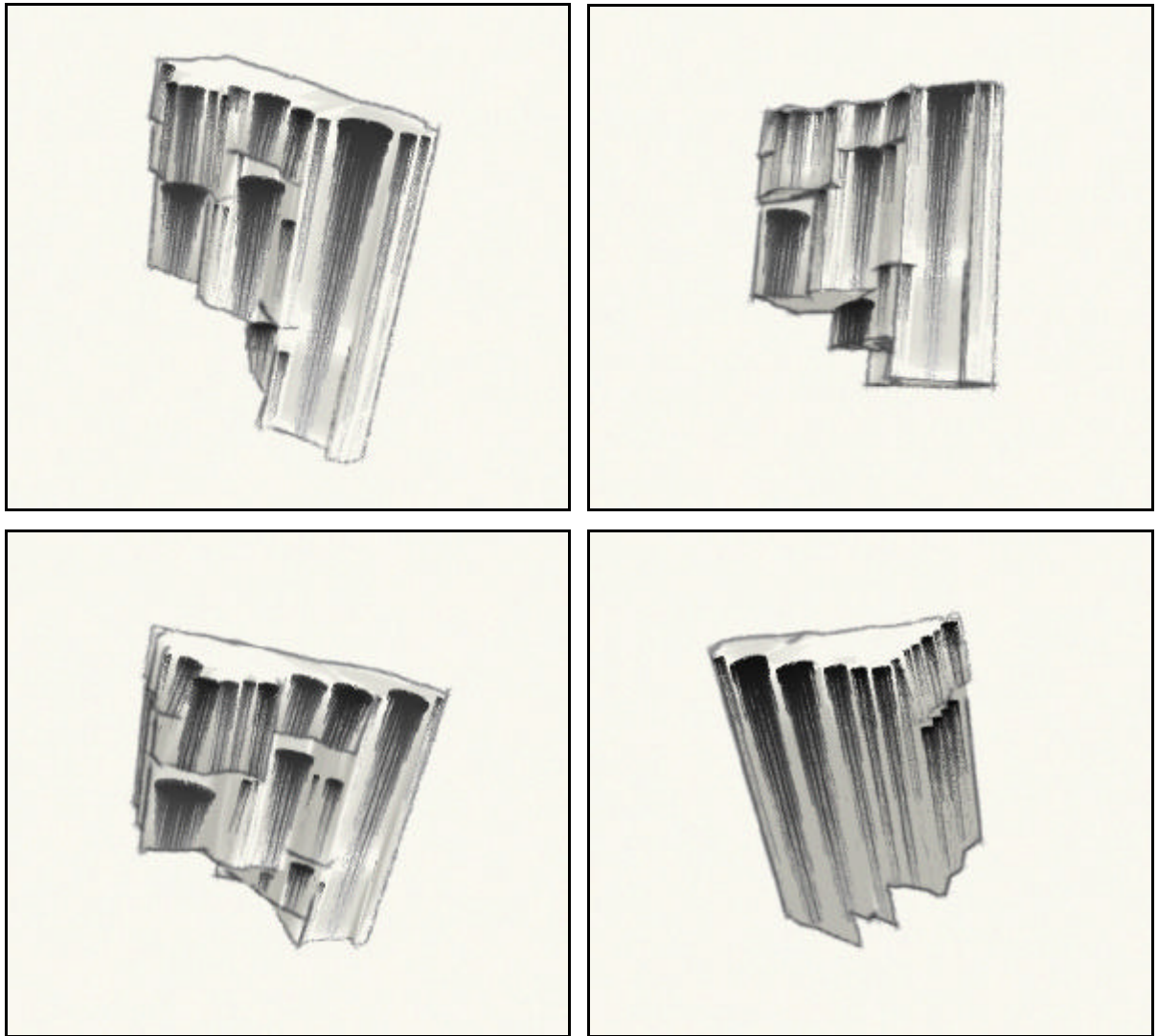
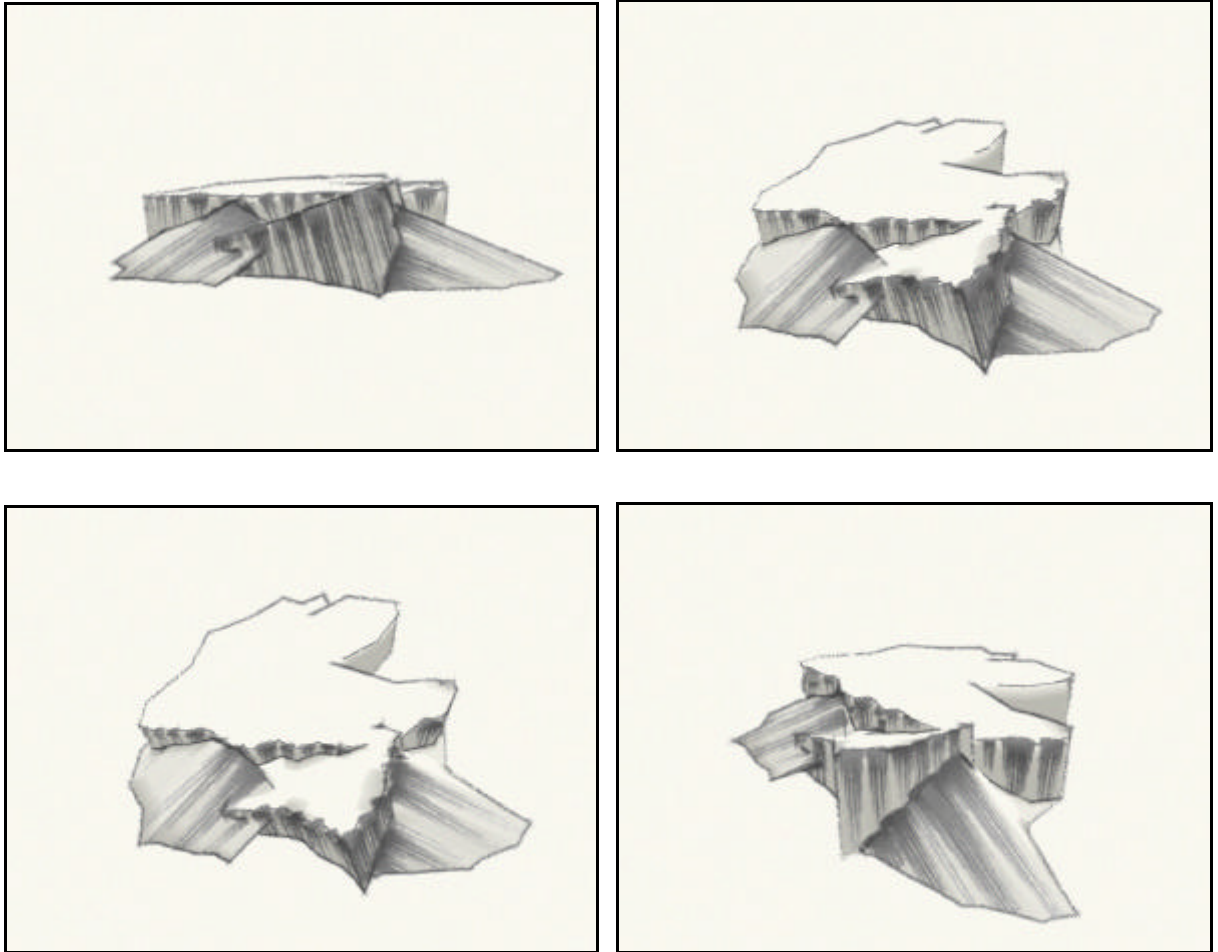


圖 39 山石模型(圖 37)在不同視角下的結果。



圖表 40 山石模型(圖 38)在不同視角下的結果。

第七章

結論

在本篇論文中，提出了一個方法模擬山水畫的山石皴法風格，將立體山石模型經由三維幾何分析，獲得山水畫皴法所需資訊，並配合形體輪廓與表面明暗度，將立體山石重要特徵解析並繪畫出來。使用者只需輸入三維模型及定義部分參數值，系統便能自動創作出具山石皴法特色的山水畫作品。本篇論文並提出具毛筆重要物理特性的水墨畫模組，因此能繪畫出逼真的水墨筆觸，就如同畫家用毛筆畫下一筆筆的筆觸所成畫作一樣自然。水墨畫模組除了模擬中鋒筆觸，也考慮側鋒特性，提出可變化的毛筆架構與自然的壓力機制，以模擬壓力與筆毛的關係，控制筆毛的接觸與墨水的滲出量，並以參數機制控制毛筆墨色與水墨量的分布，使所畫出的筆觸比重複填入相同圖案的結果來得逼真、自然。使用者不需熟練筆墨技法，便可在短時間之內，得到立體山石在山水畫皴法下所展現的藝術風格。本篇論文主要貢獻列於下方：

1. 配合識別參考影像與隱蔽點刪除法，使系統能快速的解決可見度問題，且區域擴展法找出的輪廓線段相連性正確，適合具連貫性的自然筆觸。
2. 提出特殊隱避面刪除與表面區域擴展法：
 - (a) 尋找出具備 NPR 特性的輪廓路徑，使得物體重要外形能被清楚地描繪出來，而整幅畫之輪廓筆觸不至於太過複雜而失去焦點。
 - (b) 能找出石質紋理之皴法區域，將山水畫家肉眼所見之面塊分析出來，配上毛筆模組的側鋒筆觸，將山岩壁面如同斧劈的斷裂紋理描繪出來。

3. 提出一可變的毛筆模組架構與壓力機制，可畫出中鋒與側鋒在壓力不同時所產生的不同筆觸。因此亦能模擬山水畫其他筆墨技法所呈現的效果。

然而，仍有部分問題需留待未來研究解決之道：

1. 水墨在紙張上的渲染：在我們系統中，染墨渲染機制是以平滑濾波器模擬渲染效果，但要表現更自然的淡墨渲染效果，需要用毛筆模組的筆觸效果配合上紙張模組的物理特性模擬，如此才能模擬淡墨在宣紙上自然的滲透。例如：山水畫的雲、瀑布、浪濤，其潑墨技法上，非常強調水墨渲染效果。因此為了得到更自然逼真的山水畫作，紙張的吸水特性模擬是未來的研究目標。
2. 苔點法裝飾表面事物：山水畫在整個山石繪畫流程中，需結合多個技法，才能完成一幅有層次但不雜亂之作品。明清人士多用苔點法加強表面事物的點綴，如山石凹縫的小草、小樹，增加山石外貌的豐富感，然而隨意加入濃墨點綴將會破壞皴法在山石表面紋理的表現，因點法在山石繪畫屬最後的裝飾步驟，故需要考慮到苔點配置問題，以避免破壞皴法的紋理表現。
3. 山石皴法主要包括點、線、面類皴法，其他變體皆能由這三類變化而來，其中點類皴法可以分析端點特性進行模擬，而線類皴法需要分析出山石的曲度走勢。加入這兩類皴法，將能使系統因應山岩特性，以適合的皴法筆觸描繪其山岩外貌。
4. 由於斧劈系面類皴法筆觸是二維材質表現，其區域範圍與單一像素相較之下，是非常巨大的繪畫基本單位(Primitive)，因此畫面連貫性(Frame-to-frame coherence)很低，若是改變視角的連續動畫，將會變得很不自然。因此連續畫面間，斧劈皴筆觸的消失與加入，不讓人感到突兀是一困難問題。

參考文獻

- [1] 王耀庭編，「山水畫法 1、2、3」，雄獅圖書公司，民國七十三年三月。
- [2] 沈以正、羅芳合著，「國畫—山水畫法及演變」，水牛圖書出版事業有限公司，民國七十四年十月出版。
- [3] 黃渠成編繪，「山水畫法」，藝術圖書公司，民國七十五年十一月。
- [4] 劉墉著，「劉墉山水寫生畫法」，Shui-Yun-Chai Studio，西元1984年出版。
- [5] 鄭明編著，「中國山水畫技法」，藝風堂出版社，民國七十六年三月出版。
- [6] 賴玉光主編，「中國山水畫的畫法」，唐代文化事業有限公司，民國七十八年出版。
- [7] 顧炳星著，「如何教中國山水畫」，國立台灣師範大學中等教育輔導委員會，民國七十六年五月出版。
- [8] Cassidy J. Curtis, Sean D. Anderson, Joshua E. Seims, Kurt W. Fleischer, David H. Salesin, “Computer-Generated Watercolor,” Proceedings of ACM SIGGRAPH 97, 1997.
- [9] Cassidy Curtis. ”Loose and Sketchy Animation”. Siggraph ’98 Technical Sketch, 1998.
- [10] Oliver Deussen, Thomas Strothotte, ”Computer-Generated Pen-and-Ink Illustration of Trees”, Proceedings of SIGGRAPH 2000.
- [11] Aaron Hertzmann, “Painterly Rendering with Curved Brush Strokes of Multiple Sizes”, Proceedings of ACM SIGGRAPH 98, page 453-460, 1998.
- [12] Horace H S Ip, Helena T F Wong, “Calligraphic Character Synthesis Using a Brush Model,” Proceedings of Computer Graphics International 1997, page 13-21.
- [13] Berthold K. P Horn. *Robot Vision*. MIT Press, Cambridge 1986.

-
- [14] Chih-Wei Hsu, "The Synthesis of Rock Textures in Chinese Landscape Painting", Ms thesis, National Chiao Tung University, June 1999.
- [15] Michael A. Kowalski, Lee Markosian, J.D. Northrup, Lubomir Bourdev, Ronen Barzel, Loring S. Holden, John F. Hughes, " Art-Based Rendering of Fur, Grass, and Trees", Proceedings of SIGGRAPH 99.
- [16] Peter Litwinowicz, "Processing Images and Video for An Impressionist Effect," Proceedings of ACM SIGGRAPH 97, 1997.
- [17] Barbara J. Meier, "Painterly Rendering for Animation," Proceedings of ACM SIGGRAPH 96, page 477-484, 1996.
- [18] J.D. Northrup and Lee Markosian, " Artistic Silhouettes: A Hybrid Approach. ", proceedings of NPAR 2000.
- [19] Takafumi Saito and Tokiichiro Takahashi, "Comprehensible Rendering of 3-D Shapes", Computer Graphics, Volume 24, Number 4, pages 197-206 , August 1990. ACM SIGGRAPH, 1990.
- [20] Michael P. Salisbury, Michael T Wong, John F. Hughes, David H. Salesin, "Orientable Textures for Image-Based Pen-and Ink Illustration," Proceedings of ACM SIGGRAPH 97, 1997.
- [21] Michio Shiraishi and Yasushi Yamaguchi , "An Algorithm For Automatic Painterly Rendering Based On Local Source Image Approximation", Proceedings of NPAR 2000.
- [22] Michio SHIRAISHI and Yasushi YAMAGUCHI, "ADAPTIVE PARAMETER CONTROL FOR IMAGE MOMENT-BASED PAINTERLY RENDERING", ICGG Conference Proceedings 2000.
- [23] Steve Strassmann, "Hairy Brushes," Proceedings of ACM SIGGRAPH 86.
- [24] O. Veryovka and J.Buchanan, "Comprehensive Halftoning of 3D Scenes", Proceedings of EuroGraphics'99.
- [25] Shan-Zan Weng, Zen-Chung Shih, Hsin-Yi Chiu, "The Synthesis of Chinese Ink Painting", National Computing Symposium' 99, page 461-468, 1999.