

國立暨南國際大學資訊工程學系

碩士論文

在非擬真成像環境中模擬畫布上的顏料體積視覺效果
Synthesizing the NPR Volumetric Visual Effects on
Canvas

指導教授：陳履恆 博士

研究生：陳沂顯

中華民國九十八年七月

國立暨南國際大學碩（博）士論文考試審定書

_____ 資 訊 工 程 _____ 學系（研究所）

研究生 _____ 陳沂顯 _____ 所提之論文

在非擬真成像環境中模擬畫布上的顏料體積視覺效果

Synthesizing the NPR Volumetric Visual Effects on Canvas

（中、英文題目）

經本委員會審查，符合碩（博）士學位論文標準。

學位考試委員會

歐陽明

委員兼召集人

張鈞法

委員

陳腹恆

委員

中華民國 98 年 6 月 26 日

博碩士論文電子檔案上網授權書

(提供授權人裝釘於紙本論文書名頁之次頁用)

本授權書所授權之論文為授權人在 國立暨南國際大學 大學 資訊工程學 系
97 學年度第 2 學期取得 碩 士學位之論文。

論文題目：在非擬真成像環境中模擬畫布上的體積視覺效果

指導教授：陳履恆

茲同意將授權人擁有著作權之上列論文全文（含摘要），非專屬、無償授權國家圖書館及授權人畢業學校之圖書館，不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或其他各種數位化方式將上列論文重製，並得將數位化之上列論文以上載網路方式，提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽，或並下載、列印。

讀者基於非營利性質之線上檢索、閱覽或下載、列印上開論文，應依著作權法相關規定辦理。

授權人：

姓名：

陳沂翹



(請簽名並蓋章)

中華民國九十七年七月十三日

致謝

暨大兩年是我人生重大轉捩點。從資管跨到資工領域，一切所學重頭開始累積。幸好一路有許多貴人相助，讓我得以順利完成這一切。

兩年研究生生活裡，首先感謝我的家人給予全力地支持，讓我可以專心致力於學業上。以及要感謝我的指導教授—陳履恆老師。對於入學時一切都還懵懵懂懂的我，老師總是適時的給予建議，讓我在過程中一步一步充實自己，並不斷地鼓勵我們去嘗試、讓我從中找到屬於到自己研究路途上的目標與動力。還要感謝歐陽明教授張鈞法教授在口試時不吝給予指教，讓我有機會對自己所做所學能從不同的觀點切入審視，讓論文更完備。

另外，感謝引導我們進入實驗室狀況的學長姊—小蘭、大師姊、Shower、小溫、Pointer，帶領我領略埔里的美，讓我得以更快的融入這個環境，為這個融洽的實驗室盡一己之力。以及同儕的 Panda、小瑜、小龍，這段期間感謝有你們的陪伴，作研究之餘有你們陪伴著一路吃吃喝喝、偶爾瘋狂，帶給我充實的生活。還有黑輪、豆干、柚子，一起留下美好點點滴滴的回憶。

還有，感謝人類所梅慧玉老師，給予我以不同層面來看待事物的機會，讓我學習到在看事情時由更多不同角度切入。感謝英語角伊藤老師，給予了我許多語言學習上的幫助，讓我對日語的運用有自信。還有歷史系許紫芬老師，讓我吸取了許多留學相關的心得，能對未來的規劃上有更完善的準備。

感謝在這中間過程相遇到的人們，因為相遇所以豐富了我的人生。謝謝你們。

陳沂顯 2009年7月 于 國立暨南國際大學

論文名稱：在非擬真成像環境中模擬畫布上的體積視覺效果

院校系：國立暨南國際大學資訊工程學系

畢業時間：九十八年七月

研究生：陳沂顯

頁數：55

學位別：碩士

指導教授：陳履恆 博士

摘要

非擬真成像是計算機圖學領域裡一門很重要的議題，它可以呈現出有別於相片擬真的效果。三維模型導向非擬真成像系統裡最重要的特性是一利用三維模型的空間幾何資訊來輔助筆觸的計算。舉例來說，模型的輪廓、骨架結構、與觀者的距離等，皆可以幫助我們決定如何下筆以保留物件原有特性，甚至突顯它的特性。

本研究借助非擬真成像在顏色呈現上的長處，結合筆觸合併和素描建模概念來產生俱有積體視覺效果的作品，尤以油畫的厚塗法、雕塑的黏土浮雕等。換言之，本研究提出的系統可以幫助筆者模擬簡單地創作手法來產生具有體積效果的顏料、黏土雕塑等媒材，以三維場景畫作的方式呈現。

關鍵詞：計算機圖學、非擬真成像、筆觸合併、素描建模、油畫、厚塗法、雕塑、黏土浮雕、油畫顏料

Synthesizing the NPR Volumetric Visual Effects on Canvas

Name of Institute: National Chi Nan University, Dept. of CSIE

Graduation Time: July 2009

Student Name: Yi-Hsien Chen

Pages: 55

Degree Conferred: Master

Advisor Name: Dr. Lieu-Hen Chen

Abstract

NPR (Non Photo-Realistic) is an important issue in Computer Graphics. It can present in a totally different style from realistic methods. In this paper, we takes the advantage of 3D NPR system in color presentation, and apply stroking merge and sketch-based modeling to synthesizing art works with volumetric effect, such as: oil-painting pigments with impasto style, relief sculpture, clay relief and so on.

As one of the characteristic features of 3D model oriented NPR, the geometric information is extracted from 3D models for calculating the appearance properties of each stroke. These important and useful clues include silhouette, distance, and skeleton structure of objects. Through our prototype system, several common skills of creating art works are simulated for rendering 3D scene. As shown in the experiment results, our 3D NPR system creates interesting and vivid oil-painting, clay relief liked images.

Key Words: Computer Graphics, Non-Photorealistic Rendering, Stroking Merge, Sketch-Based Modeling, Oil Painting, Impasto, Clay Relief, Relief Sculpture, pigment.

章節目錄

致謝	1
中文摘要	2
英文摘要	3
章節目錄	4
圖目錄	6
第一章 緒論	8
第一節 研究動機與目的	8
第二節 章節編排	9
第一小節 章節架構說明	9
第二小節 章節架構安排	9
第二章 相關研究	11
第一節 雕塑	11
第二節 油畫	13
第一小節 畫布特性	15
第二小節 畫筆特性	16
第三小節 顏料特性	16
第三節 畫家筆觸風格列舉以及探討	17
第一小節 梵谷畫作	17
第二小節 厚塗法	19
第四節 NPR 系統	21
第一小節 二維資訊為基礎的非擬真成像系統	21
第二小節 三維資訊為基礎的 NPR 系統	23
第三小節 雕塑作品的模擬與生成	23
第四小節 顏料體積的模擬	25
第三章 研究方法	27

第一節 三維模型資訊的前置處理	28
第一小節 資訊彙整	28
第二小節 投影計算	29
第二節 筆觸的計算與繪製	29
第一小節 隨機決定落筆處	30
第二小節 合併筆觸	30
第三節 筆觸體積的生成	31
第一小節 繪製筆觸	31
第二小節 產生網格資訊	32
第三小節 網格平滑化	38
第四章 實驗成果與討論	39
第一節 實驗成果	39
第二節 問卷調查與討論	46
第五章 結論與未來展望	50
第六章 參考文獻	51
附錄	54

圖目錄

圖片 1 - 羅丹 - 沉思者	12
圖片 2 - 卡扎爾時代的波斯浮雕	12
圖片 3 - 點描派的繪圖	13
圖片 4 - 梵谷-奧維的教堂	14
圖片 5 - 卡爾·拉森的水彩畫	14
圖片 6 - 畫布對顏料的影響	15
圖片 7 - 梵谷畫作-麥田群鴉	16
圖片 8 - 油彩顏料的堆積	17
圖片 9 - 梵谷-星月夜	18
圖片 10 - 梵谷-麥田裡的絲柏樹	19
圖片 11 - 梵谷-花瓶裡的十二朵向日葵 局部特寫	20
圖片 12 - 梵谷-麥田裡的絲柏樹畫作部份細節	21
圖片 13 - 二維平面圖像 NPR 來源檔範例	22
圖片 14 - 二維平面圖像 NPR 油畫風格繪制結果	22
圖片 15 - 三維模型檔範例	23
圖片 16 - 水墨風格繪製	23
圖片 17 - 雕塑貼圖	24
圖片 18 - 雕塑建模範例	25
圖片 19 - 高廣場域貼圖	26
圖片 20 - 系統流程圖	27
圖片 21 - 透視投影示意圖	29
圖片 22 - 隨機灑上筆觸繪製的 Seed 示意圖	30
圖片 23 - 合併筆觸的概念	31
圖片 24 - 筆觸繪制與輪廓抽取	32
圖片 25 - 分類三角片後取得骨架	33

圖片 26 - 扇形化三角片的步驟	34
圖片 27 - 邊替換(Edge Swapping)示意圖	35
圖片 28 - 將骨架線依等比高度提起示意圖	36
圖片 29 - 因入射點數量不一所造成的鋸齒狀骨架示意圖	36
圖片 30 - 修正後的骨架示意圖	37
圖片 31 - 在每個與輪廓的連線上依圓的比例內插入資料點	37
圖片 32 - 傘狀運作修正示意圖	38
圖片 33 - 花 - 真實畫作	39
圖片 34 - 花 - 模型原始輸出圖	40
圖片 35 - 花 - 模擬體積效果輸出之一	40
圖片 36 - 花 - 模擬體積效果輸出之二	41
圖片 37 - 花 - 模擬體積效果輸出之三	41
圖片 38 - 花 - 模擬體積效果輸出之四	42
圖片 39 - 花 - 模擬體積效果輸出之五	42
圖片 40 - 茶壺 - 模型原始輸出圖	43
圖片 41 - 茶壺 - 模擬體積效果輸出之一	43
圖片 42 - 茶壺 - 模擬體積效果輸出之二	44
圖片 43 - 茶壺 - 模擬體積效果輸出之三	44
圖片 44 - 茶壺 - 模擬體積效果輸出之四	45
圖片 45 - 茶壺 - 模擬體積效果輸出之五	45

第一章 緒論

第一節 研究動機與目的

在計算機圖學的領域中，關於 NPR 系統模擬油畫研究已行之有年，其主要手法主要可以分為二維影像為基礎(2D Image-Based)與三維模型為基礎(3D Object-Based)兩派。

二維影像為基礎的研究中，它主要以靜態圖片為繪製資料來源。但它最大的問題在於使用單一圖片為輸入源，導致後續計算筆觸時，無法清楚地分辨何者為背景與前景。以致於往往將主體上細節給乎略掉或者過份誇張化。

然而在以三維模型當作輸入源的研究中，它們對繪製完後筆觸外觀所附帶的顏料並沒有妥善的處理。換句話說，它們只注重繪製後的顏色，卻不管油畫顏料本身黏滯特性造成的顏料堆疊效果。如此一來的結果是一輸出的圖像永遠是平面圖，即使使用映射(Affine)來模擬轉動視角或圖片，仍無筆觸顏料在受光時所造成陰影起伏效果，以致於看不出畫作的體積感。

綜合上述，我們將先前成果予以改善，除了使用三維模型作為輸入源之外，並考慮繪製時模擬筆觸刷過時的顏料殘留。換言之，就是考量顏料殘留可能的狀況，讓筆觸看起來有凹凸起伏呈現效果。並且，再納入特定繪畫技巧來模擬繪畫過程中筆觸走向，以模擬出畫作的體積感。

第二節 章節編排

第一小節 章節架構說明

本研究的主要目標是模擬具有顏料體積視覺效果的作品。首先，第一章描述本研究的動機、目的和論文的章節安排。

其次，第二章針對雕塑、油畫以及非擬真成像系統等現有研究作回顧。一開始先簡單介紹雕塑的概念；油畫部份我們鎖定特定畫家，藉由他的畫作來探討並分析主要創作手法；以及探討現有非擬真成像系統中，找出適合的概念導入我們的研究裡。

再來，第三章我們將一一解說進行本研究時所實作的概念與流程。主要可以分為“三維模型資訊的前置處理”、“筆觸的計算與繪製”、“筆觸體積的生成”共三步驟。

接著，在第四章裡，我們附上網路上蒐集來的真實創作圖像，以及本研究實作出來的成果圖供參考比較。此外，進一步將回收的問卷作分析、探討本實驗手法的成效。

第五章簡單探述對本研究的成效。

第六章列舉出所有參考過的文獻，供讀者在後續追蹤時作進一步的參考來源。

最後附上問卷的原始內容供讀者參考。

第二小節 章節架構安排

第一章 緒論

第一節 研究動機與目的

第二節 章節編排

第二章 相關研究

第一節 雕塑

第二節 油畫

第一小節 畫布特性

第二小節 畫筆特性

- 第三小節 顏料特性
- 第三節 畫家筆觸風格列舉以及探討
 - 第一小節 梵谷畫作
 - 第二小節 厚塗法
- 第四節 NPR 系統
 - 第一小節 二維資訊為基礎的 NPR 系統
 - 第二小節 三維資訊為基礎的 NPR 系統
 - 第三小節 雕塑作品的模擬與生成
 - 第四小節 顏料體積的模擬
- 第三章 研究方法
 - 第一節 三維模型資訊的前置處理
 - 第一小節 資訊彙整
 - 第二小節 投影計算
 - 第二節 筆觸的計算與繪製
 - 第一小節 隨機決定落筆處
 - 第二小節 合併筆觸
 - 第三節 筆觸體積的生成
 - 第一小節 繪製筆觸
 - 第二小節 產生網格資訊
 - 第三小節 網格平滑化
- 第四章 實驗成果與討論
 - 第一節 實驗成果
 - 第二節 問卷調查與討論
- 第五章 結論與未來展望
- 第六章 參考文獻
- 附錄

第二章 相關研究

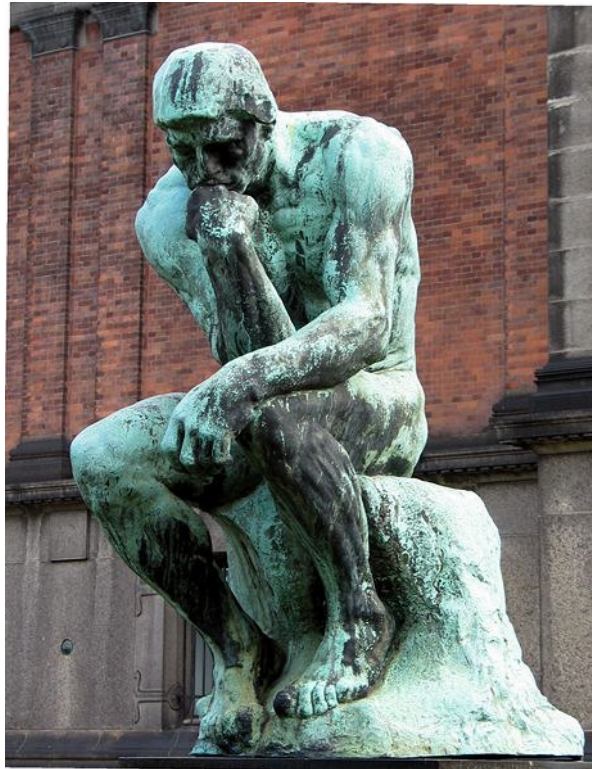
本章節一開始先回顧雕塑、油畫等帶有體積視覺效果作品的種類，以及基本繪畫技巧、畫具、畫派、技法等，還有非擬真成像系統等現有的相關研究。

第一節 雕塑

從「雕塑」的字面上來看，它其實可以分成兩件事：一是「雕」，二是「塑」。謝棟樑[31]、何恆雄[27]中指出，所謂的「雕」，也就是所謂的「雕刻」，是指從比較硬質的材料中挖掉不必要的部份，刻意留下最滿意的形象，也就是用「減」的方法所形成的空間技術。它包含金、玉、石、木、骨、象牙、竹、漆的雕刻，種類繁多。所謂的「塑」，它的主要方法就是將質軟、可塑性大的黏土，在架好的心棒上堆土造型，等塑好泥胚後，再經過繁複的外模、內模翻製後程，才能完成一件作品。方法上是用「加」的作法，從無到有，由少到多；而雕刻卻是由多到少，由實到虛。

另外，何恆雄[27]指出：「無論雕或塑它的表現型態基本上又分兩種，(一)、立體圓雕：即二度空間之實體的雕塑，強調正後、後面、上下左右面面俱到的立體造型結構的變化，顯現其立體型態的面貌。(二)、浮雕：即是平面式但略帶為凸起的型態。其形態藉由空間壓縮的方式來表現，有著另類透視的視覺效果。」

立體圓雕即一般我們日常生活常中常見的雕刻皆屬於這類的作品，如圖片 1。浮雕樣式如附圖片 2。



圖片 1- 羅丹 - 沉思者

資料來源：http://fr.wikipedia.org/wiki/Le_Penseur



圖片 2- 卡扎爾時代的波斯浮雕

資料來源：<http://en.wikipedia.org/wiki/Relief>

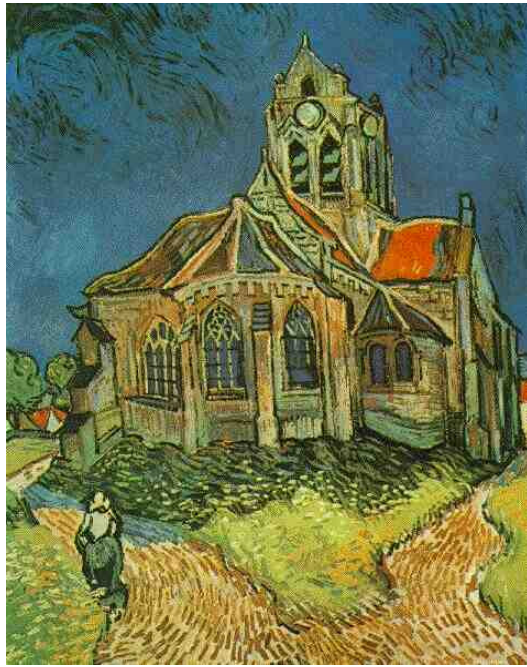
第二節 油畫

畫具為產生一張畫作的基本工具。不同的創作媒介與繪畫手法所產生出的畫作便會有極大的差異。由圖片 3、圖片 4、圖片 5 中我們可以發現，不同的畫具和手法所表現出來的畫風亦不相同。就影像處理的觀點來看，試圖從影像中擷取出完整的下筆先後順序資訊並不是一件簡單的事；分佈在畫布上的筆觸在繪製的往程中會被層層的疊加，並不容易區分出其原本的屬性及資訊，再加上缺乏近一步更精細的數位化畫作，使得此一部分的資訊擷取相當困難。

接下來我們針對畫具特性進行分析。



圖片 3 - 點描派的繪圖



圖片 4- 梵谷-奧維的教堂



圖片 5- 卡爾·拉森的水彩畫

我們嘗試幾種方向來探討油畫中用具特性：

(1) 畫布特性

畫布編織品特性

(2) 畫筆特性

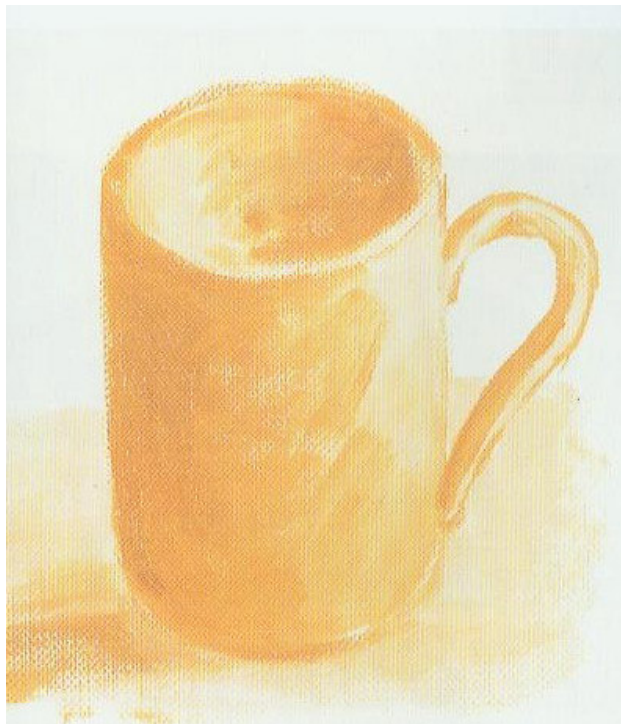
多筆觸疊合

(3) 顏料特性

油彩顏料堆積

第一小節 畫布特性

因畫布本身為編織品的關係，造成它的表面為不規律的凹凸面。所以繪製時油彩的沾附性會受到畫布表面起伏的影響，畫布紋路在油彩塗上後會讓油彩厚度累積較薄的地方變的清晰可見。由圖片 6 可清楚看出畫布與顏料沾附所造成的顆粒。油畫中畫布紋路對畫作影響之大，此類特殊的畫布紋路效果(Canvas Texture Effect)也是影響畫作呈現的重要關鍵。



圖片 6- 畫布對顏料的影響

第二小節 畫筆特性

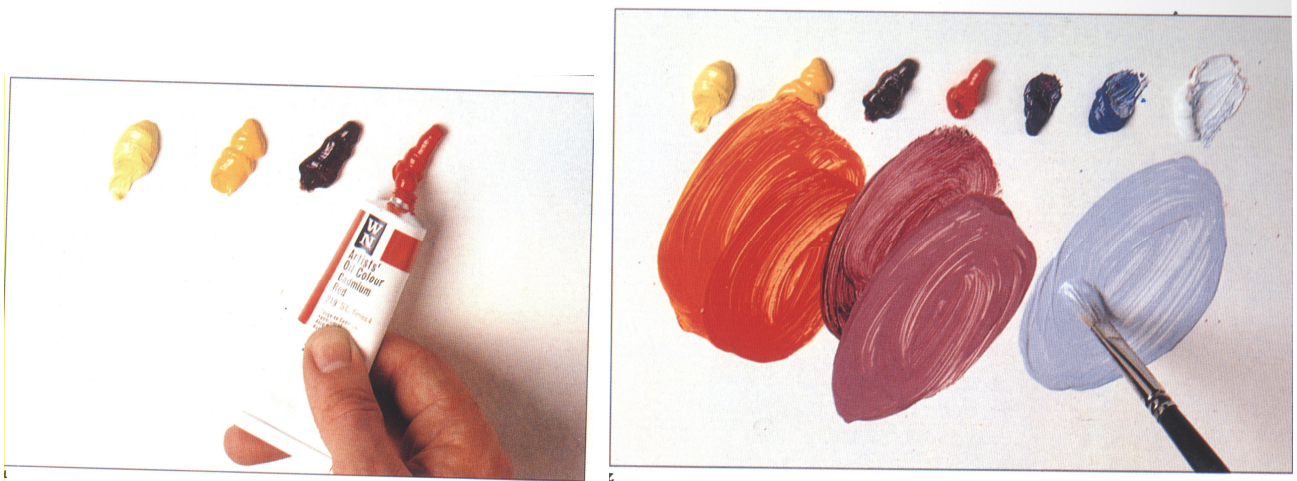
油畫顏料本身因有黏附性，當繪製範圍重疊時多會伴隨著筆觸疊合的現象。作畫過程中，若在油彩顏料未乾處繼續補上下一筆，也會造成第二筆沾染上第一筆的顏料，導致在同一筆中出現顏色分層明顯的狀況。如圖片 7 所示，畫作中的天空可以看到在同一筆觸中多筆觸疊合的現象。



圖片 7- 梵谷畫作-麥田群鴉

第三小節 顏料特性

因為油彩本身特性不似水彩易揮發和擴散，所以重疊的筆觸造成油彩顏料的堆積，導致畫作表面的厚度隨之疊加。另外，下筆先後順序的不同亦會造成不同厚度和紋路[29]，如圖片 8。



圖片 8 - 油彩顏料的堆積

油彩顏料堆積會對光線折射造成的影響。因此，從不同的角度觀看會因為光線折射而使呈現的效果有所差異。另外，下筆重複處因累積較厚的油彩顏料，所以畫布本身的紋路被覆蓋掉，加上不同的下筆先後順序，會在畫布上留下明顯的筆觸走向。概念如上圖所示。

畫作在會場展出時，會場的光源和觀賞者角度通常不是固定的因素。從觀賞者角度來看，畫作上油彩厚度堆積造成陰影，會導致畫作細節的顏色隨之變化。所以，不同的觀看角度、不同的光線變化，伴隨的是畫作顏色亦有所改變。

從上圖中亦可看出顏料堆積較厚的地方，對於光源的反射出現了高亮光的現象。而在兩條較厚的筆觸中，相對顏料堆積較薄的筆觸而言則有陰影的存在。這些影陰的視覺效果會更加強觀者的視覺觀感。

因此，實作出油畫顏料堆積厚度，為本研究重要探討議題。

第三節 畫家筆觸風格列舉以及探討

第一小節 梵谷畫作

梵谷(Vincent van Gogh, 1853~90)，把印象派筆觸改變成像緞帶一般滑潤渦狀

畫，以激動的颜色和筆法表現出內在的苦悶和激情。他曾在友人處看到日本浮世繪圖畫，這對他作畫時所採用的筆觸和用色影響很大。他知名的代表作有《吃馬鈴薯的人》(1885，阿姆斯特丹梵谷美術館)、《自畫像》(1890，倫敦古宮廷畫廊)、《夜間咖啡屋》(1888，耶魯大學畫廊)、《麥田與柏樹》(1889，私人藏)、《星夜》(1889，紐約現代美術館)。

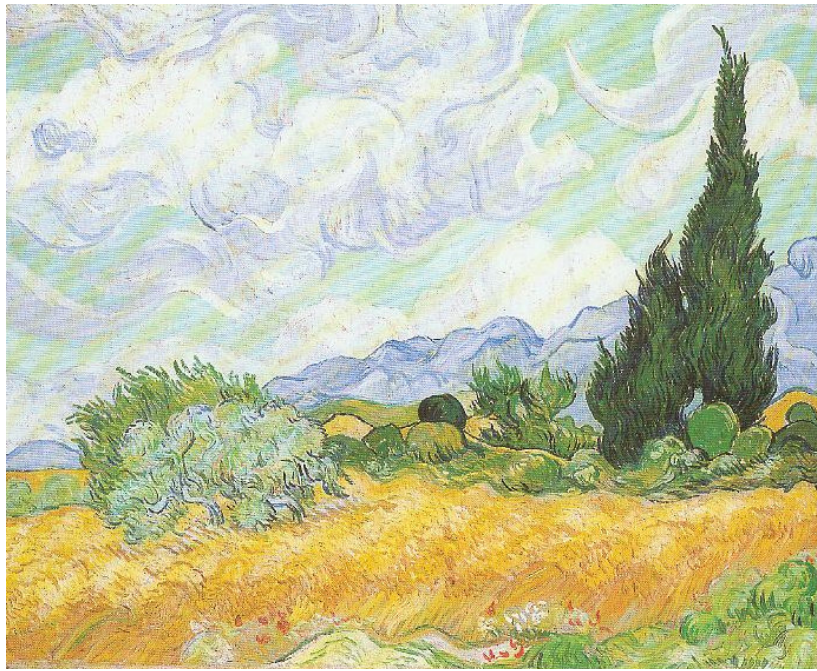
以油彩作為繪畫工具畫家中梵谷享有盛名。他一生的經歷也導致了他畫作特異風格。因風格強烈，所以拿他的畫作來探討畫家個人風格，應較為容易分析與其他畫家不同之處[28]。



圖片 9- 梵谷—星月夜

由圖片 9 可看到，梵谷在描繪銀河時描繪成漩渦狀，銀河位置位於圖中的中心點，讓觀賞者有一股被此畫作吸入的感覺。整個星空的筆觸，受到畫中月亮和星星光源影響，呈現一種如同漣漪般型態。

由此可知，梵谷描繪畫作中物體時，以這種獨特繪畫技法展現個人風格。



圖片 10 - 梵谷－麥田裡的絲柏樹

從圖片 10 中，梵谷在畫絲柏時摒除枝葉細節，單以樹幹為主體。由下而上筆觸以樹幹為中心像似火焰受到空氣擾動般扭曲。在畫絲柏以外其他植物時，也用了類似技法。

第二小節 厚塗法

梵谷許多作品中顏料都塗得很厚實。以圖 9 與圖 10 為例，用筆的痕跡清晰可見，產生十分具有質感效果。這種塗得厚厚地技法稱為「厚塗法」(impasto)，為許多印象派畫家所採用。

約 1840 年起，顏料的容器改用金屬管子，厚塗法被廣泛採用。由於裝在管子裡，顏料必須做得比以前濃稠，否則，無法從管口適當地擠出。另外借助機器生產，顏料濃度可以保持一致，使得這種技法普及。

印象派中，梵谷的厚塗法相當有氣勢，力度十足，這恐怕是受到莫提切裡 (Adolph Moticelli, 1842~1886) 影響。1886 年梵谷初次看到他作品「法斯特、瑪

爾加雷、梅菲絲特菲雷斯便對這位畫家讚賞不已。莫提切裡作品色彩鮮豔，顏料塗得非常厚，有些人認為這簡直就是精神異常狀態下的產物」[28]。

梵谷最為人所稱道就是對於光與顏色的處理。由於他的筆觸相當重，所以常常在畫布上留下一層厚厚地顏料。塗色法是由印象派演變來，他使用厚塗大筆觸，如附圖的《向日葵》、《麥田裡的絲柏樹》，運用燃燒般的熱情色彩以及激烈的筆觸，表達色光的顫動效果。如圖片 11、圖片 12 裡可以看到許多下筆處時使用大量油畫顏所造成堆疊、起伏的效果。



圖片 11 - 梵谷—花瓶裡的十二朵向日葵 局部特寫



圖片 12 - 梵谷—麥田裡的絲柏樹畫作部份細節

第四節 NPR 系統

從計算機圖學發展脈絡中，可得知重點發展項目為模擬出接近於真實世界圖像的擬真成像(PR - Photo Realistic)。此外，還有另一個重要的議題—非擬真成像(NPR - Non Photorealistic Rendering)。非擬真成像由來已久，主要著眼點並不在於精確地模擬出真實地效果，而是注重作品整體畫風、風格以及細節呈現：例如筆觸效果、繪畫風格等可以突顯出作品的特色因素。因此，非擬真成像適合來做手繪風格作品的模擬。

在非擬真成像的研究中，依據不同的資料輸入來源可將其區分成兩個種類：2D Image-Base、3D Object-Base 兩種。

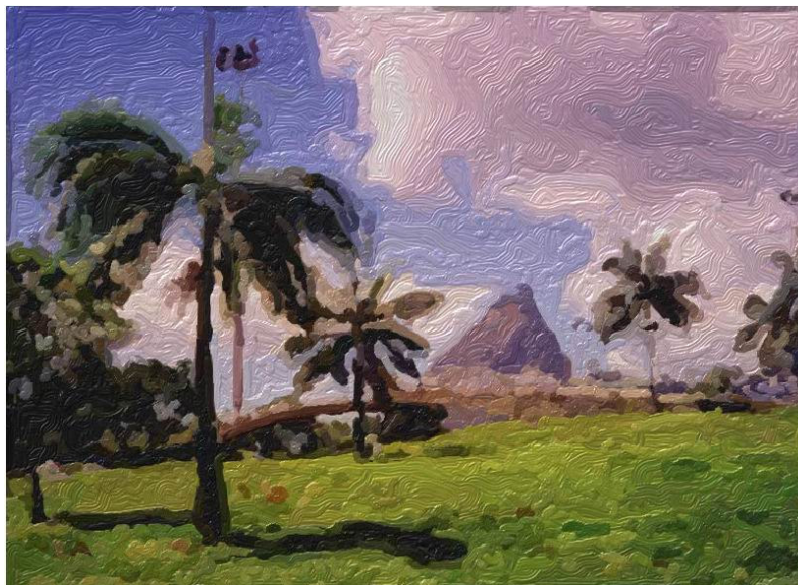
第一小節 二維資訊為基礎的非擬真成像系統

在 2D Image-Base 部份，它主要的概念是讀入二維平面影像後，依據影像上的相素、亮度等特性來進行筆觸計算，再將最終繪製結果輸出，其範例如圖片 13、圖片 14。如近年來許多非擬真成像系統([1], [2], [3], [5], [6], [10], [13], [14],

[18], [23], [24], [26])皆為屬於此類型。二維影像為基底非成像系統，優點是圖片來源較容易取得，例如從照片或者電腦繪圖作品，更甚者如 Hertzmann [2]使用視訊當作圖片擷取來源，可以更輕易的取得圖片，以達成其特殊用途之即時互動效果。然而，此類 NPR 系統的不足處，在於無法清楚的得知背景與前景之間的關係。因此，在繪製過程中往往容易將一些物件上主要特徵給破壞掉，導致無法呈現出繪畫主體的特徵。



圖片 13 - 二維平面圖像 NPR 來源檔範例

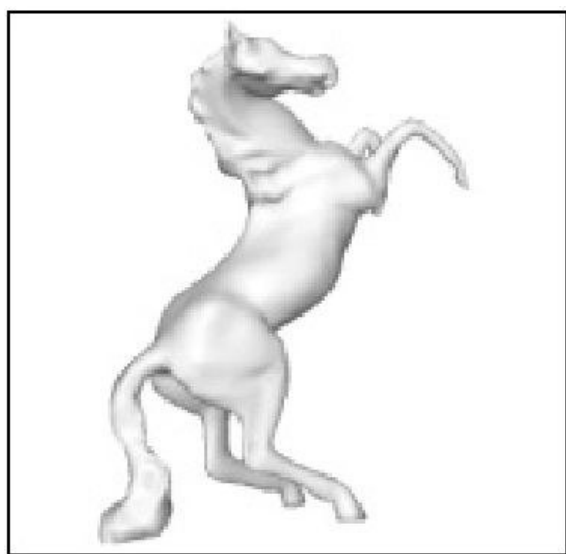


圖片 14 - 二維平面圖像 NPR 油畫風格繪制結果

第二小節 三維資訊為基礎的 NPR 系統

在 3D Object-Base 部份，主要方法是讀入三維模型資訊，並根據空間資訊和網格資訊來進行筆觸繪製，範例如圖片 15、圖片 16。相關研究在近年來仍陸續有許多豐碩研究成果([11],[12],[15],[19],[25])。此類非擬真成像系統最大長處在於模型本身提供空間資訊和網格資訊，克服 2D Image Base 部份缺點。因此，在計算筆觸時能有更精確地依據。舉凡骨架(Skeleton)、外框(Contour)、觀者的距離、光源等額外資訊輔助，讓作品能有更多呈現上的彈性。

在本研究中，我們承續先前研究結果([11][12])，以 3D Object-Base 非擬真成像系統為基底來進行後續研究。



圖片 15 - 三維模型檔範例



圖片 16 - 水墨風格繪製

第三小節 雕塑作品的模擬與生成

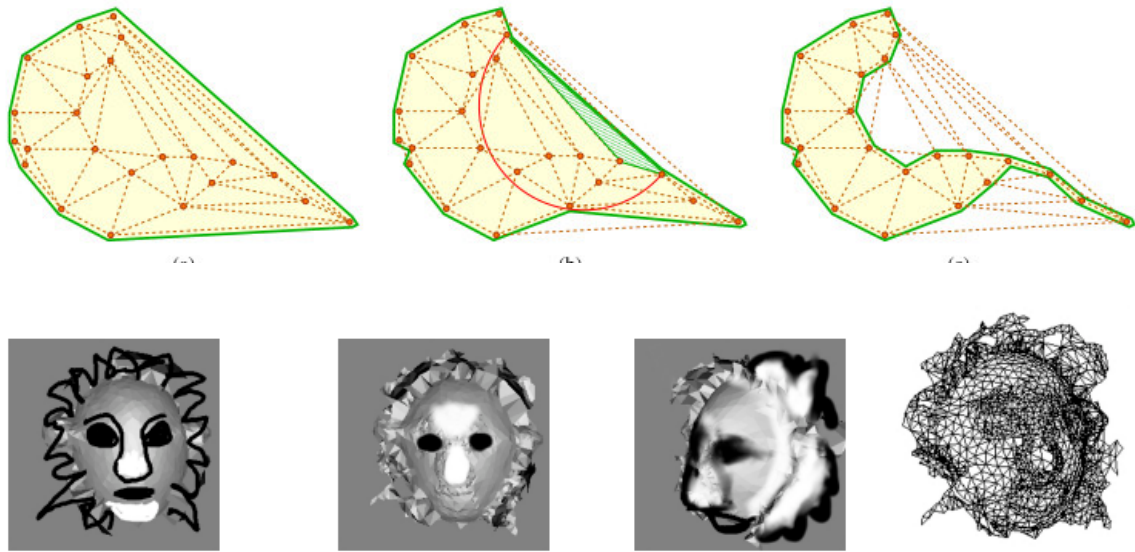
現有研究處理雕塑作品([8][16][17])中，主要手法大多以現有模型搭配材質貼圖(Texture Mapping)、凹凸貼圖(Bump Mapping)、雕塑貼圖(Relief Mapping)等，

將事前準備好現成維型和材質貼圖導入後進行渲染。其主要的功用為輸出擬真雕塑作品成像(Rendering)，且著重於呈現的部份。效果大致如圖片 17。



圖片 17 - 雕塑貼圖

在建模(Modeling)部份，現有研究(如[7])或者市售建模軟體(如 3D Max, Maya)，主要手法是透過一定手續將網格資訊本身從無到有建立出來。這類手續對使用者而言，第一個門檻不外乎要先熟悉建模方法與流程，所以使用者較不容易在短時間內入手。如效果大致上如圖片 18。



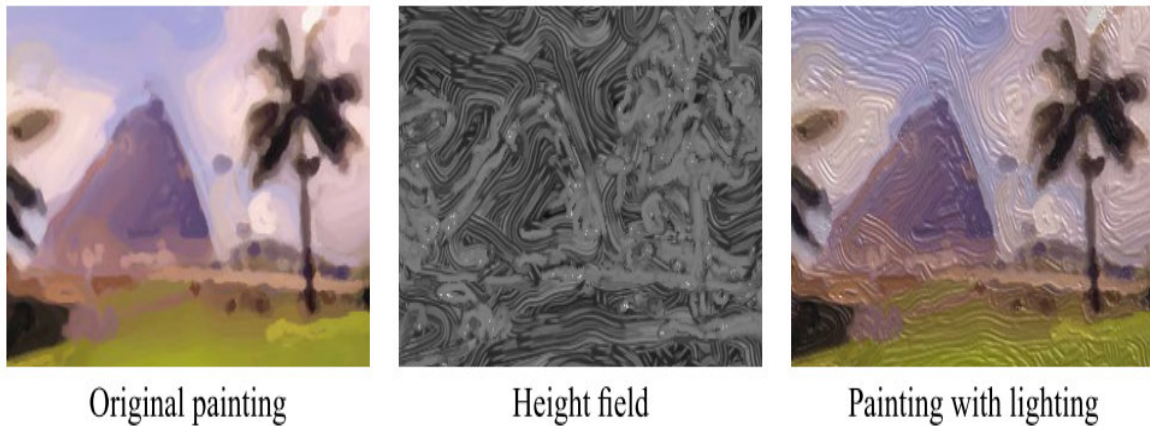
圖片 18 - 雕塑建模範例

綜觀現有研究成果中，直接將三維模型轉變成雕塑作品的研究比較少。因此，我們構想利用三維非擬真成像系統來進行雕塑建模與輸出，讓使用者透過我們提出的系統，將自行準備的模型檔輸出為俱備雕塑風格的作品。

第四小節 顏料體積的模擬

顏料堆疊與混合為油畫顏料特有的特性，為達到更擬真油畫效果，我們進一步將顏料模擬納入研究範圍。在 2D Image-Base 非擬真成像部份，Hertzmann[3] 和 Henry[10]利用高度場域對應法(Height Field Mapping)模擬筆觸在畫布上遊走時造成顏料殘留效果，效果大致上如圖片 19。此方法可實作出擬真效果的油墨體積，但這些顏料體積的外觀皆取決於單一固定筆觸。易言之，畫出來每一筆顏料體積近幾一模一樣，不會因特定範圍內下筆的多寡而對顏料殘留量有明顯差異。這點當在於真實情境中並不合理。此外，還有它本身最大的限制—也就是

2D Image-Base 非擬真成像在針對物件細節的呈現上有相當多的限制。



圖片 19 – 高廣場域貼圖

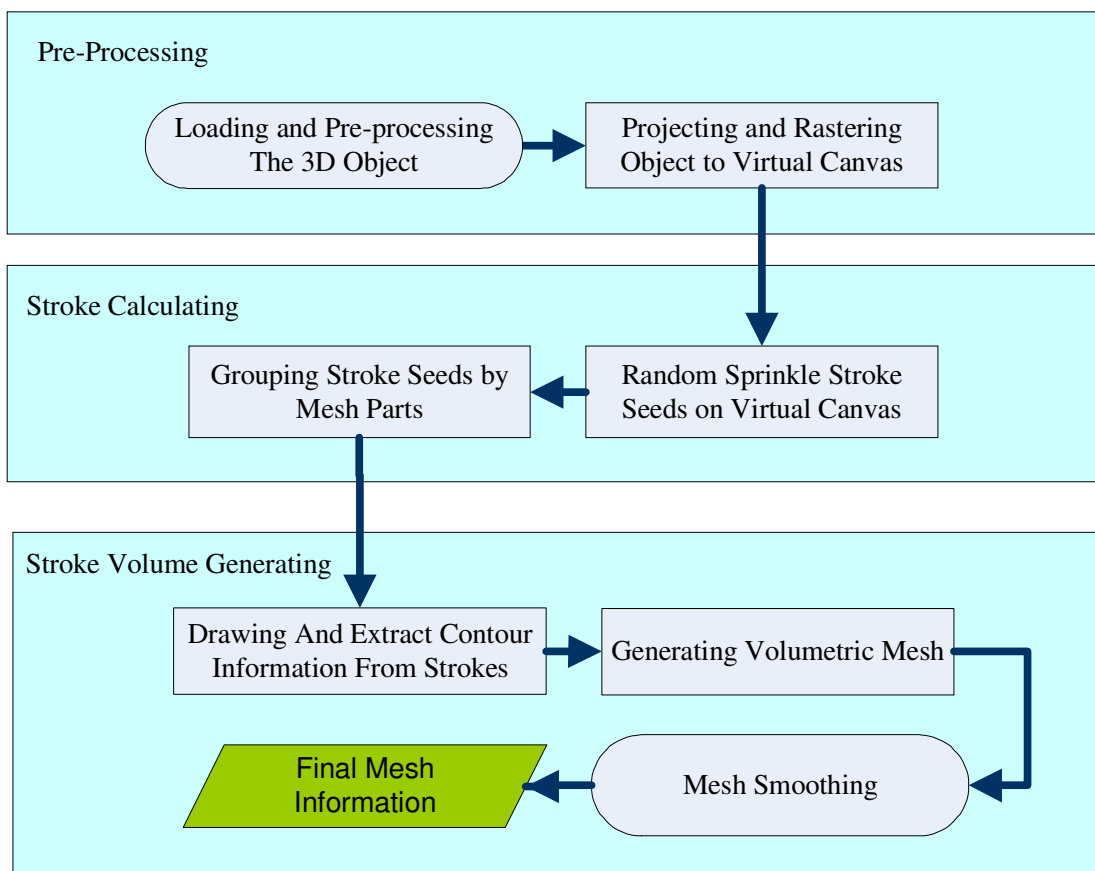
在相關三維非擬真成像系統裡，主要針對水彩、素描和中國水墨畫等的模擬與繪製，著點眼在於風格呈現。因此，對於顏料堆疊效果並沒有特別處理。意即只模擬物件繪製時只專注於顏色的呈現，而對顏料的堆疊起伏特性沒有進一步處理。

綜合上述原因，我們提出一個結合二維與三維非擬真成像的概念，納入二維非擬真成像系統中處理顏料體積的手法，以及三維非擬真成像系統精確呈現物件特性的優點，以求更精確地模擬顏料體積應有面貌。

第三章 研究方法

目前 NPR 系統處理筆觸時因種種因素，幾乎從頭到尾只用單一筆觸來繪製，形成筆觸過於均一化(Uniform)，導致畫出來每個筆觸高低起伏感覺都很類似，作品呈現出來感覺不自然。為解決這個問題，我們希望能將筆觸在繪製時以較非均一化(Non-Uniform)外觀呈現。因此，我們套用 Yang[12]筆觸合併與 Gallarotti [9]、Igarashi[21] 網格生成和概念來處理筆觸生成，進而產生模擬顏料體積的網格(Mesh)。

以下資料為本研究的主要流程：



圖片 20 - 系統流程圖

主要流程可以分為「三維模型資訊的前置處理」、「筆觸的計算與繪製」、「筆觸體積的生成」三部份，接下來將分別在後續討論。

第一節 三維模型資訊的前置處理

第一小節 資訊彙整

本系統中使用 Direct3D 的 X-file 作為資料的儲存格式。X-file 資料格式優點為具有階層特性物件關係。每一物件包含各自群組名稱、頂點作標、引點索引、法向量、UV 貼圖座標、骨架(Bone)等還有相關轉置矩陣，能夠相當提供完善地幾何資訊作為筆觸計算的參考依據。

由於 X-file 中頂點資訊為非具唯一性(non-unique)特性，若沒有經過整理與剔除多餘頂點步驟而直接使用，將會大量消耗不必要系統運算資源。因此，為讓資料更適於本研究系統使用，在前置處理的部分增加一個 Data Adapter，將 X-file 檔案資料轉換成本研究用的資料結構。

我們將場景中所有物件匯入整理成一份頂點清單，並將群組關係及三角片特性交由三角片清單來管理。其中包含了索引資訊，群組資訊，骨架資訊等。

(A) 頂點資訊(Vertexes Data)：由於 Maya / 3DsMax 轉換 X-file 頂點資訊皆不具有唯一性。必須先做過一次資料篩選以及建立 Replace Table 更改其 Index 參照資訊之後，才能將具有唯一性的頂點資訊填入 Vertexes List。

(B) 三角面資訊(Triangle Data)：根據上面 Replace Table 以及物件間 Offset Table 來更新資料資後，輸入到 Index List。

(C) FrameRoot：儲存 Bone 的階層關係以及 Bone 轉置矩陣、頭尾資訊等。

(D) MeshRoot：儲存許多模型的相關資訊如 Material、FrameTransMatrix、Mesh Name、UV 等。Triangle List 可由指標連結來取得相關資訊。

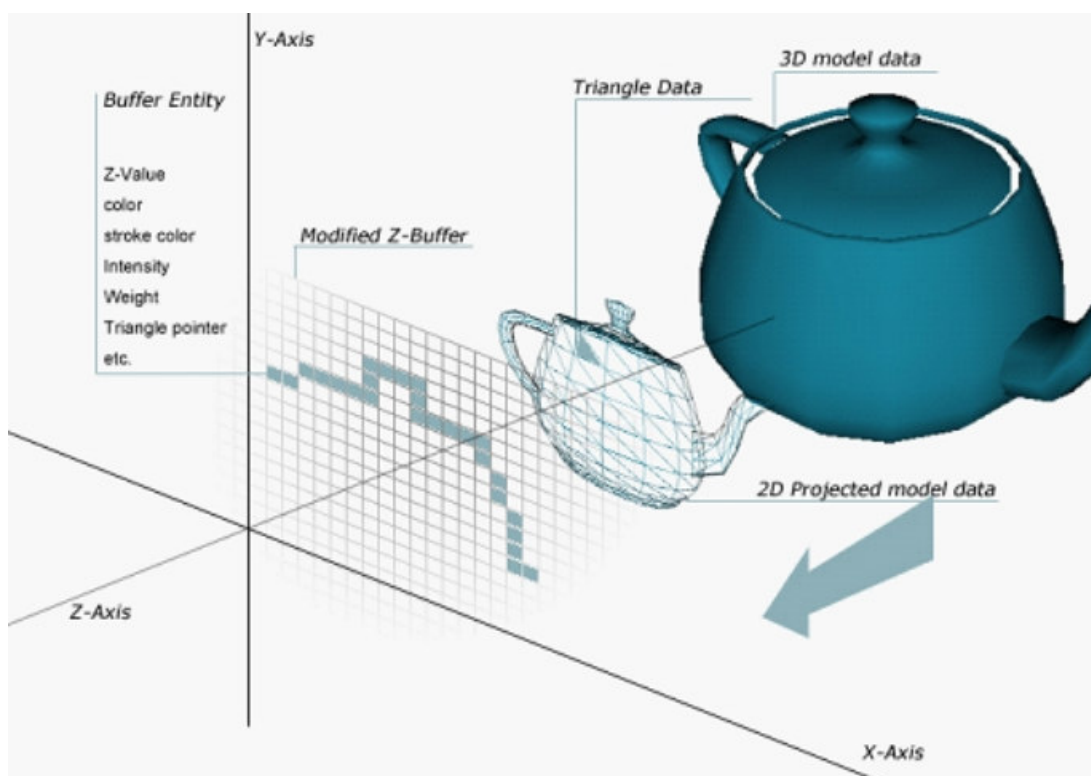
此外，當讀取的 X-file 僅有基本模型資料時，X-file Adapter 負責轉換此類模型資料。模型骨架的有無將決定 Vertex 所需參照的 Matrix。

第二小節 投影計算

為呈現模擬物件繪製效果，將需一個自訂的 Z-Buffer 結構來儲存相關資料，在此我們稱為虛擬畫布。虛擬畫布上儲存經過投影後的模型資訊，以求能夠更精確繪製出預期結果。

虛擬畫布裡每個單位代表螢幕上的像素，裡頭資訊除了有最基本的座標，還有此權重、分類、顏色、筆觸走向等。

接下來，我們經由投影 (Projection)方式將三維模型資訊投射到此虛擬畫布上，然後利用光柵化填色(Rasterization)方式將模型上浮點數頂點資訊座標轉換成螢幕上整數座標，然後作三角片填色，並將上述所提三維模型相關資訊填入虛擬畫布中。整個流程大致上如圖片 21



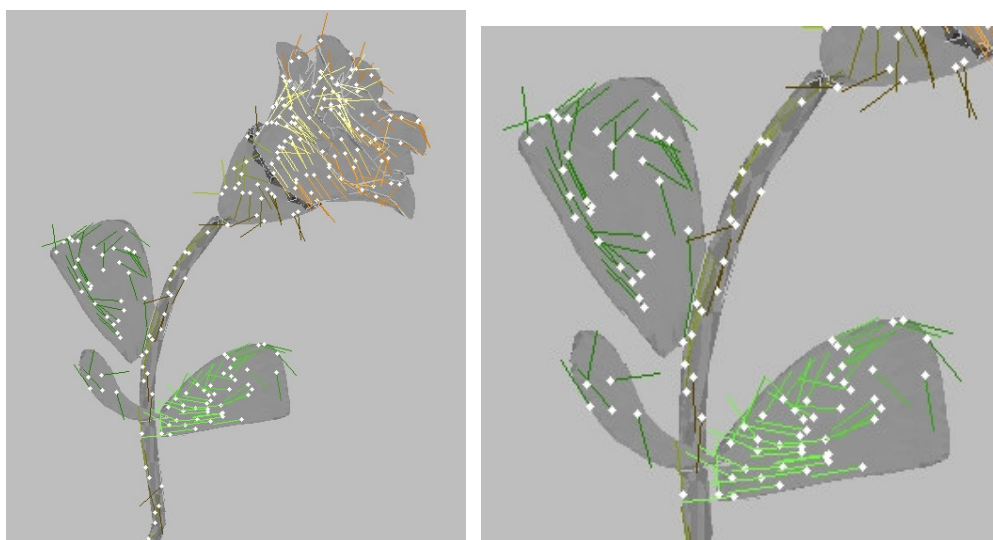
圖片 21 - 透視投影示意圖

第二節 筆觸的計算與繪製

第一小節 隨機決定落筆處

經過投影後，我們亂數灑上筆觸繪製點(Seed)，繪製點會依照投影到的 Mesh 資訊作顏色計算和筆觸向量(Stroke Vector)計算。當 Seed 落點離物件輪廓(Contour)愈近時，本身帶的權重值愈高，且筆觸向量與輪廓的切線方向愈平行；反之亦然。

以圖片 22 為例，圖中白色點為下筆處，畫筆會使沿著筆觸向量方向往正反兩端繪出。過程中若繪製到不同物件上時便會停止繪畫。例如，繪製葉子時若筆觸超過邊界(Contour)或畫到枝幹上時，便會停止繪製。



圖片 22 - 隨機灑上筆觸繪製的 Seed 示意圖

第二小節 合併筆觸

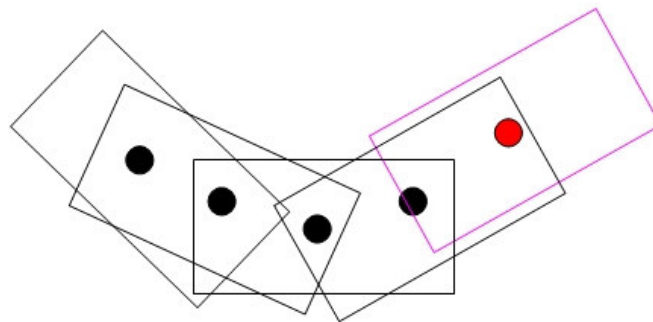
畫作場景通常由許多物件構成，且畫家在繪製時，會因為物件遠近、顏色構成而有不同下筆順序。就下筆的習慣，考量先後順序因素主要有二：一為物件輪廓，二為顏色深淺明暗。本研究中採用物件輪廓作為下筆順序決定因素。

先前研究中，模擬筆觸方法為在畫布物件中亂數灑上 seed，再以光源、seed

與物件輪廓相對關導算出 seed 所對應筆觸的向量。但 seed 為亂數灑上，彼此之間並無先後順序，為模擬前述以物件輪廓作下筆順序，因此以 seed 與物件輪廓線的相對位置為基準給予每個 seed 權重值。此權重可用來決定繪畫物件時的順序。

seed 權重大小計算為取 seed 週圍最接近輪廓點之距離。距離越近權重越小；反之則權重越大。由於油畫由於顏料和畫筆的特性，導致繪製筆製時常有貌似多條筆觸疊合的痕跡。為實作出這種筆觸，我們以先前給予各筆觸權重為基礎，先對筆觸做分組動作。

首先，依權重大小對所有 seed 做排序，從權重小者開始挑選。取得 seed 中心後，根據筆觸向量畫出一長與寬比例為 1.618 的黃金長比例方形。若該 Seed 與其他 Seed 長方形有相交時則將該 Seed 歸為同群組。如此重複循環，直至沒有 seed 長方形與挑選到的長方形相交為止。此步驟重覆施行，直至 seed 皆有歸屬群組為止。其概念如圖片 23 所示。



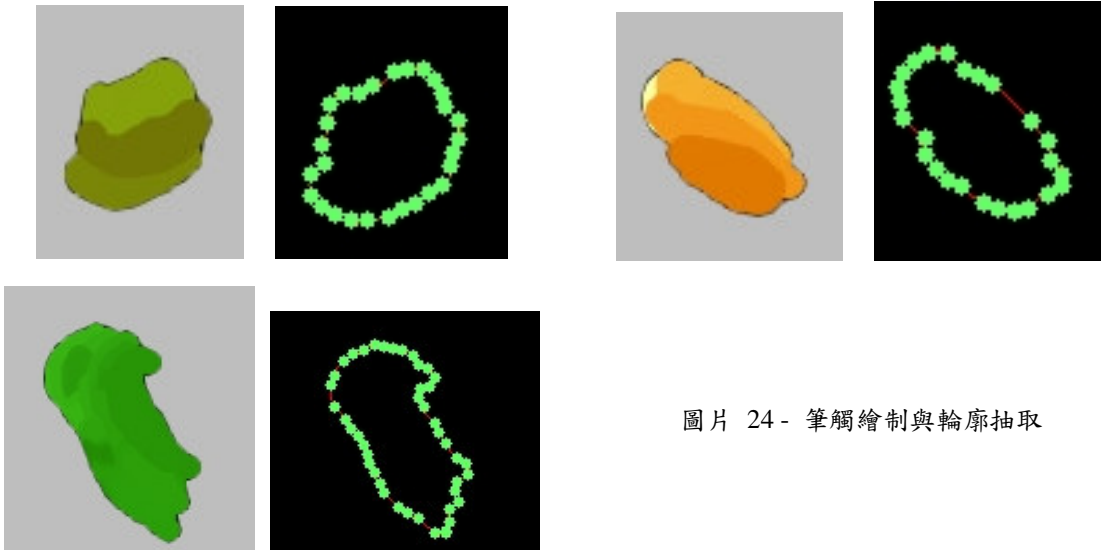
圖片 23 - 合併筆觸的概念

第三節 筆觸體積的生成

第一小節 繪製筆觸

所有 Seed 經過分群後，即決定好繪制的先後順序；依序繪製筆觸後，套用數位影像處理中數學形態學(Mathematical morphology)的 closing 運算來取得更平

滑筆觸範圍。接下來，再用輪廓截取(Contour Extraction)方式將各別群組所繪製過筆觸範圍輪廓控制點抽取出，待下一步進行筆觸體積生成時使用。其概念如圖片 24。



圖片 24- 筆觸繪制與輪廓抽取

第二小節 產生網格資訊

首先，將上一個步驟中取得輪廓資訊輸入限制性迪勞尼三角形(Constrained Delaunay Triangulation – CDT)，並將所有輪廓設為限制邊(Constraint Edge)，然後開始進行三角化手續，再依續取出輪廓內三角形作運算。

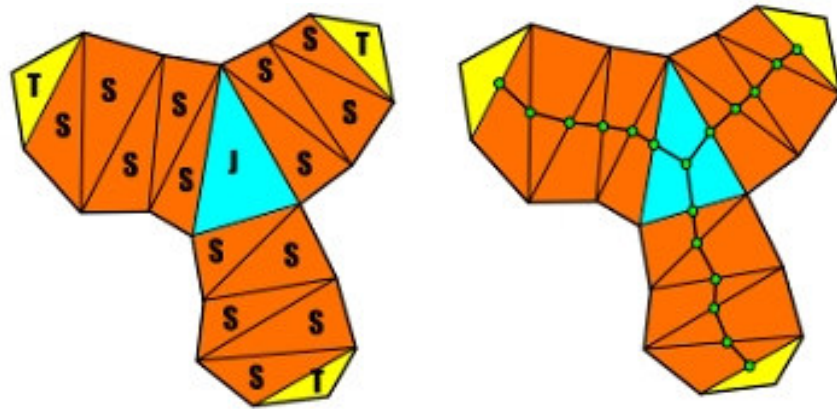
接下來，為了取得該輪廓的骨架(Spine)，必須先將所有三角片進行分類。分類原則如下表：

三角型類形	特性
T - Terminal	該三角片上有兩個限制邊
S - Sleeve	該三角片上有一個限制邊
J - Junction	該三角片上沒有限制邊

再來，依照下列原則在各三角片上新增線段：

三角型類形	動作
T	不新增任何線段
S	新增一個由非限制邊中心點連至另一非限制邊中心點的線段 (Non-Constraint Edge Center to Non-Constraint Edge Center)
J	由三角片中心點連至三個非限制邊的中心 (Triangle Center to Non-Constraint Edge Center)

進行三角片性質分類與取得骨架線連線後結果如圖片 25。



圖片 25 - 分類三角片後取得骨架

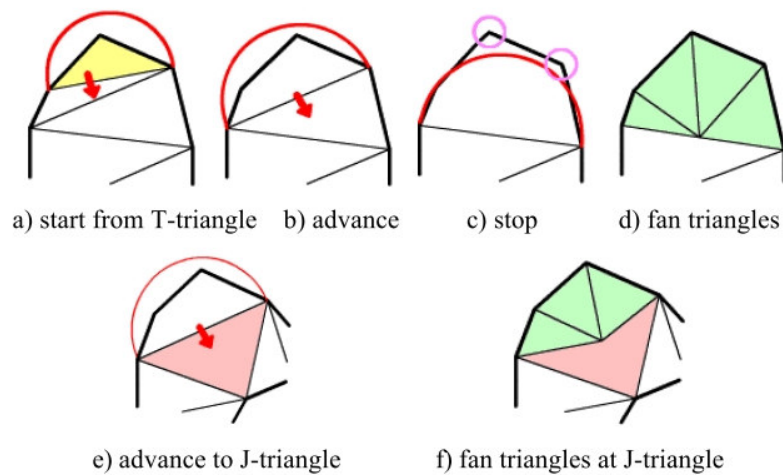
取得骨架線後，下一步要進行網格(Mesh Generation)生成。為了讓生成後的網格更平順，必需要先將 T 類三角片處轉化成扇形三角形(Triangle Fan)。否則，後續作網格資料點內插(Interpolation)時會造成許多凹凸不平的區塊。

轉化扇形三角形步驟如下：

1. 從 T 類三角形開始往內(Internal)走訪(Traverse)：取三角片上未被拜訪過的非限制邊長度為直徑，以該非限制邊中心為圓心並畫半圓。判斷先前走訪過的點頂是否都被包含在該半圓內。
 - a) 若是，將該非限制邊移除，並繼續拜訪其相鄰的三角形，重複方才的半圓測試。

2. 半圓範圍測試動作會持續至達成下列其中一條件為止：
 - a) 半圓測試時發現有一個以上的頂點落在範圍外或遇到 T 類三角形。
 - i. 從最後一個停留的非限制邊中心點，新增線段至方才所有以走訪三角片頂點上。
 - b) 遇到 J 類三角形
 - i. 從 J 類三角形的重心點新增連線至方才所有以走訪過的三角片頂點上。

整體部驟與結構如圖片 26。



圖片 26 - 扇形化三角片的步驟

建立完扇形三角片後，接下來要進行邊的置換(Edge Swap)。

Chen[20]指出「我們要求子區域中的每個三角形必須有兩個邊是連接輪廓線與骨架線，而以正常的 Delaunay 三角化後會有兩種情況不合此規定...對紅色區域進行邊替換...」。因此，在建立網格之前，我們先需將這些不符合規定的三角片進行邊的替換。

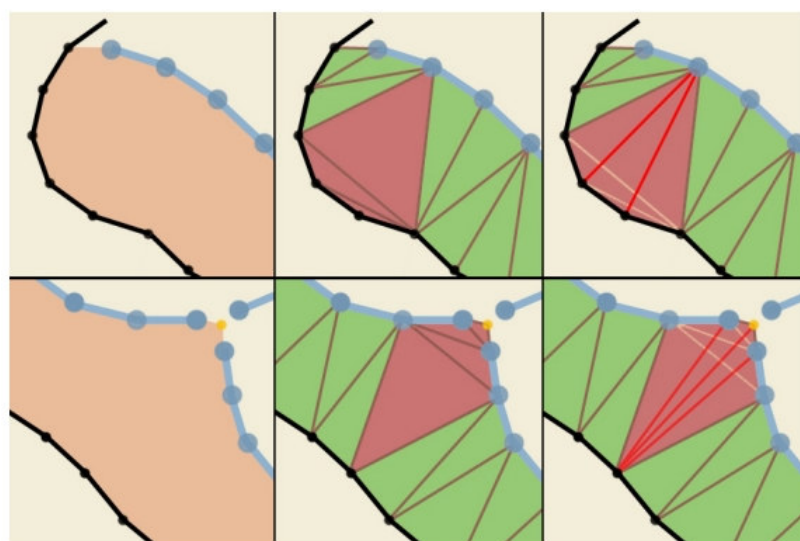
為了施行這個步驟，需將這些不符合規定的三角片挑出來。實驗後發現，這

些不符合規定的三角片恰好皆在J類三角片的週圍。因此，我們將再對於此網格重新分類並給予每個T、S、J等標記，然後從J類三角形開始走訪。

步驟如下：

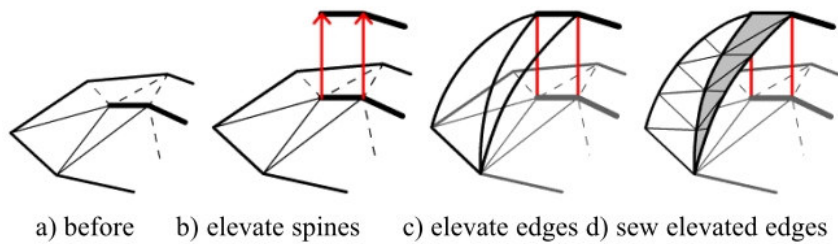
1. 依據頂點數量與型態判斷走訪方向：
 - a. 三角片上有一個骨架點與兩個輪廓點—往外(External)走訪。
 - b. 三角片上有兩個骨架點與一個輪廓點—往內(Internal)走訪。
2. 依走訪方向投射出一直線作 Line Walk，將有被標記到的三角片記錄起來，表示這些三角片皆需要進行邊的置換(Edge Swap)。
3. 將走訪過的三角片以佇列的方式儲存起來，當所有標記完的三角片後，依先進先出(FIFO)的順序進行邊的置換。

此一置換程序我們以迭代方式進行。當網格內不存在任何J類三角片或者此回合中沒有邊被置掉換時即停止。概念如圖片 27。



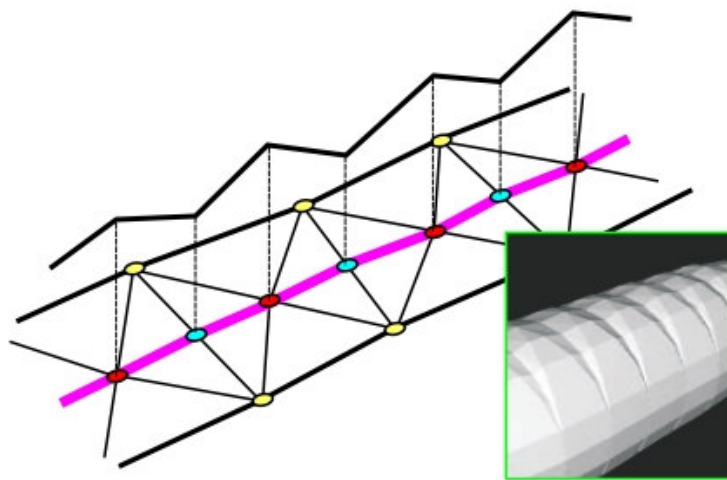
圖片 27 - 邊替換(Edge Swapping)示意圖

當所有三角片皆修正完後，接下來要進行提高骨架線。首先，我們在每一個骨架線點上環繞一圈，取該點至每個輪廓點的平均距離當作點高度。概念如圖片 28。



圖片 28 - 將骨架線依等比高度提起示意圖

Francesco[9]指出依 Igarashi[21]方法直接取平均當作高度後，會在骨架線上產生鋸齒狀般現象。原因是如下圖中，骨架線處紅色點和藍色點，它們與輪廓點連線的線段數量不一致。從如圖片 29 中可明顯可看到紅色點的輪廓連線多為斜線，而藍色點的線連為直線居多，導致使平均距離差異過大而造成骨架線忽高忽低、鋸齒狀的外觀。



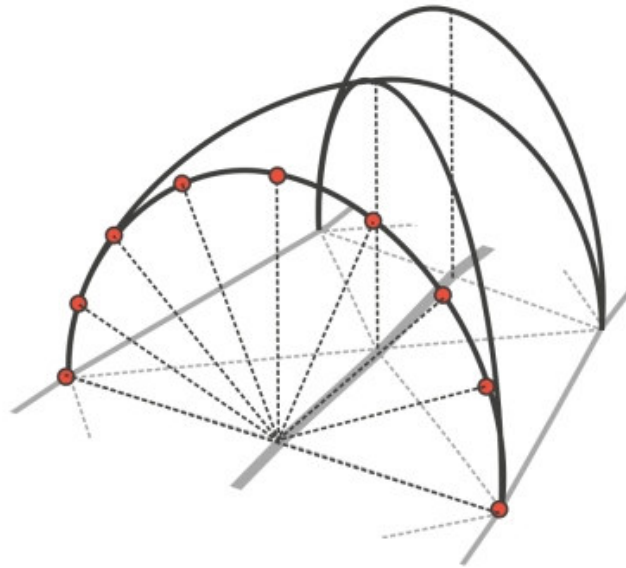
圖片 29 - 因入射點數量不一所造成的鋸齒狀骨架示意圖

針對這個問題，Francesco[9]指出其藍色骨架線點高度取入射點(incident)至輪廓點的頂點平均距離。這方法在取點時需作進一步走訪才能完成。在此以較直觀方法替代：直接取其相鄰兩個較高的骨架點作高度平均。也就是當發現某個骨架線高度皆低於週圍鄰接點時，則取其相鄰點平均高度。下圖為修正後的結果，可以看見在骨架線上網格較為平整。如圖片 30。



圖片 30 - 修正後的骨架示意圖

取完骨架線高度後，接下再對所有與骨架線有連線的邊進行高度內插：其高度計算採用橢圓公式代入。如圖片 31，骨架線處高度為方才取平均距離，而最外圍的高度為零，中間切成數等分後內插入資料點。內插資料點時，根據筆觸對應至座畫布標上，將畫布上顏色資訊填入該頂點內，並計算每個頂點的法向量，以求網格產生出來後能符合筆觸應有的外觀。



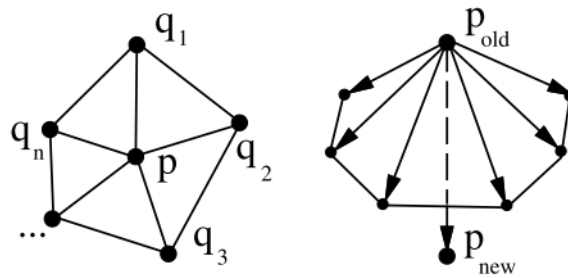
圖片 31 - 在每個與輪廓的連線上依圓的比例內插入資料點

步驟至此，已能依筆觸範圍產生出對應的筆觸網格。為求網格平整，最後再

進行簡單地網格平滑化手續。

第三小節 網格平滑化

為求平滑化，我們採用 Belyaev[4]的傘狀運作 (Umbrella operator) 修正。概念如圖片 32，也就是任意點 p 的修正幅度與其相鄰點 q 平均距離有關。



圖片 32 - 傘狀運作修正示意圖

計算方式如下：

$$P_{new} \leftarrow P_{old} + \lambda U(P_{old})$$

$$U(P) = \frac{1}{n} \sum_i Q_i - P$$

式子中 λ 為修正幅度參數，該值愈小，每次平滑化後修正的幅度愈小；反之亦然。此平滑化為一迭代程續，籍由數次迭代過程中不斷修正每個頂點與其鄰接點的差異值。

經由數次的修正之後，即可得到具有體積且較平滑地筆觸網格。

第四章 實驗成果與討論

第一節 實驗成果

本章裡我們附上真實藝術家的創作，和先前手法的原始繪出參考圖，以及本研究手法的模擬厚塗法最終提供參考比較。

生成最終圖像時，採用 Gouraud Shading 進行渲染，並加上光源照明和 Stencil Shadowing 陰影生成效果，力求模擬出符合真實環境裡中的畫作。結果如下列附圖。



圖片 33- 花 - 真實畫作



圖片 34 - 花 - 模型原始輸出圖



圖片 35 - 花 - 模擬體積效果輸出之一



圖片 36 - 花 - 模擬體積效果輸出之二



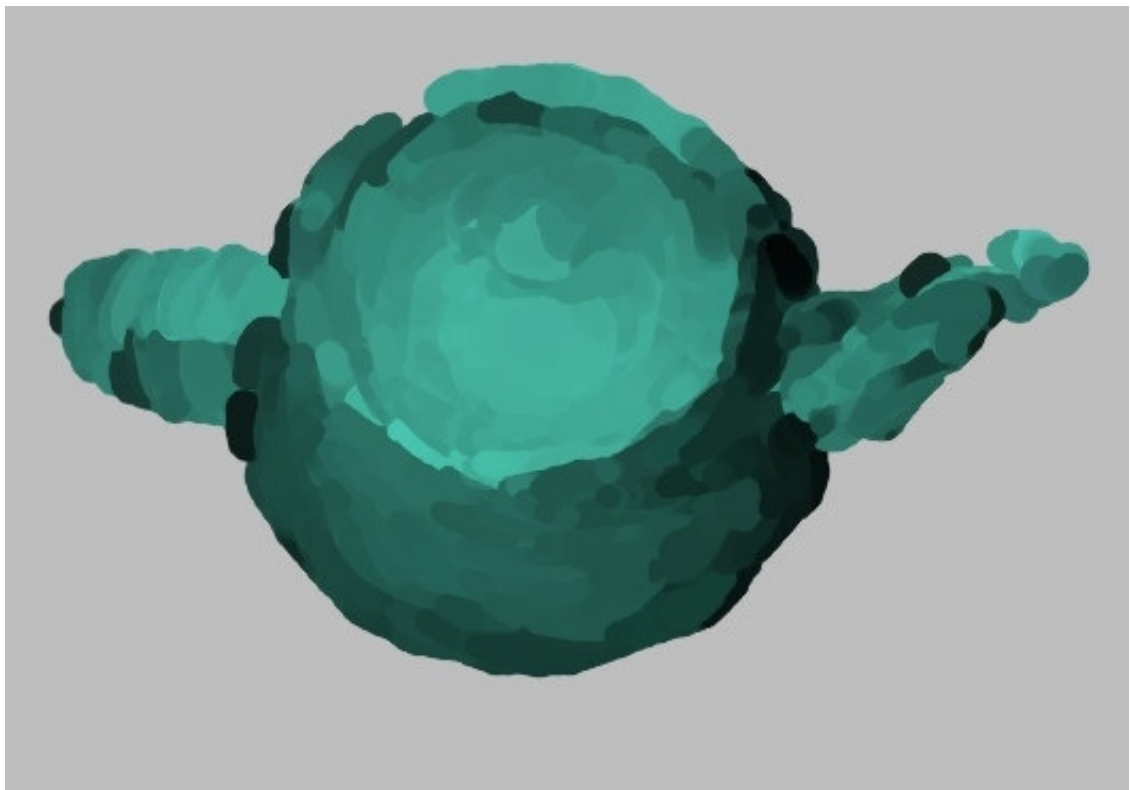
圖片 37 - 花 - 模擬體積效果輸出之三



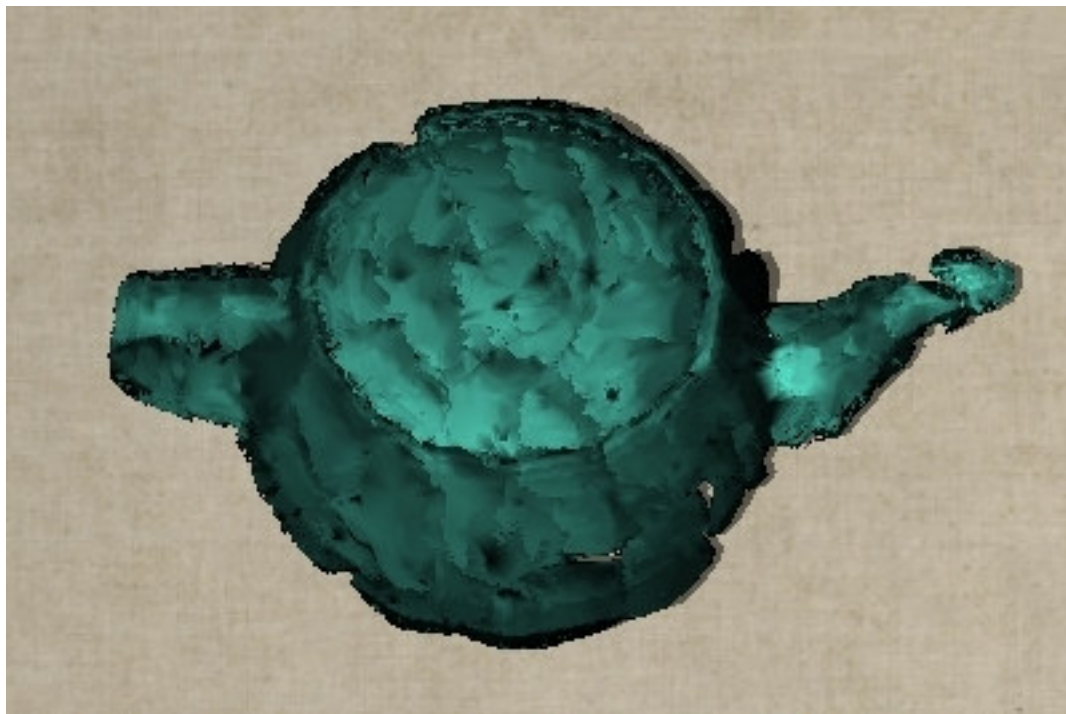
圖片 38 - 花 - 模擬體積效果輸出之四



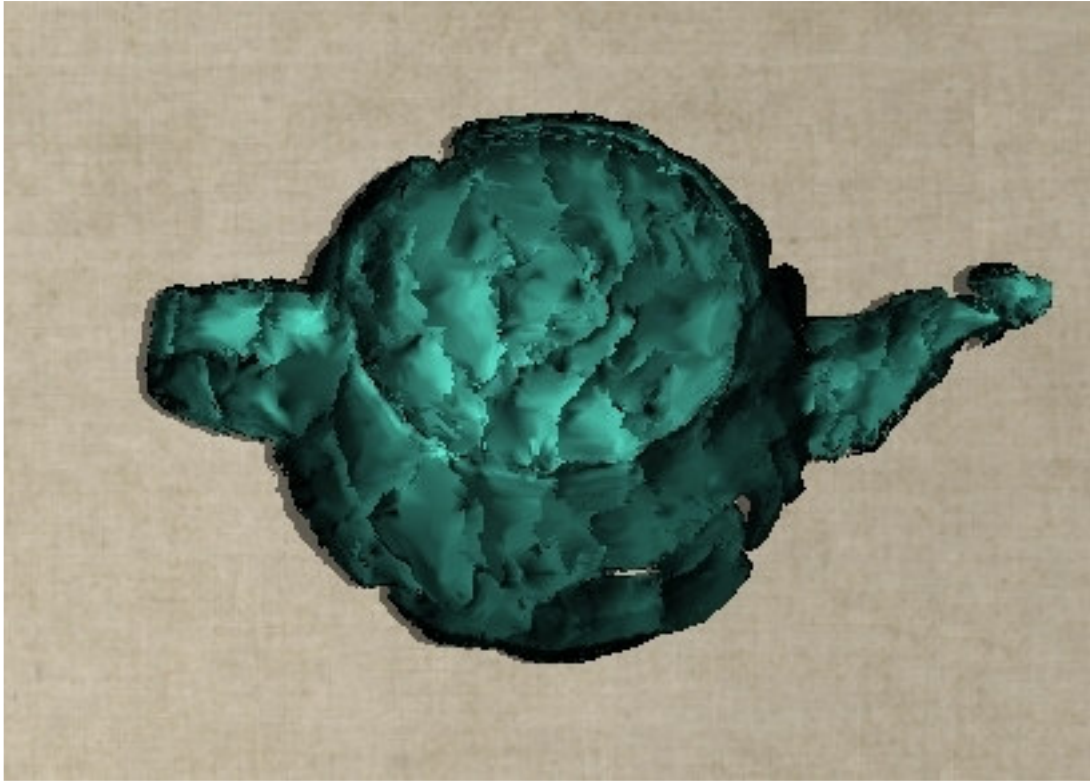
圖片 39 - 花 - 模擬體積效果輸出之五



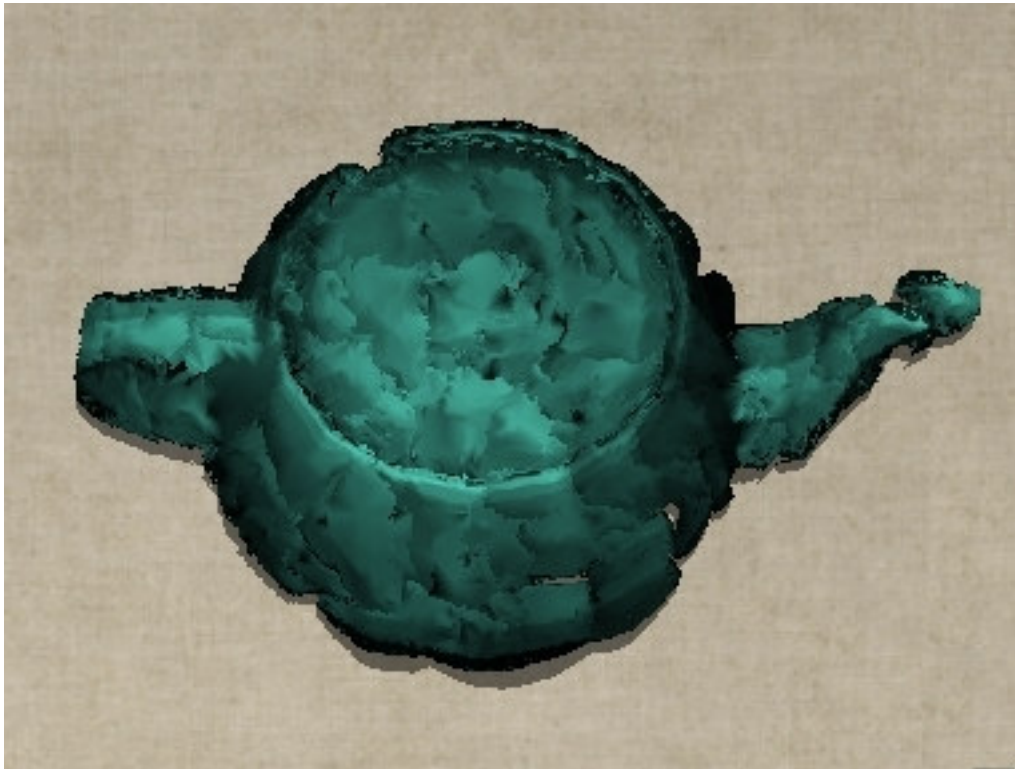
圖片 40 - 茶壺 - 模型原始輸出圖



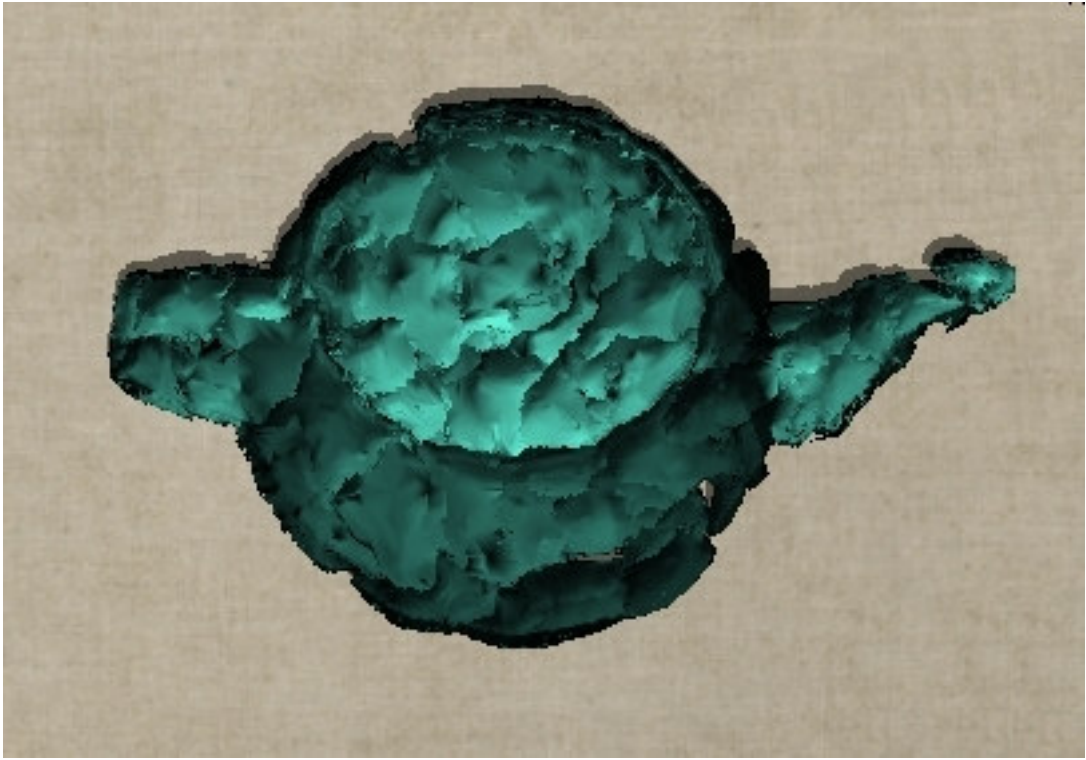
圖片 41 - 茶壺 - 模擬體積效果輸出之一



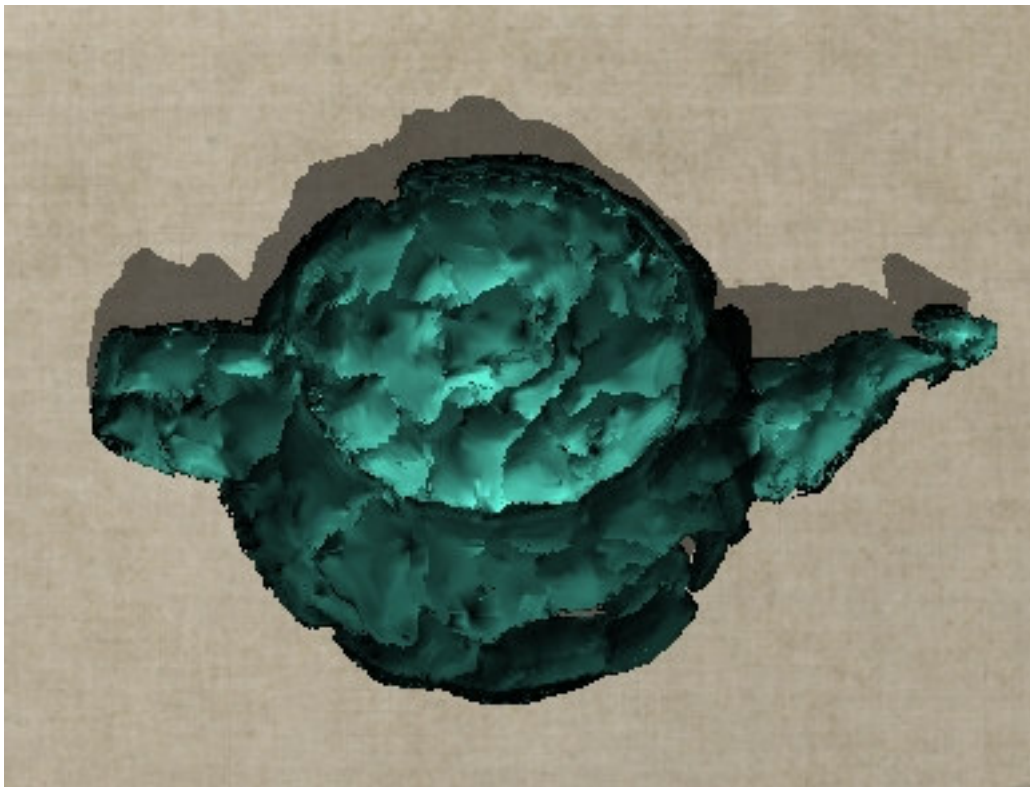
圖片 42 - 茶壺 - 模擬體積效果輸出之二



圖片 43 - 茶壺 - 模擬體積效果輸出之三



圖片 44 - 茶壺 - 模擬體積效果輸出之四



圖片 45 - 茶壺 - 模擬體積效果輸出之五

第二節 問卷調查與討論

為了評估本研究中提出手法的成效，我們設計了兩份問卷。問卷內附上平塗渲染法與體積模擬法所生成的圖像各一。受訪者觀看圖像後填選出與印象最符合的選項。詢問內容有體積視覺效果觀感的認同程度、創作媒材類型的歸納等，內容如附錄。

問卷一共回收 24 份。答題狀況如下列附表。

作品一(花) - 問卷各題勾選次數

題號	選項				
1	非常同意 14 次	同意 10 次	傾向於同意 0 次	不同意 0 次	非常不同意 0 次
2	鉛筆畫 0 次	水彩畫 0 次	黏土浮雕 10 次	油畫 14 次	CG 影像 0 次
3	非常同意 4 次	同意 7 次	傾向於同意 5 次	不同意 6 次	非常不同意 2 次

作品二(茶壺) - 問卷各題勾選次數

題號	選項				
1	非常同意 14 次	同意 9 次	傾向於同意 1 次	不同意 0 次	非常不同意 0 次
2	鉛筆畫 0 次	水彩畫 0 次	黏土浮雕 10 次	油畫 14 次	CG 影像 0 次
3	非常同意 4 次	同意 9 次	傾向於同意 3 次	不同意 6 次	非常不同意 2 次

各題勾選率如下。

作品一各題勾選率

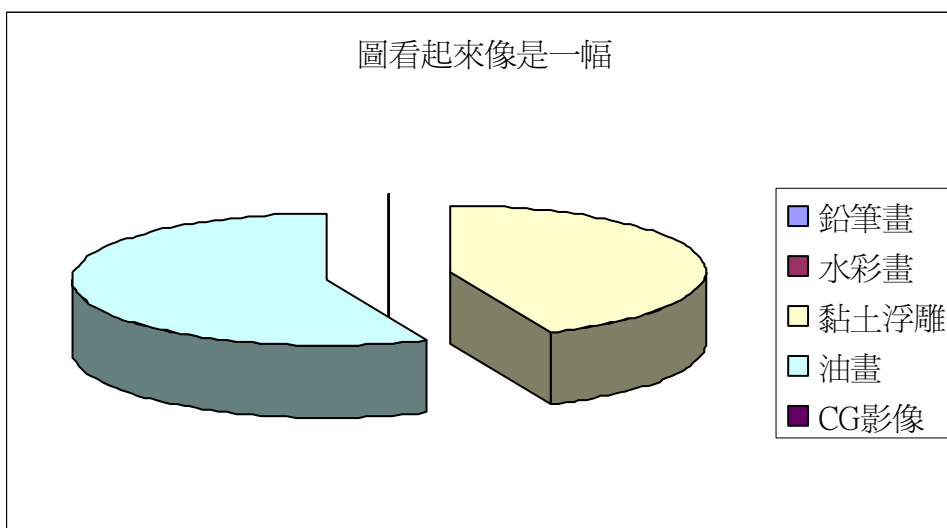
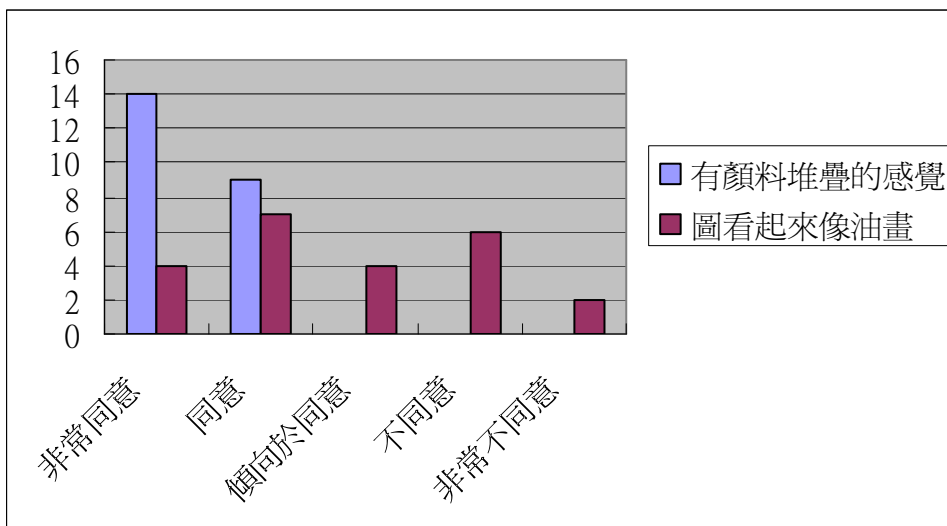
題號	選項				
1	58.3%	41.7%	0.0%	0.0%	0.0%
2	0.0%	0.0%	41.7%	58.3%	0.0%
3	16.7%	29.2%	20.8%	25.0%	8.3%

作品二各題勾選率

題號	選項				
1	58.3%	37.5%	4.2%	0.0%	0.0%
2	0.0%	0.0%	41.7%	58.3%	0.0%
3	16.7%	37.5%	12.5%	25.0%	8.3%

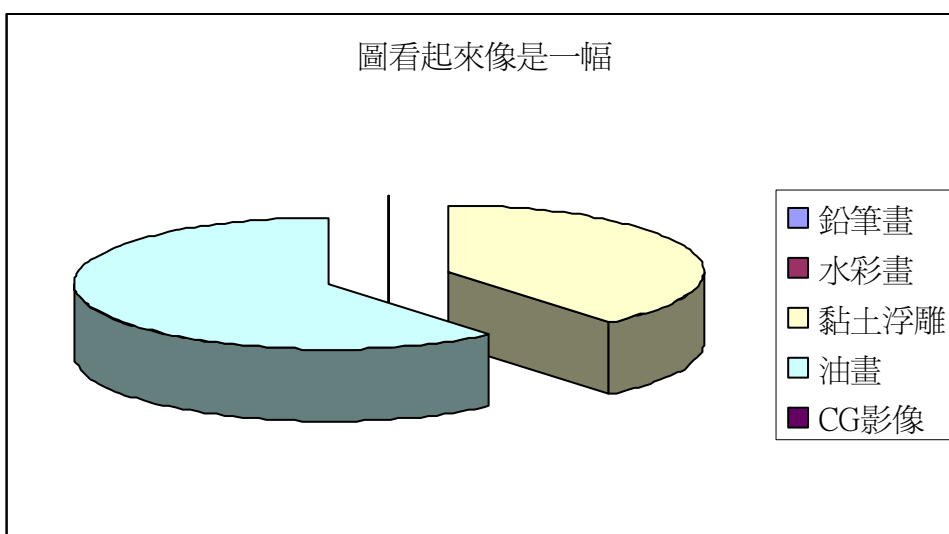
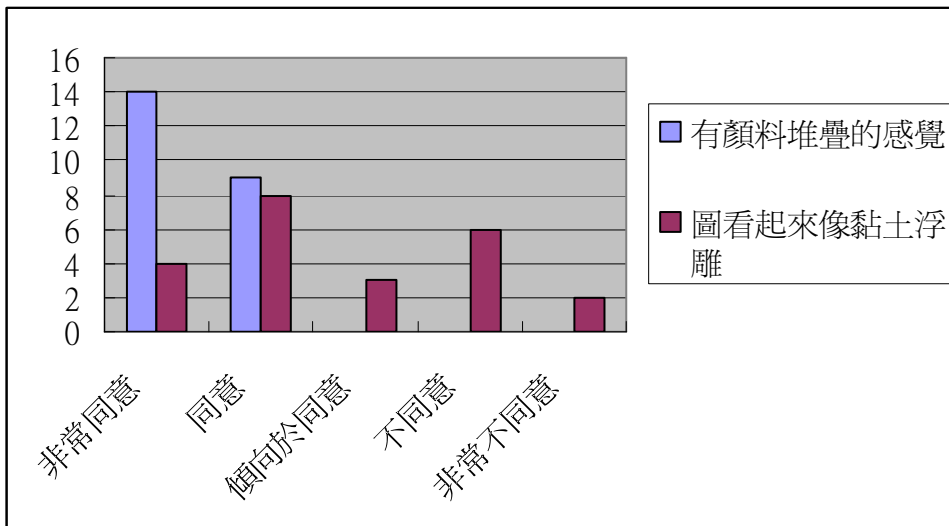
在作品一部份，從下表中可以看到受訪者對於該畫作所呈現的體積視覺感多有正向的評價。但是問到該畫作是否像油畫時，可以看到覺得像油畫與像黏土雕塑的兩方人數各佔一定比例。

作品一(花)狀況



在作品二部份，也是如同作品一的答題狀況。受訪者多覺得畫作作品的體積視覺效果是很明顯的。覺得該畫作像油畫或黏土雕塑的人也是各佔一定比例。

作品二(茶壺)狀況



經過交叉比對後得知受訪者一致同意兩幅畫作所呈現的體積感，這說明經由本實驗手法所生成的畫作是具有體積視覺效果的。

但同一幅具有體積感的畫作在受訪者看來，該畫作媒材是屬於油畫或黏土浮雕之間並沒有明顯地區別。經檢討後認為，在未來工作上有必要對於這些油畫顏料或者黏土浮雕材質表現上作加強。例如：畫作材質、筆觸、顏料等，要更精確的掌握到它們應有的特性，以期望能讓受訪者明確分辨油畫作品與黏土浮雕作品間的明顯差別。

此外，我們對於油畫的印象通常是一整幅完整的畫作—有主體與背景；而紙黏土之類的浮雕通常是單一的物件。在我們用來作測驗的實驗成果中，標的物皆為不帶背景的唯一物件。這對於受測者來說也是一個影響他們對油畫與紙黏土的判斷的重要因素。因此，在後續的工作上期望能將模擬的手法推展到具有背景的物件上、甚至是整個場景。

第五章 結論與未來展望

本研究整合三維模型為基底非擬真成像系統和筆觸建模概念，使用者可以將自行建置的三維模型檔轉換、輸出成帶有厚塗法或者似黏土雕塑視覺效果的作品。在問卷的輔助下，我們確信本研究提出手法的確能強化畫作作品的體積視覺感，強化非擬真成像的原始用意—「提供創作參考而非取代創作者」，提供使用者在創作過程中不同層面的參考依據。

為求後續能提供更擬真的畫作，在體積模擬、網格平滑程度等面項還有許多可以改進的地方。

首先、體積模擬時採取類似直接擠顏料至畫布上方式來作顏料的堆疊。但此方式並不完全符合真實物理模型，較精細的力學模擬還有待改良後導入。例如顏料量、顏料的水含量、筆刷的力道、下筆的方向、顏料的推擠、顏料混合等物理特性考慮進去，以求更精確的繪畫結果。

接著，模型本身在輸出時其本身的平滑度還有待改進，若能進一步導入二次曲面逼近針對整個網格進行適度的內插的話，相信可以再進一步的改善網格的視覺效果。

若能克服上述問題，不僅是計算機圖學領域裡一個重大的突破，也更進一步革新透過電腦來輔助創作藝術的可能性。

第六章 參考文獻

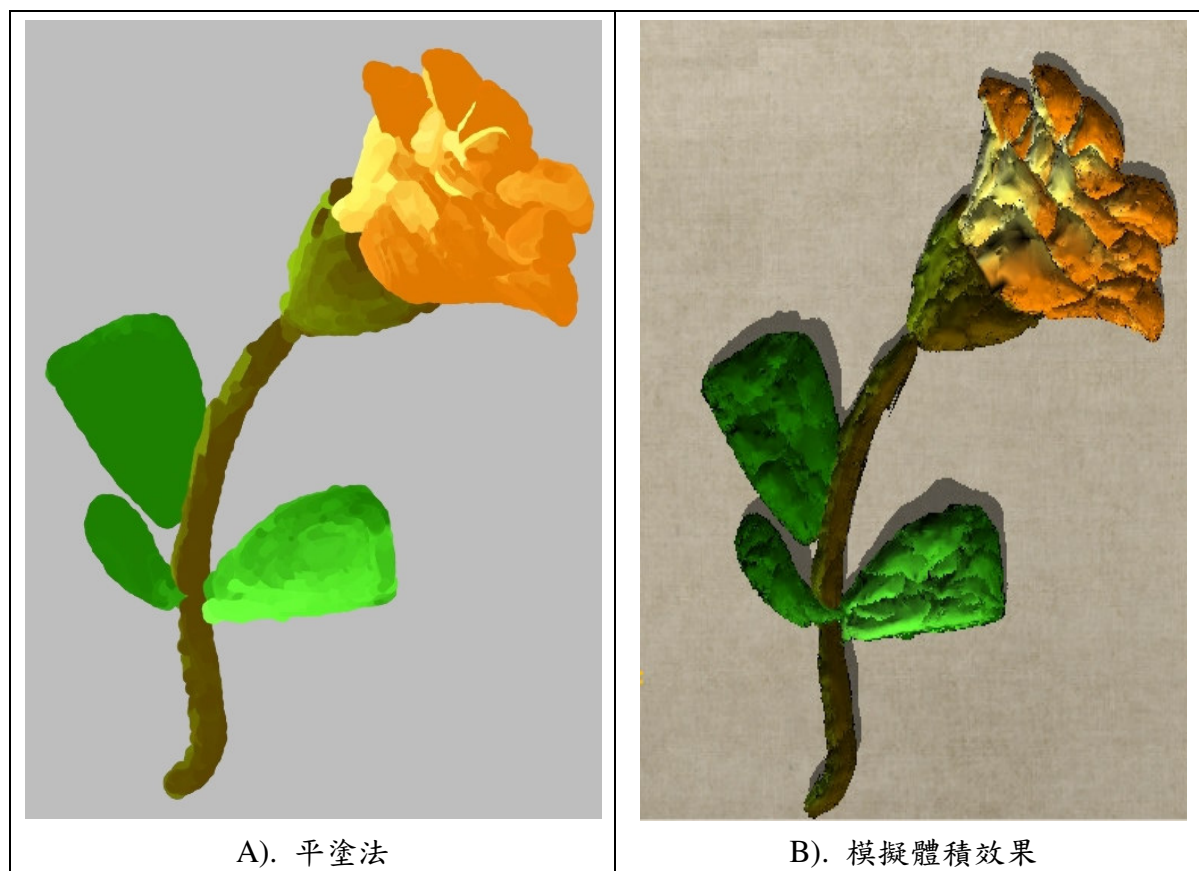
1. Aaron Hertzmann, "Painterly Rendering with Curved Brush Strokes of Multiple Sizes", SIGGRAPH 98, 1998, 453-460, 1998.
2. Aaron Hertzmann, Ken Perlin^L, "Painterly Rendering for Video and Interaction", Proc. of Non-Photorealistic Animation and Rendering 2000, 2000.
3. Aaron Hertzmann, "Fast paint texture". Proc. of Non-Photorealistic Animation and Rendering 2002, 91 - 96, 2002.
4. Alexander Belyaev, "Mesh Smoothing and Enhancing. Curvature Estimation", 2006.
5. Cheng-Tseng Ling, "Automatic Generation of Pencil Sketch Drawing from Photos", National Chiao Tung University, Master thesis, 2005.
6. Chi-Cheng Chen, "Automatic Generation of Pencil Sketching with the Effects of Paper Texture", National Chiao Tung University, Master thesis, 2005.
7. David Bourguignon, Raphaëlle Chaine, Marie-Paule Cani, George Drettakis, "Relief: A Modeling by Drawing Tool" , EUROGRAPHICS Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling (2004), 2004.
8. Fabio Policarpo, Manuel M. Oliveira, João Comba. Real-Time Relief Mapping on Arbitrary Polygonal Surfaces. ACM SIGGRAPH 2005 Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, Washington, DC, April 3-6, 2005, pp. 155-162.
9. Francesco Gallarotti, "Constructing 3D geometry through user sketch", State University of New York at Stony Brook , Course Final Project, 2004.
10. Hsuan-Ming Chen, "Non-Photo-Realistic Illustrations with Artistic Style", National Sun Yat-sen University, Master thesis, 2003.
11. Jimmy Lin, "Shape-Oriented Brush Stroke Synthesis in Non-Photorealistic Rendering", National Chi-Nan University, Master thesis, 2006.
12. Jun-Lan Yang, "Simulating the Oil Painting in an NPR 3D Animation System", National Chi-Nan University, Master thesis, 2007.

13. Johan Henry, Matsui Hajime, Haga Toshiyuki, Dobashi Yoshinori, Nishita Tomoyuki, "A Method for Creating Region-Based and Stroke-Based Artistic Images", The transactions of the IEICE. Vol.J88-D-II, pp. 358-367, 2005.
14. Johan Henry, Hashimoto Ryota, Nishita Tomoyuki, "Creating Watercolor Style Images Taking Into Account Painting Techniques", The Society for Art and Science, Vol.3 No.4 pp.207 - 215, 2004.
15. Keiji Kawasaki, Koji Nakamaru, Yoshio Ohno, "Generation of Stroke Direction for NPR and Its Application to Suiboku-ga Style Rendering", The Society for Art and Science, Vol.3, No.4 pp. 235-243. 2004.
16. Oliveira, Manuel M., Gary Bishop, David McAllister. Relief Texture Mapping. Proceedings of SIGGRAPH 2000 (New Orleans, La), July 23-28, 2000, pp.359-368.
17. Oliveira, Manuel M. Relief Texture Mapping. Ph.D. Dissertation. UNC Computer Science Technichal Report TR00-009, University of North Carolina, March 3, 2000.
18. Qi Zhu, "A Perceptually-Based NPR Framework for Synthesizing", National Chiao Tung University, Master thesis, 2005.
19. Robert D. Kalnins, Lee Markosian, Barbara J. Meier, Michael A. Kowalski, Joseph C. Lee, "WYSIWYG NPR: Drawing Strokes Directly on 3D Models", SIGGRAPH 2002, 2002.
20. Shyun-Ren Chen, Tong-Yi Lee, "Stroke-based modeling and Animation from a Single Image", National Cheng-kung University, Master Thesis, 2005.
21. Takeo Igarashi, Satoshi Matuoka, Hidehiko Tanaka, "Teddy: A Sketching Interface for 3D Freeform Design", SIGGRAPH 99, 1999.
22. Takeo Igarashi, John F. Hughes, "Smooth Meshes for Sketch-based Freeform Modeling", ACM Symposium on Interactive 3D Graphics, ACM I3D'03, Monterey, California, April 27-30, 2003, pp.139-142.
23. Xiaoyang Mao, Yoshiyasu Nagasaka, Shigefumi Yamamoto, Atumi Imamiya, "Automatic Generation of Pencil Drawings Using Line Intergral Convolution", The Society for Art and Science, Vol.1 No.3 pp.147-159. 2002

24. Yi-Mu Lu, "Non-Photo-Realistic Illustrations", National Sun Yat-sen University, Master thesis, 2002.
25. Yung-Nien Chen, Ming-Te Chi, Tong-Yee Lee, "Non-Photorealistic 3D Rendering in Chinese Painting Style ", CGW 2003, 2003
26. Zhao Yang, Xu Dan, "Oil Style Image Generation via Fluid Simulation", Journal of Software, Vol.17, No.7, pp.1571 - 1579, 2006
27. 何恆雄, 《雕塑漫遊－藝術欣賞入門手冊－雕塑篇》, 台北：教育部, 2004 年.
28. 柏納, 《目擊者百科－梵谷》, 台北：貓頭鷹出版社, 2006 年.
29. 珮翠西亞·瑟里葛曼, 《油畫基礎法畫》, 台北：新形象出版事業有限公司, 1995 年.
30. 閔致綱 統籌, 《藝術大師世紀畫廊 飽受折磨的靈魂－梵谷》, 台北：閣林國際圖書出版, 2001 年.
31. 謝棟樑, 《雕塑》, 台北：台灣省政府教育廳, 1992 年.

附錄

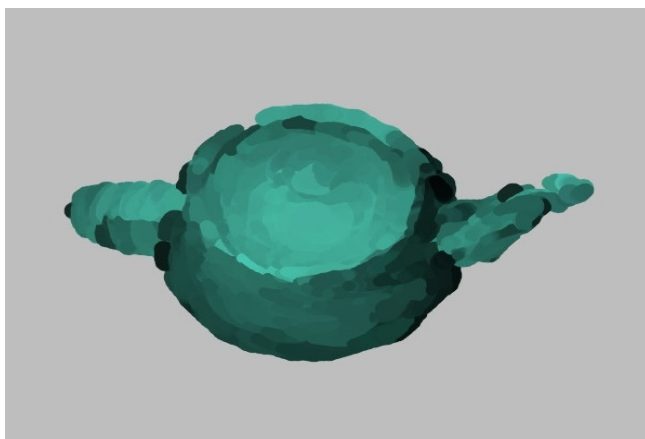
問卷—作品—花



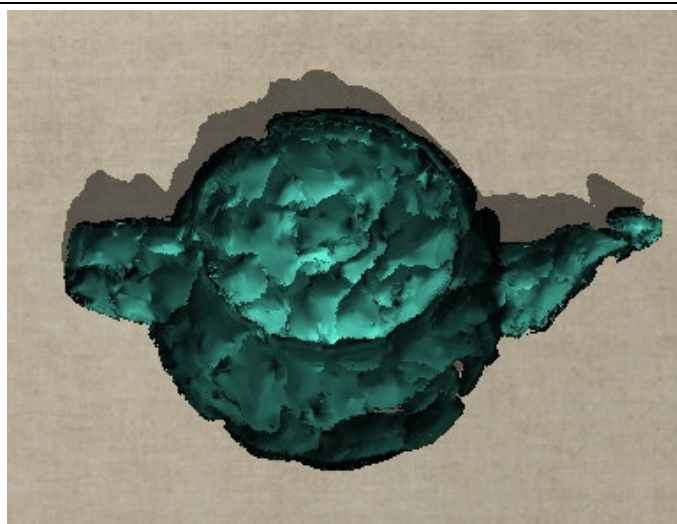
評分項目

項目	選項				
01、圖 B 較圖 A 更有顏料堆疊的感覺	<input type="radio"/> 非常同意	<input type="radio"/> 同意	<input type="radio"/> 傾向於同意	<input type="radio"/> 不同意	<input type="radio"/> 非常不同意
02、我覺得圖 B 看起來像是一幅： (右方請擇一勾選)	<input type="radio"/> 鉛筆畫	<input type="radio"/> 水彩畫	<input type="radio"/> 黏土浮雕	<input type="radio"/> 油畫	<input type="radio"/> CG 影像
03、圖 B 較 A 更像一幅油畫	<input type="radio"/> 非常同意	<input type="radio"/> 同意	<input type="radio"/> 傾向於同意	<input type="radio"/> 不同意	<input type="radio"/> 非常不同意

問卷一作品二 茶壺



A). 平塗法



B). 模擬體積效果

評分項目

項目	選項				
01、圖 B 較圖 A 更有顏料堆疊的感覺	<input type="radio"/> 非常同意	<input type="radio"/> 同意	<input type="radio"/> 傾向於同意	<input type="radio"/> 不同意	<input type="radio"/> 非常不同意
02、我覺得圖 B 看起來像是一幅： (右方請擇一勾選)	<input type="radio"/> 鉛筆畫	<input type="radio"/> 水彩畫	<input type="radio"/> 黏土浮雕	<input type="radio"/> 油畫	<input type="radio"/> CG 影像
03、圖 B 較 A 更像一幅黏土浮雕	<input type="radio"/> 非常同意	<input type="radio"/> 同意	<input type="radio"/> 傾向於同意	<input type="radio"/> 不同意	<input type="radio"/> 非常不同意