國立暨南國際大學資訊工程學系

碩士論文

有關在 NPR 3D 動畫系統中模擬油畫之研究

Simulating the Oil Painting in an NPR 3D Animation System

指導教授：陳履恆 博士

研究生：楊竣蘭

中華民國九十七年六月

國立暨南國際大學碩士論文考試審定書

資訊工程 學系（研究所）

研究生 楊竣蘭 所提之論文

有關在 NPR 3D 動畫系統中模擬油畫之研究
Simulating the Oil Painting in an NPR 3D Animation System

經本委員會審查，符合碩士學位論文標準。

學位考試委員會

_____ 委員兼召集人

_____ 委員

_____ 委員

中華民國 97 年 6 月 16 日

博碩士論文電子檔案上網授權書

本授權書所授權之論文為授權人在 暨南國際大學 資訊工程學系

96 學年度第 二 學期取得 碩士 學位之論文。

論文題目： 有關在NPR 3D動畫系統中模擬油畫之研究

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本人畢業學校圖書館，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及論文電子檔以上載網路方式，提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印。

- 讀者基非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印上列論文，應依著作權法相關規定辦理。

授權人： 楊竣蘭

簽　名： 楊　竣　蘭　　中華民國 97 年 06 月 20 日

授權書編號：ncnu-97-95321542-1

國立暨南國際大學博碩士論文授權書

本授權書所授權之論文為立書人在 **國立暨南國際大學科技學院 資訊工程學系**，96 學年度第 2 學期取得**碩士學位**之論文。

論文題目：**有關在 NPR 3D 動畫系統中模擬油畫之研究**
指導教授：**陳履恆**

授權事項：

一、 立書人 **楊竣蘭** 同意無償授權 **國立暨南國際大學** 將上列論文全文資料之以微縮、數位化或其他方式進行重製作為典藏之用。 **國立暨南國際大學** 在上述範圍內得再授權第三人進行重製。

二、 立書人**楊竣蘭 同意有償授權** 將前條典藏之資料收錄於資料庫，並以電子形式透過單機、網際網路、無線網路或其他傳輸方式授權用戶進行檢索、瀏覽、下載、傳輸、列印等。 **國立暨南國際大學**得將上述權利再授權于第三者。

前兩條授權均為非專屬授權，立書人仍擁有上述授權著作之著作權。立書人擔保本著作為立書人所創作之著作，有權依本授權書內容進行各項授權，且未侵害任何第三人之智慧財產權。如有侵害他人權益及觸犯法律之情事，立書人願自行負責一切法律責任，被授權人一概無涉。

有償授權條件：**享有權利金的回饋，權利金捐贈校務發展基金指定用於圖書館館務使用。**
論文全文上載網路公開時間： **立即公開**
立書人： **楊竣蘭**

簽名： 楊 竣 蘭　　中華民國 97 年 6 月 20 日

致謝

我在暨大度過了大學和研究所共六年的學生歲月，感謝學校對我的栽培。人生中可以說是最重要的心智生長期，我在這間學校學習到了很多的事情。不管是學業上的、生活上的，還是人際關係上的，這六年裡我都成長了非常多。

而在研究所的兩年生活裡，首先我要感謝我的指導教授：陳履恆博士。陳老師在研究中總是適時的給予我各種意見和指導。在我對研究中有時遇到瓶頸感到灰心時，也總是對我予以鼓勵。讓我能夠在研究生涯中學習到該用怎樣的態度去分配工作和生活。老師平易待人的親切態度，也讓我在待人處世的方法上獲益良多。

感謝我的家人在我求學的過程當中，讓我沒有經濟方面的後顧之憂，得以專心的作研究。感謝一直陪伴著我，在背後支持著我的瑪莉。因為有妳的陪伴，我的人生才不孤單。

再來我要感謝研究室裡的學長 bird、沛宇在我剛進研究室時給予許多指導和意見，讓我能儘快適應研究生活。Jimmy 學長帶我進入 NPR 的研究領域。Pointer 學長總是在我對撰寫程式有問題時，給予指導和幫助。感謝小溫學長常帶我去參加登山社的各種活動，使我能夠在登山這個活動當中體會到許多以往生活從未有過的經驗。因為各位學長的教導，使我剛成為研究生時，不致懵懵懂懂、跌跌撞撞的開始。

接著要感謝我的同學，shower 和宜靜。感謝你們在研究過程中能夠跟我相互勉勵，共同合作、努力去作我們的工作。在研究之餘，閒暇時間也一起去各個地方遊玩，確實的領略了埔里山明水秀的風光。在生活上遇到的困頓和挫折也能夠和你們一起分享。研究生活因為有你們的陪伴，所以變得更為精彩和值得回憶。還要感謝研究室的學弟妹們，阿俊、Panda、小瑜、小龍、謝杰。謝謝你們處理 lab 的一些事務，讓我不用去擔心研究以外的事情。在口試前的準備工作也麻煩你們了。

最後感謝我的朋友們和許許多多這裡未提到的人，因為和你們相遇，構成了我的人生。

論文名稱：有關在 NPR 3D 動畫系統中模擬油畫之研究
院校系：國立暨南國際大學資訊工程學系　　頁數： 57
畢業時間：九十七年六月　　學位別：碩士
研究生：楊竣蘭　　指導教授：陳履恆 博士

摘要

Non-Photorealistic Rendering(NPR) 在圖學的領域中由來已久，此一特殊的成像方式不以物品的擬真度為優先考量，而是著重於筆觸(stroke)、繪畫風格(paint style)等的呈現。由於其成像多以誇張的手法呈現欲突顯的部分，而不注重其呈現出的正確精確性，因此適合用來模擬畫家的繪畫手法。

在本篇研究中我們藉由 3D-model 與場景的原始資訊，來呈現出 NPR 的連續且正確的筆觸生成影像，並且嘗試將研究成果套用並模擬出近似油畫風格的繪畫。我們從各種相關文獻與畫作中，歸納出油畫的風格特點在於顏料的堆積，以及單一筆劃中，多筆觸的疊合。以以往的研究為基礎，我們根據筆觸在物件上與物件邊緣的相對位置建立物件上全部筆觸的權重順序。並且，以此順序為基準，透過對畫布平面的動態分割，做出同一物件內筆觸區域性的分組，各組再以演算法做出筆觸的疊合。並記錄筆觸中顏料堆積厚度的資訊，實作出一對照此資訊，平面上有凹凸起伏的 3D 畫布。

本研究的主要貢獻，在於產生油畫特有的具有體積的筆觸，正確模擬油畫顏料在畫布上所應呈現的視覺效果：包括顏料的重疊堆積、顏色的疊加等等。

關鍵詞： 電腦圖學、筆觸、Non-Photorealistic Rendering(NPR) 、模型、3D-skeletons、油畫。

Title of Thesis: Simulating the Oil Painting in an NPR 3D Animation System
Name of Institute: National Chi Nan University, Dept. of CSIE Pages: 57
Graduation Time: June 2008 Degree Conferred: Master
Student Name: Jun-Lan Yang Advisor Name: Dr. Lieu-Hen Chen

Abstract

Non-Photorealistic Rendering (NPR) has been an important issue in the field of Computer Graphics. Instead of highlighting the realism of CG synthesized images, NPR focus on the representation of the stroke and paint style. One of the most important features of Non-Photorealistic Rendering is the exaggeration expression over the subjects of image. Therefore, NPR is suitable to synthesize images that simulate the paint style with the visual effect of strokes. The research issues of NPR can be roughly divided into two types, 2D image-based method and 3D model-based method.

In this paper, we synthesize 3D model-based NPR images and animation with continuous volumetric strokes to simulate the visual effects of oil painting. According to our survey on oil paintings, we conclude that the heap of pigment and the volumetric property of each single stroke are two of the most important factors in the works of oil painting. According to the distance from the strokes to the edge of the object, we set up the priority of all strokes. Based on the order, through dynamically segmenting the canvas apart, we make the grouping with regional stroke in the object. And then pile strokes in the same group. The information of the thickness of strokes is stored in a Z-buffer-like data structure. The 3D canvas is then rendered based on this information.

Main contribution of this research includes producing the volumetric strokes, and simulating the oil color correctly on the canvas. These goals are achieved by piling up the strokes on the same pixel, and superposing the pigments to simulate the final resulted color on the canvas.

Keyword: Computer Graphic、stroke、Non-Photorealistic Rendering(NPR)、3D-skeletons、oil painting。.

目錄

摘要 2

目錄 4

圖片目錄 6

第一章　緒論 8

1.1　研究動機與目的 8

1.2　論文編排模式 9

第二章　研究背景 10

2.1　油畫筆觸風格的分析 10

2.1.1　畫布特性 12

2.1.2　筆觸特性 13

2.1.3　顏料特性 14

2.2　畫家筆觸風格列舉以及探討 15

2.2.1　梵谷畫作 15

2.2.2　漩渦及波形 16

第三章　系統概述 17

3.1　構想 17

3.2　系統架構 18

3.3　系統運作流程 20

3.4　資料的讀取及整理 22

3.5　虛擬畫布: Modified Z-buffer 23

第四章　3D 油畫 NPR 系統 28

4.1　筆觸分組 28

4.1.1 分組順序 28
4.1.2 以筆觸權重分組 30
4.2 筆觸疊合 33
4.2.1 map 紀錄 33
4.2.2 膨脹(dilation) 33
4.2.3 侵蝕(erosion) 34
4.2.4 closing 35
4.3 顏料堆積 36
4.3.1 顏料厚度資訊紀錄 36
4.3.2 筆觸先後順序的影響 37
4.4 3D 畫布 38
4.4.1 輸出檔案 38
4.4.2 3D Viewer 41
第五章 研究成果 43
第六章 結論及未來工作 54
6.1 結論 54
6.2 未來工作 54
參考文獻 56

圖片目錄

圖一　pointillism 點描派的繪圖 10

圖二　梵谷 奧維的教堂 11

圖三　卡爾·拉森的水彩畫 11

圖四　畫布對油彩附著的影響 12

圖五　梵谷 麥田群鴉 13

圖六　油彩顏料的堆積 14

圖七　梵谷　星月夜 15

圖八　梵谷 玉米田的絲柏 16

圖九　筆觸的細節 17

圖十　System architecture 19

圖十一　系統流程 20

圖十二　Rasterization 示意圖 23

圖十三　綜合三種線段產生出來的 Output 24

圖十四　遮蔽問題示意圖 25

圖十五　Adapt Depth Test 流程圖 26

圖十六　套用傳統的 Z-Depth 的結果 27

圖十七　改進 Depth-Test 後的結果 27

圖十八　執行完 Hidden Line Elimination 後的結果 27

圖十九　筆觸權重示意圖一 29

圖二十　筆觸權重示意圖二 29

圖二十一　筆觸分組演算法示意圖 30

圖二十二　筆觸分組圖一 31

圖二十三　筆觸分組圖二 32

圖二十四　膨脹示意圖 34
圖二十五　侵蝕示意圖 35
圖二十六　closing 成果一 35
圖二十七　closing 成果二 36
圖二十八　油畫筆觸的剖面圖 37
圖二十九　3D 畫布示意圖 39
圖三十　輸出檔案 40
圖三十一　3D viewer 介面 42
圖三十二　成果圖一 43
圖三十三　成果圖二 44
圖三十四　成果圖三 45
圖三十五　成果圖四 46
圖三十六　成果圖五 47
圖三十七　成果圖六 48
圖三十八　成果圖七 48
圖三十九　成果圖八 49
圖四十　成果圖九 49
圖四十一　成果圖十 50
圖四十二　成果圖十一 50
圖四十三　成果圖十二 51
圖四十四　成果圖十三 51
圖四十五　成果圖十四 52
圖四十六　成果圖十五 52
圖四十七　成果圖十六 53
圖四十八　成果圖十七 53

第一章　緒論

1.1 研究動機與目的

Non-Photorealistic Rendering(NPR) 在圖學的領域中由來已久，此一特殊的成像方式不以物品的擬真度為優先考量，而是著重於筆觸(stroke)、繪畫風格(paint style)等的呈現。由於其成像多以誇張的手法呈現欲突顯的部分，而不注重其呈現出的正確精確性，因此適合用來模擬畫家的繪畫手法。而其中有多樣性的研究方向。[1][2][3][4][5][6][7]

在 NPR 的領域中，根據資料來源來劃分大致上可以分為兩類：2D image-based method 以及 3D model-based method。在此研究中，我們使用 3D model-based method 實作。優點在於可藉由 3D-model 與場景的原始資訊，來呈現出 NPR 的連續且正確的筆觸生成影像。

在本研究中，我們提出一些模擬油畫風格的方法，主要在做出油畫顏料和筆觸的特性。我們對於已畫在畫布上的筆觸，依照其與物件邊緣的相對位置關係，給予權重。並以其權重為基準做區域分組，再對個別的分組做多筆觸的疊合，以模仿油畫的筆觸。而對於油畫顏料堆積的特性表現，再每畫上一筆筆觸時，會在以建立的資料結構中儲存其厚度資訊。此資訊可在畫作完成後建立一平面上有凹凸起伏的 3D 畫布。此畫布上顏料堆積所形成的凹凸起伏，便可以反應出環境光源和使用者觀看角度對畫布上顏料顏色的影響和差異。

Model-base 則是以 3D-model 為資料來源，套用各種 3D-matrix, lighting, shading 等原則，藉由欲呈現的物件 model 中可取得的各種資訊來繪製 NPR 影像。本篇研究即嘗試使用 3D-model base 的 NPR 來模擬出油畫。

1.2 論文編排模式

研究的目標在於,能夠生成近似現實中油畫效果的模擬結果，我們嘗試從各畫家的油畫畫作中，分析出構成油畫的特性。並且為了能充分模擬出此種繪畫媒介的效果，我們將探討其繪畫用具的特性，如油畫顏料在畫布上的表現，筆觸的疊合和顏料的堆積。還有畫風較為特異的畫家之繪畫手法，此一部分將在第二章做探討。

在第三章，我們講解關於此系統的設計構想、以及系統的主要架構與流程。第四章將油畫中的筆觸構成重點”筆觸的疊合”，其前置作業，筆觸的分組方式和參考資訊權重做介紹。講解在做筆觸疊合時所使用的資料結構和演算法、顏料堆積的資訊處理和累積厚度計算，還有繪畫時筆觸先後順序造成的影響。最後則依照此厚度資訊實作出一 3D 的畫作，模擬現實中的油畫畫作。

在第五章，我們展示本論文的研究成果。最後在第六章作結論說明及探討未來的工作。

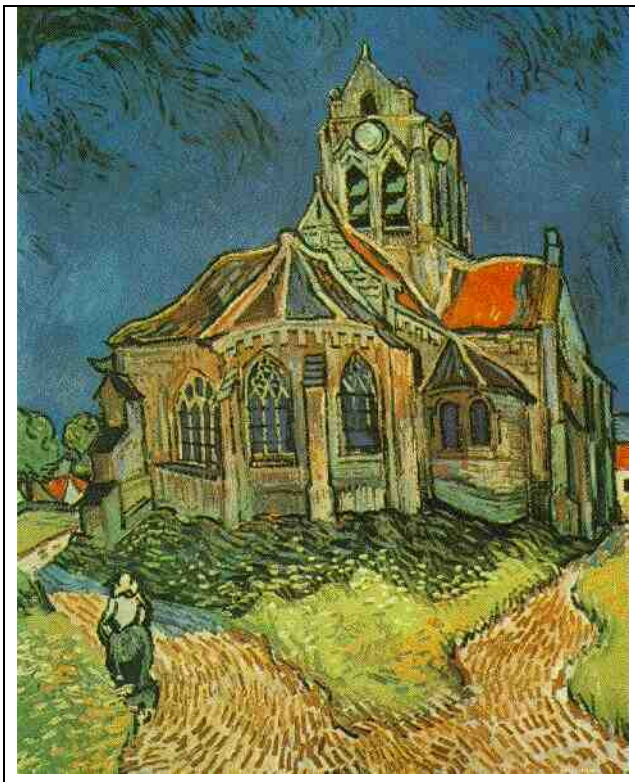
第二章　研究背景

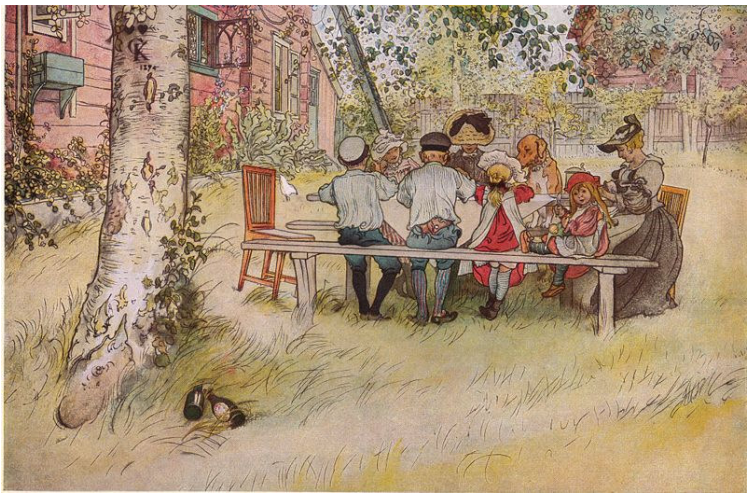
在ＮＰＲ的領域中，對於筆觸的模擬及研究由來已久，然而其大多數的研究所作出的實作，和真實畫作比較，仍可看出生硬不自然的筆觸。其問題在於未針對繪畫用具及顏料特性作深入研究。在這篇研究中，我們將改善原本的ＮＰＲ系統。使之能夠模擬出油畫的特性。

2.1 油畫風格的分析

在繪畫的世界中，繪畫用具乃產生一張完整手繪圖的基本物件。不同的繪畫媒介和繪畫手法，產生出的畫作便會有極大的差異。

	[圖一] pointillism 點描派的繪圖，將顏色還原成原本的七色，用點描繪在畫布上。

	[圖二]梵谷 – 奧維的教堂。其中油畫中短筆觸的使用，在畫中小徑上非常明顯。

	[圖三] 卡爾·拉森的水彩畫

由上述幾張圖我們可以發現，不同的繪畫用具和手法所表現出來的繪畫風格亦不相同。而就 Image Processing 的觀點來看，試圖從影像中擷取出條狀的筆觸資訊，並不是一件簡單的事，分布在畫布上的筆觸資訊，經過層層的疊加，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。因此，我們無法直接以畫家的作品作油畫特性的分析。有了這一部分的結論後，我們的研究便朝向針對油畫用具特性的分析。

為了提供我們更具體的研究成果比對，在前期的研究過程中，我們嘗試由以下幾種方向來探討油畫中用具的特性：

(1) 畫布特性

畫布的編織品特性

(2) 畫筆特性

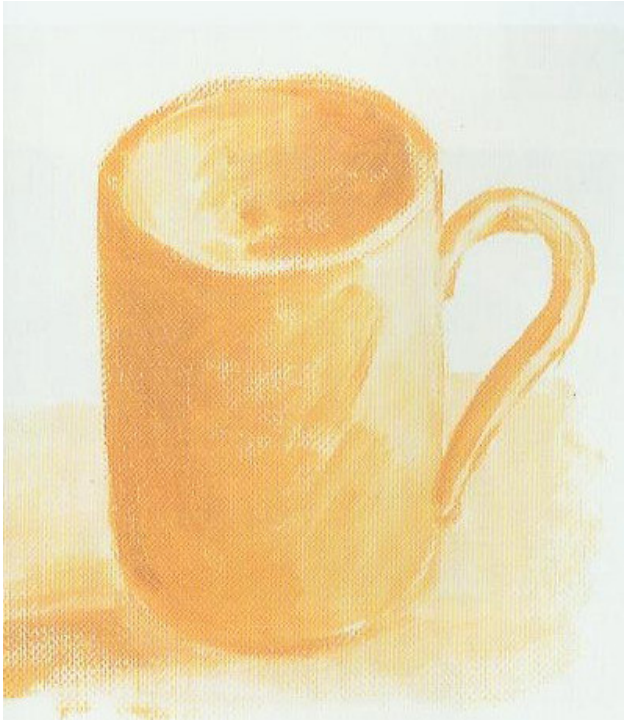
多筆觸的疊合

(3) 顏料特性

油彩顏料的堆積

2.1.1 畫布特性

因為畫布本身編織品的特性，畫布表面乃是一規律的凹凸不平面。油彩在其上的沾附性會受其影響，也形成規律的圖案。[8]

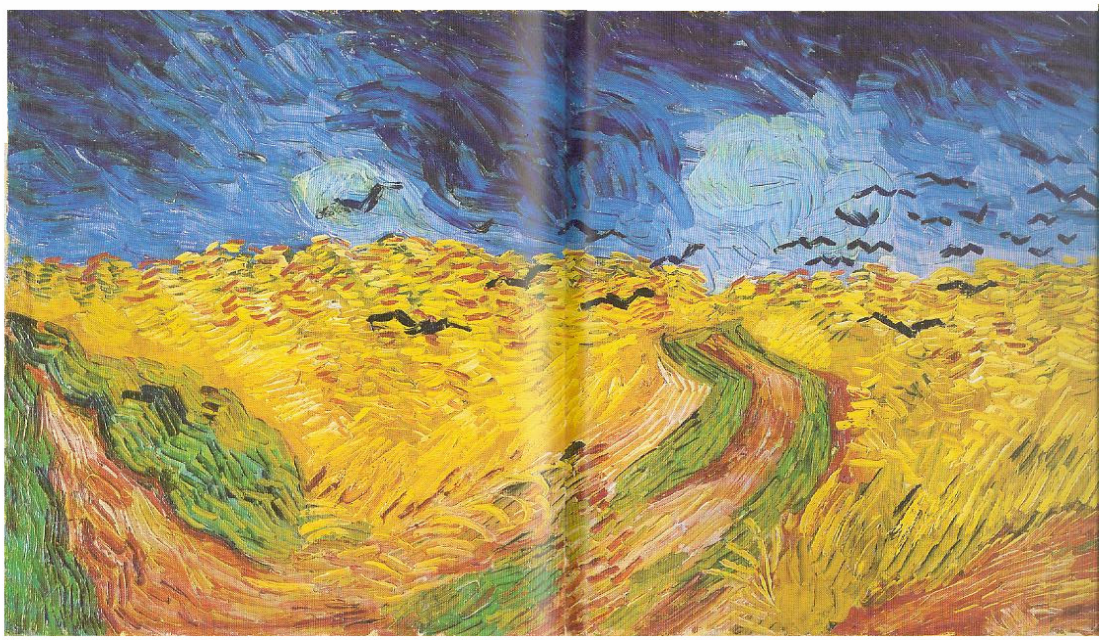


［圖四］畫布對油彩附著的影響：由此圖可清楚看出，油畫中畫布的紋路在油彩塗上後，在油彩厚度累積較薄的地方變的顯而易見。

由圖四這張畫我們可以看到油畫中畫布紋路對畫作影響之大，所以欲模擬油畫風格，在實作這一部分時，我們可以簡單的套用一個遮罩（filter），作出仿畫布編織圖案般的紋路。

2.1.2 畫筆特性

油畫的畫筆和油性顏料的沾附性所造成的特異筆觸，會形成同一筆劃中有多筆觸疊合的現象。而作畫時，若在油彩顏料未乾時繼續補上下一筆，也常會造成第二筆沾染上第一筆的顏料，使得在同一筆中，出現顏色分層明顯的狀況。



［圖五］梵谷畫作-麥田群鴉。在畫作中的天空可以看到在同一筆觸中多筆觸疊合的現象。

在圖五中，可看到構成天空的筆觸紊亂，常出現不同筆觸間疊合的情況，而各單一筆劃中也有多筆觸疊合的現象。同一筆中，顏色分層明顯的情況亦有所見。

2.1.3 顏料特性

在油畫中，重疊的筆觸會造成油彩顏料的堆積，這是因為油彩本身的特性不似水彩易揮發和擴散。以致畫作表面的厚度增加。而因為畫家下筆先後順序的不同亦會造成不同厚度和紋路。[8]

［圖六］油彩顏料的堆積：圖中可以看到油彩的堆積對光線折射造成的影響，從不同的角度觀看因為光線折射而有所差異。

由圖六可以看出在筆劃重複的部分累積了較厚的油彩顏料，在此較厚的地方，畫布本身的紋路已經被蓋過去，變的較為不可辨識。此圖也可看出畫筆筆觸先後順序不同所造成的痕跡。

而畫家的畫作在會場展覽時，會場的光源位置和觀賞者角度是不定的。而從觀賞者角度來看，在畫作上油彩厚度堆積所造成的小陰影，也會造成畫作上顏色的變化。觀賞者會因站在不同的角度，不同的光線變化，所看到的畫作之顏色亦有所改變。從此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情形。而在兩條較厚的筆觸中間，相對而言顏料堆積較薄的筆觸，則有陰影的存在。

所以實作出油畫顏料堆積的厚度，是這項研究極為重要的課題。

2.2 畫家筆觸風格列舉以及探討

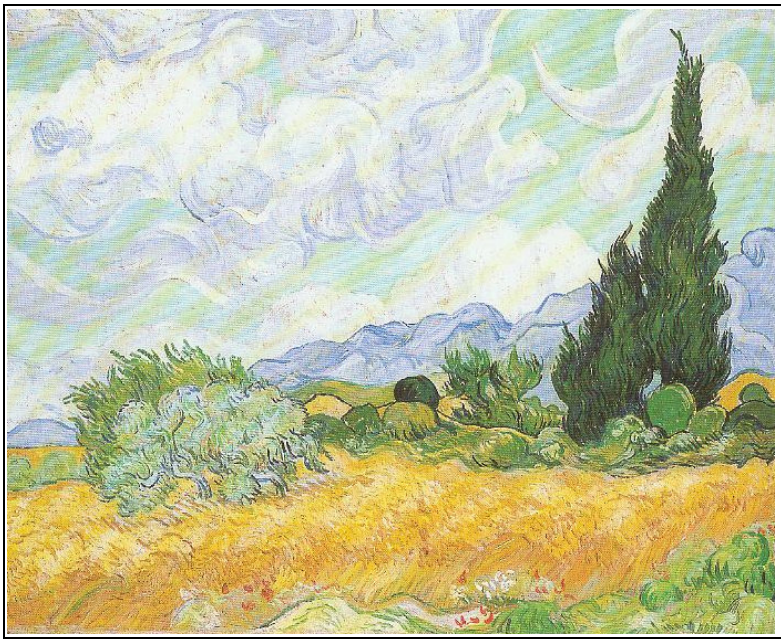
2.2.1 梵谷畫作

梵谷在使用油彩作為繪畫工具的畫家中享有盛名，他一生的經歷也導致了他畫作的特異風格。因其風格的強烈，所以我們拿他的畫作來探討畫家個人風格，應較為容易分析其與其他畫家的不同之處。[9]

	[圖七] 梵谷　星月夜： 梵谷描繪夜空之美的畫作

由上圖可看到梵谷在描繪銀河時，將其描繪成漩渦狀，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。而整個星空的筆觸，受到畫中月亮和星星的光源影響，呈現一種如同漣漪般的型態。

梵谷常在描繪其畫作中的物體時，以這種獨特的繪畫技法去展現其個人風格。



[圖八]
梵谷 玉米田的絲柏
右方較高的植物即
為絲柏。

解析梵谷的作畫方式，他在畫絲柏時摒除其枝葉細節，單以樹幹為主體。由下而上的筆觸以樹幹為中心像似火焰受到空氣擾動般的扭曲。而在畫絲柏以外的其他植物時，也用了類似的技法。

2.2.2 漩渦與波形

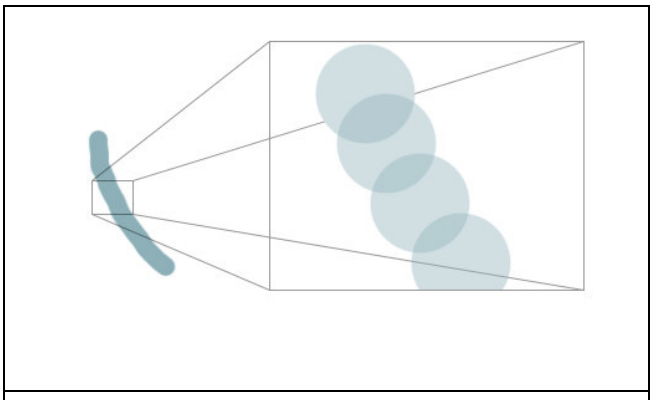
在之前所提過的梵谷畫作中，可以觀察到梵谷作畫時，其畫中的物件常符合一些數學上的幾何型態，如漩渦和波形。因此我們認為若在系統中套用簡單的幾何公式，可以創造出較具有個人風格的畫作。讓使用者能自己做出不同於其他使用者風格的作品。

第三章　系統概述

本章我們說明我們所提出的 NPR System，包括早期的構想、系統架構以及運作流程圖。

3.1 構想

考慮最原始的筆觸構成。假設單點的筆觸圖案為一實心同色圓，則沿某一軌跡連續貼出此圖案即可模擬出最簡單的筆觸。而根據此一基本想法加以擴充，如基本筆觸的圖形變化、分布的密度、透明度等，便產生了構成不同風格的筆觸所需的各種參數。而將多條筆觸疊合在一起，則可模擬出油畫筆觸。



[圖九] 筆觸的細節。

而此一筆觸遵循的軌跡，更是構成各種風格的繪畫的一個重要因素。為了能生成第四章討論的油畫筆觸風格，我們需要一個模擬畫布的資料結構。這張模擬畫布的每一個 Pixel，必須可以自由的參考 3Dmodel 以及矩陣運算過後的 2D-shape，或者整個世界場景中的相關資料如光影、方位等。如此才可以根據這些資訊生成可信的筆觸。

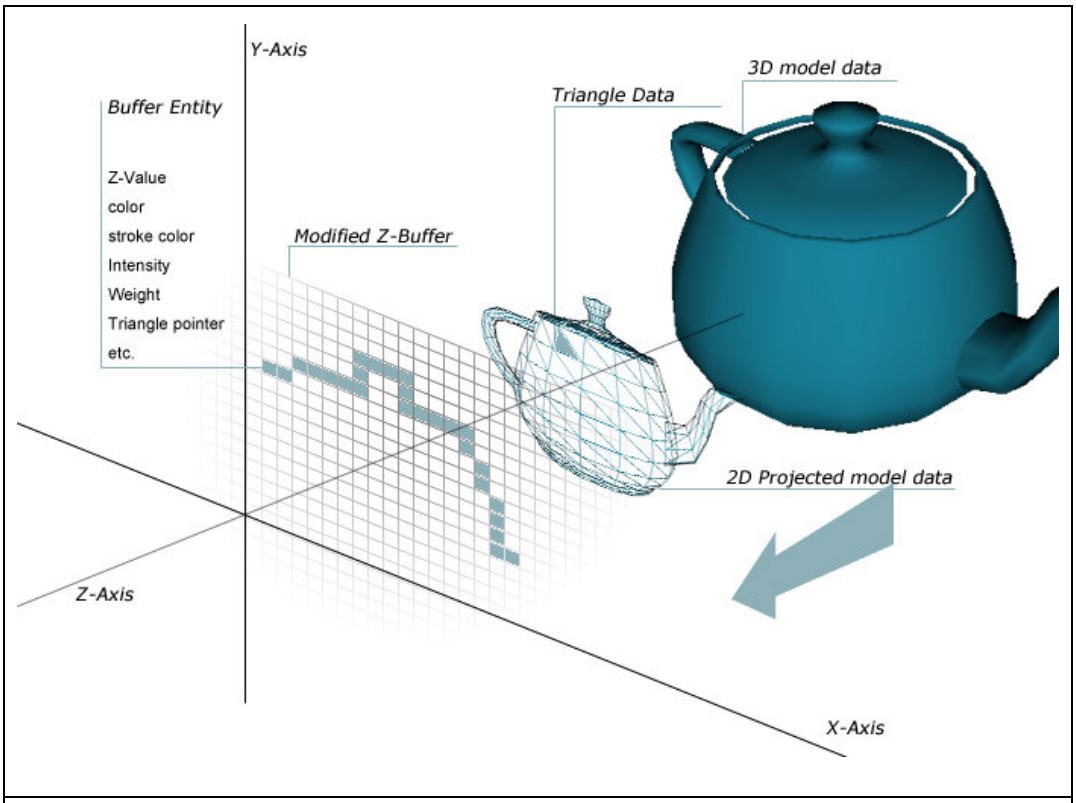
基於這個構想，我們嘗試改良原本繪圖卡所提供的 Z-buffer 這樣的繪圖機制。藉由重新定義 Z-buffer 上的儲存資料結構來達到我們需要的結果。

原始的 3Dmodel 中的 Index 資料也必須重新整理。我們必須規劃出以 Triangle 為單位的資料結構，來儲存 Triangle-Triangle 之間的關聯性，以及每一塊 Triangle 各自的資訊，如線段資訊等。

3.2 系統架構

為了可以處理畫布上每一條筆觸的細節，我們建構出一塊由 Buffer 組成的虛擬畫布。此一畫布除了傳統的 pixel – Z information 之外，還必須能夠參考到原始模型的資訊，以及平面化後的 Shape 資訊，以便於計算出合適的筆觸資料。

另外，由於製作 Animation 的需求，模型的原始格式除了 Vertices、Indices 之外，還必須包含 Group，Bone，Frame 等資訊，故我們選擇 Direct3D 的.X file 作為模型資訊儲存的架構。

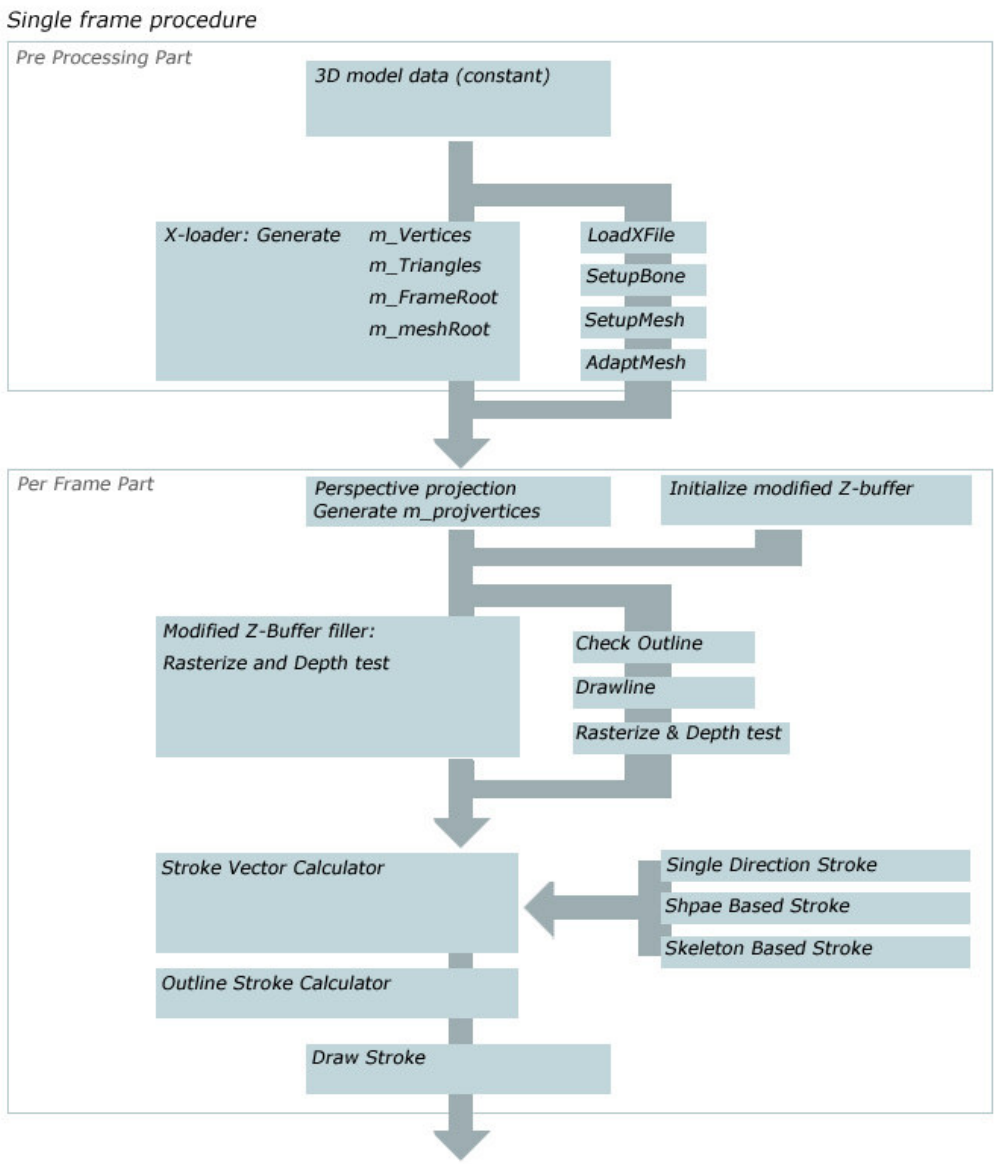


[圖十] System architecture. 列舉幾個系統中重要元件的關係。

如圖十三所示，此為 NPR-System 的基本架構。3D model data 即為原始的模型資料；Modified Z-Buffer 即代表”虛擬畫布”。每一個 Buffer 上的像素必須儲存一個 Triangle data 的連結，以方便讓 Modified Z-Buffer 上的每一塊像素可以便利的參考 3D 原始資料，以及套用過所有的轉置矩陣(模型座標矩陣、世界座標矩陣、投影矩陣)後的 2D Projected model data。

其次，為了整理出模型 Triangle-Triangle 之間的相互關係，以及便利找尋模型上的輪廓線，我們必須重新定義原始模型中三角形的 Index 資料，重新儲存為 Triangle data。

3.3 系統運作流程



[圖十一] 系統流程。包含前置處理部份以及單次影格處理程序。

本 NPR-System 概括來看，可以分為四個主要的部分。

(A) 3D model loader – Pre Processing part

我們將由 X-file 讀入的資料，重新拆解並整理成我們系統需要的資料結構。

模型與骨架的階層關係、模型內部的表面關聯性都在此作前置處理。

(B) Modified Z-Buffer: Rasterizing & Depth test – Per Frame part

1. 判別線段資訊。填入需要繪製的線段
2. 初始化 modified Z-buffer，並將 3D-model 的浮點資訊光柵化並填入 Z-buffer。
3. 深度測試，消除隱藏線。

(C) Stroke Merge

1. 根據指定的資訊給予各筆觸權重
2. 以權重分組各筆觸
3. 用 clothing 演算法作各組筆觸的疊合

(D) Output

1. 畫筆觸時記錄油彩厚度累積資訊
2. 以 Z-buffer 資訊實作出一畫作的 3D model

其中，圖十一包含了 A 及 B 這兩個部份，C 與 D 將在後面的章節作說明。

3.4 資料的讀取與整理

在本系統中，我們選擇使用 Direct3D 的 X-file 作為資料的儲存格式。其優點為具有階層特性的物件關係。每一物件包含各自的 Group Name、Vertex、Index、Normal、UV、Bone 以及相關轉置矩陣。

由於 X-file 中的頂點資訊為”non-unique”的特性，若沒有經過整理與剔除多餘的頂點的步驟而直接使用，將會大量消耗不必要的系統運算資源。

因此，為了可以讓資料更適於自己的系統使用，我們在前置處裡的部分亦增加一個 Data Adapter，用來將 X-file 的檔案資料轉換成此 NPR-System 使用的資料結構。

在 NPR-System 裡，我們將場景中的所有 Vertex 全部匯入整理成一份 Vertex List，而將群組關係及 Triangle 特性交由 Triangle List 管理。包含 Index 資訊，群組資訊，骨架資訊等。因此必須將 Input 的 X-file 重新拆解、整理。

(A)Vertices Data:

由各 Object 之 Vertex 資料取得。由於 Maya / 3DsMax 轉換的 X-file 其頂點資訊皆不具有唯一性，也就是說一個簡單的正四面體，卻會出現 3X4=12 個頂點資訊。因此，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 Vertices List。

(B)Triangle Data：

根據上面的 Replace Table 以及物件間的 Offset Table 來更新資料資後，輸入到 Index List。

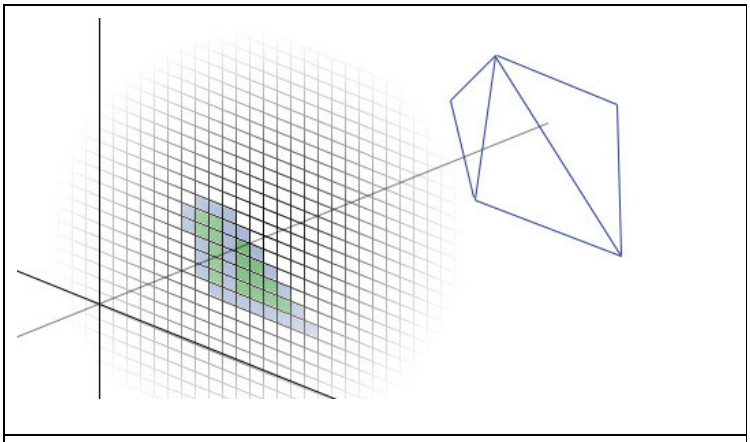
(D)MeshRoot：

儲存許多模型的相關資訊如 Material、FrameTransMatrix、Mesh Name、UV 等。等待之後讓 Triangle List 由 Pointer 連結過來取得關聯的資訊。

3.5 虛擬畫布: Modified Z-buffer

我們使用自定的格式來實作一個 Z-buffer，即先前所提的虛擬畫布。使所有的 Stroke 計算以及生成均可以利用此畫布達到需求的效果。

Z-buffer 的結構，代表每一個螢幕上出現的像素包含的資訊。其中除了最基本的座標，也包含了關於此 Pixel 的權重、經過 3D 場景運算後的 color、以及各種筆觸的走向及顏料累積的厚度等。



[圖十二]Rasterization 示意圖。

Rasterization 即是將模型上的 Vertex 浮點座標轉換成螢幕上的整數座標的一個動作。傳統的 Rasterization 僅將 Triangle 作填色的動作，我們的 NPR-System 為了稍後的筆觸運算，在 Rasterization 的同時，亦將 3D-model 的相關連接資訊傳入 Modified Z-buffer 之中。

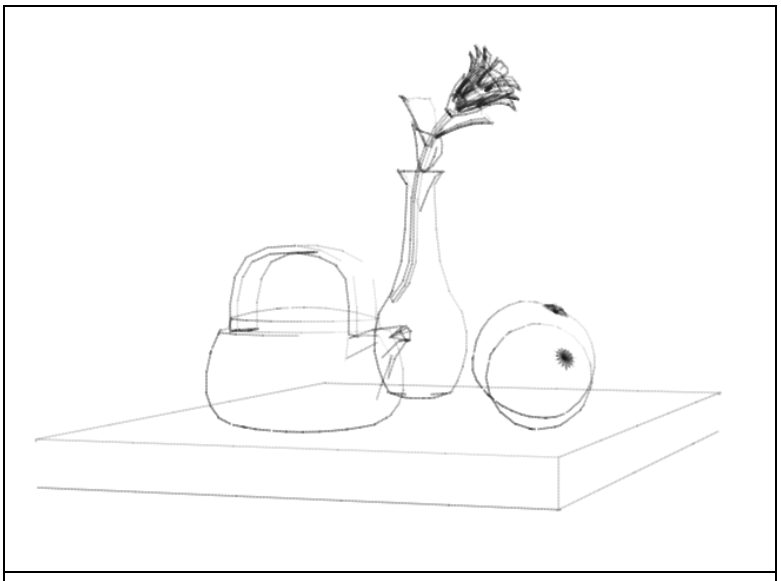
對於物體上的每一個 Triangle，我們檢測下列情形：

(A) 其三角形相鄰的三個三角形，各自與視線的夾角。若夾角大於 90 度，則判定此兩個三角形中間所夾的線段為 Silhouettes。

(B) 其三角形法向量與其相鄰的三個三角形各自的法向量之夾角。若夾角大於判別角，則判定此兩個三角形中間所夾的線段為 Boundaries。

(C) 其三角形中，若有一邊沒有與任何三角形相連，則此邊判定為 Discontinuities。

(D) 其三角形之法向量與視線的夾角。若夾角大於 90 度，則不計算該三角形之 Outline。(Cull Back Face)



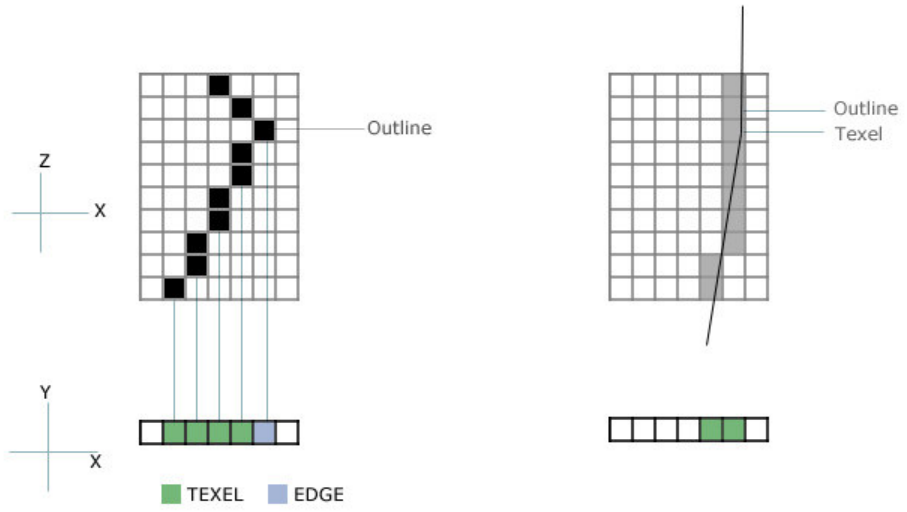
[圖十三] 綜合三種線段產生出來的 Output。

藉由上述三項線段結合所產生的輪廓線，會發生從被遮蔽的物體後方透出來的情形，因此需要將這些「應該被前物遮蔽的線條」從線段中剔除，稱為 Hidden-Line Elimination。[10][11]

為了消除這些線段，我們採用較為普遍的 Z-Depth Test 實作。對於場景中所有物件的 Triangle，利用 Rasterization，我們依序將其填入虛擬畫布(Modified Z-buffer)中，同時在每一個 Pixel 填入時，藉由比對 Z-buffer 中每一個填色物件的深度(Z value)，來決定最後此 Buffer 將歸於哪一個物件。

然而此一方法在實作時，對於我們的系統卻出現一個問題。NPR-System 中，我們將 modified Z-Buffer 單元分為三類：Empty、Texel、Edge。Empty 代表沒有被任何物件填色的 Pixel；Texel 代表被場景中的物件填色，且非該物件 Outline 的 Pixel；Edge 則代表場景中的物件填色、且為該物件的 Outline。

傳統 Z-Buffer 在使用時，考慮到的乃單純物件 pixel 的深度，並不需要考慮內圖色塊(Texel)與邊緣線條(Edge)的分別。因此，當物件為”高複雜度、圓弧狀表面”時，便會出現問題。



[圖十四] 左：正常的物件作 Depth Test 所得結果；右：平滑表面所出現的問題。

當物件的平滑表面變成輪廓線時，由於過於平滑，用來判斷是否為 Outline 的 3D-model 邊緣會被自己的內圖色塊遮蔽(Z-Value 判斷後，texel 會遮蔽 Outline)。導致部份的 Outline 消失。

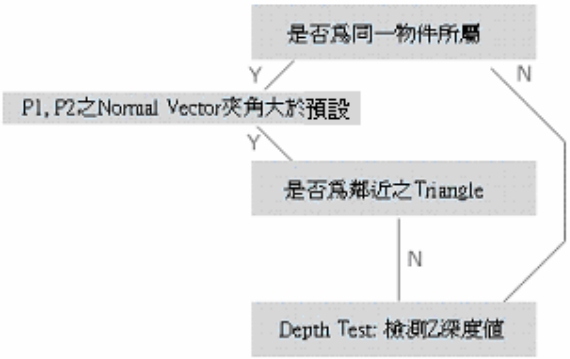
為了解決這個問題。我們改進了 Depth-Test 的檢測方法。基本檢測流程如下：

Rasterization:

```
For Each Triangle in Scene
    Rasterization
        for Each Pixel
            Adapt Depth Test
        end
    end of Rasterization
end
```

Adapt Depth Test:

令 P1 為目前儲存於 Z-Buffer 上的點、P2 為準備與 P1 作 Depth test 的點。

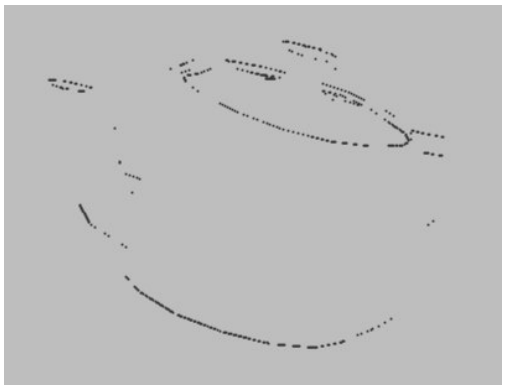
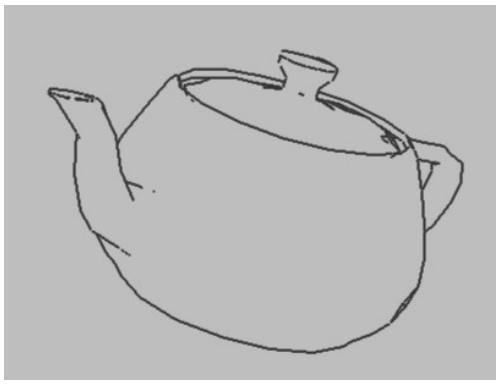


[圖十五] Adapt Depth Test 流程圖。

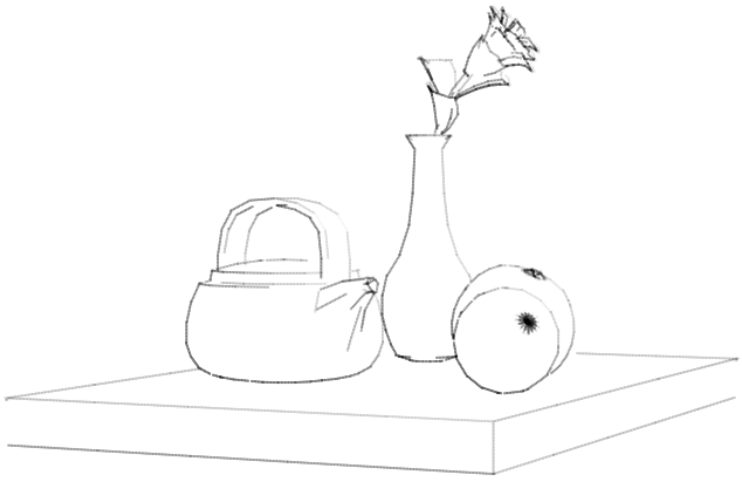
(A) 若 P1, P2 分別屬於不同的物件，則直接作深度測試。

(B) 反之，則判斷 P1, P2 點上的 NormalVector(由 3Dmodel 取得)之夾角，若超過一預設之門檻則繼續判定條件(C)

(C) P1, P2 若彼此為非相鄰之 Triangle，則作深度測試。

	
[圖十六]套用傳統的 Z-Depth 的結果。Outline 被刪除的情形相當嚴重。	[圖十七] 改進 Depth-Test 後的結果。Outline 正常顯示。

由圖十六、十七可以看見執行 Adapt Depth 後的結果。原本的深度測試法，當模型精細度越高時，產生的 Outline 遮蔽問題會越嚴重，改進深度測試的結果，便可避免大部分的遮蔽情況，順利的完成 Hidden Line Elimination。



[圖十八] 執行完 Hidden Line Elimination 後的結果。

至此為止，我們已經將虛擬畫布 – 即 modified Z buffer 所需要的相關資訊整理完成。Buffer 上每一個像素都具有自己的屬性以及資料。等著接下來的筆觸特性計算及模擬。

第四章　3D 油畫 NPR 系統

本章節旨在說明如何模擬出油畫筆觸特性和實作，共分為四個小節。

4.1 筆觸分組

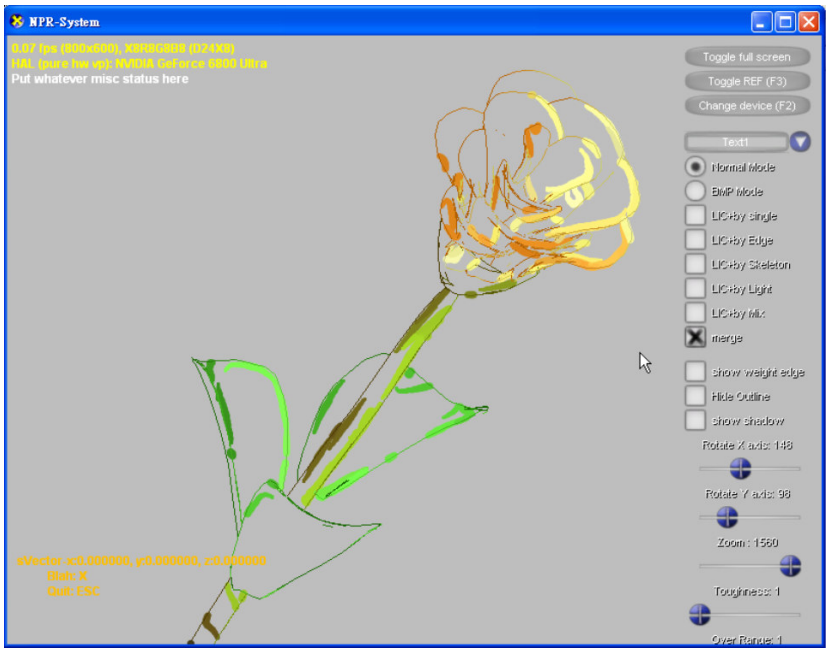
4.1.1 分組順序

油畫畫作中的場景常由不同的多種物件所構成。畫家在繪製畫作時，會因為場景中各種物件的遠近和顏色構成，而有不同的下筆順序。分析其油畫下筆順序，大致是以兩個方向為主。其一是物件的輪廓，其二則是顏色的深淺明暗。在此研究中較為著重的是以物件輪廓為主的分組順序。

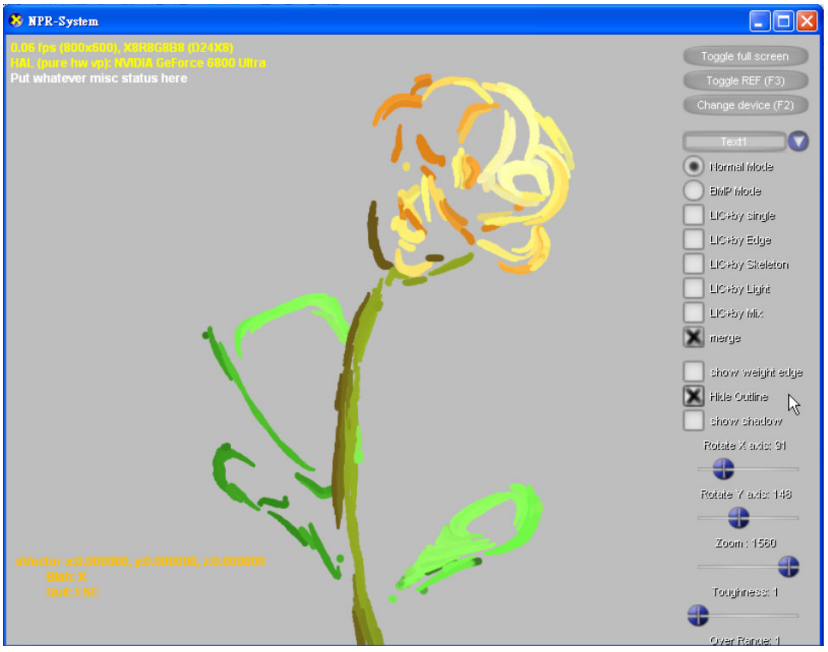
我們原先的研究中，模擬筆觸方法為在平面畫布上的物件中亂數灑上 seed，再以其畫中的光源，seed 與物件輪廓 edge 的相對關係，計算出 seed 所對應筆觸的向量。以 seed 為中心，向量的正反方向為準畫出一條筆觸。

但因為 seed 為亂數灑上，彼此之間並無先後順序。所以在我們後來的研究中，以 seed 與物件輪廓線的相對位置為基準，給予了每個 seed 權重。此權重可用來決定繪畫物件時，每一條筆觸的先後順序。

seed 權重的大小計算，取決於此 seed 在其所在的物件上，與其最接近的物件輪廓 edge 上的點之距離。距離越近，則權重越大，反之，則權重越小。成果如下圖。



[圖十九]
物件上應先畫上的輪廓線，筆觸權重較大的幾筆會先畫上去。圖中的細線為物件本身的 edge，筆觸的權重判定即由與其之間的相對位置決定。

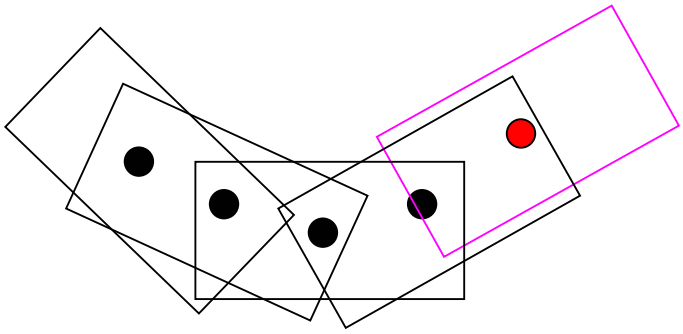


[圖二十]
以權重為準，畫上更多的筆觸。可發現圖中的花，其莖較先畫出，其花瓣的輪廓線也已清晰可辨。此圖中已拿掉原本的物件 edge。

4.1.2 以筆觸權重分組

油畫由於其顏料和畫筆的特性，再同一筆筆觸當中，常有貌似多條筆觸疊合的痕跡。為了實作出這樣的筆觸，我們以先前給予各筆觸的權重為基礎，先對筆觸做分組的動作。

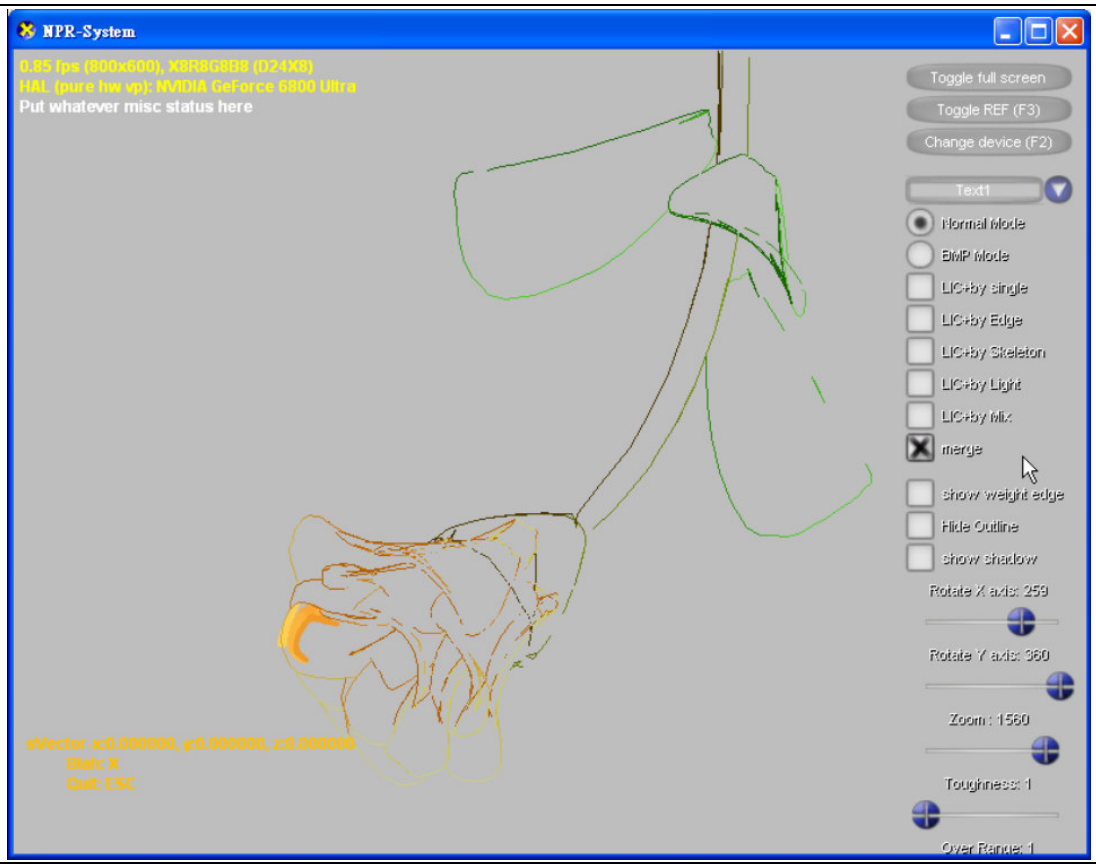
首先以權重大小對所有 seed 做排序，然後以排序好的順序為準依序分組。以第一個取得的 seed 為中心，畫出第一個根據其向量方向，長與寬比例為 1.618 的黃金長方形。在長方形內部的 seed 則與其同組，並再以此 seed 為中心，畫出第二、第三個長方形。如此重複循環，直到所找到的 seed，以其為中心畫出的長方形不再與最初的第一個長方形相交為止，此 seed 便被剔除在外，不與先前的 seed 為同一組。而已被分組的 seed 便不再參與之後的分組，如此循環下去直到所有的 seed 皆被分組為止。如圖二十一所示。



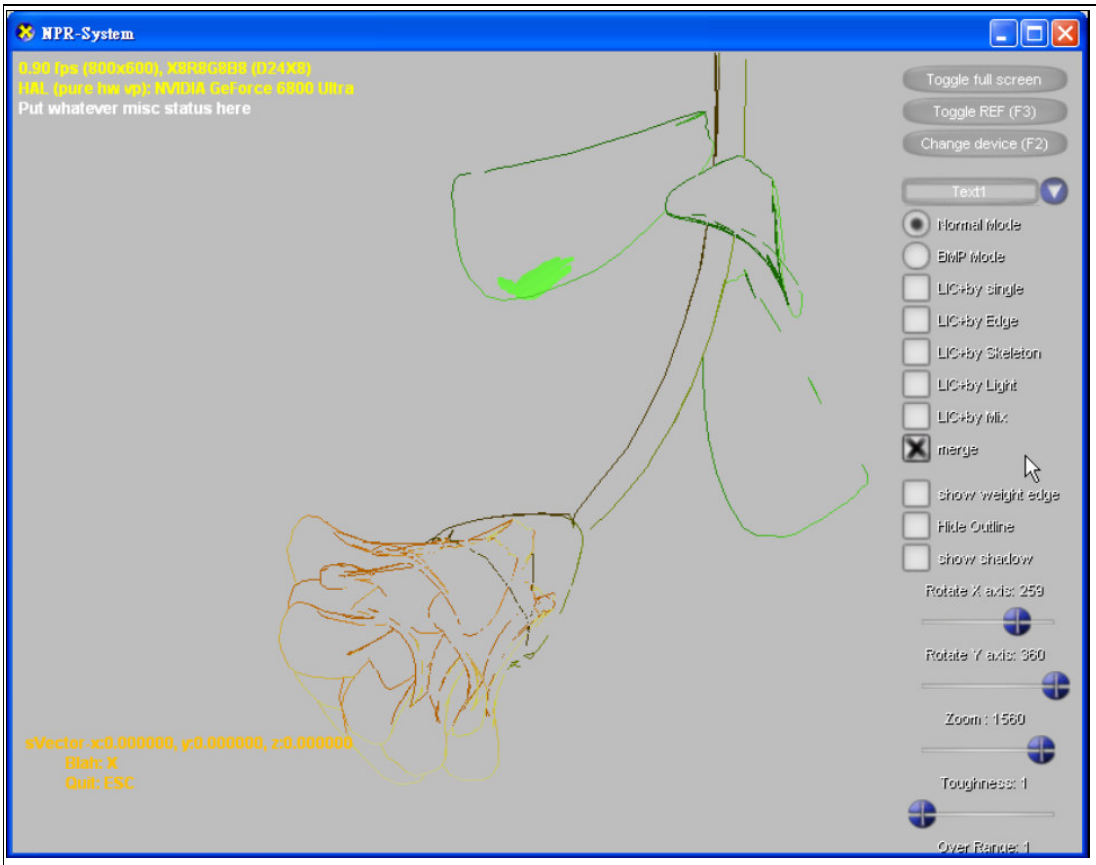
[圖二十一]
從最左邊的 seed 開始，做長方形，範圍內的 seed 重複步驟，外框為藍色的 seed 即為同組。直到右上角的 seed 其框線與第一個 seed 的框線無交錯，即停止。

長方形的大小，可以視物件的大小而有所改變，seed 是否同組也可再加入其他的條件判定，譬如加入 seed 的 vector 資訊相差角度若大於特定角度，便予以捨棄。此作法可以篩選掉向量角度相差過大的筆觸。

在筆觸全部分組之後的成果如下圖



[圖二十二] 第一組分組，可清楚看到其中有三條筆觸



[圖二十三] 葉子上某組筆觸的分組。

在對畫作上的筆觸分組之後，這些結果，將會應用在下一小節的筆觸疊合中。

4.2 筆觸疊合

4.2.1 map 紀錄

在上一小節中，我們對於畫作中所有的筆觸做了分組。這些分組是為了確定筆觸該對另外的哪些筆觸作疊合之用。

作筆觸疊合的演算法之前，必須先自訂一個 map 資料結構來紀錄筆觸資訊。我們對於每一組筆觸，皆開啟一個自訂的 smallmap 資料結構。結構內的資訊包含組別編號、起始點位置，還有型態為 Boolean 值的二維陣列，其大小為 600 乘 800，對應到圖上的每個 pixel。以 0 和 1 紀錄此組別中，各筆筆觸畫在畫面上，所覆蓋到的 pixel。

由於原本的系統只紀錄畫面上所要貼圖的座標點資訊，所以在計算筆觸所覆蓋到的 pixel 時，必須先確認筆觸中單一貼圖在畫面上對 pixel 的覆蓋範圍。我們以貼圖中心座標為原點畫圓，使其面積大小與貼圖一樣。以此方式來紀錄 pixel 是否被覆蓋到。

而在做 map 紀錄時，我們撰寫的程式也同時在做顏料厚度累積，詳細方法會在之後提到。

為了做出筆觸疊合的效果，在研究過程裡我們嘗試了各種不同的演算法。最後發現，使用數位影像處理中的數學形態學(Mathematical morphology)成果較符合我們要求的效果。morphology 是專門用來處理、分析影像中的形狀的一門理論，其發展非常多元。以下小節將解釋我們所用的演算法。

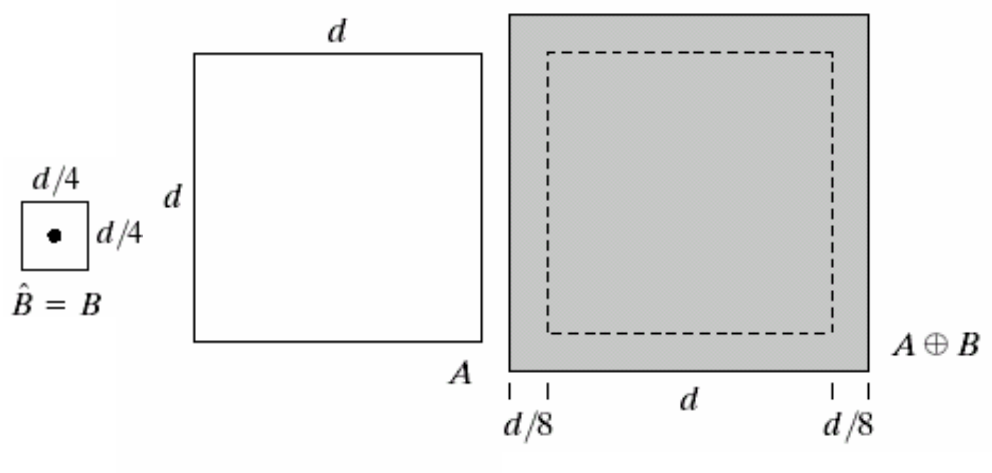
4.2.2 膨脹(dilation)

假設有兩個像素集合 A 與 B，使用 B 來膨脹 A，記為 $A \oplus B$，定義為 $A \oplus B = \bigcup_{x \in B} A_x$。這代表對每個點 x∈B，都使用這些座標值對 A 進行平移。然後對全部的平移結果取聯集。

另一個相等的定義如下

$A \oplus B \quad = \{(x,y)+(u,v) : (x,y) \in A, (u,v) \in B\}$

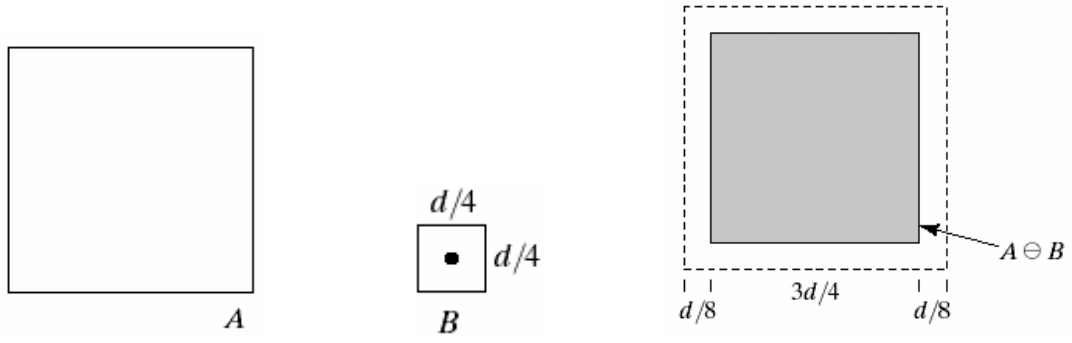
膨脹有放大物體輪廓的效果，一般而言，我們假設 A 是需要處理的影像，B 是較小的影像集合。在此 B 稱為結構元素。



[圖二十四] 膨脹示意圖，以 B 對 A 作膨脹，最右方的圖是結果

4.2.3 侵蝕(erosion)

假設有兩個像素集合 A 與 B，使用 B 來侵蝕 A，記為 $A \ominus B$。定義為 $A \ominus B = \{z: B_z \subseteq A\}$。也就是說 B 侵蝕 A 的結果，是由像素點 z ＝（x,y）構成，z 要滿足 B_z 在 A 之中。進行侵蝕，首先將 B 放在 A 之內，找到所有能使 B 完全被 A 所覆蓋住的位置，然後取所有位置上相對應的 B 原點所在位置的像素點。這些點的集合便是結果。



[圖二十五] 侵蝕示意圖，以 B 對 A 作侵蝕，最右方的圖是結果

4.2.4 closing

closing 為先膨脹再侵蝕的結果，其效果可以平滑影像，連接斷裂和紋路，並去除細小空洞。此演算法較符合我們作多筆觸疊合時所需效果。例如將筆觸間轉折角度較大部份平滑化，或將不同筆觸間之空隙補上。

研究中使用過各種不同的圖形作為結構元素。而因為筆觸的走向各不相同，筆觸間的空隙亦不定在筆觸的那一方向。所以使用圓形的結構元素較符合研究所需。系統中使用一半徑為 9 pixel 的圓作為結構元素，對已分組好的各 map 作 closing。

[圖二十六]closing 成果，左圖為原始圖像，中間為使用半徑為 5pixel 的圓形結構元素，右圖為使用半徑為 10 pixel 的圓形結構元素。

[圖二十七] closing 成果，最左至右分別為原始圖像、使用半徑為 5pixel 的圓形結構元素和使用半徑為 10 pixel 的圓形結構元素。

由圖二十六可看出，筆觸之間的空隙得到填補，使多筆觸間疊合成較形似一筆完成的筆觸。圖二十七中則可看出筆觸轉折角度較大的部份，在做完 closing 後，顯得較為圓滑化。

4.3 顏料堆積

4.3.1 顏料厚度資訊紀錄

在做完上一小節的筆觸疊合後，接下來要實作的便是油畫顏料堆積。油彩顏料因其本身材料特性不同於其他顏料特性，如水彩顏料的渲染性。其顏料的主要特性在於顏料中所含溶劑揮發完後，顏料厚度的堆積，會形成畫布上凹凸不平的表面。其形狀跟筆觸走向有極大相關。

本系統中，我們使用第三章所提到的 Z-Buffer 資料結構，來儲存不同筆觸所造成的顏料堆積厚度結果，還有筆觸上顏色的變化。一般而言，大部分油畫筆觸的形狀會如圖二十八所示。

	［圖二十八］ 油畫筆觸的剖面圖，有著高低起伏的山谷形狀。

油畫筆觸的多筆觸疊合情形會影響顏料厚度堆積的形狀，造成如上圖中的山谷形狀。在上一小節實作出的各組別筆觸，因其資料結構還保留著各筆觸分別的資訊，所以我們可以利用此資訊，做出以山谷形狀累積顏料厚度的演算法。

如上圖中由三筆單一筆觸構成的一筆劃剖面圖，越靠近單一筆觸中心點的顏料堆積越厚，距離越遠則越薄。系統中實作出此一現象的方法，是在做 map 紀錄時，其中以原本單一筆觸的起始點為中心，依筆觸向量資訊指向下一點並記錄下來的步驟中，加入累積顏料厚度資訊的算法。

其算法為以貼上筆觸單點圖案的每一點為圓形中心，此中心為顏料累積厚度最高的點，依次向四周以遞減的方式累加厚度。此方法便可使厚度資訊紀錄呈現山谷形狀。而每次累加的厚度數據若做出不同的調整，可以使不同單一筆觸間的斜率落差有所改變，做出不同的效果。

4.3.2　筆觸先後順序的影響

在 4.1.1 中提及的繪畫筆觸先後順序，在油畫中當然也會因為此順序影響油畫生成效果。影響所及中，最主要的兩點就是最後呈現出的顏料顏色和所干涉的厚度累積情況。

油彩顏料與水彩不同，因為其較濃厚的物理性質，在作畫時不會有明顯易見的渲染效果。相較於水彩的容易渲染混色，油彩的顏料較易覆蓋於本來在畫上的一層顏料，而不與其相混。所以筆畫順序中越晚畫上的筆觸，其顏色便會覆蓋於最上層，而不易與其下層的顏料顏色相混。所以紀錄筆觸順序，才可以決定最後油畫所顯現出來的顏色。

顏料厚度累積，因為畫作上筆觸會有重疊情形，而不同的筆觸之間又會有顏料互相推擠或覆蓋的情形。一般而言若是第二筆筆觸與第一筆筆觸疊合，疊合的部份中，畫筆在下第二筆畫時，若第一筆顏料未乾，則筆毛會推擠走第一筆已累積在畫布上的顏料，但也會留下第二筆所帶的顏料堆積在畫布上。若第一筆顏料已乾，那麼第二筆所堆積的顏料厚度，則會直接加諸於第一筆之上。所以此兩種情況會造成顏料堆積厚度並非是一定會越堆越高，而是會受到筆觸順序影響而有不同的累積厚度方式。

本系統中並未完全模擬筆觸間乾溼程度和不同筆觸順序間顏料推擠情況，而是以較為簡易的條件限制去達成最後結果的模擬。諸如上一小節提到的厚度累加方式，和限制厚度累加到一定程度便不再累加。以免造成筆觸間高低落差過大的情形。

4.4 3D 畫布

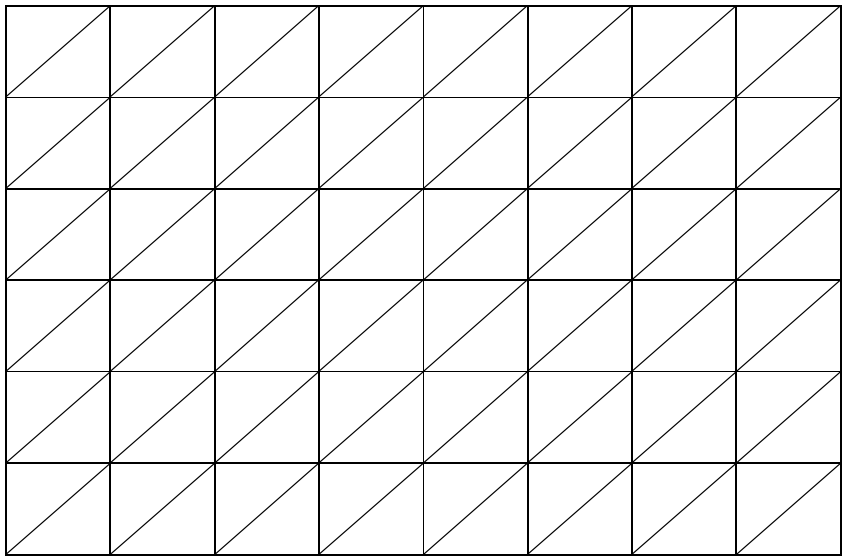
在做完前幾個小節的工作後，系統便可以利用所紀錄和演算出來的資訊，去實作出一個以 3D 網格建構而成的畫。因為輸出結果是以 3D model 的型態存在，所以我們便可以模擬畫作在展示時的環境光源，使得畫作較接近於真實世界中展示時受環境光源影響，所呈現出來的顏色和陰影。以下是實作方法。

4.1.1 輸出檔案

在系統中，我們分為兩個階段。第一個階段是讀取 3D model 的.X 檔，並對其作前幾章所敘述的演算。第二階段就是將這些演算過後的資訊輸出成一個.txt 檔案，再由我們另外撰寫的一 3D viewer 程式來讀檔，將成果顯示在螢幕畫面上。這樣做的好處在於，因為第一階段對輸入的 3D model 所作的演算法極耗運算資源，使得程式運算耗費很多時間。如將輸出畫面也寫在同一程式裡，則每次檢閱結果成品都要花上不少時間。若將每次運算後的結果皆儲存輸出成一獨立檔案，

再用另外撰寫的程式來讀檔，則對使用者來說相對較為方便。

在程式中第一階段我們所作成的油畫，其大小皆為 600*800 個 pixel。我們將其接近中心點的 pixel 視為座標值 x 為 0，y 為 0 的原點，長寬各為 800 跟 600 的一個面。前一章所紀錄下來的各點厚度資訊便作為各點在 z 軸上的值。如此可得到 48 萬個在三維空間上的點座標，而每 3 個點構成一個面，如此便可構成一個在三維空間中的 3D 畫作。此為輸出檔案構成的概念。其示意圖如圖二十九，將各點投影在 2D 平面上的樣子。



[圖二十九]示意圖，圖中每一個轉折處皆代表一個 pixel，此為最後產生的 3D 畫布投影在 2D 平面上的示意圖。

系統中最後輸出的檔案包含的資訊為點座標、顏色跟面。輸出檔案為一 txt 文字檔。檔案內容如圖三十。

```
Point
0 -4 -3 0 64 64 64
1 -4 -2.99 0 64 64 64
2 -4 -2.98 0 64 64 64
3 -4 -2.97 0 64 64 64
4 -4 -2.96 0 64 64 64
5 -4 -2.95 0 64 64 64
                .
                .
                .
479996 3.99 2.96 0 64 64 64
479997 3.99 2.97 0 64 64 64
479998 3.99 2.98 0 64 64 64
479999 3.99 2.99 0 64 64 64
Triangle
0 0 600 1
1 1 600 601
2 1 601 2
3 2 601 602
4 2 602 3
5 3 602 603
6 3 603 4
7 4 603 604
8 4 604 5
            .
            .
            .
957196 479396 479996 479397
957197 479397 479996 479997
957198 479397 479997 479398
957199 479398 479997 479998
957200 479398 479998 479399
957201 479399 479998 479999
957202 0 599 474000
957203 599 479999 474000
```

[圖三十] 包含點座標、顏色跟面資訊的輸出檔案。

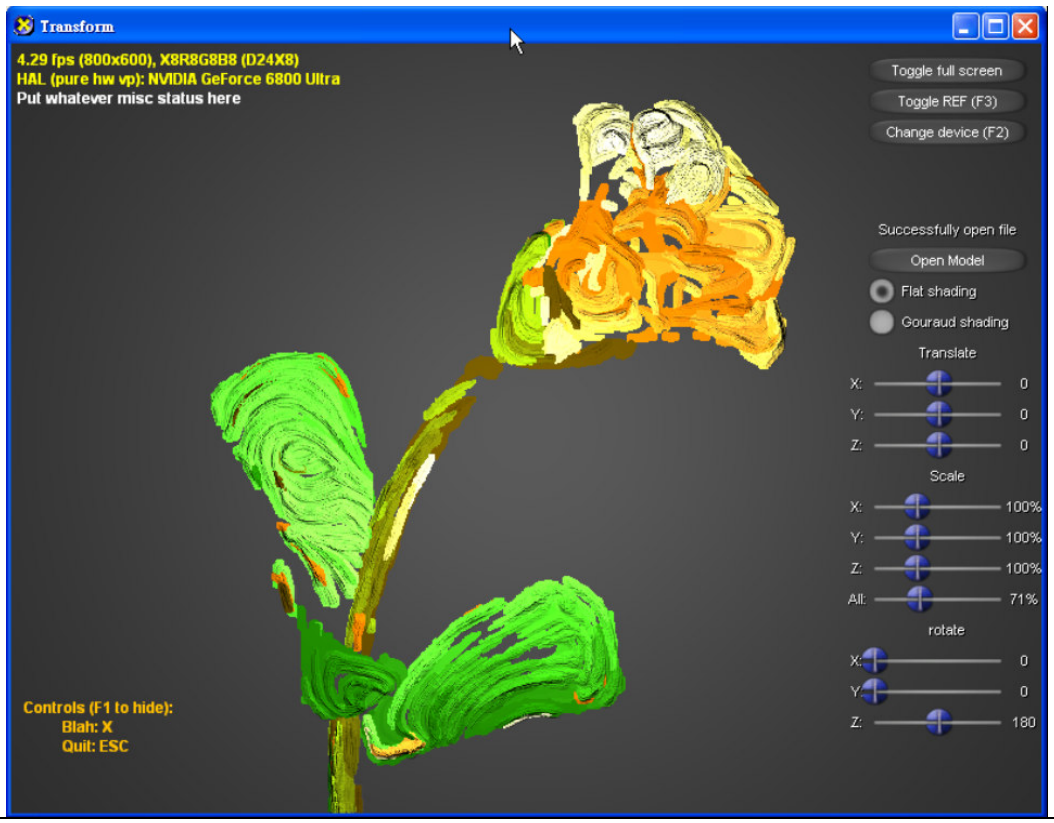
檔案內容第一行為 point，以下為點座標和顏色資訊。每行皆為一個點資訊。第一個數字為作標點的索引號碼，第二到第四個數字為座標ｘ、ｙ、ｚ值。第五到第七個數字為該點的ＲＧＢ值。點座標資訊一直到 Triangle 為止

Triangle 以下則為面資訊，每行皆為一個面資訊。其中第一個數字為面的索引值，第二到四個數字為構成面的三個點資訊，其數字參照各點的索引值。

4.4.2 3D viewer

最後，以另外撰寫的 3D viewer 程式來讀取輸出的檔案。此程式會對讀取後的數據再作建構場景的運算。在讀檔的時候依次計算出每個面和點的法向量值，以便建構出有光源的環境。

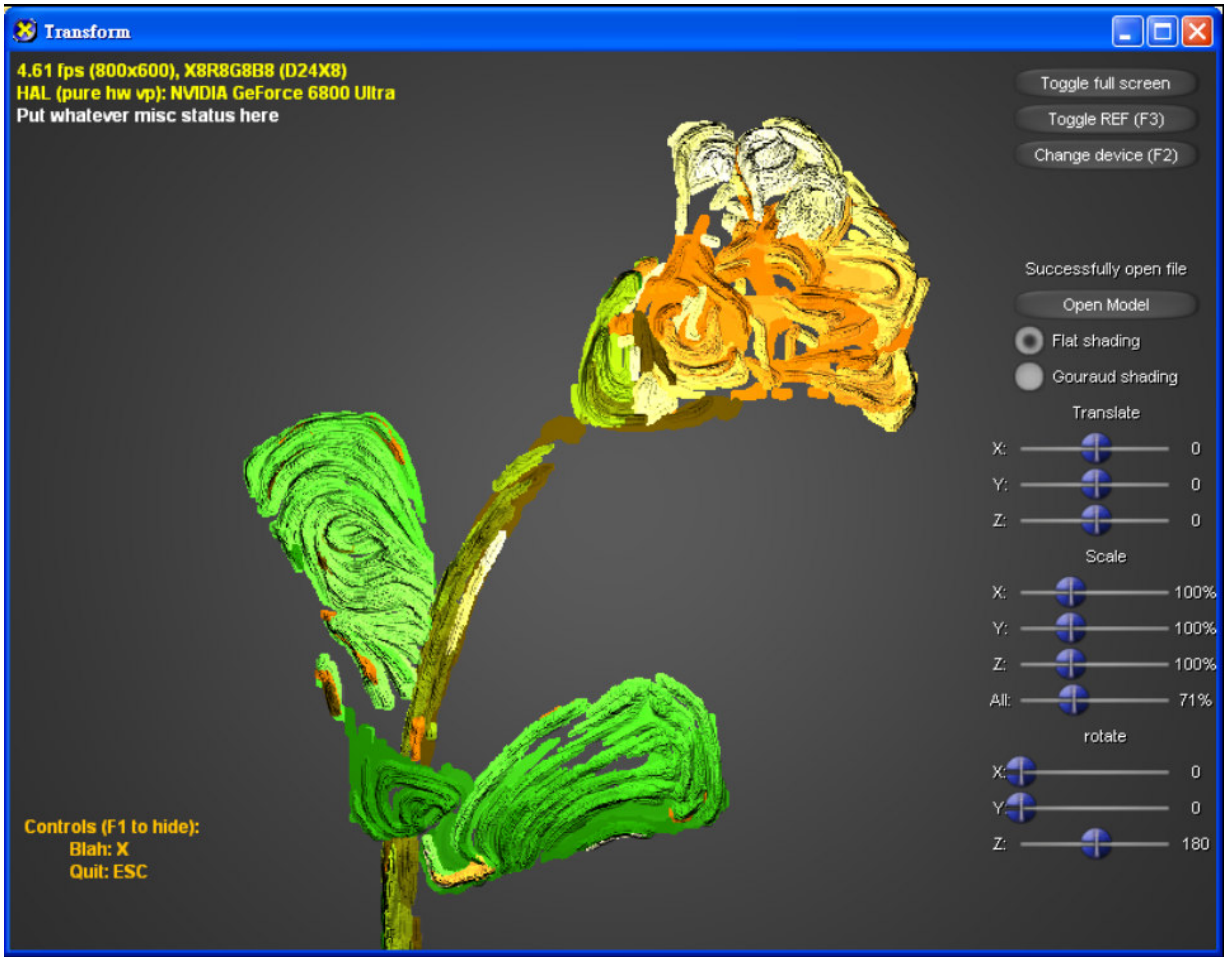
我們模擬一般畫廊展場的環境光源，用點光源來照明畫作。此程式也可作放大縮小和旋轉等功能，因此可以模擬出光源位置不同對畫作的影響。介面如圖三十一



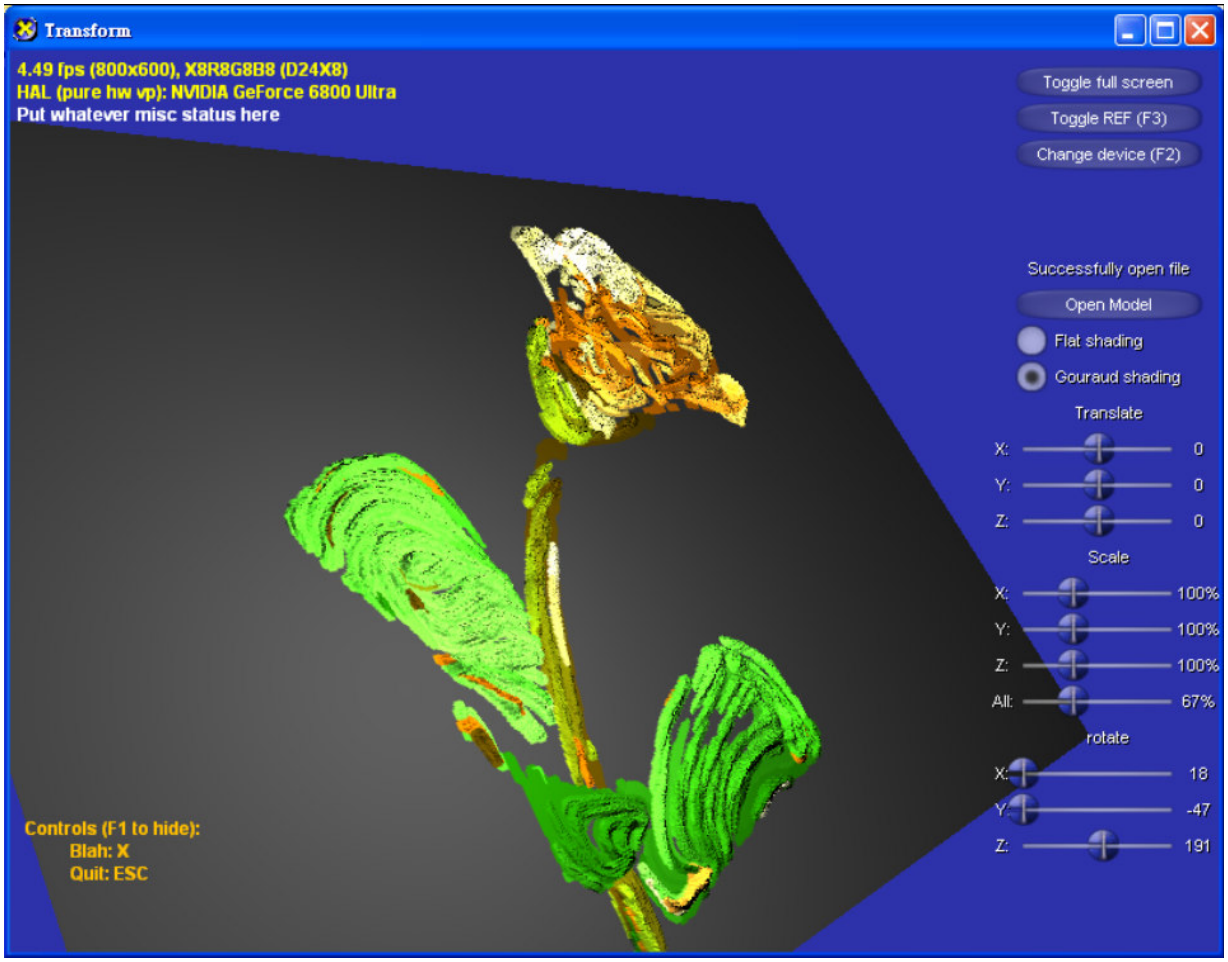
[圖三十一]3D viewer 介面，光源設定在畫布正前方中央的位置。右下方可控制物件大小和旋轉角度。

第五章　研究成果

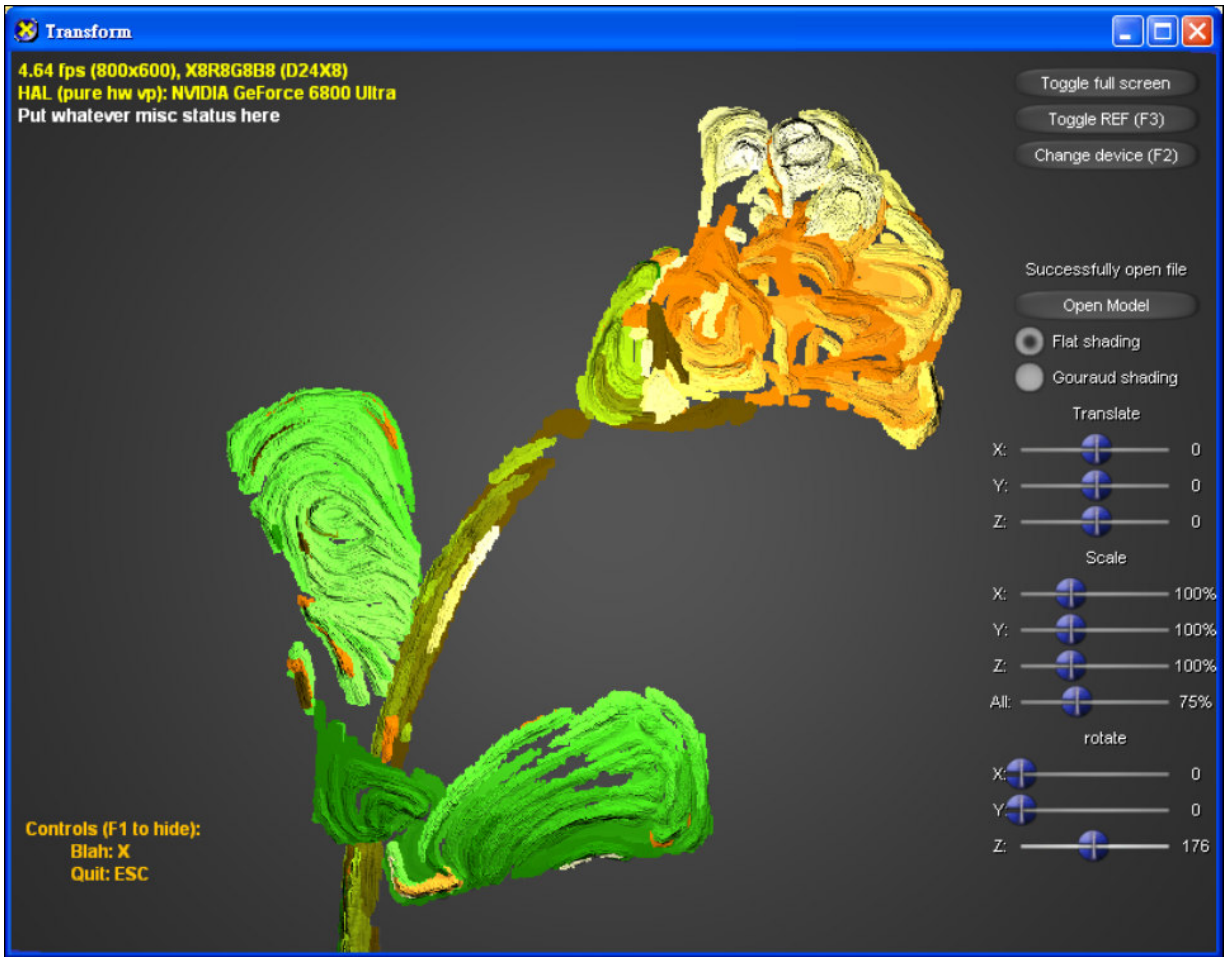
本章節我們展示研究的成果。而更多的成果和連續影像展示可以在以下網址下載,。http://cgda.csie.ncnu.edu.tw/gallery.htm



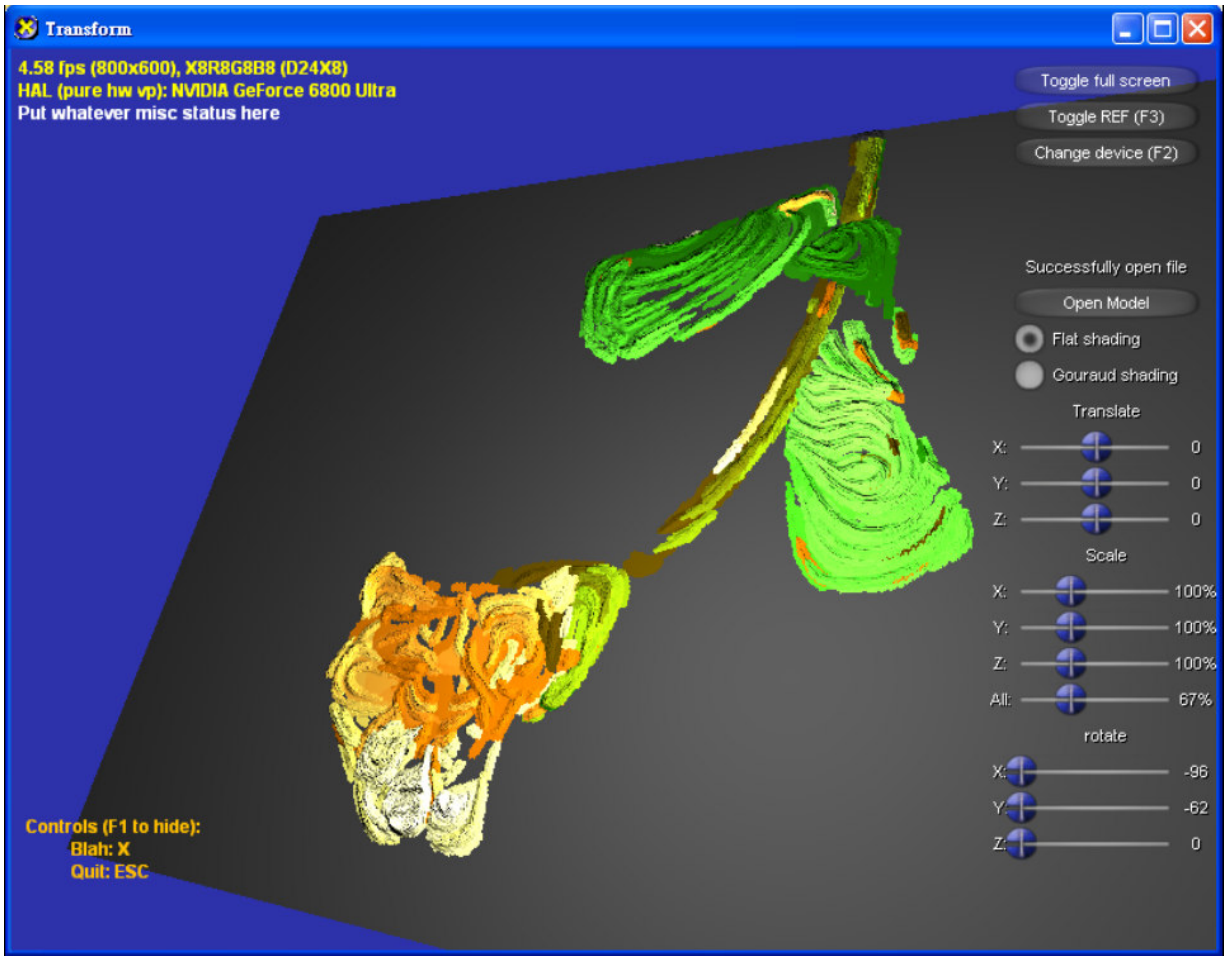
[圖三十二]　累加厚度係數為 0.005 的花



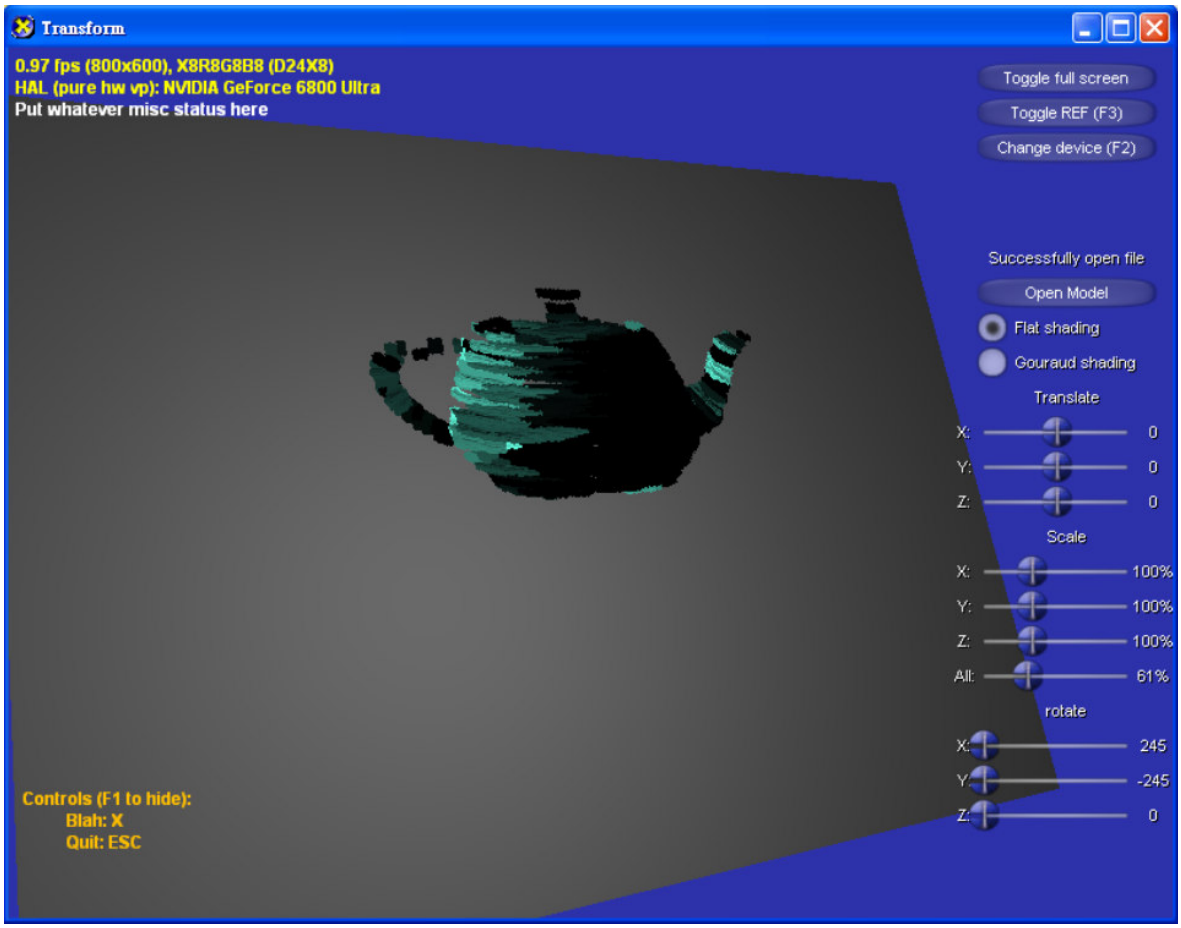
[圖三十三]　不同角度和光源下，累加厚度係數為 0.005 的花。



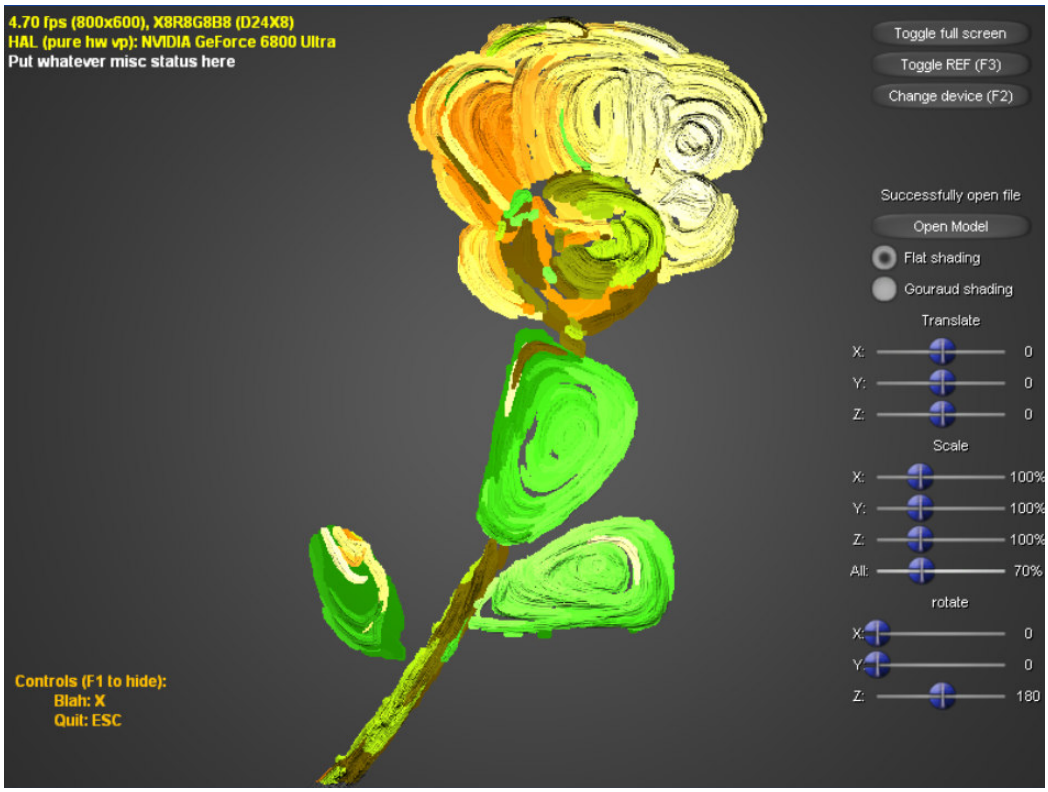
[圖三十四] 累加厚度係數為 0.0025 的花



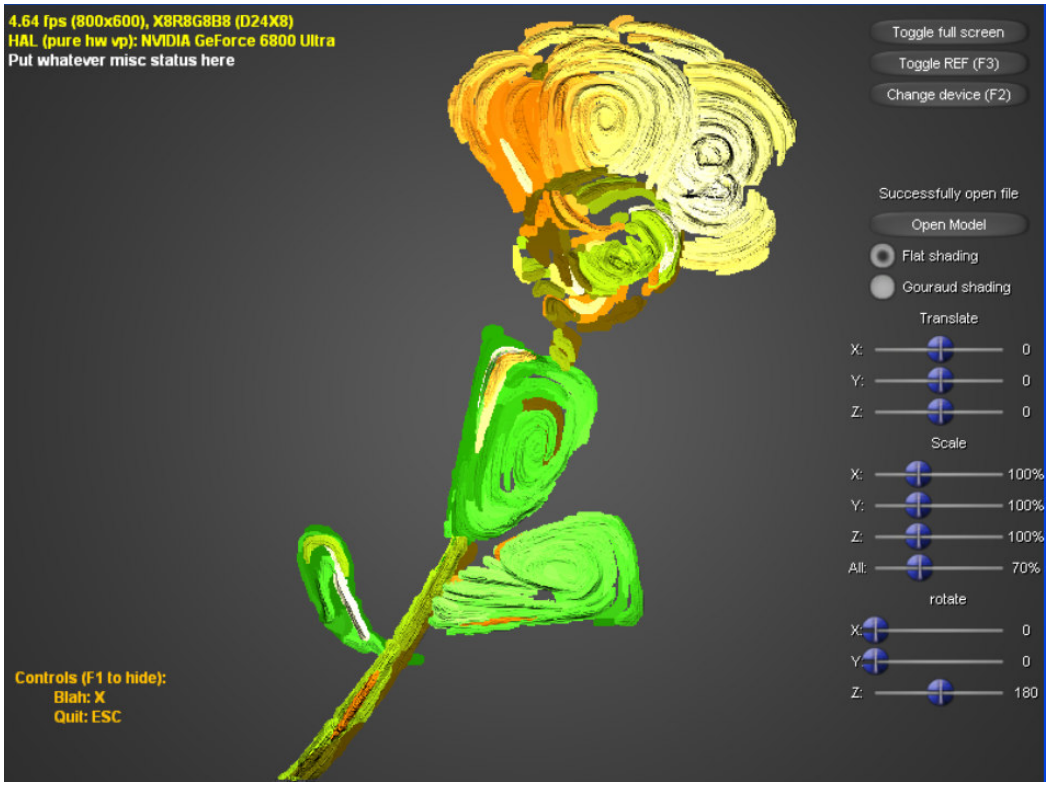
[圖三十五] 不同角度下，累加厚度係數為 0.0025 的花



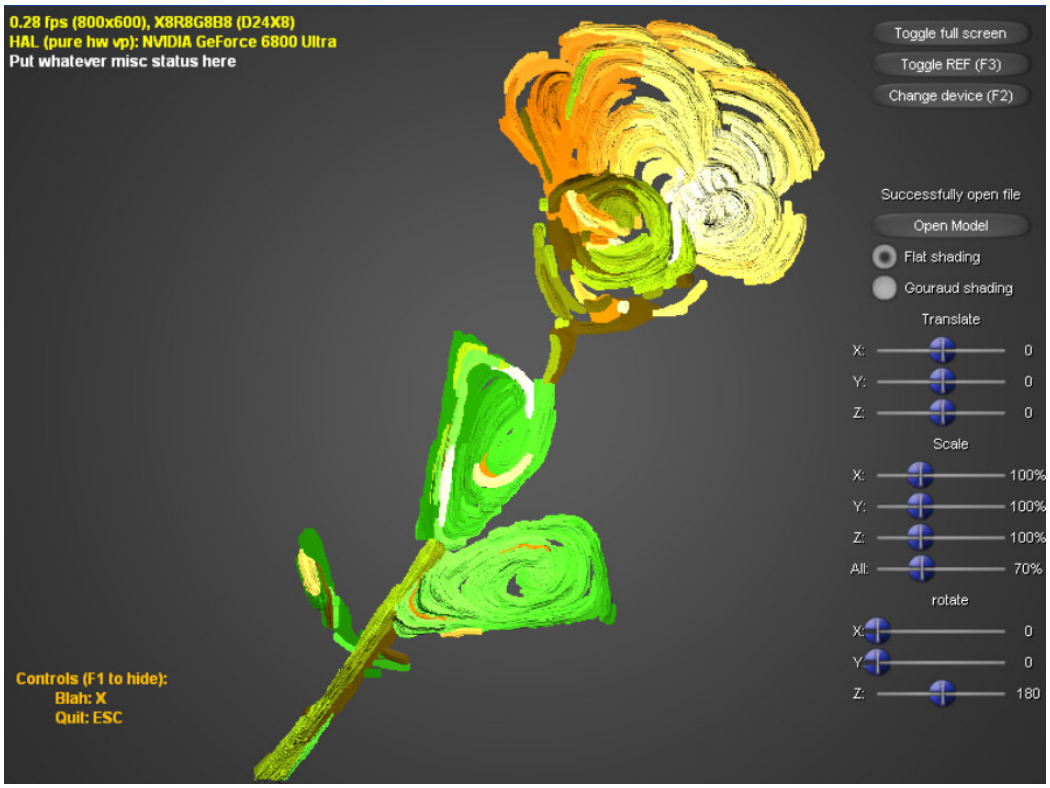
[圖三十六] 以物件的骨架資訊畫出筆觸的茶壺。



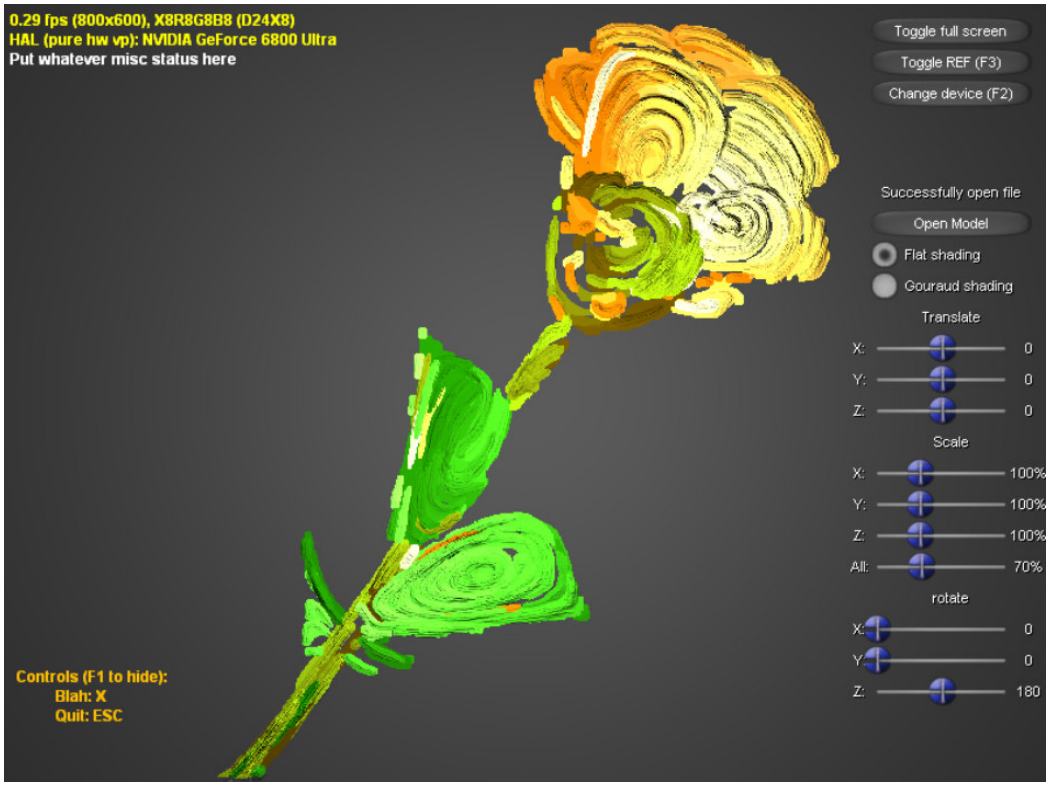
[圖三十七] 以 Y 軸為中心旋轉的花連續畫之一。



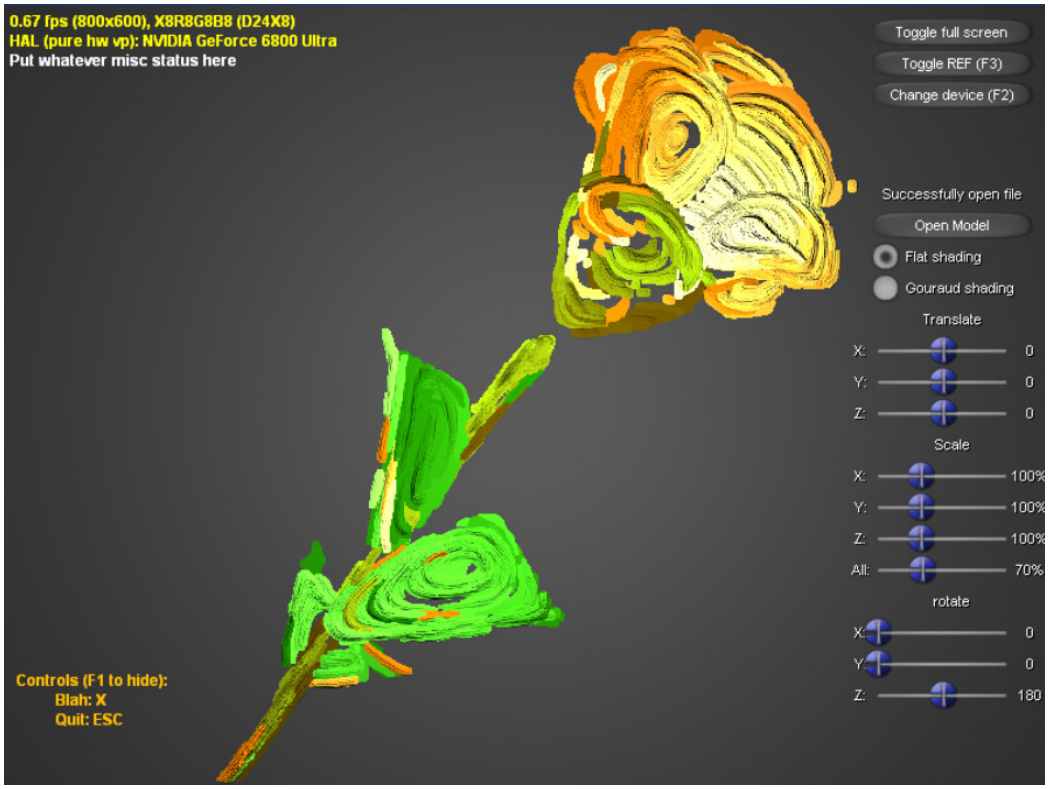
[圖三十八] 以 Y 軸為中心旋轉的花連續畫之二。



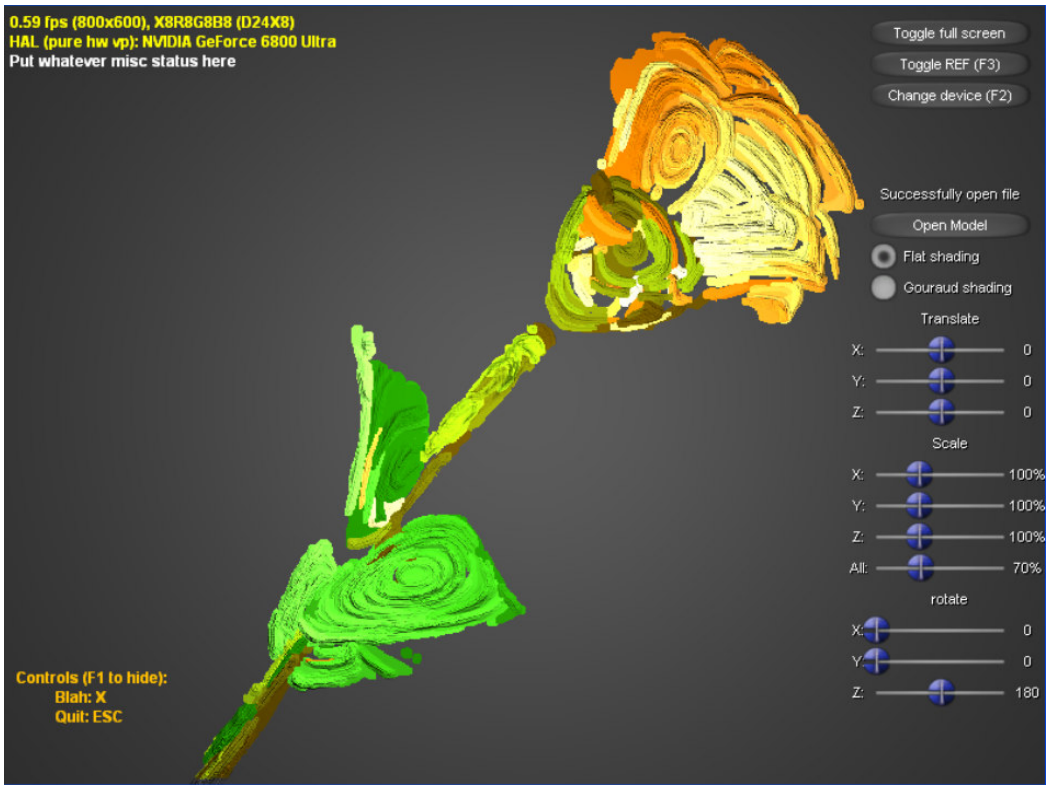
[圖三十九] 以 Y 軸為中心旋轉的花連續畫之三。



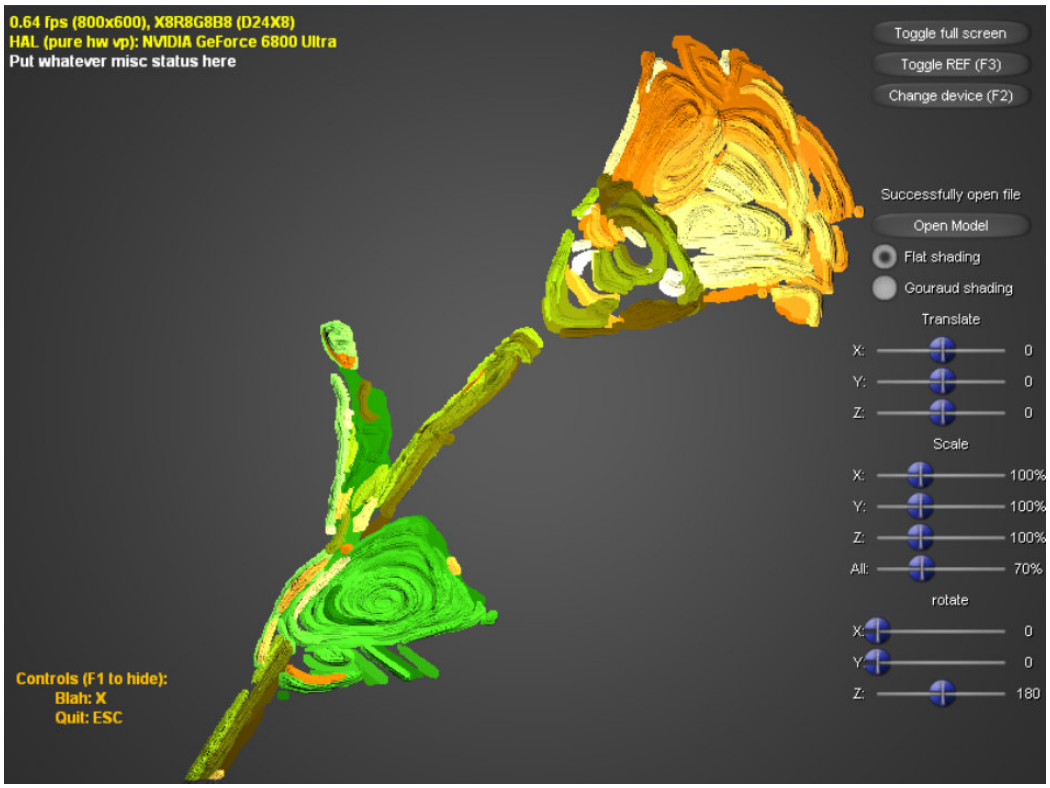
[圖四十] 以 Y 軸為中心旋轉的花連續畫之四。



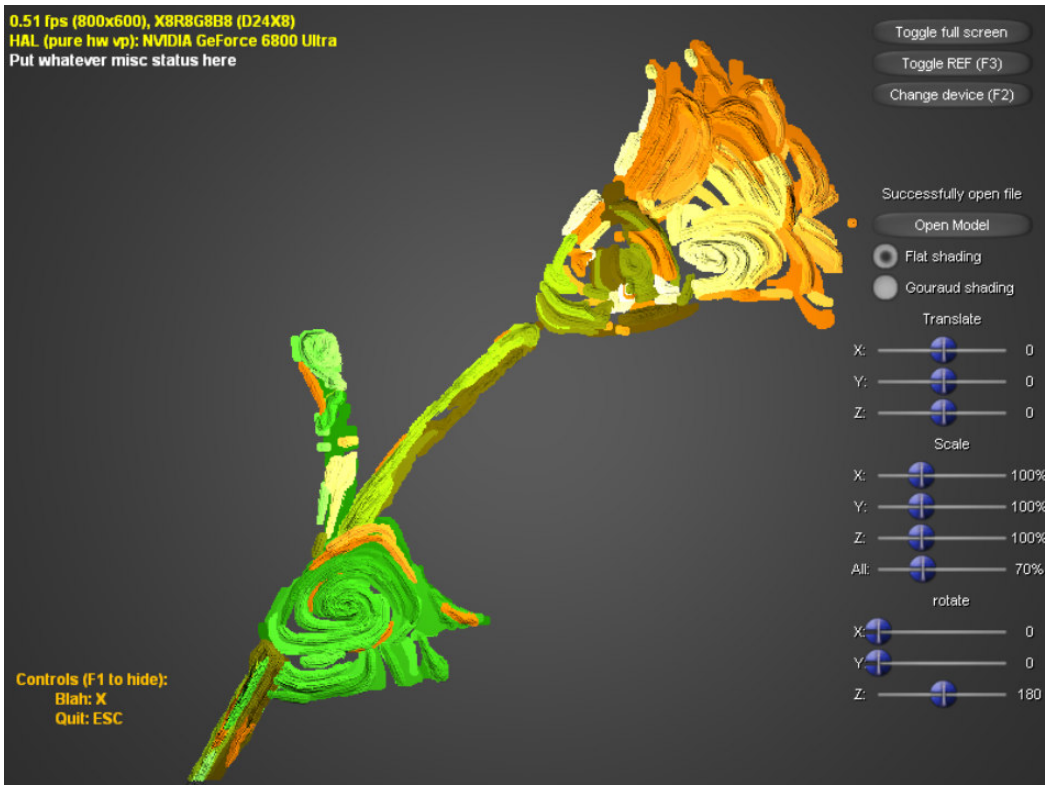
[圖四十一] 以 Y 軸為中心旋轉的花連續畫之五。



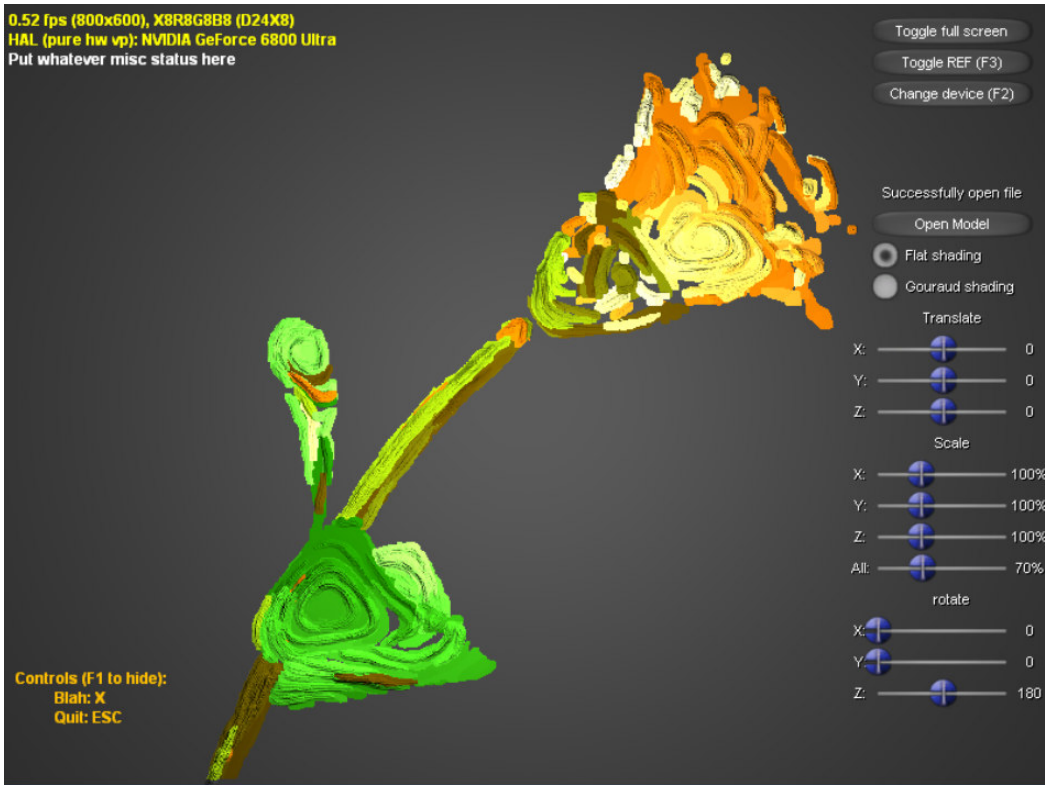
[圖四十二] 以 Y 軸為中心旋轉的花連續畫之六。



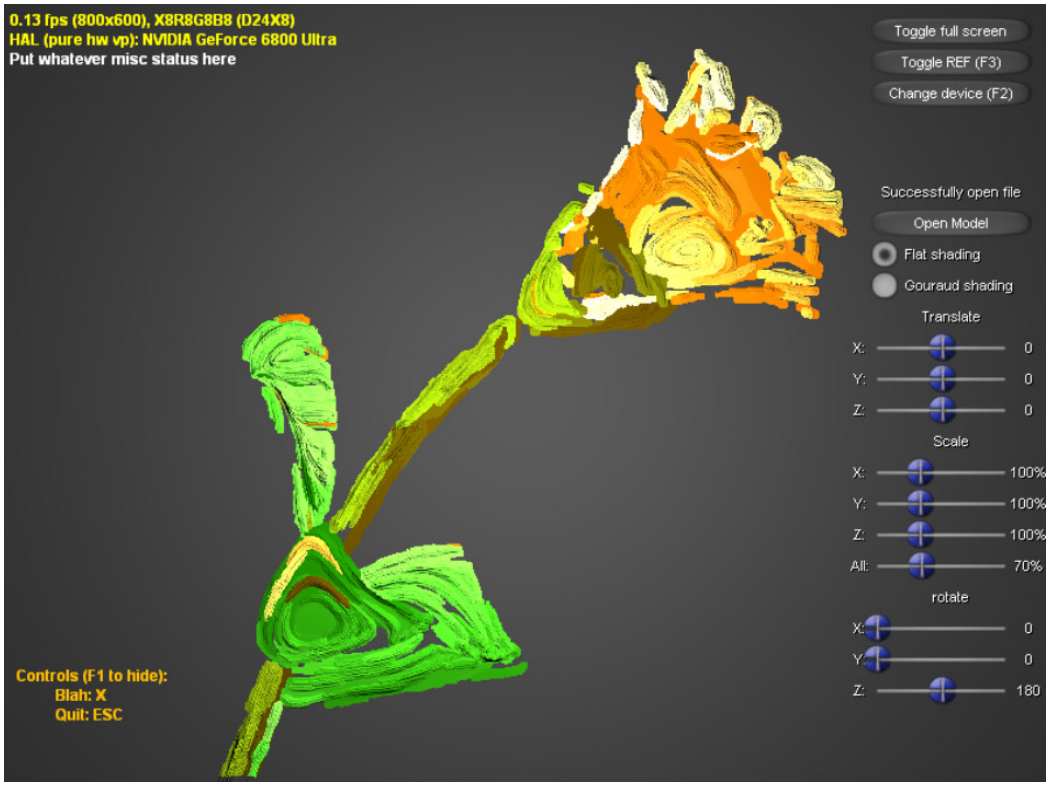
[圖四十三] 以 Y 軸為中心旋轉的花連續畫之七。



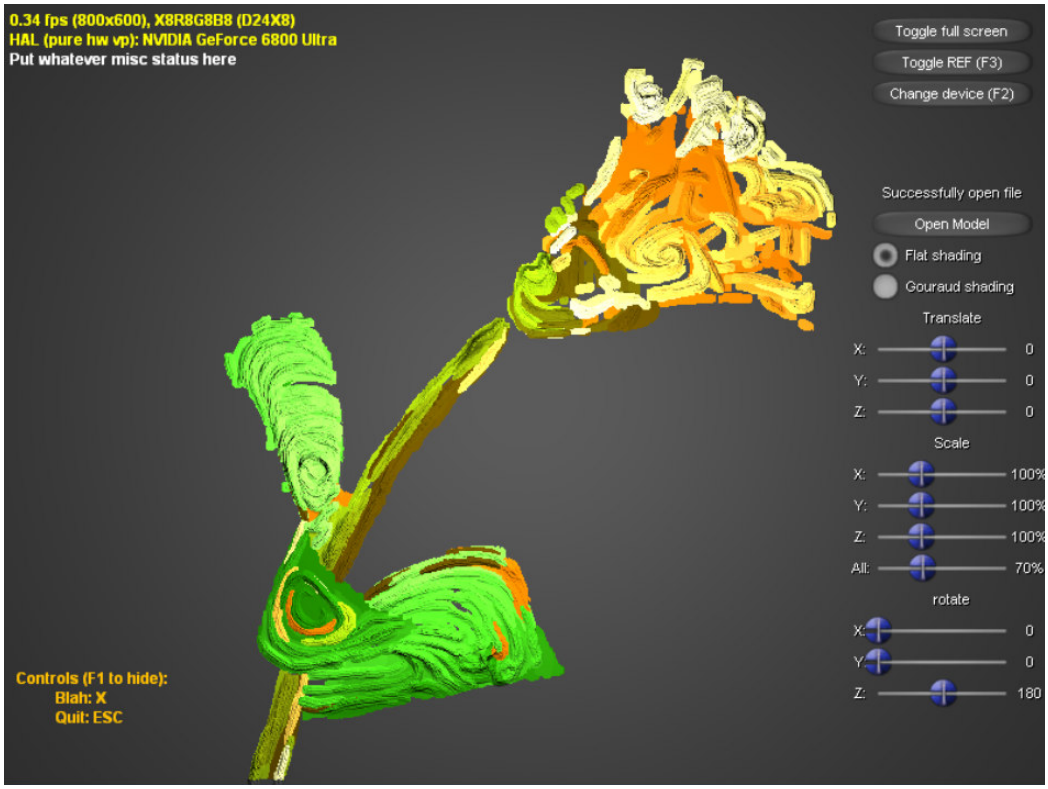
[圖四十四] 以 Y 軸為中心旋轉的花連續畫之八。



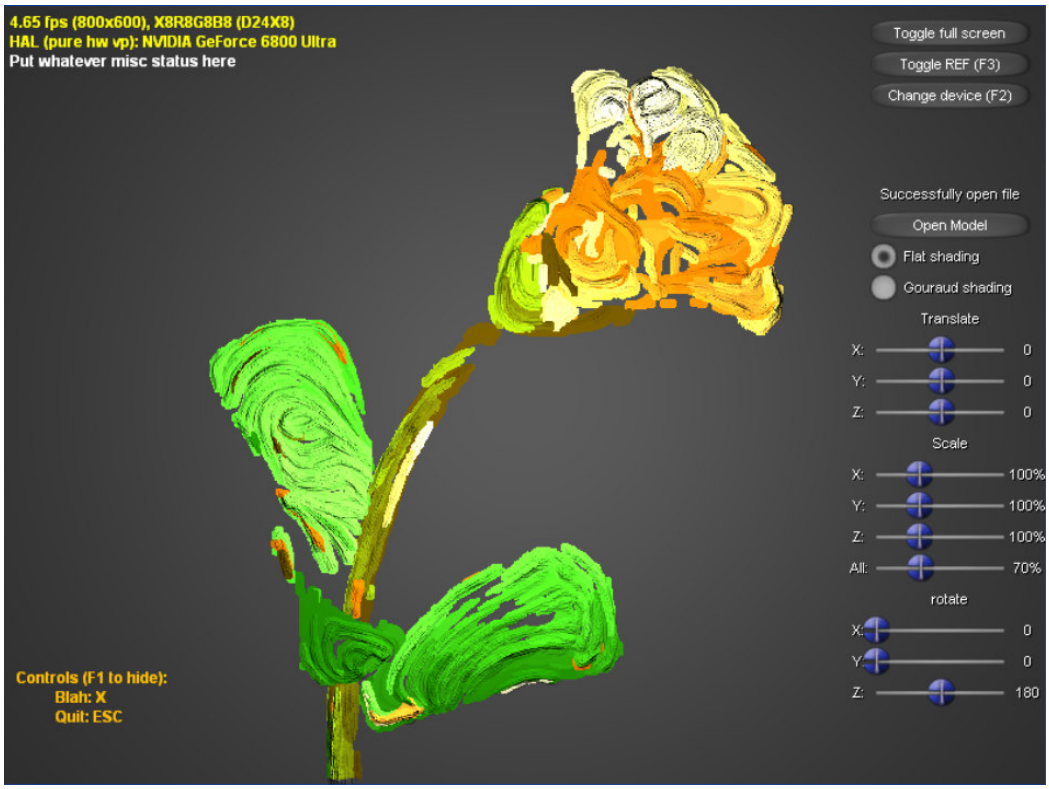
[圖四十五] 以 Y 軸為中心旋轉的花連續畫之九。



[圖四十六] 以 Y 軸為中心旋轉的花連續畫之十。



[圖四十七] 以 Y 軸為中心旋轉的花連續畫之十一。



[圖四十八] 以 Y 軸為中心旋轉的花連續畫之十二。

第六章　結論及未來工作

6.1 結論

在本篇研究中，我們提出一種新的構想來實作出 NPG 3D 動畫系統中的油畫生成，藉由可任意取得模型本身 2D 以及 3D 的相關資訊，我們成功的藉由這些資訊模擬出繪畫筆觸特性的作品。而筆觸疊合、顏料堆積以及 3D 畫布的整合，使我們能夠更近一步模擬出油畫風格，進而生成較接近現實中油畫畫作的成果。

本研究中所使用的筆觸疊合之演算法，與其他我們實驗過的演算法相比，較為適用。此演算法對於不同筆觸間的疊合，能夠有效的消除過大的曲折點，還有補上筆觸間的空隙處。對於處理油畫特性裡單一筆觸中，多筆觸疊合這一點，相當適用。

顏料堆積和建構出 3D 畫布的研究，能夠更進一步的模擬出油畫特性中，油彩顏料堆積厚度的實現。透過實現畫家下筆順序先後的作法，建構出不同筆觸間互相干涉和累加厚度的結果，可做出更具有現實存在感的畫作。

6.2 未來工作

本篇研究藉由Modified Z-buffer，將NPR與油畫模擬的許多概念進行整合。目前只有針對一般常見明顯的油畫特性作處理，而對於不同油畫畫家間的風格差異，都尚欠缺考慮，另外，仍有許多圖學的特性，可以加入系統中。

底下列出可在未來改進此系統的幾個方向：

(a): 模擬個別畫家的繪畫風格。

如本論文中所提到過的梵谷，其畫作獨樹一格的風格。可以藉由導入一些物理模型，對畫作作運算改變其筆觸走向，來作模擬。[12]

(b): 模擬非固體的目標體以及各種特效的生成。

目前系統只有針對可以模型化的物體作處理，若要進一步模擬出無法模型化的物體如煙霧、流水、火光等，則需要額外的資料結構來生成。

(c): 更多油畫特性的模擬。

我們相信仍有許多的油畫繪畫特性是我們所沒有觀察到的。藉由目前已經開發出的系統平台，希望能在未來觀察出更多的特性，並且模擬之。

(e): 改寫為 Plug-in。

目前主流的建模軟體如 MAYA 或 3DS-MAX 皆有提供 Plug-in 的編寫方法。我們希望能夠將此研究以 Plug-in 的方式嵌入建模軟體中，成為獨具一格的 Render 方法。讓更多的使用者接觸這項研究成果。

ACKNOWLEDGMENTS

This research project is partially supported by NSC-94-2213-E-260-021

參考文獻

[1] Lake, A., Marshall, C., Harris M., and Blackstein, M. Stylized Rendering Techniques for Scalable Real-Time 3D Animation. In Proceedings of NPAR 2000: First international symposium on Non-photorealistic animation and rendering, Annecy, France, pp. 13-20, June 2000.

[2]Michael A. Kowalski, Lee Markosian, J. D. Northrup, Lubomir D. Bourdev, Ronen Barzel, Loring Holden, John F. Hughes:
Art-based Rendering of Fur, Grass, and Trees. 433-438
Electronic Edition (ACM DL) BibTeX

[3] Oliver Deussen, Thomas Strothotte. Computer-Generated Pen-and-Ink Illustration of Trees. SIGGRAPH 94. p 91 – 100.

[4] Thomas Luft, Oliver Deussen, "Non-Photorealistic Real-Time Rendering of Characteristic Faces," pg, pp. 339-347, Computer Graphics and Applications, 12th Pacific Conference on (PG'04), 2004.

[5] Eric B. Lum, Kwan-Liu Ma, "Non-Photorealistic Rendering Using Watercolor Inspired Textures and Illumination," pg, p. 0322, Ninth Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (PG'01), 2001.

[6] Maria Shugrina, Margrit Betke, John Collomosse,“Empathic Painting: Interactive stylization through observed emotional state”.

[7] CHUNG-MING WANG, JIUNN-SHYAN LEE, “Non-Photorealistic Rendering for Aesthetic Virtual Environments”

[8] 金子亨著，胡淑惠譯。自學油畫入門 進階&技巧。笛藤出版圖書有限公司。

[9] 柏納著，陳苓譯。目擊者百科 梵谷。家庭傳媒城邦分公司。

[10] Appel, FJ Rohlf and AJ Stein. The haloed line effect for hidden line elimination. ACM Computer Graphics (Proc. of SIGGRAPH '79), 13(2):151--157, August 1979.

[11] R. Galimberti and U. Montanari. An algorithm for hidden line elimination. Communications of the ACM, 12(4):206--211, April 1969.

[12] Bin Wang, Wenping Wang, Huaiping Yang, Jiaguang Sun, “Efficient Example-Based Painting and Synthesis of 2D Directional Texture”.