

# 使用基於秀拉顏色組成的多類藍雜訊取樣 生成點描派畫作

研究生：吳宜倩

指導教授：林文杰 教授  
莊榮宏 教授

國立交通大學

多媒體工程研究所



本論文提出了一個新的點畫技術，利用一個簡單且直觀的概念，可以有效地將輸入的彩色影像轉換成非擬真著色的彩色點畫輸出。首先，本論文藉由參考多幅秀拉的點畫作品，收集、分析、並模仿這些色點的顏色組成結構，進而創造出更多真實畫作中所缺乏的顏色，並將這些資訊儲存起來，以構成我們的色彩統計模型。接著，採用我們所修改的「多類藍雜訊取樣」作為色點的分佈方式，並參考我們在前處理時所建構的色彩統計模型，模仿秀拉的色點分布情況，而藍雜訊的性質確保色點之間的均勻以及隨機分布。最後在實驗部分，我們使用多維度適合度檢定來分析我們與其他先前研究的輸出結果，比較每一個分割區域的色彩分佈與秀拉色彩分佈的相似度，證實了我們在顏色組成上與秀拉的作畫習慣最為近似。

# **Generating Pointillism Paintings Using Multi-Class Blue Noise Sampling Based on Seurat's Color Composition**

**Student: Yi-Chian Wu    Advisor: Dr. Wen-Chieh Lin  
Dr. Jung-Hong Chuang**

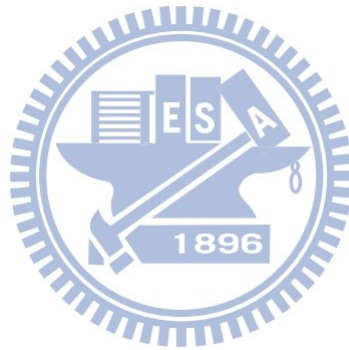
**Institute of Multimedia Engineering  
National Chiao Tung University**



**In this thesis, we propose a new stippling technique, using a simple and intuitive concept to convert a color image into a pointillism painting. First, we collect, analyze, and imitate the color composition structure from Seurat's paintings. We further infer more color compositions, which do not contain in the reference painting, and include them in our color statistical model. Then, we use the modified multi-class blue noise sampling to distribute color points by looking up the color statistical model to imitate Seurat's color composition. The blue noise property ensures that the color points are randomly located but remain spatially uniform. In our experiments, we use the multivariate goodness-of-fit tests to analyze our and other previous research's results, comparing the color composition of each segmentation region to Seurat's, and confirming that the color compositions of our results are most similar to Seurat's painting habit.**

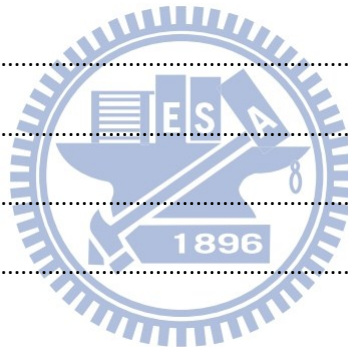
# 致謝

感謝我的父母在我的求學之路不斷給予支持與鼓勵，並在我對研究生涯感到困惑時給我建議與方向，讓我得以完成碩士學業。感謝我的指導教授林文杰教授兩年多來的耐心指導與包容，教導我對於研究的責任與態度，並引導我獨立思考以及學習新知的能力。感謝摯愛葉佳欣先生自大學至研究所以來一路相伴，幫助我度過了許多挫折與風雨，以及突破了許多不管是人生中或是研究上的盲點。感謝 GPL 以及 CAIG 實驗室的全體成員，我的研究之路因為有你們這群朋友而感到快樂。由衷的感謝你們，因為有你們，才能讓這篇論文得以完成。



# 目錄

中文摘要 .....	I
ABSTRACT .....	II
致謝 .....	III
目錄 .....	IV
圖表目錄 .....	VI
第一章 緒論 .....	1
第二章 相關研究 .....	4
2.1 非擬真著色與紋理合成 .....	4
2.2 點畫 .....	5
2.3 半色調 .....	7
2.4 藍雜訊取樣 .....	8
第三章 色彩統計模型的建立 .....	9
3.1 點畫分析的目的與方法 .....	9
3.1.1 彩色影像分割 .....	11
3.1.2 k-means 分群法 .....	13
3.1.3 計算共變異數矩陣 .....	15
3.2 色彩統計模型 .....	16
3.3 色彩統計模型插值計算 .....	17
3.3.1 產生新代表色 .....	19
3.3.2 驗證插值計算的正確性 .....	23
第四章 研究內容與方法 .....	26





4.1 策略及演算架構 .....	26
4.2 決定填入色彩 .....	28
4.3 多類藍雜訊取樣 .....	30
4.3.1 多類硬盤取樣 .....	30
4.3.2 修改後的多類取樣 .....	31
4.3.3 建立 R-矩陣 .....	32
4.4 色點的方向與橢圓 .....	35
<b>第五章 實驗與結果討論 .....</b>	<b>38</b>
5.1 實驗一 .....	39
5.1.1 實驗一方法 .....	39
5.1.2 實驗一結果 .....	40
5.2 實驗二 .....	45
5.1.1 實驗二方法 .....	45
5.1.2 實驗二結果 .....	46
5.3 其他結果 .....	48
5.4 結果討論 .....	61
<b>第六章 貢獻與未來展望 .....</b>	<b>66</b>
6.1 貢獻 .....	66
6.2 未來展望 .....	66
<b>參考資料 .....</b>	<b>67</b>



# 圖表目錄

圖 1 大捷特島的星期日下午 (SUNDAY AFTERNOON ON THE ISLAND OF LA GRANDE JATTE)	1
圖 2 秀拉的畫中並不是所有顏色都會使用補色	3
圖 3 秀拉點畫分析的主要流程架構	10
圖 4 基於平移影像分割示意圖	12
圖 5 彩色影像分割	13
圖 6 彩色影像分割及分析結果	14
圖 7 我們所參考的秀拉點畫作品	16
圖 8 由秀拉點畫局部圖中所收集到的一些顏色及其結構	17
圖 9 尚未改善顏色問題之點畫結果	18
圖 10 目前由藝術家點畫所收集到的代表色在 RGB 空間中的分布情形	19
圖 11 做完插值計算之後的色彩統計模型	21
圖 12 顏色問題改善前與改善後的結果圖比較	22
圖 13 驗證結果比較圖	23
圖 14 本論文的整體演算架構	27
圖 15 參考共變異數矩陣與否的點畫結果局部圖比較	29
圖 16 秀拉點畫具有藍雜訊的性質	30
圖 17 不同非對角項制定方式所造成的不同分佈結果	33
圖 18 藍雜訊能量頻譜	34
圖 19 秀拉點畫局部圖	35
圖 20 圓點和橢圓的點畫局部圖比較	37
圖 21 GEISHA。HAYS、YANG 與我們的結果比較	41
圖 22 COW。HERTZMANN、YANG 與我們的結果比較	42
圖 23 PINK FLOWER。YANG、SEO 與我們的結果比較	43

圖 24	COLUMNS。LUONG、YANG 與我們的結果比較.....	44
圖 25	多維度適合度平均能量值比較.....	45
圖 26	與我們的結果比較的秀拉點畫「大捷特島的塞納河畔」.....	49
圖 27	我們的結果與秀拉點畫在邊緣結構上的比較圖.....	50
圖 28	我們的結果與秀拉點畫在色彩結構上的比較圖.....	51
圖 29	我們的結果與秀拉點畫在樹葉結構上的比較圖.....	52
圖 30	GEISHA。HAYS、YANG 與我們的結果比較放大圖.....	53
圖 31	COW。HERTZMANN、YANG 與我們的結果比較放大圖.....	54
圖 32	PINK FLOWER。YANG、SEO 與我們的結果比較放大圖.....	55
圖 33	COLUMNS。LUONG、YANG 與我們的結果比較放大圖.....	56
圖 34	孔雀.....	57
圖 35	花卉.....	58
圖 36	城堡.....	59
圖 37	海灘.....	60
圖 38	不同參數值造成彩色影像分割結果的不同.....	61
圖 39	秀拉點畫的能量頻譜.....	63
圖 40	光暈分析.....	64
圖 41	手動增加光暈結果.....	65
表格 1	使用者投票實驗.....	46
表格 2	使用者評分實驗.....	47



# 第一章

## 緒論

自 1800 年代開始，新印象派的藝術家崛起，其中最為人所知的畫家即為喬治秀拉 (Georges Seurat)。在當時，秀拉想出了一個從來沒有人使用過的新繪畫方法，在他的畫作中，找不到任何拖曳的筆觸，取而代之的是用點繪的方式，將顏料以點狀離散地一個一個直接點在畫布上，此法即稱之為「點描繪法」(pointillism)。秀拉認為：透過視覺的傳達，這些畫布上的顏色不需要事先經過調色盤來進行融合，因為人們的眼睛就是調色盤，這些彩色小點的顏色將會自動在人類視網膜中融合，進而感知到他所想要表達的真正顏色，這就是點描派藝術家所主張的觀點：色彩的視覺混和。秀拉最知名的傑作「大捷特島的星期日下午」(A Sunday Afternoon on the Island of La Grande Jatte) (圖 1) 可以說是此點描繪法的代表之作，也是發起我們本論文研究的重要靈感。

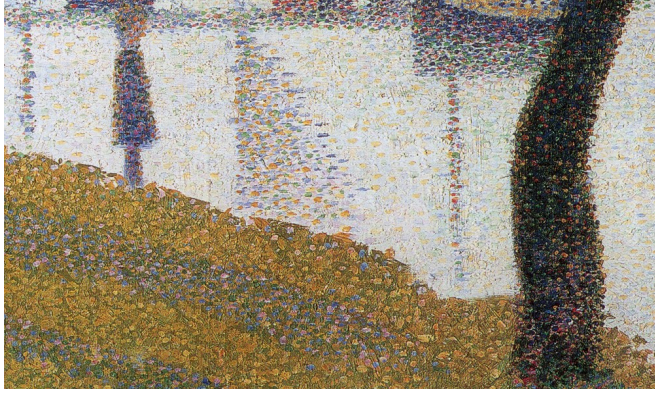


圖 1 大捷特島的星期日下午 (Sunday Afternoon on the Island of La Grande Jatte)

近年來，由於電腦圖學的發展與普及，藝術創作已不再局限於畫布和畫筆，人們也喜愛利用電腦研究方法來創造藝術。1990 年代起，開始有研究者利用電腦圖學的非擬真著色法來研究點畫技術。在初期，與點畫技術有關的研究大多著重在控制這些點的分布方式，例如半色調 (Halftone) [1-4] 以改變點的大小及排列密度來達成灰階值的表示方式；紋理合成技術 (Texture Synthesis) [5-9] 則用於合成不同密度的單一色點紋理，用來表現出圖片中顏色的深淺變化或光線的明暗度；范諾圖 (Voronoi Diagram) 的控制 [10, 11] [12, 13]，利用勞合社的演算法 (Lloyd's Algorithm) 控制單一顏色色點的疏鬆方式。目前為止，這些技術大多都只能透過輸入灰階影像來產生，或者可以輸入任意彩色影像，但是只能夠產生單一顏色的色點或灰階色點輸出，而沒有針對輸出彩色點畫的方法進行研究。近年來，也有許多彩色點畫的研究興起 [14-16] [17-21]，這些研究細心的揣摩秀拉的光暈 (Halo)、補色 (Complementary Colors) 等特徵。然而，秀拉的畫作中並不是所有的顏色都會使用到互補色 (如圖 2)，這些研究所使用的色點顏色決定方式，也鮮少考慮到真實畫家所使用的顏色組合方式，而是採用其他新的演算方式來決定色點的顏色呈現。在視覺上與真實畫作相比之下，其色彩豐富度就顯得略低一籌。

在本篇論文中，我們提出了一個直覺而簡單的彩色點畫技術，事先收集多幅秀拉的點畫作品，把這些從真實畫作收集而來的色彩資訊儲存在可供有效查詢使用的色彩統計模型中，這些色彩統計資訊，包含了秀拉在某顏色之下是否會使用到補色 (Complementary Colors)，並模仿藝術家在構築色彩時所使用的的色點組合方式，來產生真實畫作所收集不到的顏色。在程序進行時，使用者輸入一張彩色圖片，我們的方法可以讓使用者依照自己的喜好來決定輸出結果的細緻度、決定色點的形狀是圓或橢圓、以及決定色點的大小。而在著色的過程中，我們會參考輸入圖片的梯度方向以及梯度值大小，以確保在著色之後的輸出結果可以保留輸入圖片內容的邊緣特性與物件結構。最重要的是，我們會去查詢在前處理時所建構出來的色彩統計模型，並依照所查詢到的顏色比例資訊以及每個組成色在 R、G、B 值的共變異數矩陣進行對色點的著色，使我們所輸出的點畫結果擁有相似於真實藝術家所呈現出來的色彩豐富度以及其顏色組合方式。





(a)



(b)



(c)

圖 2 秀拉的畫中並不是所有顏色都會使用補色。(a) 黃綠相間的草地並沒有藍色與紅色補色；(b) 黃色的沙灘上找不到任何一個補色色點；(c) 紅色的旗子並沒有綠色補色，而綠色與橘色的旗子也沒有明顯的補色效果。

# 第二章

## 相關研究

本論文的研究目的在於利用電腦圖學的非擬真著色演算方式由任意輸入影像產生出彩色點畫輸出，因此本章節將介紹一些非擬真著色與點畫的相關研究。第一小節介紹非擬真著色在電腦圖學研究中的崛起，以及紋理合成技術用於實現非擬真著色的研究；第二小節分別介紹數篇這幾年以來的灰階點畫研究和彩色點畫研究，以及這兩種方法在研究重點上的差異；第三小節提到以半色調構築灰階點畫的研究，以及此方法不適用於本論文彩色點畫概念的原因；第四小節討論點與點之間的分布方式，並解釋藍雜訊性質在點畫中的重要性。



### 2.1 非擬真著色與紋理合成

在非擬真著色 (Non-Photorealistic Rendering) (NPR) 研究中，最主要的目的在於利用電腦圖學來表現出藝術的風格，不管是水彩、鉛筆素描、油畫、水墨畫、或者蠟筆等等各式各樣的非擬真呈現效果或筆觸。在 1980 年代後期，NPR 首次在電腦圖學研究中被提出來，1986 年 Strassmann[22]的毛狀筆觸研究、以及 1990 年 Haerberli[23]的多種筆觸的著色方法研究，可以說是此領域的開端。2003 年時，Hertzmann[24]發表了一篇截至當時為止的二維 NPR 研究統整介紹。其中，基於實例的 NPR 技術在當時是一個相當受歡迎且成果卓越的研究，而紋理合成 (Texture Synthesis) 就是此技術中相當重要的一種實現方法：在 2001 年，Efros 等人[6]提出了圖片縫合技術 (Image Quilting)，保留了輸入影像的低頻資訊，再利用使用者想要呈現的輸出材質來繪製結果。但是此項技術局限於單一種材質的合成，而不能在同一輸出中呈現多元化或多種顏色的材質組合；同一年，Hertzmann 等人[7]也提出了圖像類比技術 (Image Analogies)，參考已知的圖片與

其非擬真輸出之間的相對關係，利用此相對關係，可將輸入的新圖片轉換出相同效果的非擬真輸出。但是對於期望輸出的結果，使用者若沒有事先持有一組這樣的相對關係，就無法單憑一張輸入圖片進行非擬真著色。

近期在 2008 年，Yan 等人[8]以文森威廉梵谷（Vincent Willem van Gogh）的作品作為範例，經由他們的影像分割和合併及內插技術，進而產生一組由畫家擷取出來的藝術圖（Painterly Art Map）（PAM），其內容是一串連續的顏色，由明到暗、並具備梵谷筆刷特徵的紋理，此 PAM 用以重新描繪使用者所輸入的圖片或模型，使輸出結果具有梵谷的筆刷紋理。2010 年，Lee 等人[9]同樣使用梵谷的作品作為範本，從任意輸入圖片中先參考其梯度方向產生出一幅方向圖，再結合梵谷的作品，依照方向圖將原圖的高頻資訊使用紋理合成技術以梵谷的筆刷取代。以上兩篇近期研究皆參考了真實藝術家梵谷的作品，並擷取梵谷的筆刷特徵，因此激發了本論文擷取真實藝術家配色以實現彩色點畫技術的靈感。



## 2.2 點畫

從 1990 年代起，開始有研究者利用電腦圖學的非擬真著色法來研究點畫（Stippling）技術[5]，此時期的點畫皆為灰階點畫。點畫技術一般可以由輸出結果的表示方式來區分，如：圖片、曲面、或幾何模型，分別代表二維、二點五維、及三維的點畫。而本論文的主要焦點即放在討論二維點畫。

基於圖片的點畫研究通常以灰階圖片做為輸入，並透過適當的調整點的位置、大小及形狀來表現原圖中不同位置所要表現的明暗色調。早期的點畫技術大多使用勞合社迭代疏鬆法，透過質心范諾圖（Centroidal Voronoi Diagram）（CVD）的控制來決定產生點的分布位置。Deussen 等人[10]在 2000 年應用此技術允許使用者操控與局部調整點的位置。2002 年，Secord 等人[12]更進一步改善了此技術，提出加權 CVD（weighted CVD），用以反映出目標位置的局部密度。近期在 2008 年，Kim 等人[25]同樣使用勞合社迭代疏鬆法的范諾圖，並提出了有方向性的點畫來保留並加強輸入圖片的結構性。



除了勞合社迭代疏鬆法之外，也有研究者採用其他方法來呈現點畫。Salisbury 在 1997 年[5]提出的研究即是一個使用紋理合成技術來呈現筆和墨水效果的點畫研究。近期在 2009 年，Kim 等人[26]同樣使用紋理合成技術，收集真實畫家的墨水點畫，並建構出色調圖 (Tone Map)，存放由明到暗的真實墨水點畫筆觸，此篇也是激發本論文靈感的研究之一；2007 年 Mould[27]修改了代克斯托演算法 (Dijkstra's Algorithm) 用以決定點的放置位置；而 2010 年 Martin 等人[28]參考藝術家在作畫時所執行的所有高階動作，包括擷取輸入圖片的主要內容、排除非主要事物、增加輸入圖片的全域及局部對比度、降低圖片的複雜度、加入細節等等，藉此模仿藝術家在創作時的行為模式，已達到電腦輸出無法產生的效果。

而在彩色點畫模擬的部分，1998 年，Hertzmann[20]是最早開始模擬彩色點畫的研究，除了點畫之外，還模擬了各種不同畫筆的筆觸。2004 年，Hays 等人[19]利用影片來轉換出各種不同的繪畫風格，其中也包含了彩色點畫的模擬，其方法為利用參數的調整來進行色彩擾動 (Jitter) 以達到色點顏色繽紛的效果。在 2005 年，Jang 和 Hong[14]同樣利用色彩擾動，再利用 Glassner 在 1998 年[29]提出的潘洛斯鋪磚 (Penrose Tiling) 並結合他們提出的色彩密度公式 (Color Density Function) 來決定每個色點的分布位置。同一年，Luong 等人[21]認為藝術家點畫的繽紛效果是由挑選相同亮度值的顏色來構成，因此他們利用這樣的性質挑選亮度值相同的色彩來構成的點畫。而 2008 年，Yang[15]等人針對秀拉的真實點畫進行基本色彩、點的大小、光暈與補色效果等的觀察，在 CIELAB 色彩模型上決定色點的顏色，也利用了舍夫雷爾 Chevreul 所定義的「主顏色」 (Primary Colors) 來進行混色 (Dithering)。2010 年，Seo 與 Yoon[16]擴充了 RYB 色彩空間為一個色彩輪盤，並分析秀拉真實點畫，在此 RYB 色彩空間下，分析構成感知色 (Perceived Color) 的色點之間，在色調 (Hue) 上的變異數 (Variance)，並結合遞迴王氏貼磚 (Recursive Wang Tile) 來完成色點的分佈。另外在 2010 年，Arroyo 等人[17]以呈現彩色麥克筆的點畫為目的，透過模擬藝術家的行為模式而推測出一組機率函數，並使用一個隨機演算法來決定點的擺放位置。2011 年，Roguljic 與 Papic[18]將輸入影像分成五層，並在 HSV 色彩模型下進行色彩擾動 (Perturbation)。本論文最後將與這幾篇同樣是以彩色點畫為目的的研究做數據實驗與比較。

## 2.3 半色調

半色調 (Halftone) 原本是一種用在印刷方面的技術，透過控制離散色點的大小、形狀或間距來模擬連續色調 (Continuous Tone) 的灰階影像。半色調也可以專指利用上述過程所產生出來的輸出。由於印刷技術的崛起，半色調在早期時就有很多相關研究，其中又以 1974 年 Floyd 等人[3]的誤差擴散 (error diffusion) 技術最廣為之名，但卻有結構效果不明確以及視覺上排列不自然 (Visual artifacts) 的問題。2001 年，Ostromoukhov 等人[4]改善了視覺上排列不自然的問題，但在結構保持的表現仍不盡理想。近幾年來，半色調的研究幾乎已經可以說是走到成熟，Pang 等人在 2008 年[30]提出了利用最佳化演算法及目標函數保留了整體圖片結構與色調指標 (tone metrics)；2009 年，Chang 等人[31]利用誤差擴散的方式，不僅能保留整體結構，還大大縮短了整個程序的運算時間；2010 年，Li 和 Mould[32]提出了對比感知的半色調 (Contrast-aware Halftoning)，繼續沿用誤差擴散技術，保留此技術運算快速的優勢，並強調人眼視覺對明暗對比的感知，藉此更強化圖片內容的結構性。

然而，半色調技術並不適用於本篇論文產生彩色點畫的概念。其原因為半色調的主要運作方式是在一個給定的固定離散取樣空間下執行色彩計算，而非一般無論在連續或離散空間都需要計算顏色和位置資訊的影像取樣，其點的取樣位置在一般影像取樣方法中，較具有隨機的性質，而半色調則較具規律性。再者，如半色調振動 (Dithering) 或誤差擴散等，這些依賴固定的鄰近區間大小的方法，其取樣方式規律且離散，只要稍微增加輸出圖片的解析度，就會降低此固定鄰近區間大小的有效空間範圍，進而產生無法消除的離散不自然 (discretization artifacts) 效果。另外，因為本論文的重點在於可以產生彩色點畫，因此所需要的圖片取樣方法必須可支援彩色圖片的運作，而半色調技術雖然在灰階點畫方法中已趨近成熟[30-32]，但在處理彩色圖片時只能以少量的顏色，如 CMYK 來處理多種色彩，因此本論文最後不採納半色調取樣方法來完成我們的點畫研究。下一小節將介紹我們所採用的圖片取樣方法。

## 2.4 藍雜訊取樣

影像取樣 (Image Sampling) 在電腦圖學中是一種非常廣泛的技術，不同的應用方式往往需要不同的取樣圖案。而在現今已存在的各種影像取樣方法中，藍雜訊取樣 (Blue Noise Sampling) 因為具有空間上的均勻性以及避免了混疊鋸齒的不自然效果 (Aliasing Artifact) 而受到歡迎且被廣泛使用。1983 年，Yellott[33] 以靈長類動物的視網膜錐細胞分布狀況為靈感，提出了藍雜訊傅立葉光譜 (Fourier Spectrum) 性質的概念，即是一種隨機分佈卻又保持著均勻狀態的性質，其特色是頻譜中僅有高頻資訊而缺乏低頻資訊，且有結構性餘峰 (Structural Residual Peaks)。

1982 年，Lloyd[34] 提出的勞合社演算法 (Lloyd's algorithm)，以及 1986 年，Cook[35] 所提出的泊松磁盤分佈 (Poisson Disk Distribution) 可以說是藍雜訊影像取樣的兩個開創性的研究，這兩大方法各具有不同的品質、效能、以及用法的權衡。關於勞合社演算法的應用，我們在本章第二小節已經提過；而在 2003 年 Cohen 等人[36] 提出的王氏貼磚 (Wang Tile)、2005 年 Lagae 等人[37] 的程序性物件分佈函數、2006 年 Kopf 等人[38] 結合了王氏貼磚以及紋理合成等研究，都參考並應用了泊松磁盤取樣的技術。另外，1998 年 Glassner[29] 提出了彭羅斯貼磚 (Penrose Tiling)，彭羅斯貼磚是由一組原始磚 (Prototile) 的集合經由非週期性分裂而產生的一種非週期性貼磚法。近期在 2004 年，Ostromoukhov 等人[39] 利用彭羅斯貼磚提出了一種參考圖片局部重要性的藍雜訊取樣，而在本章第二小節提過 Jang 和 Hong[14] 所提出的彩色點畫技術就是以此取樣做為實現基礎。


然而，截至目前為止這些影像取樣技術都是把焦點放在單類 (Single Class) 取樣，因此一次只能處理一類的資料，而在多類 (Multi-class) 取樣下卻無法在各類之間仍舊保持藍雜訊的均勻性質。值得一提的是，在 2010 年時，Wei[40] 提出了多類硬盤取樣 (Multi-Class Hard Disk Sampling) 以及多類軟盤 (Soft Disk) 取樣，這兩種取樣方法分別延伸並修改自泊松磁盤分佈以及勞合社演算法，可以多類處理，無論是在單一類別中、或是類別與類別之間，都可以保持藍雜訊隨機與均勻的性質。本論文即是參考並修改 Wei 所提出的多類硬盤取樣來實現彩色點畫。

# 第三章

## 色彩統計模型的建立

這個章節為本論文研究的前處理介紹。第一小節說明本論文如何擷取藝術家真實點畫的顏色組成結構，並逐一詳細解釋各步驟做法；第二小節介紹色彩統計模型的結構以及存取方式；第三小節闡述上述步驟在方法條件上的限制，並提出一個解決方法以補足色彩統計模型中缺乏的顏色，確保本論文使用的點畫技術所產生的點畫整體顏色不會因蒐集的顏色不足而與原始輸入圖片相差太多。

### 3.1 點畫分析的目的與方法



經由觀察秀拉的點畫可以得知，在他的畫作中，並不是所有的顏色區塊都會使用到補色（如圖 2），因此一味的在結果圖中加上補色不一定會符合秀拉的作畫風格。我們認為，秀拉在不同顏色的表達上，會有不同的顏色組成結構。為了模擬藝術家真實點畫的顏色組成，以增加我們輸出點畫的真實性，我們收集了多幅秀拉的彩色點畫局部圖，並利用影像處理以及統計方法來進行分析，以做為未來在著色時色彩組合的參考範本。本論文點畫分析的基礎精神為：對於任意顏色，我們由真實點畫中依照構成此顏色的局部色塊，統計此色塊中總共使用了哪些顏色的小色點，並將這些小色點依照像素值（Pixel Value）加以分群，再計算每一群的像素數量（Pixel Number）佔此色塊像素數量的百分比，取得這些資訊後，便可以加以模擬利用。

在此，本論文定義以下名詞：在藝術家想要表達的任意一個局部區域顏色，我們稱之為「代表色（Representative Color）」，而在此代表色的色塊區域下，依照像素值所分出的  $k$  群，即稱為此代表色下的  $k$  種「組成色（Component Colors）」。（如圖 6）



由於秀拉在作畫時所使用的色點顏色變化多端，為了避免少數色點的顏色在分析及分群合併的過程中，因為數量太過稀少而被忽略，流失了原始真實點畫的色彩豐富感，本論文提出了利用保存各組成色內的像素值共變異數矩陣 (Covariance Matrix)，保留住少數色彩的出現機率；另外，一個代表色下所有像素值的共變異數矩陣也會被儲存在色彩統計模型中，以供產生不足顏色時使用，此方法將在 3.1.3 小節以及 3.3 節介紹。



圖 3 秀拉點畫分析的主要流程架構

### 3.1.1 彩色影像分割

為了產生好的色彩統計模型，以供未來在點畫著色時查詢使用，彩色影像分割（color image Segmentation）便扮演了非常重要的角色。一般來說，彩色影像分割還可以細分為：將物件、圖形或色彩從一幅彩色影像中分離出來的三種分割方式。在基於實例的非擬真著色中，許多研究往往喜歡使用以分離物件為主的影像分割方式，其原因是將物件分割出來之後再一一處理，可以將原始輸入圖片的結構保留得較為完整，也較為容易判斷前景與背景的區別。然而，物件影像分割往往需要一連串影片的輸入來幫助判別，並且大多只能判別出移動物體與背景的差別，若不使用影片輸入而只有輸入單張影像，則牽涉到許多物品判別的前處理，而且往往只能找出特定物件，或一次只能找出少數物件，而不能一次將整張影像完全分類。再者，在同樣的物件下，不同的光影變化在螢幕上所呈現出來的色彩值必定不相同，亦即：同一個物件在照光區域或非照光區域所呈現的色彩必定不同；更甚者，同樣的亮度照光條件下，物件在白光照射與黃光照射的部分也必不會是同樣色彩。由於本論文使用影像分割的目的在於能得知一個「色塊區域」之下的色點組成，若採用分離物件的影像分割，則無法判斷同樣物件上所呈現的不同色彩，因此本論文主要採用的是分離色彩的彩色影像分割方式。

本論文使用 2002 年 Comaniciu 與 Meer 所提出的基於平移（Mean Shift based）影像分割系統[41]做為色彩影像分割方式。其做法為將影像的資料分佈在 CIE Luv 空間中，一開始撒上多個任意點作為掃描窗的初始中心位置，接著在掃描窗的範圍中找出局部分佈最密集的位置，並將掃描窗平移過去，隨著每次迭代過程更新掃描窗中心點位置，重複此步驟直到掃描窗不再移動，即為收斂，此時每個掃描窗的中心位置就是每個分割區域結果的顏色。最後根據此過程中掃描窗的移動軌跡來決定如何合併這些資料點成為同一個分割區域，以及調整參數設定以決定每個分割區域的大小。其過程示意圖如下所示：

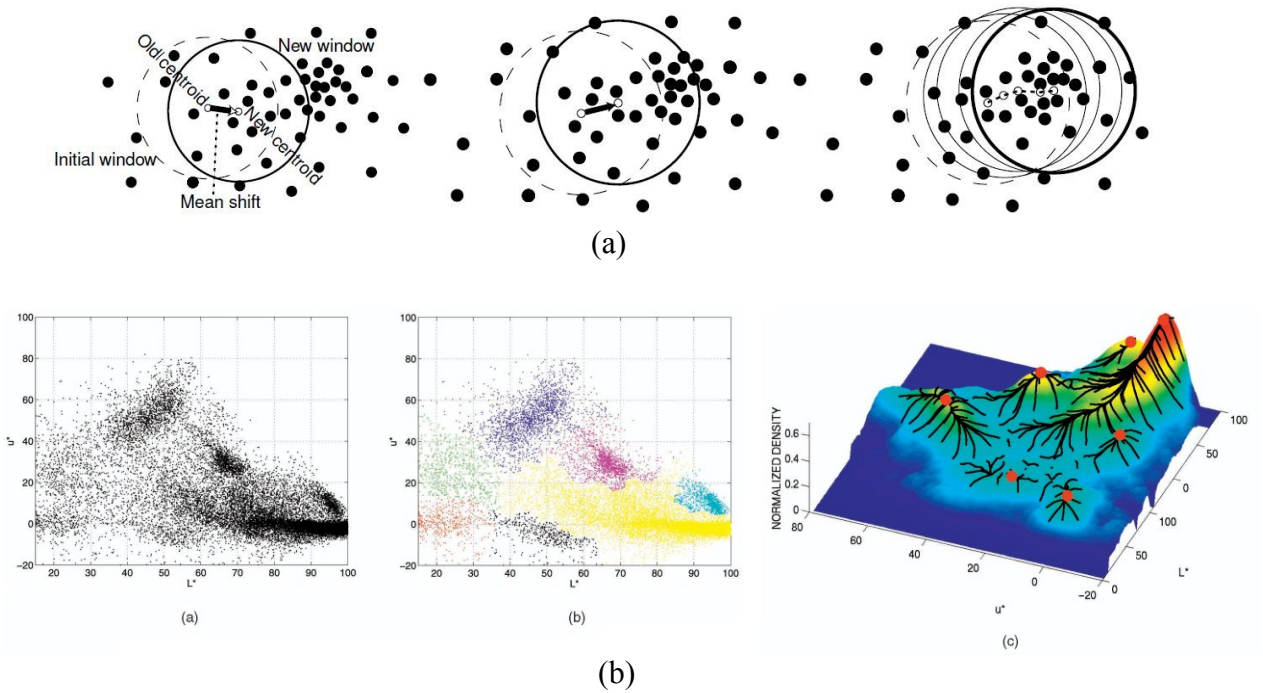


圖 4 基於平移影像分割示意圖。圖片來源：Comaniciu 與 Meer 在 2002 年所發表的論文。

此系統可調整的參數如下：透過改變空間解析度參數 (Spatial Resolution Parameter)  $h_s$  來調整掃描窗的大小；調整範圍解析度參數  $h_r$  (Range Resolution Parameter) 以決定同一個色彩分割區域下可以容忍不同顏色數量的程度；而最小區域參數 (Minimum Region Parameter)  $m$  用以限制一個色彩分割區域的最少像素數量。在本論文的研究中，由於秀拉點畫的顏色繽紛多變，因此先使用高斯低通濾波器 (Gaussian Low-pass Filter) 來使過於銳利的色點邊緣變得較為平滑，也可以消除過多的高頻資訊，以避免影像分割過程中將少數色點分離出來，而空間頻寬以及色彩頻寬的參數值也因此需要較大的容忍，以保護在要表達顏色中的對比色，不會將對比色在同一區域中被分割開來；最小區域參數也必須夠大，以確保分割出的區域面積其顏色組成足夠具有代表性。一張藝術家作品的彩色影像分割結果如圖 5 所示。在本實驗中，空間頻寬參數約介於 30~80、色彩頻寬參數約介於 8~20、最小區域參數約介於 50~220 像素數，參數值的大小視圖片色彩豐富度決定。





圖 5 對藝術家點畫作品做彩色影像分割，以取得分割區域內部資訊。  
 圖片解析度： $1000 \times 787$ ， $(h_s, h_r, m) = (50, 8, 50)$ 。

### 3.1.2 K-means 分群法

為了量化顏色組成資訊以方便利用，在做完彩色影像分割之後，我們針對每一個分割區域，從原圖中取得此區域內所有的像素值加以分群，並計算每群的百分比。在本論文的實驗中，一開始我們採用  $k = 5$  來分群像素值，但我們發現取  $k = 5$  使得許多少數顏色的色點經分群後無法被表達出來，著色之後的結果也相對的單調。而取  $k = 10$  時，又造成建立 R-矩陣的複雜度過高。經由反覆實驗之後，我們最後決定取  $k = 7$ ，可以以最小的演算複雜度達到最高的少數色點顏色的保存。

秀拉認為，人眼就是調色盤，繽紛的色點最終會由人眼融合出他想要表達的顏色。本論文的精神亦是如此：每一個分割區域，裡面包含了許多顏色的色點，而這些色點的像素值總平均，代表了此區域要表達的顏色，即我們先前所定義的代表色  $C_i^r$ ：

$$C_i^r = \frac{1}{N_i} \sum_{(x,y) \in S_i} C(x,y) \quad (1)$$

其中  $C_i^r$  以及  $C(x,y) \in \mathbf{R}^3$ ，分別代表第  $i$  個分割區域  $S_i$  的代表色像素值以及座標為  $(x,y)$  的像素值，以上兩項皆屬於 RGB 色彩空間； $N_i \in \mathbf{N}$  為  $S_i$  中的像素數目。透過 K-means 分群法，將所有在此分割區域  $S_i$  的像素依照像素值分成  $k$  群，每一群中有多個相似像素值的像素，則取群內所有像素值的平均值，即為我們前面所定義的組成色，在此定義符號  $C_{i,j}^c \in \mathbf{R}^3$ ：



$$C_{i,j}^c = \frac{1}{N_{i,j}} \sum_{(x,y) \in S_i \cap K_{i,j}} C(x,y) \quad (2)$$

表示第  $i$  分割區域  $S_i$  代表色  $C_i^r$  之下的第  $j$  個組成色，其中  $N_{i,j} \in \mathbf{N}$  為  $S_i$  中第  $j$  群  $K_{i,j}$  的像素數目， $j=1 \sim k$ 。而組成色  $C_{i,j}^c$  在代表色  $C_i^r$  中所佔的像素百分比密度  $d_{i,j} \in [0,1]$  為：

$$d_{i,j} = \frac{N_{i,j}}{N_i} \quad (3)$$

透過這些資訊，當我們要為點畫上色時，就可以由此得知在某個顏色區域中，需要填上什麼代表色，此代表色又分別需要多少百分比的  $k$  種組成色來構成此分割區域。

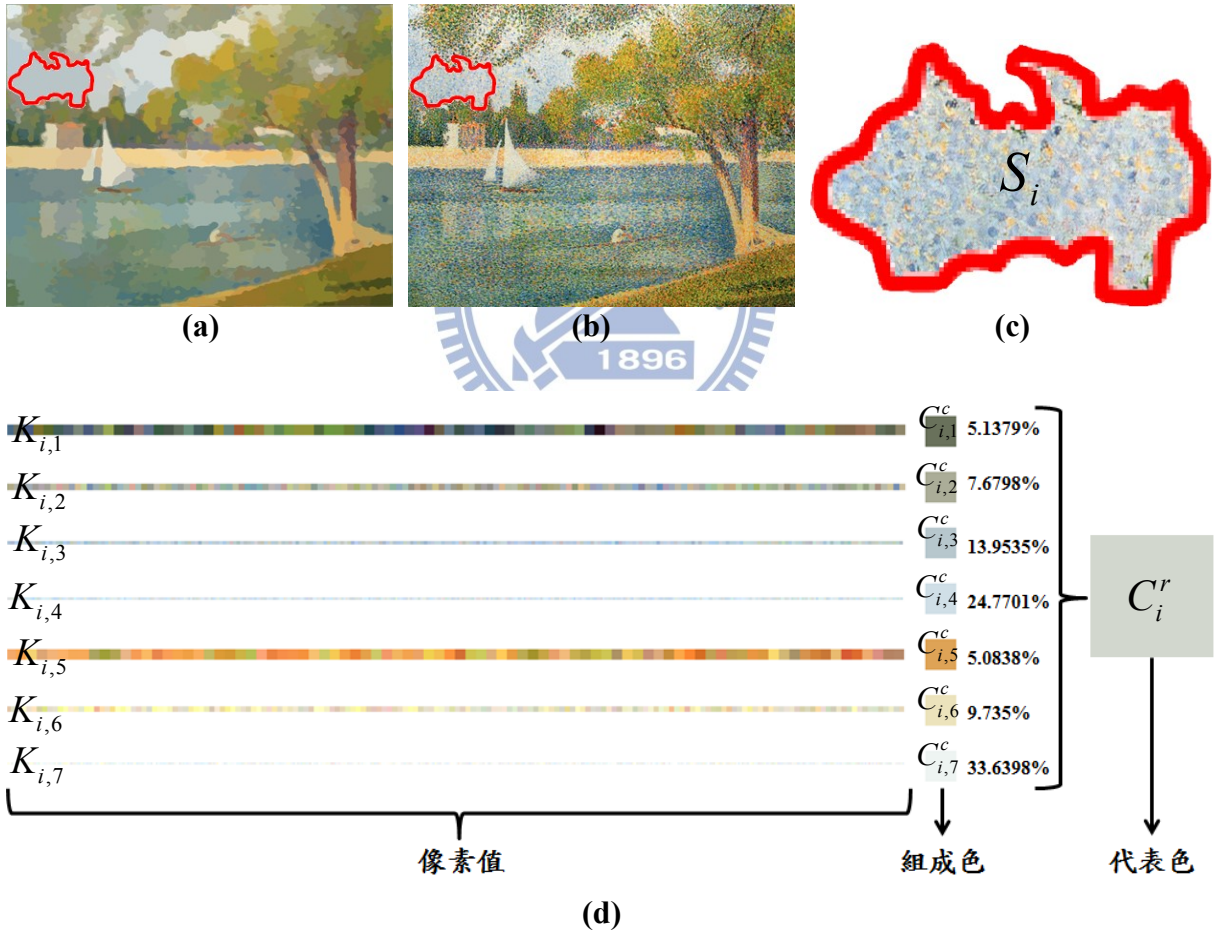


圖 6 圖(a)為圖(b)的彩色影像分割結果。圖(a)中，紅色選取的分割區域  $S_i$ ，至圖(b)中查看其內部的原始像素值，圖(c)為此分割區域  $S_i$  在圖(b)的局部放大圖。圖(d)為此分割區域內的所有像素值，並將這些項素質利用 K-means 分成 7 群的結果。各分群的像素平均值為組成色  $C_i^r$ ，所有像素平均值為代表色  $\{C_{i,j}^c \mid j=1:k\}$ 。

### 3.1.3 計算共變異數矩陣

然而，因為這些組成色是經過群內平均過後的像素值，這意味著在此分割區域中有許多相對少數但確實存在的色點，因做了取平均值的動作而被忽略。若只依據此平均像素值來進行著色，便表示每一個代表色之下只會由  $k$  種組成色來構成，而無法表現出真實藝術家在用色上的豐富度，點畫結果勢必相形失色。

為了改善這個問題，我們認為在取得代表色與組成色的過程中，不可光靠平均一個群的像素值來表示此組成色的顏色，而忽略了每個群內的結構內容。因此，在做完 K-means 分群之後，以其中一群為例，我們將由此群可能取出的顏色視為一個隨機變數  $X$ ，其樣本空間為： $Color: \{[R, G, B] \mid R, G, B \in [0, 255]\}$ 。隨後，計算每一個群內（意即，每一個組成色）所有像素值的共變異數矩陣（Covariance Matrix） $\Sigma_{i,j} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ ，用來表示第  $i$  分割區域的第  $j$  群內所有像素值在 R、G、B 三通道的總體誤差。此共變異數矩陣為一個  $3 \times 3$  大小的正半定（Positive-Semidefinite）對稱（Symmetric）矩陣，其對角項分別為 R、G、B 三個通道各自的變異數，非對角項則為兩兩通道之間的共變異數。而此群的像素平均值正好就是先前我們所定義的組成色  $C_{i,j}^c$ ，如此一來，我們就可以藉由共變異數矩陣  $\Sigma_{i,j}$  以及平均值  $C_{i,j}^c$  利用多維高斯分佈（Multivariate Gaussian Distribution）得到一組此組成色的機率密度函數（Probability Density Function）：

$$P_{i,j}(C) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} |\Sigma_{i,j}|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2}(C - C_{i,j}^c)^T \Sigma_{i,j}^{-1} (C - C_{i,j}^c)\right) \quad (4)$$

$\Pr_{i,j}(C): Color \rightarrow [0,1]$ ，其使用方式將在第四章第二小節（4.2）介紹。

另外，我們也計算在第  $i$  代表色之下所有像素值，即此分割區塊中的所有像素在 R、G、B 三通道的共變異數矩陣  $\Sigma_i \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ ，同樣的，此分割區塊的平均值即為代表色  $C_i^r$ 。此共變異數矩陣  $\Sigma_i$  與平均值  $C_i^r$  同樣使用多維高斯分佈來得到此代表色的機率密度函數：

$$P_i(C) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} |\Sigma_i|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2}(C - C_i^r)^T \Sigma_i^{-1} (C - C_i^r)\right) \quad (5)$$

$\Pr_i(C): Color \rightarrow [0,1]$ ，作為未來生成為之新代表色時使用，這部分將在本章第三小節 (3.3) 介紹。

## 3.2 色彩統計模型

我們由藝術家真實點畫所取得的資訊，經過上述的點畫分析過程之後，得到了多個代表色  $C_i^r$  及構成此代表色的  $k$  個組成色  $\{C_{i,j}^c | j=1:k\}$  和每個組成色所佔的百分比密度  $\{d_{i,j} | j=1:k\}$ ，以及此分割區域的共變異數矩陣  $\Sigma_i$  和每個組成色內的共變異數矩陣  $\{\Sigma_{i,j} | j=1:k\}$ 。

在本論文的實驗中，我們總共所參考的秀拉點畫作品如圖 7，以平移影像分割區域為單位，一共取得了 5153 個區域，即 5153 個代表色，每個代表色之下儲存了上述所有相關資訊。其中  $C_i^r$  即為分割區域的像素平均值、而  $C_{i,j}^c$  為每個組成色本身的平均值。另外我們也記錄了每一個代表色分別取自哪一張藝術家點畫的局部圖。如此便初步構成了我們的色彩統計模型  $T$ ，我們用  $T(i)$  來表示第  $i$  筆代表色以及此代表色之下的其他相關資訊。

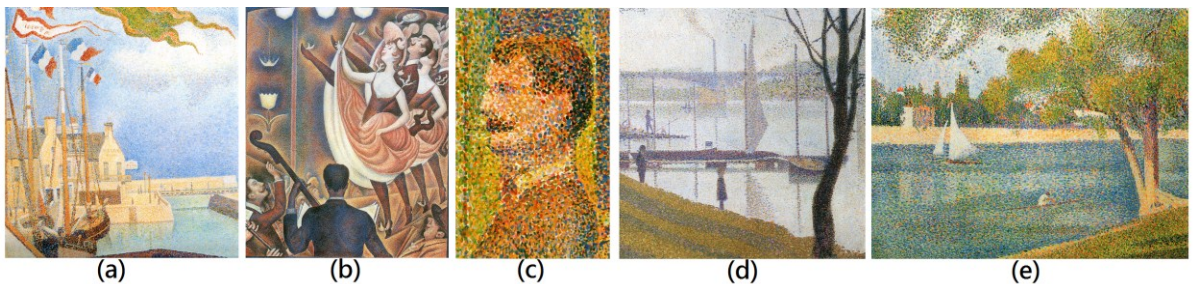


圖 7 我們所參考的秀拉點畫作品。(a)「貝辛港的星期日」局部圖，(b)「舞蹈」局部圖。(c)「馬戲雜耍」局部圖，(d)「庫爾伯瓦之橋」局部圖，(e)「大捷特島的塞納河畔」全圖。

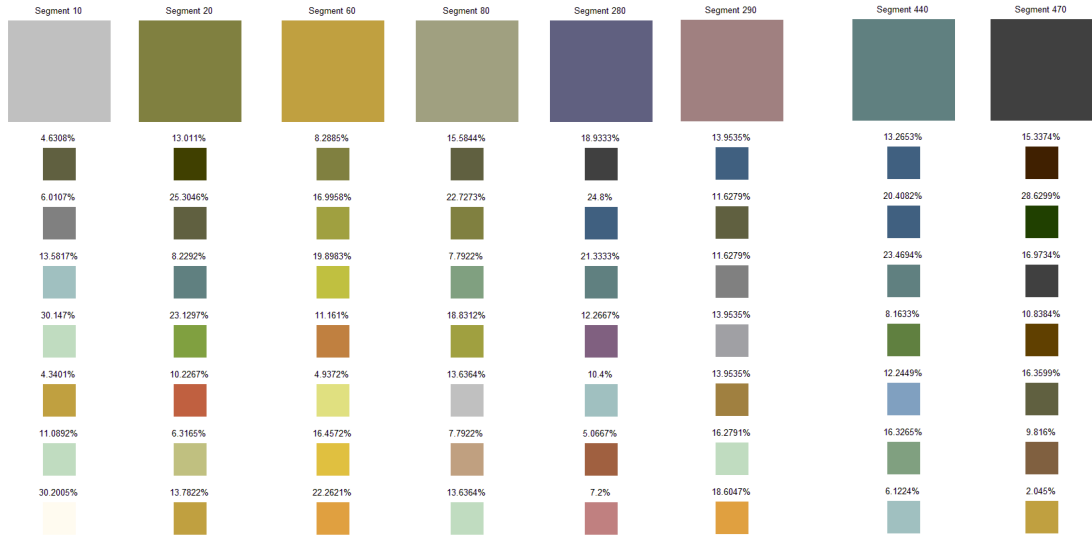


圖 8 由秀拉點畫局部圖中所收集到的一些顏色及其結構。

### 3.3 色彩統計模型插值計算

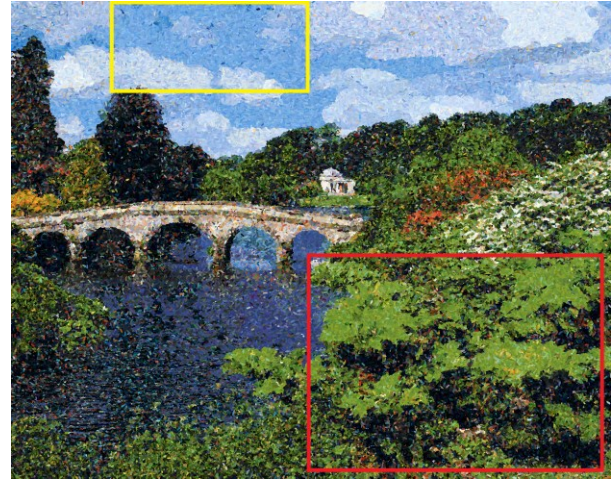
只靠收集藝術家點畫的顏色並不足以呈現任意輸入影像的所有顏色，我們僅採用了五幅秀拉點畫的局部圖，其原因是我們在做前處理分析時所需要的是足以清晰辨別出每一個小色點的點畫，但我們無法再取得更多足夠解析度的秀拉作品。若我們可以採用更多秀拉點畫的作品，其結果也許可以更好，但是由於秀拉有一定程度的用色習慣，因此對色彩統計模型的插值計算以補足收集不到的顏色仍是不可避免的。

如圖 9，在色彩統計模型顏色不足的前提下，一張彩色影像的點畫輸出必定是不理想的，其原因之一是在著色的過程當中，在我們原始的色彩統計模型裡搜尋不到足夠相近的代表色，取而代之最相近的代表色與要填色的區域顏色仍然相去甚遠，使得輸入與輸出的結果顏色明顯不同，如圖 9 (d)；而第二個原因是：在輸入影像中，假設一些鄰近的區域恰好為相似的顏色（例如將漸層的天空分割成多個區域），但是因為代表色不足，使得這些鄰近的區域找到最接近的代表色恰好皆為同一個代表色，進而造成這些原本不同顏色的鄰近區域在輸出結果卻都是同一顏色，如圖 9 (f)。





(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

圖 9 圖(b)為圖(a)尚未改善顏色問題之點畫結果。圖(c)為圖(a)和圖(b)在紅色方框中的局部放大圖；圖(d)為圖(a)和圖(b)在黃色方框中的局部放大圖。

如果將我們在第二小節所提到的，從藝術家真實點畫所提取的全部代表色放入 *RGB* 空間，如圖 10，可以觀察發現，我們所收集到的代表色大多集中在 *RGB* 空間的中心部分，而在 *RGB* 空間的周圍幾乎沒有任何顏色。在此我們假設所有顏色為均勻分布在 *RGB* 空間，如此一來，我們的目的即為：「在 *RGB* 空間中，任意一點在一個固定距離範圍內，至少可以找到一個與此任意點足夠接近的代表色，使得此任意點與和它最靠近的代表色在視覺上無法輕易分辨出在顏色上的差別。」而為考量色彩統計模型整體的儲存大小以及搜尋速度，經實驗後我們發現 *R*、*G*、*B* 分別在色距 32 單位以內，人眼開始不能輕易分辨顏色之間的差別。因此，我們將 *RGB* 空間劃分為  $8 \times 8 \times 8$  共 512 個小格子，每個格子分別在 *R*、*G*、*B* 的色距皆為 32，則我們的目的就是在這 512 個小格子中，每個格子至少存在一個代表色。

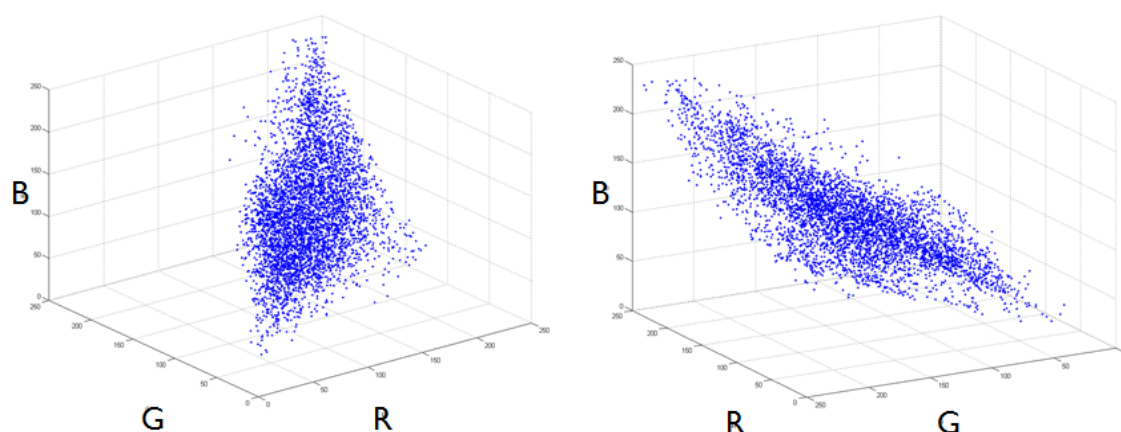


圖 10 目前由藝術家點畫所收集到的代表色，在 *RGB* 空間中的分布情形。

### 3.3.1 產生新代表色

為了達到此目的，在目前已分佈了我們從藝術家點畫中取得的 5153 個代表色的 *RGB* 空間，我們必須把那些不存在任何代表色的小格子至少補入一個新的代表色。依此目標，產生新代表色的精神在於：我們認為，顏色相似的兩個代表色，其組成色的結構也會相似。因此我們利用已知代表色的共變異數矩陣，可以推得一個在附近大略位置的新代表色的共變異數矩陣，藉此取樣產生一組新的組成色，最後再由此新產生的一組



新的組成色來推算出新的代表色的像素值。詳細步驟如下：首先，在目前的 512(8×8×8) 個格子中，找出一個符合下列條件的格子：

- 一、 此格子為空的，即沒有任何代表色存在此格子中。
- 二、 在此空格子周圍相鄰的 26 個格子 (3×3×3) 中加總起來擁有最多的代表色。

找出空格子的目的在於，最後將會產生一個代表色補入此空格子中。而找出周圍擁有最多代表色的空格，是為了利用周圍這些代表色其已知的像素值共變異數矩陣  $\Sigma_i$ ，來推算空格中欲產生代表色的共變異數矩陣  $\Sigma_{new}$ 。在足夠接近的範圍內，可參考的代表色越多，其準確性也會相對越大。接著，對於在此 26 個格子中的這些已知代表色  $C_i^r$ ，計算其與空格子中心點在 RGB 空間中的距離  $D_i$ 。 $D_i$  越小，表示代表色  $C_i^r$  與空格子中心點越接近，那麼很直覺地，其可供產生新代表色參考的價值便越高，權重越大。而只考慮此 3×3×3 格子內的已知色點，其目的在於避免參考範圍太大。假設我們採用的是 5×5×5 範圍內的已知代表色，最外層的代表色距離較遠、參考價值較低、權重也較低，但是也因為這些代表色處在外層，範圍大，總數量可能很多，使得原本內層參考價值較高的代表色權重降低。

由於在此 3×3×3 格子中的這些已知代表色  $C_i^r$ ，都有其各自的像素值共變異數矩陣  $\Sigma_i$ 。我們認為：在靠近此空格周圍的已知代表色，因其在 RGB 空間上的位置與此空格中心點的顏色距離最為接近，而共變異數矩陣結構也會因此而相近。藉由上述理由，我們定義了此空格中心的新代表色其組成色的共變異數矩陣  $\Gamma_{new}$  計算方式：

$$\Sigma_{new} = \sum_{i \in 26grid} \left( \frac{w_i}{\sum_{k \in 26grid} w_k} \times \Sigma_i \right), \text{ 其中 } w_i = \frac{1}{D_i} \quad (6)$$

而此空格的中心點顏色，即代表此區域的平均顏色  $M_{new}$ 。而新得到的共變異數矩陣  $\Sigma_{new}$ ，即表示在此空格中心點顏色  $M_{new}$  下，其所有即將產生的像素值之間的總體誤差，因此我們可以利用新共變異數  $\Sigma_{new}$  矩陣以及平均顏色  $M_{new}$  來得到一組機率密度函數(如

公式(5))，並由此函數中取樣數 2000 個顏色，成為構成新代表色的像素值。再如同我們在前處理時點畫分析的步驟，將此新取樣出來的 2000 個顏色利用 K-means 分群法加以分群，由此得到的  $k$  群顏色，每群個別計算平均值，即為新的組成色  $\{C_{new,j}^c \mid j=1:k\}$ 。最後依照本章在第一小節 (3.1.3) 提到的作法，計算各群內像素值的共變異數矩陣  $\{\Sigma_{new,j} \mid j=1:k\}$  以及每個群 (組成色) 占總像素數的百分比密度  $\{d_{new,j} \mid j=1:k\}$ ，並將這些資訊一併儲存到色彩統計模型中，並更新我們所定義的  $8 \times 8 \times 8$  RGB 空間，如此一來，此空格被填入了一個新的代表色，那麼在下一輪的條件式中，此格因不再是空格而不會再被納入要增加代表色的區域。

重複上述步驟，直到我們所定義的這 512 個格子中，每一個格子至少存在一個代表色及宣告完成，如圖 11。在本實驗中，做完點畫分析時共有 5153 個代表色，而在做完色彩統計模型的插值計算之後，原本不存在任何代表色的 392 個空格分別都被填入了一個新代表色在靠近空格中心的位置，因此最終我們的色彩統計模型共有 5545 個代表色。這意味著：無論輸入影像的像素值為多少，我們都可以在這個以 RGB 色彩空間為基準的色彩統計模型中查找到一個足夠接近的代表色供查詢使用。

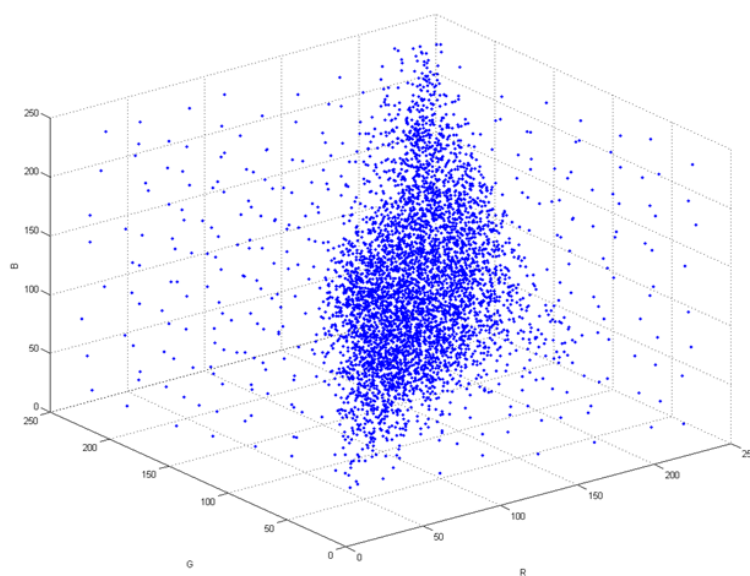


圖 11 做完插值計算之後的色彩統計模型，其所有代表色在 RGB 空間中的分布情形。



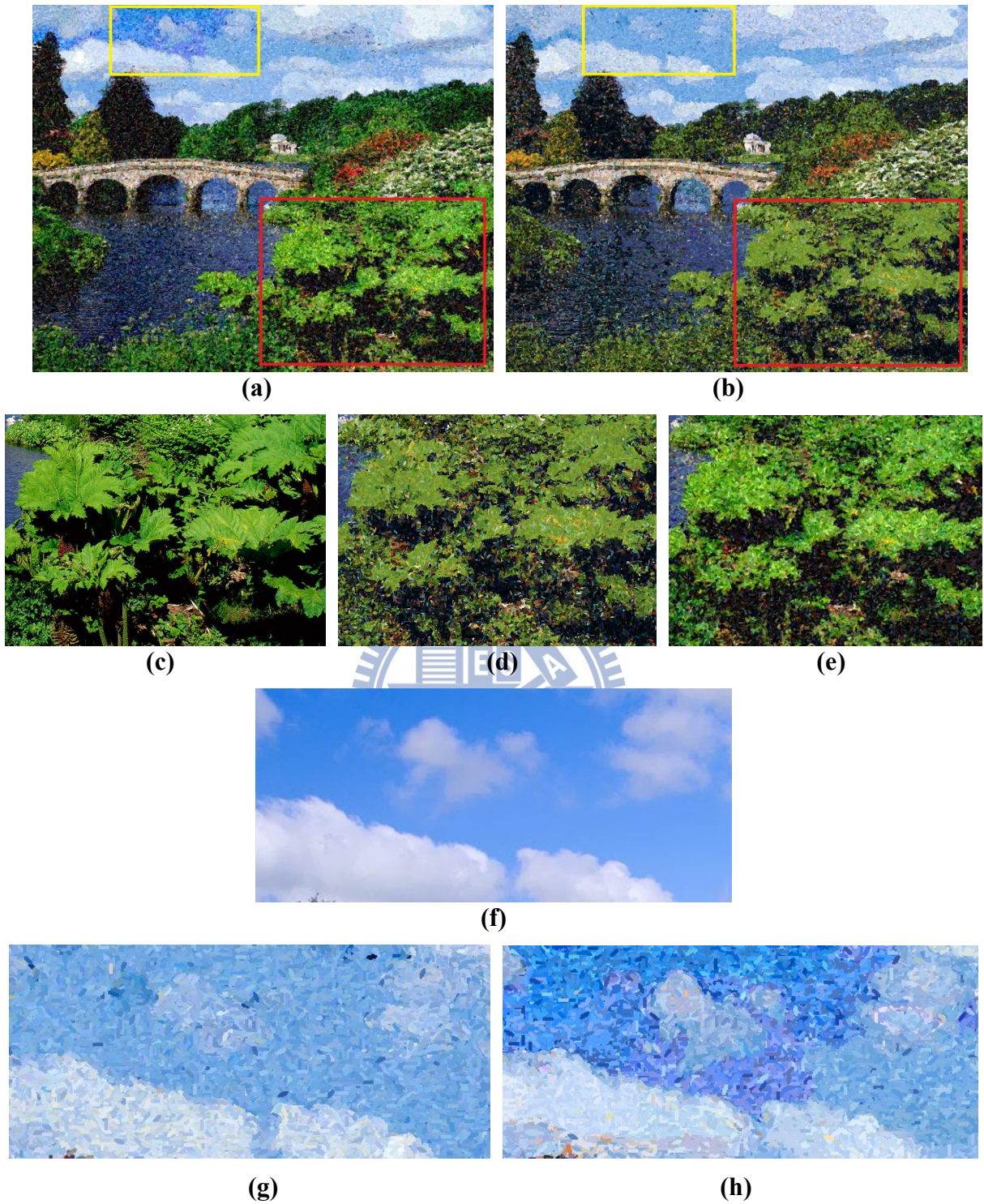


圖 12 圖(a)與圖(b)分別為改善顏色問題前與改善後的結果圖，其原使圖片如圖 8(a)所示。圖(c)、(d)、(e)為圖 8(a)、圖(a)和圖(b)在紅色方框中的局部放大圖；圖(f)、(g)、(h)為圖 8(a)、圖(a)和圖(b)在黃色方框中的局部放大圖。由圖(e)可看出改善後的顏色比改善前(d)的顏色整體更貼近原圖(c)；圖(h)顯示出改善後比改善前(g)更能表達出原圖(f)的漸層效果。

### 3.3.2 驗證插值計算的正確性

為了驗證上述方法的正確性，以及確保我們所產生的人工代表色其組成色的結構與藝術家會使用的組成方式相似，我們設計了以下的驗證方法：

我們找到了一些已知的代表色，其在 *RGB* 空間的位置十分接近我們所定義的某些格子的中心點，在此我們假設這些格子為空的，意即這些格子裡不存在任何已知代表色，在此條件下執行上述不足顏色的產生方法，利用周圍已知色點來產生我們要驗證的代表色，並觀察我們所產生的代表色和原本就已存在靠近格子中心的代表色是否相近。其結果如圖 13 所示。由觀察圖片可以發現，我們所產生的新代表色和新組成色，其顏色結構與秀拉所使用的顏色十分相近。

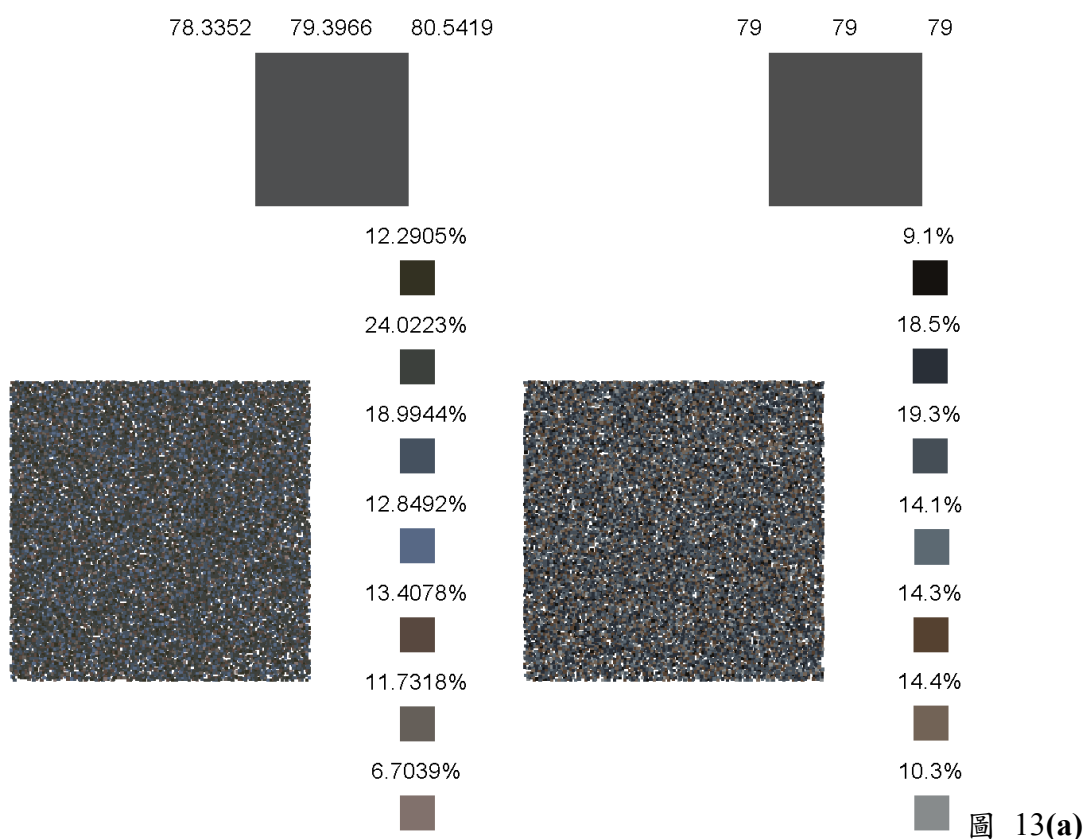
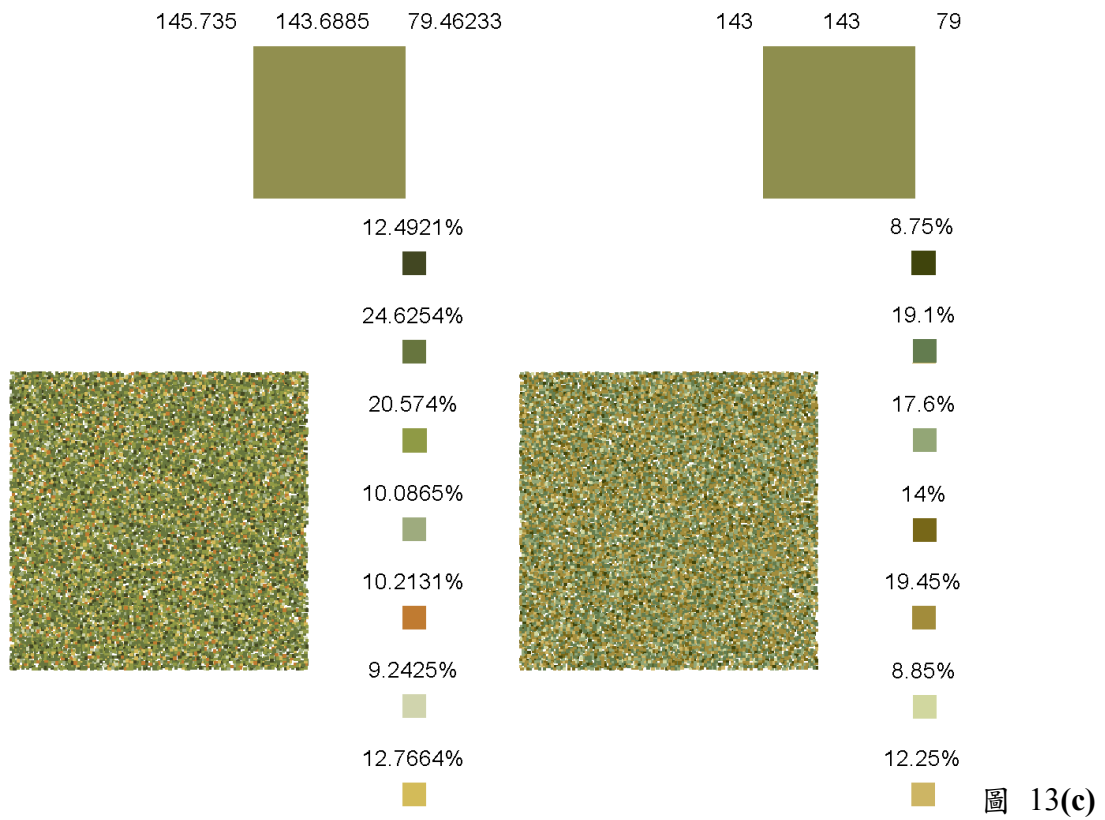
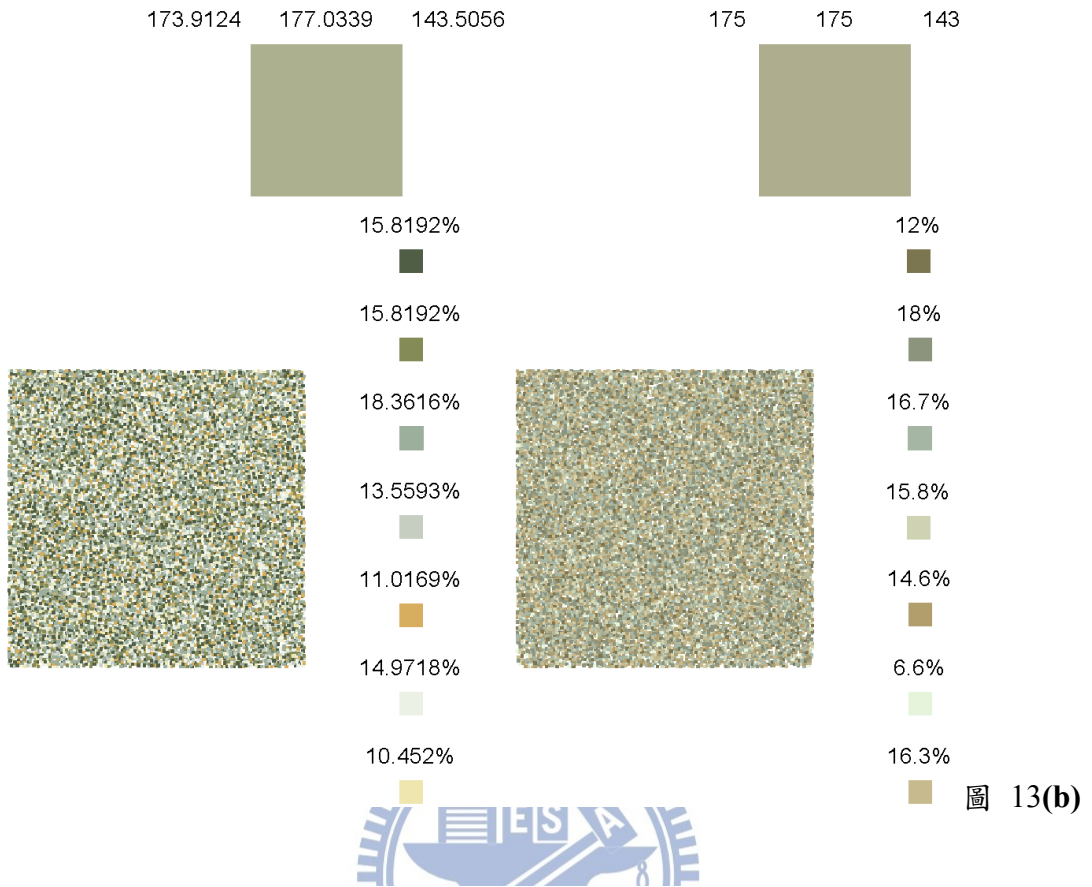
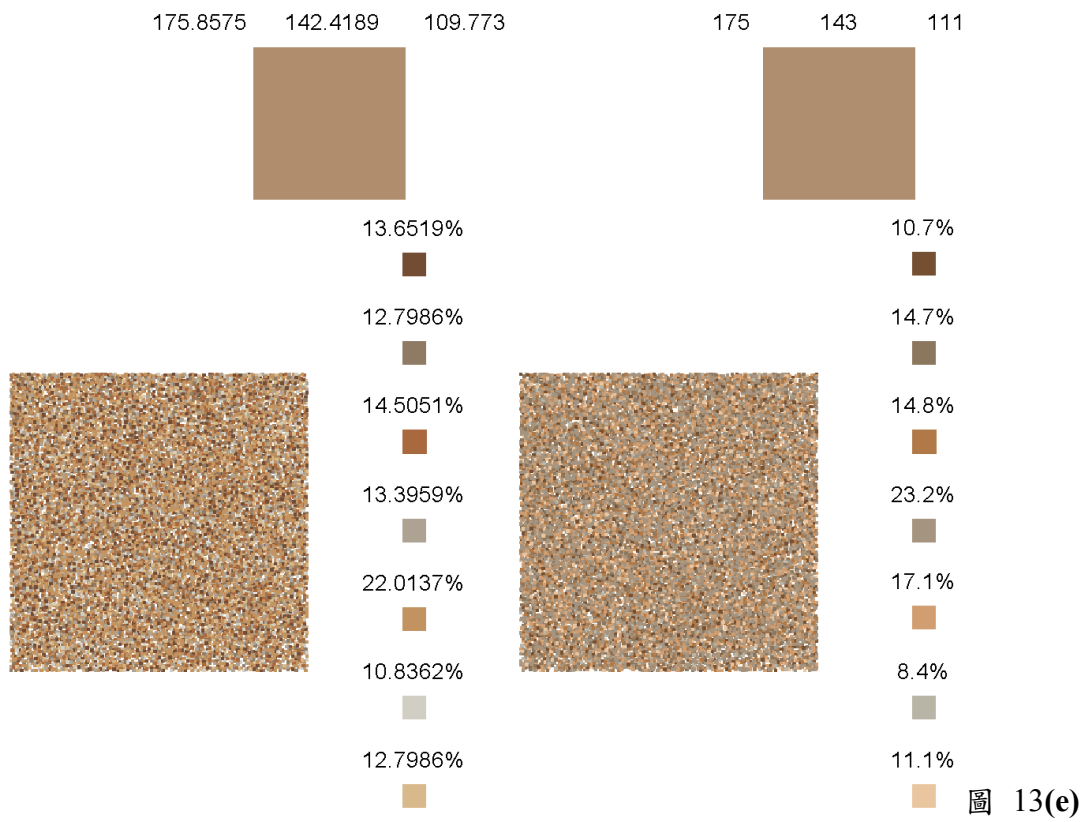
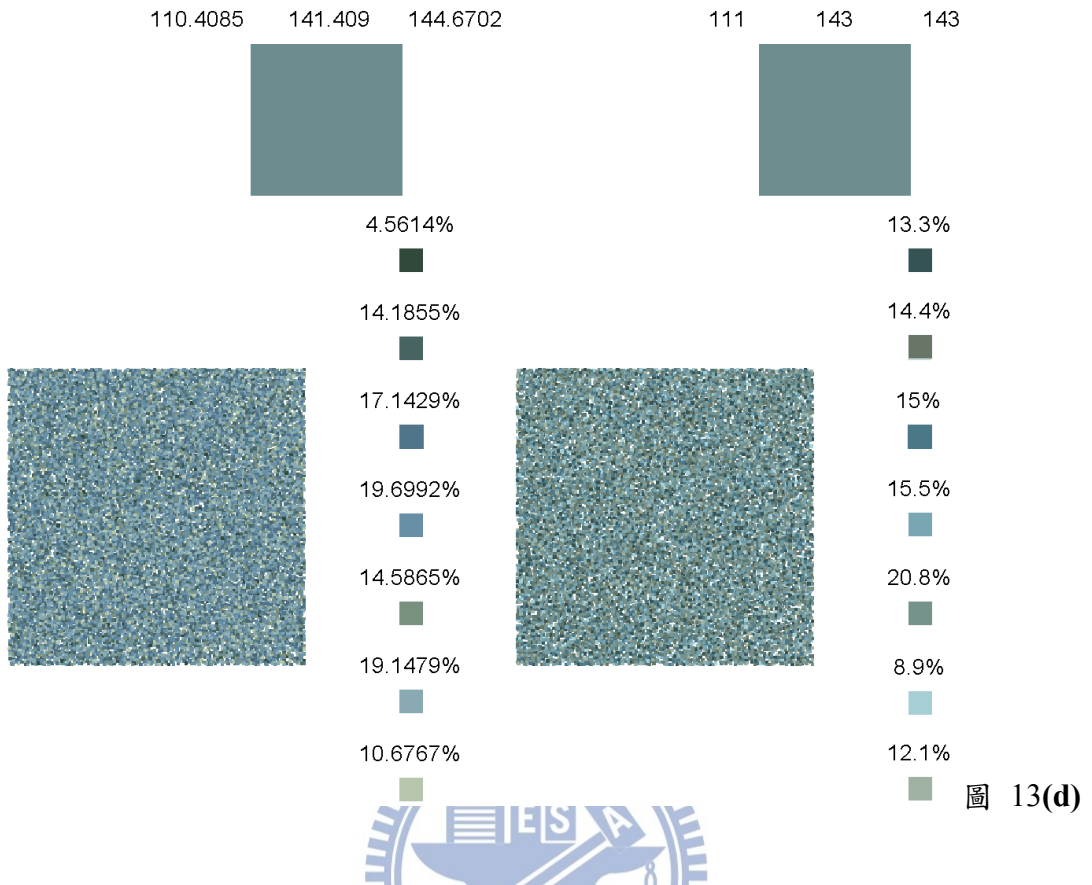


圖 13 驗證結果比較圖，圖 13(a)到(e)的左側資料為由藝術家點畫所擷取的資訊，右側資料為使用我們的方法所產生出來的結果。







# 第四章

## 研究內容與方法

本章節進入本論文的點畫研究主要方法介紹。首先在第一小節介紹本研究的整體演算架構以及我們所採用的策略；第二小節說明如何處理輸入圖片，並結合查詢我們在前處理所建構出來的色彩統計模型來決定填入色彩；接著在第三小節帶入多類藍雜訊取樣技術，分項詳細解說各步驟，並介紹本實驗如何修改多類藍雜訊取樣來完成我們的點畫技術；第四小節討論如何改變色點的形狀、排列方向及距離，使得輸出點畫品質更為細緻。



### 4.1 策略及演算架構

為了產生與真實畫作相似的點畫，本論文的主要精神就是符合藝術家的著色方法與結構。我們的想法十分直覺且簡單：當我們拿到一張彩色影像時，該如何決定哪些局部區域要填入何種色彩呢？而當我們已經決定了一個局部區域要填入某種色彩了，此色彩又要如何以各種不同顏色的小點來組成呢？上述二個提問即為本章節主要步驟的思維。其演算架構如下圖 14 所示：

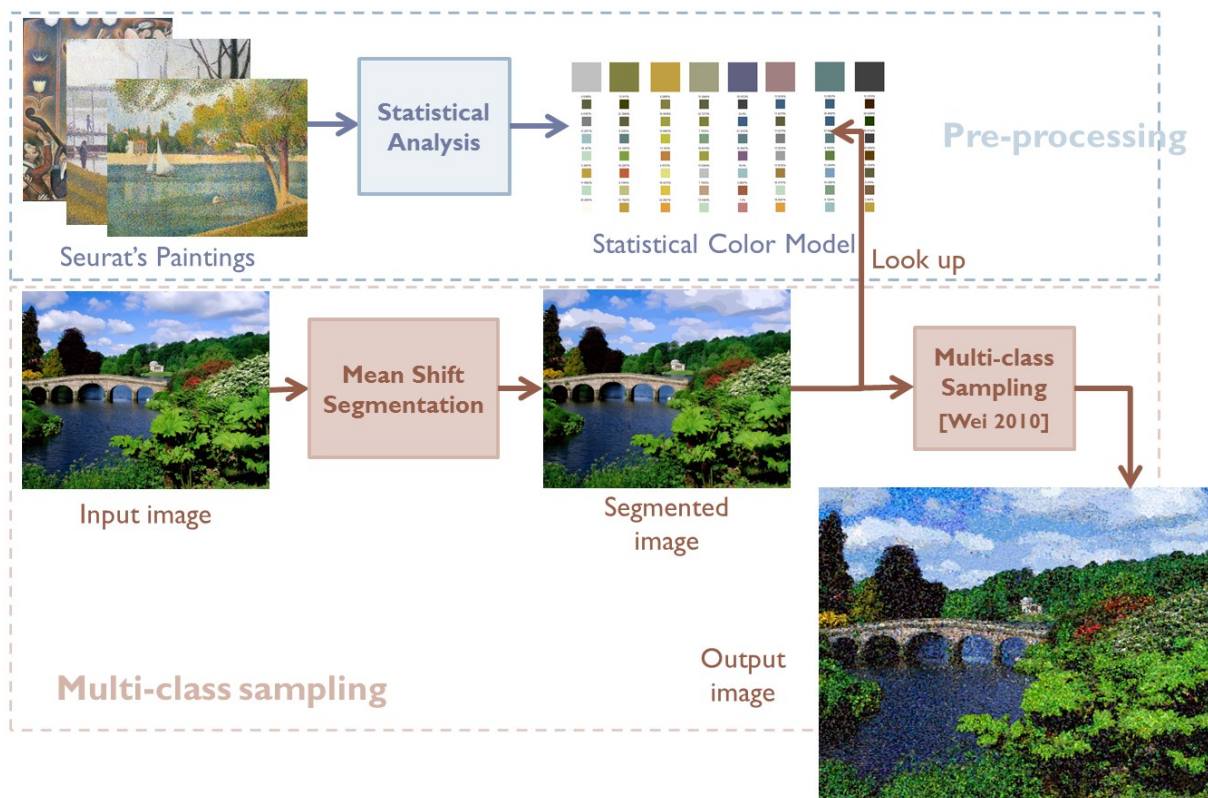


圖 14 本論文的整體演算架構。



如圖 14 所示，上半部淺藍色虛線方框中為我們在第三章主要探討的色彩統計模型的建立，為本研究的前處理部分。而下半部粉紅色方框的內容為本研究產生點畫的主要方法步驟，即為本章的主要重點。

當我們輸入任意一張彩色影像時，我們利用彩色影像分割技術將此彩色影像分成數個分割區域，每一個分割區域即為一個色塊，此色塊的顏色就是這個區域所要填入的顏色依據。而得知了一個分割區域要填入的顏色之後，接下來我們必須知道藝術家會想要如何以各種不同的小點填滿此區域以代表這個顏色，這時就需要去查詢我們在前處理時所建構的色彩統計模型，以取得這個代表色的各個組成色及其所占百分比。最後，搭配我們修改過的多類藍雜訊取樣來決定這些組成色的色點如何在此區域中分佈，即可得到一幅符合藝術家畫作顏色組成的點畫作品。



## 4.2 決定填入色彩

第一個步驟為將輸入影像做彩色影像分割，這裡的彩色影像分割就是本論文在第三章第一小節(3.1.1)所提到的基於平移(Mean Shift based)影像分割系統。而與先前在前處理做法不同的地方是：前處理的目的在於分析分割區域中代表色與組成色之間的關係，輸入的影像是藝術家的真實點畫，因為色點多、顏色繽紛，因此需要足夠大的掃描窗、足夠大的色彩包容、以及足夠大的分割區域，以確保每一個分割出來的色塊具有參考其內部組成的價值；而在此章節中，欲分割的影像是任意輸入的彩色圖片，為了使輸出的點畫結果更為精緻，並且可以表現出嚴格的顏色精確度，因此由此步驟得到的分割影像在每一個分割區域中並不希望容忍太多的顏色。也就是說，每一個分割區域在原始圖片中的顏色越少越好，分割結果越精細越好。因此，色彩頻寬(Color Bandwidth)參數值並不希望被設得太大，最小區域(Minimum Region)參數值也可以調整小一點。在本實驗中，此步驟的空間頻寬參數約介於20~80、色彩頻寬參數約介於2~5、最小區域參數約介於20~50，參數值的大小視圖片色彩豐富度及解析度決定。

得到了彩色分割影像，接下來要探討的是如何將色點分別填入每一個分割區域中。由於分割結果在每一個區域 $S_l$ 內僅會有一種顏色 $C_l \in \mathbf{R}^3$ ，此顏色的意義即代表了未來欲填色所使用的代表色。然而，我們先前所建構的色彩統計模型 $T$ 並不包含 $RGB$ 空間上的所有色彩，因此在操作上，我們拿 $C_l$ 來進行查找，找出色彩統計模型 $T$ 中與 $C_l$ 最接近的代表色 $C_l^r$ ，意即求解：

$$i^* = \arg \min_i \| C_i^r - C_l \| \quad (7)$$

由於我們在前處理時針對色彩統計模型 $T$ 顏色不足的問題做了改善，利用了 $8 \times 8 \times 8$ 個方格，補齊那些空格的中心點顏色，即原本不在 $RGB$ 空間上的代表色；又因為每個方格之間為32色距，因此我們可以保證：對於任意分割區域的顏色 $C_l$ ，我們都可以在色彩統計模型 $T$ 中找到一個相對應的代表色 $C_l^r$ ，使得 $\| C_l^r - C_l \| \leq \sqrt{3 \times 32^2}$ 。

查找到代表色  $C_i^r$  之後，便可以得知構成此代表色的  $k$  個組成色  $\{C_{i,j}^c | j=1:k\}$ 、每個組成色相對的百分比密度  $\{d_{i,j}^* | j=1:k\}$ 、以及共變異數矩陣  $\{\Sigma_{i,j}^* | j=1:k\}$ 。至此，使用者可以自行決定要只使用  $k$  個組成色來填滿此分割區域，或者要參考每個組成色中的共變異數矩陣  $\{\Sigma_{i,j}^* | j=1:k\}$ ，利用公式(4)求得每個組成色的機率密度函數，並由每一組機率密度函數中取樣出構成每一組代表色的像素值，並由這些新取樣出來的像素值來填滿此分割區域。若只使用  $k$  個組成色來填滿分割區域，其優點為速度較快，顏色較一致，但相對的色彩豐富度較低；若參考每個組成色中的共變異數矩陣來產生新像素值，則花費時間相對較長，但顏色看起來較繽紛且豐富。

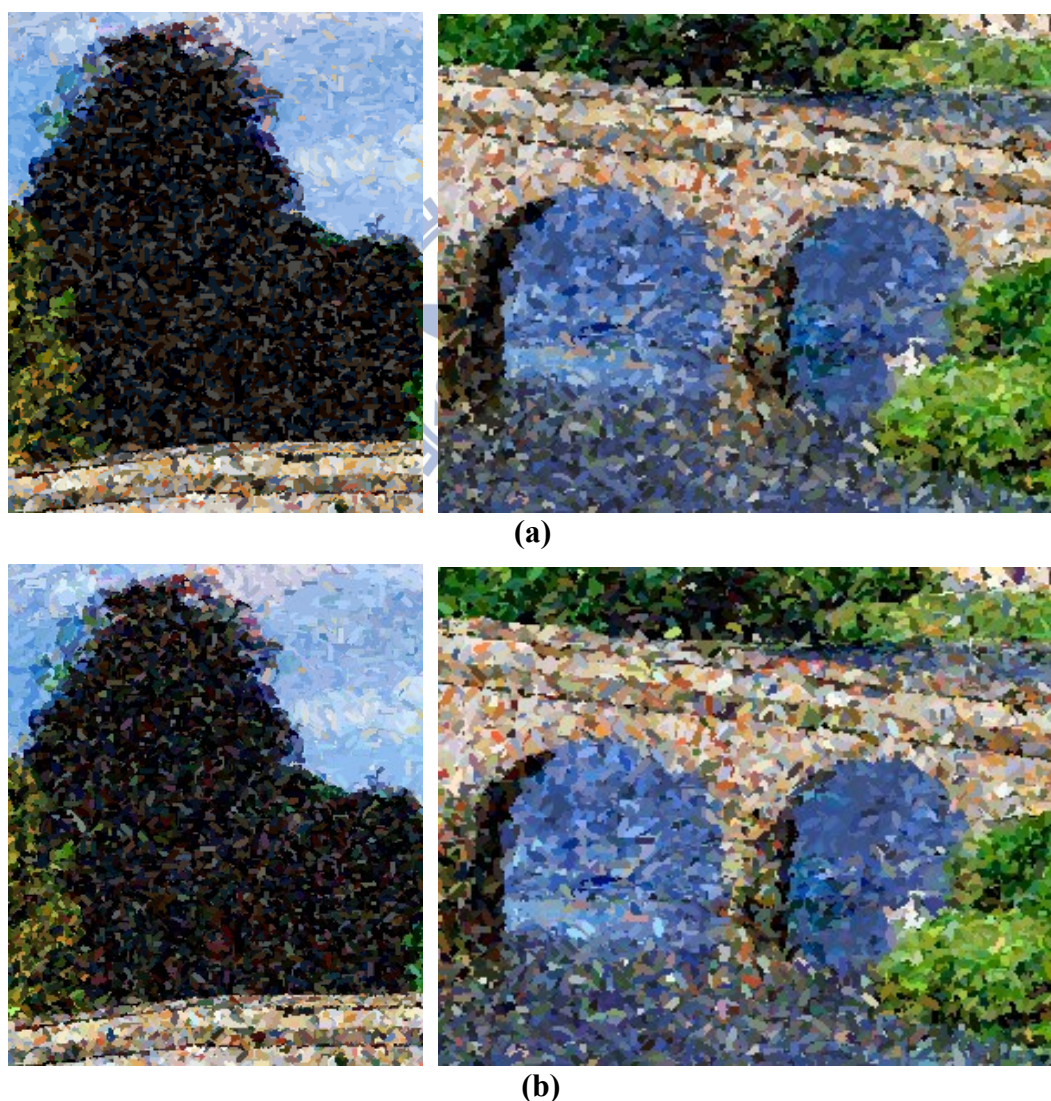


圖 15 此為圖 8(a) 的點畫結果局部圖。其中(a)為只使用組成色的著色結果；(b)為參考共變異數矩陣產生新像素值的著色結果。由圖可觀察發現，圖(b)的色彩豐富度較圖(a)來的高。



### 4.3 多類藍雜訊取樣

從秀拉的點畫中可以觀察發現，每種不同顏色的色點在各個局部區域中，色點之前保持著均勻的分布，如下圖，天空及雲朵中的黃色點、綠色旗面中的橘色點、橘色旗面中的白色點、以及藍色旗面中的黃色點等，雖然不能保證手繪的每一筆刷畫下的色點都完美的符合藍雜訊，但這些色點在各個局部區域確實遵守了隨機且均勻分布的性質。



圖 16 秀拉點畫具有藍雜訊的性質

多類藍雜訊取樣[40]有別於以往一般的單類藍雜訊取樣技術，它可以同時確保多個類別在每一類中的取樣點、以及各類之間的取樣點之間都保持著隨機且均勻分布的藍雜訊性質。因為多類藍雜訊取樣保有這樣的優勢，正好符合我們需要在一個確定代表色的分割區域中填滿多種組成色的色點、且每個色點之間是隨機且均勻分布的條件，因此本論文選擇採用多類藍雜訊取樣來做為我們著色的方式。

#### 4.3.1 多類硬盤取樣

在 2010 年 Wei 所提出來的多類藍雜訊取樣技術[40]，可以分為「多類硬盤取樣」以及「多類軟盤取樣」。多類硬盤取樣使用的是 Cook 在 1986 年[35]所提出的泊松磁盤

分佈 (Poisson Disk Distribution)，而多類軟盤取樣則是修改自 1982 年 Lloyd[34]提出的勞合社演算法 (Lloyd's Algorithm)，其中軟盤取樣的結果顯示各取樣點呈現出漸層暈染的效果，並不符合我們要模擬的顏料色點外觀，而硬盤取樣的取樣點則是完整的物件，因此本論文採用多類硬盤取樣。

Cook 提出的泊松磁盤分佈概念其實很簡單，以單類取樣為例：它主要的想法是利用飛鏢投擲的方法 (Dart Throwing)，限制每個投擲進來的新取樣點與已存在「鏢靶」上的所有舊取樣點至少都保持著  $r$  以上的距離，若新取樣點與某個舊取樣點的距離小於  $r$ ，那麼則視情形捨棄此新投擲的取樣點或者捨棄與它衝突的舊取樣點，以保持整體隨機而均勻分布的性質。如此持續投擲新取樣點，並判斷新取樣點是否合法、是否要捨棄，直到達到終止迴圈的條件成立，例如：達到整體目標總取樣點數，或達到總投擲次數等。對於多類取樣處理的想法也是一樣的，只是不同的地方在於：多類取樣方法將一個單一距離限制條件  $r$ ，替換成一組距離數列  $\{r_i | i=1:k\}$ ，分別代表了  $k$  個類別裡面，取樣點與取樣點之間的最小距離。然而，若只遵守  $\{r_i | i=1:k\}$  的限制條件，只能確保各類獨立的均勻性質，而並不足以保證類與類之間的均勻性質。因此，Wei 提出了「 $R$ -矩陣」 ( $R$ -Marix) 的概念， $R$ -矩陣即是距離數列  $\{r_i | i=1:k\}$  的延伸，它是一個  $k \times k$  矩陣，對角項  $R_{i,i} = r_i$ ，就是前面所提到的各類本身取樣點的最小距離，而  $R_{m,n}$  項即代表著第  $m$  類與第  $n$  類取樣點之間的最小距離，如此依照  $R$ -矩陣來規範各類之間的投擲取樣點分佈，就可以達到多類之間均勻隨機分佈的性質。關於多類硬盤取樣的更多細節，請參照 Wei 在 2010 年所發表的論文[40]。

#### 4.3.2 修改後的多類取樣

Wei 所提出來的多類藍雜訊取樣技術，其基礎是建立在取樣整張影像，給定  $k$  個類別即每一類中的取樣點之間的最小距離  $\{r_i | i=1:k\}$ ，整張影像便使用此  $k$  個類別所產生的  $k \times k$   $R$ -矩陣來投擲取樣點。而將此方法套用於本論文的點畫技術時，由於本研究的目的在於產生出一幅顏色繽紛的點畫作品，一張影像只使用少數幾種顏色來構成是絕對不夠的，因此我們在做完彩色影像分割之後，便針對每一個分割區域來採用多類取樣技

術，使得每一個分割區域都有自己獨立的代表色、組成色及其密度百分比，也利用這些由色彩統計模型所得到的資訊來建構此分割區域專屬的  $R$ -矩陣。換句話說，假設整張彩色影像被分割出  $N$  個分割區域，則我們就會有  $N$  個獨立的  $k \times k$   $R$ -矩陣分別代表此  $N$  個分割區域中組成色之間色點分佈的距離限制。更進一步，我們可以得知此彩色影像經由我們的點畫技術最後可以得到一幅至少包含  $O(N \times k)$  種色彩的點畫結果。

### 4.3.3 建立 $R$ -矩陣

當我們已經確定一個影像中的分割區域要使用代表色  $C_i^r$  之下的  $k$  個組成色  $\{C_{i,j}^c | j=1:k\}$  來填滿，首先我們必須依照多類硬盤取樣的規範來建立出此區域的  $R$ -矩陣。一個很直覺的想法是：當我們知道一個類別  $k_m$  在整體投擲點中所佔的點數為最多，那就可以因此推得： $k_m$  所制定的距離  $r_m$  應當為最小；反之，如果一個類別  $k_n$  在整體投擲點中所佔的點數為最少，那就  $k_n$  所制定的距離  $r_n$  就最大。意即：一個類別中的點數多寡與此類別所限制的距離大小成反比。由於我們已經得知組成色  $\{C_{i,j}^c | j=1:k\}$  在整個代表色中所佔的百分比密度為  $\{d_{i,j} | j=1:k\}$ ，那麼在此分割區域中所建立的  $R$ -矩陣，其對角項  $R_{j,j}$  輸入的距離數列即為：

$$\{R_{j,j} = r_j | r_j = \frac{p}{d_{i,j}}, j=1:k\} \quad (8)$$

其中  $p$  的估算方式如下：由我們的色彩統計模型中可以觀察出，每個代表色其下的各個組成色所占百分比密度約在 5%~30% 之間。依照公式(8)，若將  $p$  取 1，則可得距離為百分比密度的倒數：約 3~20 個像素距離左右，所以若圓或橢圓的直徑或長短軸長度大於 3 像素，則會有色點之間覆蓋的情形發生。而在本論文的著色過程中，我們僅產生一層色點，因此為避免色點之間過於稀疏而露出畫布白底，色點之間彼此的些微覆蓋是必須的，為達到良好的些微覆蓋效果，必須遵守圓或橢圓大小增大，則色點之間的距離要增大這項原則。本論文最後實驗結果，取  $p = \frac{a_l + a_s}{3}$  有最佳效果。其中  $a_l$  與  $a_s$  分別為橢圓的長軸與短軸，若使用者選擇使用圓形色點，則  $a_l = a_s$  為圓形半徑。

填好了  $R$ -矩陣的對角項之後，接下來討論如何制定非對角項。首先舉兩個極端的例子來說：如果我們將非對角項都填上 0，表示任意兩個類別  $k_m$  與  $k_n$  之間的取樣點最小距離  $R_{m,n}$  為 0，因為任意兩個類別之間的最小距離沒有給予限制，此時這個多類取樣演算法便降階成單類取樣演算法，類別與類別之間無法滿足均勻性質（如圖 17 最上層）；另一方面來說，如果我們將非對角項  $R_{m,n}$  制定為  $\frac{r_m+r_n}{2}$ ，則只能保證所有類別合併後的均勻性質，而不能保證各自類別的均勻性質（如圖 17 中間層）。本小節建立  $R$ -矩陣的目標為需要滿足使類別之間與各類本身都具有均勻的性質（如圖 17 最下層）。

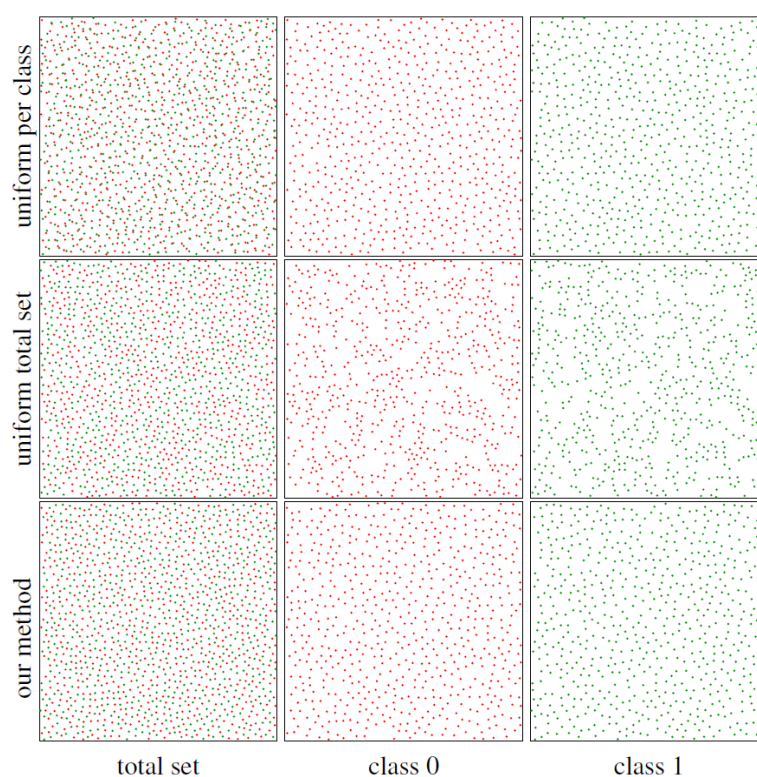


圖 17 不同非對角項制定方式所造成的不同分佈結果。圖片來源：Wei 在 2010 年所發表的論文。

為了方便解釋，我們先假設總共只有兩個類別 ( $k=2$ )，由於我們的距離數列來自百分比密度的倒數（如公式(8)），因此可反推得  $k_i$  最終的點數密度會正比於  $\frac{1}{r_i}$ ，那麼在此  $2 \times 2$   $R$ -矩陣的非對角項  $r_{\phi}$  應如下制定，使整個取樣結果的整體密度滿足  $\sum_{i=1}^k \frac{1}{r_i}$ ，意即：



$$\frac{1}{r_\phi} = \sum_{i=1}^k \frac{1}{r_i} \quad (9)$$

如果我們所設定的非對角項值小於  $r_\phi$ ，則會得到類別與類別之間不均勻的結果；如果我們所設定的非對角項值大於  $r_\phi$ ，則會得到各自類別中不均勻的結果。此方法也可以用在當  $k > 2$ ，且所有類別都有相同  $r$  值時。然而，當  $k > 2$ ，且所有類別皆不同  $r$  值時，使用公式(9)將產生不理想的結果。若制定的取樣點距離為  $r$ ，泊松磁盤取樣其樣本集擁有一個內圈半徑為  $\frac{1}{r}$  的藍雜訊能量頻譜 (power spectrum)。假設現在有兩個類別  $k_0$ 、 $k_1$ ，其取樣點距離關係為  $r_0 > r_1$ ，則  $\frac{1}{r_0} < \frac{1}{r_1}$ ，表示  $k_0$  的內圈半徑小於  $k_1$  的內圈半徑，下圖為這兩個類別各自的能量頻譜。

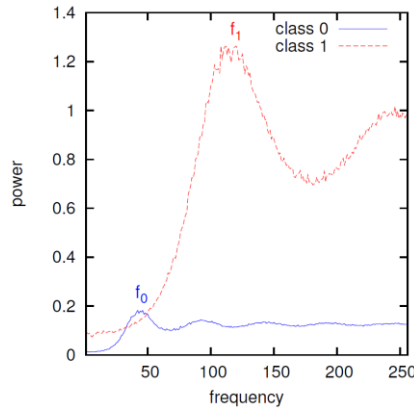


圖 18  $k_0$  與  $k_1$  的能量圖。圖片來源：Wei 在 2010 年所發表的論文。

由圖 18 可見， $f_0 < f_1$  ( $r_0 > r_1$ )， $k_0$  的內圈半徑因為小於  $k_1$  的內圈半徑而干擾到  $k_1$ 。由上述理由，為了確保每個類別之間的相互干擾為最小，當我們要計算任一  $k_i$  與其他類別之間的距離，我們必須保證  $\{k_j | r_j < r_i\}$  此集合中類別已盡可能是均勻分布。因此我們每回合依照  $r_i$  由大到小的順序來考慮  $k_i$ ，並如公式(9)計算目前已考慮類別的總密度

$D = D + \frac{1}{r_i}$ ，依照當回合的  $k_i$  找出  $\{k_j | r_j > r_i\}$ ，則非對角項  $\left\{ R_{i,j} = \frac{1}{\sqrt{D}} | r_j > r_i \right\}$  即可依序填入。

如此在每一個分割區域中就會因為組成色之間不同的百分比密度組成而構成一個

此區域專屬的  $R$ -矩陣。關於建立  $R$ -矩陣的更多細節，請參照 Wei 在 2010 年所發表的論文[40]。

#### 4.4 色點的方向與橢圓

為達到輸出的結果與真實的點畫足夠相似，我們觀察了藝術家的真實點畫。由這些真實點畫我們可以發現：藝術家在作畫時，色點並不會是規規矩矩的圓型，而是一個個隨著物件的邊緣流動方向而排列的長扁橢圓形，並且有著明顯的輪廓外形，如圖 19。我們還可以觀察發現：越是在物件邊緣的部分，該部分的色點就會在越上層。綜合以上兩個觀察到的特性，這樣的橢圓不僅可以強調出影像內容的邊緣特性，還更加強了物件與物件之間的區別，使得真實點畫不僅僅是一種由多個小色點組合而成的馬賽克效果，而是許許多多隨著畫筆方向而旋轉排列的小橢圓點所構成富含結構紋理的圖畫。



圖 19 秀拉點畫局部圖。可看出秀拉大多使用長扁形的橢圓來作畫。

藉由以上的觀察，我們計算圖片的梯度值 (Gradient) 來得到每一個像素的方向性 (Orientation)，影像中在座標  $(x, y)$  的梯度向量  $f(x, y)$  定義為：

$$\nabla f = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (10)$$

當  $\nabla f(x, y) = \vec{0}$ ，表示在  $(x, y)$  座標處邊緣強度為 0，因此在此座標的旋轉角度我們給予一個隨機角度  $\theta(x, y) = \text{rand}(-\frac{\pi}{2} : \frac{\pi}{2})$ 。若  $\nabla f(x, y) \neq \vec{0}$ ，那麼在座標  $(x, y)$  上的橢圓旋轉角度  $\theta(x, y)$  恰好垂直於梯度角度方向  $\alpha(x, y)$ ，假設  $G_x(x, y)$ 、 $G_y(x, y)$  皆不為 0：

$$\theta(x, y) = \alpha(x, y) + \frac{\pi}{2} \quad , \quad \text{其中 } \alpha(x, y) = \tan^{-1}\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (11)$$

若  $G_x(x, y) = 0$ ，表示  $x$  方向無變化量，則  $\theta(x, y) = 0$ ；同理，若  $G_y(x, y) = 0$ ，則  $y$  方向無變化量， $\theta(x, y) = \frac{\pi}{2}$ 。如此一來，我們將原本的圓點改變為橢圓，並隨著這個角度  $\theta$  來旋轉橢圓，使得橢圓點的排列符合橢圓圓心的梯度垂直方向。

另外，我們也計算了整張影像的梯度大小：

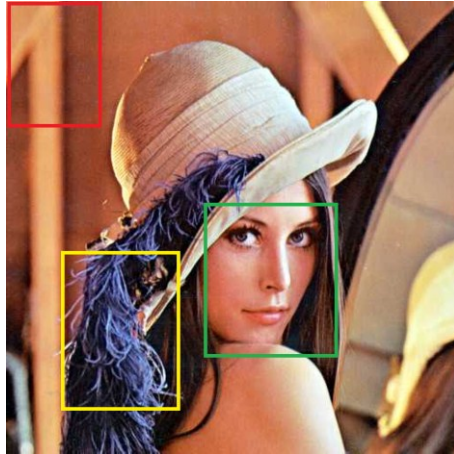
$$|\nabla f| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \quad (12)$$

我們依照梯度值由小到大的順序來進行著色，使得梯度值越大的部分在越上層，以確保其色點不被覆蓋，也因此可使用以強調邊緣的色點保留在最上層。

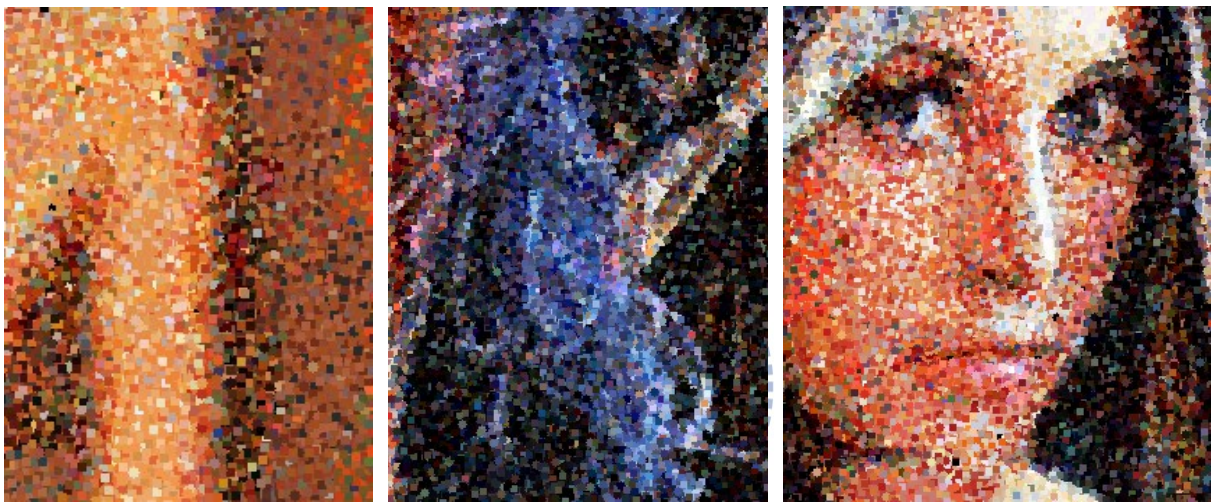
由於在本論文的研究中，整體訴求為簡單直覺，況且在一幅點畫作品中，色點的形狀其實十分難以辨別，只可大致判斷出是否近似圓形或橢圓，因此本論文中只採用圓形及橢圓，以降低整體實驗的複雜度。而若未來有更好的影像分析技術可以分析擷取出秀拉所習慣使用的色點形狀，則我們的模擬結果應該可以更好。

下圖 20 可以比較出圓點與橢圓點在呈現影像結構上的差異。

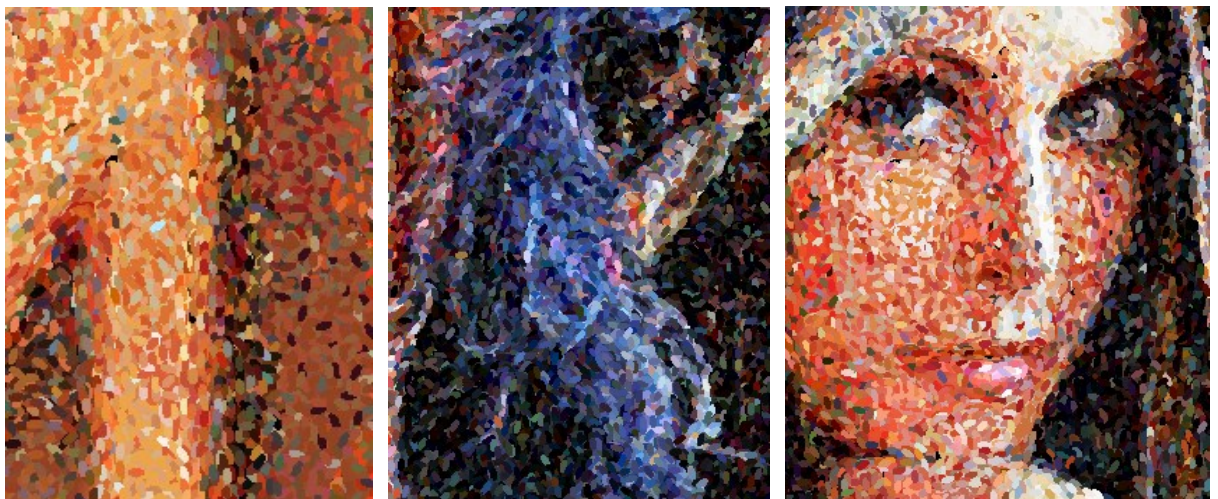




(a)



(b)



(c)

圖 20 圖(a)為輸入影像。圖(b)和圖(c)分別為用圓點和橢圓所構成的點畫局部圖。可以看出橢圓比圓點更能描繪出邊緣的結構與細節輪廓，也更貼近筆觸的形狀。



## 第五章

# 實驗與結果討論

在以往的研究中，並沒有一套可供評估點畫輸出結果好壞的統計量化方式來測量一幅模擬圖的好壞，大多使用圖片目測比對的方式來評估結果。然而一幅藝術創作的在視覺上的感受往往是很主觀的，因此若只單靠目測比對的方式來評斷結果，就稍微缺乏了一點公信力。在本論文中，我們認為若要測試一幅點畫是否與秀拉的作品足夠相似，那麼在色彩的組合方式上便是很重要的一環。色點的顏色分佈狀況就是一個可以量化的部分，如果顏色的分佈數據足夠近似秀拉的作品，那麼也許結果在外觀目測上也可以呈現出較好的結果。

然而在許多秀拉的作品中，我們無法得知秀拉當初在作畫時眼睛所見的場景的色相及亮度是多少，只能靠我們自己憑空想像，因此在秀拉作品的模擬方法上，輸入影像與輸出結果在顏色上的差異大小是好或壞是十分主觀的，而且秀拉在作畫時的情緒與情感影響畫出來的不同結果也難以量化分析。因此除了數據上的量化分析實驗之外，我們也找了數位使用者來針對主觀藝術部分進行使用者實驗，針對整體藝術性的好感度、色彩好感度、結構性保留度、以及色彩保留度進行評分，以比較我們的方法與其他作者的方法在主觀人為感受上的差異。

本章第一小節將介紹我們所採用的量化測量方式，用來評估我們輸出的點畫在色彩的結構上與秀拉點畫的適合度，並呈現多張點畫結果，以及我們的結果與先前其他研究所產生的點畫結果在圖片上與數據上的比較；第二小節介紹我們的使用者實驗方式，並以表格方式呈現使用者測試結果；第三小節展示本論文更多的輸出圖片，以及我們的結果與秀拉作品局部圖的比較；第四小節針對我們的研究方法與我們方法上的限制進行討論。

## 5.1 實驗一

### 5.1.1 實驗一方法

為了測試本論文在顏色組合上與秀拉點畫的相似度，我們收集了多幅先前的研究所產生的點畫結果來與本論文的輸出結果進行數據上的比較。我們使用了 Aslan 和 Zech 在 2005 年[42]所發表的多維度適合度檢定 (Multivariate Goodness-of-fit Tests)。

首先我們對輸入圖片使用彩色影像分割，每個分割區域為一個顏色，將此顏色至我們所收集的秀拉局部圖中進行比對，我們會在秀拉的局部圖中找到一個顏色最相近的分割區域，那麼在此分割區域中的像素值，便拿來與該圖片的輸出點畫相對應分割區域進行像素值分佈的多維度適合度檢定。在決定填入色彩 (4.2) 時，我們僅能保證所找到的相對應代表色與分割區域的顏色差距小於等於  $\sqrt{3 \times 32^2}$ ，其原因是我們所產生的新代表色有可能稍微偏離空格中心，但在本章節的實驗，為了使納入參考的分割區域有充分的參考價值，我們訂定的條件則較為嚴謹：若在秀拉局部圖查找近似顏色的過程中，找到的顏色與實際顏色在  $RGB$  空間距離大於  $\sqrt{3 \times 16^2}$ ，表示我們所收集的秀拉局部圖中沒有適合做為參考的分割區域，則此輸入圖片的分割區域不加入測試資料中。

做完上述步驟，我們可以知道每張輸入圖片的每個分割區域顏色分別對應至秀拉局部圖的哪一個分割區域，此時就可以對這兩個分割區域內的像素值分佈狀況做多維度適合度檢定。假設某一輸出點畫的一個分割區域共有像素值  $x_1 \sim x_n$ ，視為一筆資料  $X$ ，而與此區域對應的秀拉點畫局部分割區域有像素值  $y_1 \sim y_m$ ，視為一筆資料  $Y$ ，則這兩筆資料分佈的適合度能量  $\phi$  計算如下：

$$\phi_{mn} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{j>i} L(|x_i - x_j|) + \frac{1}{m(m-1)} \sum_{j>i} L(|y_i - y_j|) - \frac{1}{mn} \sum_{i,j} L(|x_i - y_j|) \quad (13)$$

其中， $L$  為對數距離 (Logarithmic Distance) 函數：

$$L(r) = -\log(r + \varepsilon) \quad (14)$$

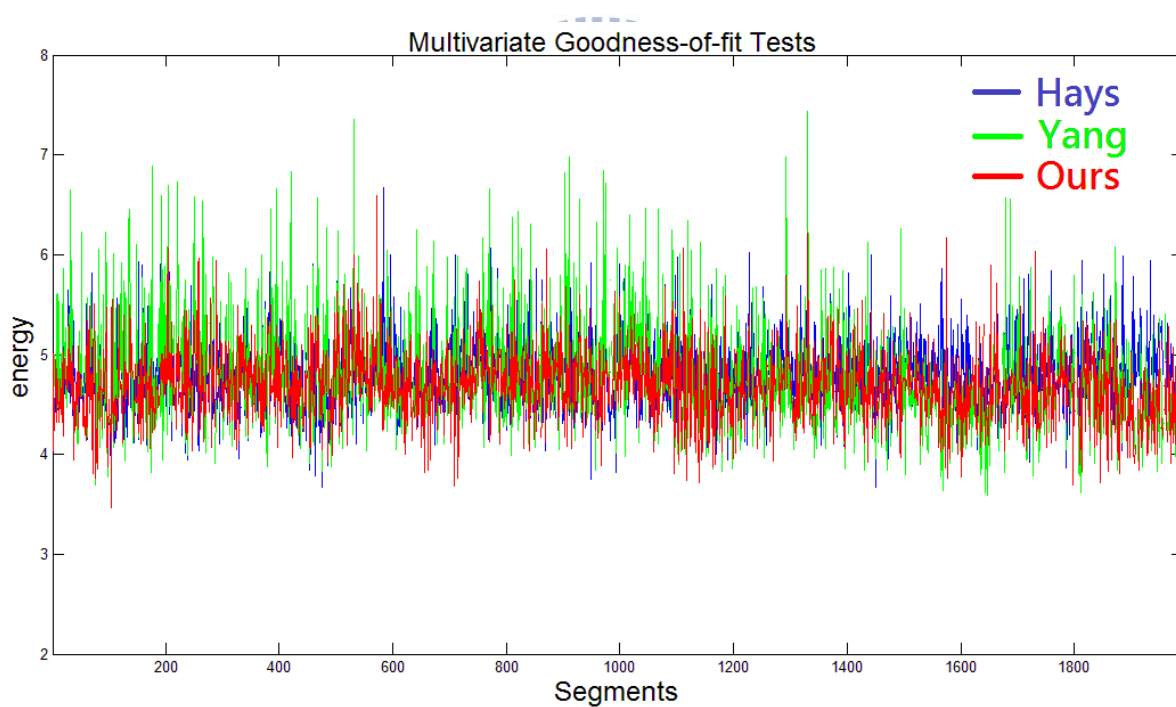
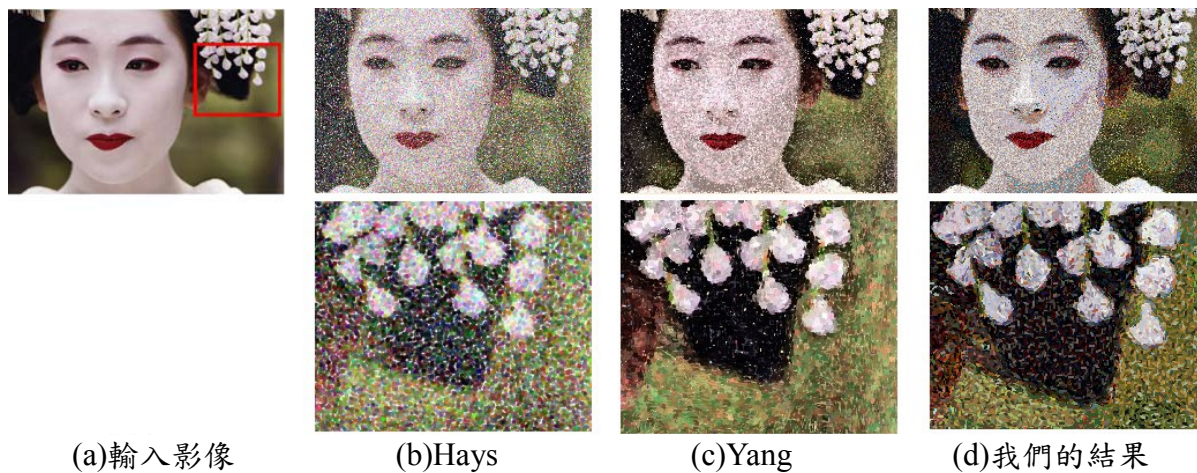
$\varepsilon$  為一個值足夠小的正數常數。則計算出來的能量值  $\phi_{mn}$  越小，表示此分割區域資料  $X$  與對應的秀拉局部區域資料  $Y$  的分佈情形越相似。

### 5.1.2 實驗一結果

圖 21~圖 24 為我們的方法與先前其他研究者的結果差異比較。由圖 21 可看出，Hays 的輸出結果顏色偏淺，並有許多空隙留白，視覺上較偏向彩色筆的模擬；而 Yang 的結果較難判別出色點的輪廓，顏色豐富度也較低；我們的結果在色點之間有足夠的密度，也能有保有色點清楚的輪廓，與真實顏料筆觸相似，色彩上如局部放大圖，白色的頭飾也摻有粉色與紫色，增加了整體的色彩豐富度。圖 22 的部分，Hertzmann 在顏料的處理上容易有破碎斑駁的感覺；Yang 在亮度呈現上為了產生光暈效果而提高對比度，但容易失去局部細節的細緻度；而我們的結果整體顏色與輸入影像的顏色差異較小，也保留了局部細節。圖 23，Seo 在結果圖中加上大量的補色，但反而使得這些補色色點格外的顯眼且突兀。事實上，在秀拉的點畫作品中，表達綠色的部分並不會使用鮮豔的紅色作為補色。圖 24，Luong 在灰色的柱子中出現了螢光粉紅，彩度變化過大；而 Yang 所使用的顏色整體亮度與原圖有較大的差距，圖片中葉子的清晰度也稍低；我們在灰色的柱子中則可以保有顏色的豐富度，但不至於出現過度顯眼突兀的顏色，在枝葉細節保留的部分表現也較好。

而在多維度適合度檢定能量值的部分。橫軸表示每一張輸入影像被納入參考的區域分割編號，縱軸表示適合度檢定的能量值，即每一個影像分割內的像素分佈與其對應的秀拉局部區域像素分佈利用公式(13)所求得的结果值。由圖 22(e)與圖 24(e)可以明顯的看出，我們的顏色分佈（紅色線）相較於 Yang 的結果（綠色線），能量值較低，表示我們在局部分割區域所彩色的色點顏色分佈較近似於秀拉所使用的分佈。而圖 21(e)與圖 23(f)額外再加入 Hays 的結果分析數據（藍色線），圖 23(f)可以明顯看出我們的能量值大部分仍低於 Hays 的數據。而圖 21(e)因為納入參考的分割區域太多造成數線遮蔽，在此我們將各個研究在不同張影像所計算出來的能量值計算平均，得到結果如圖 25，可以看出我們在圖 21~24 的分析結果能量值的平均值都低於 Hays 與 Yang，表示我們的在顏色組合條件下與秀拉的點畫作品最相似。

下面各圖中  $h_s$ 、 $h_r$ 、 $m$  分別代表空間解析度參數、範圍解析度參數、最小區域參數，詳細定義請參照第三章 3.1.1。



(e)

圖 21 geisha。Hays、Yang 與我們的結果比較。  
 解析度： $1600 \times 1067$ ， $(h_s, h_r, m) = (50, 2, 30)$ 。  
 (實驗採納分割數, 總分割數) = (1991, 3117)。



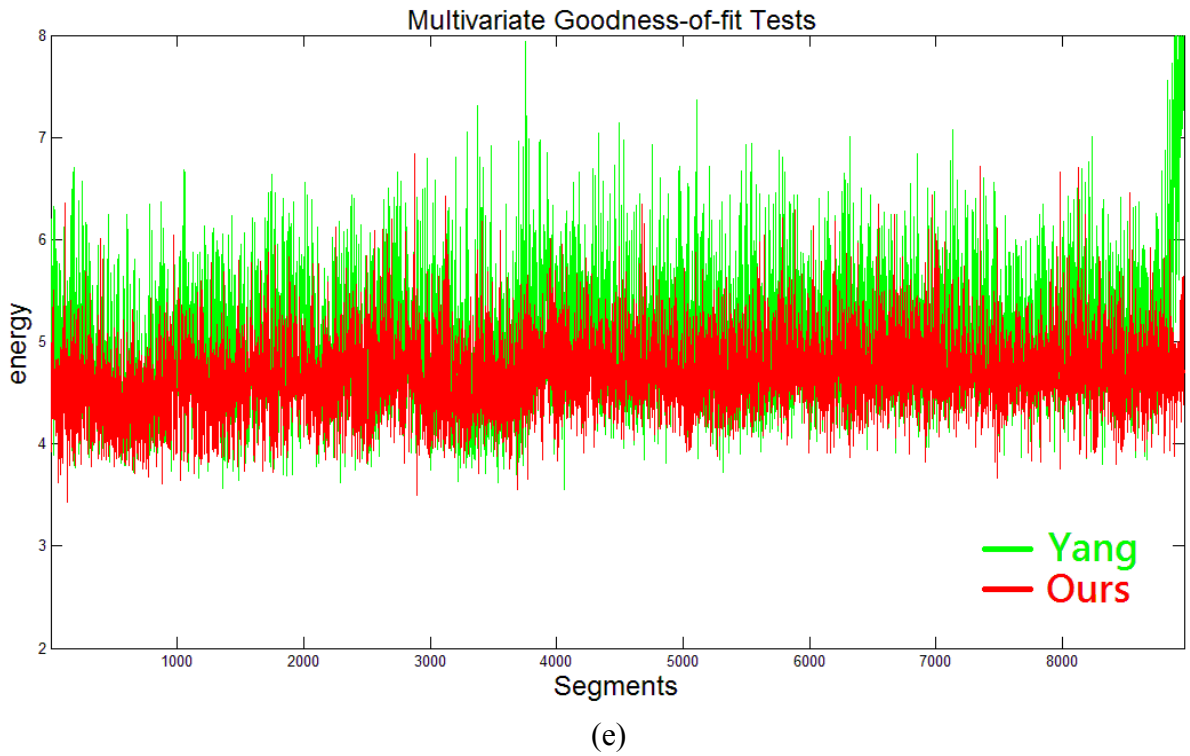
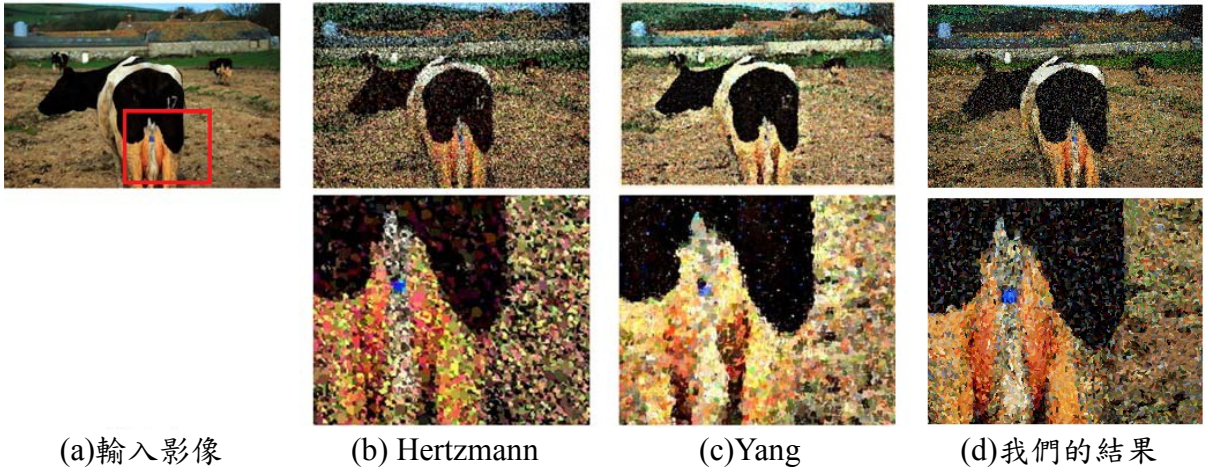


圖 22 cow。Hertzmann、Yang 與我們的結果比較。  
 解析度： $1600 \times 1067$ ， $(h_s, h_r, m) = (50, 2, 30)$ 。  
 (實驗採納分割數, 總分割數) = (8961, 12170)。

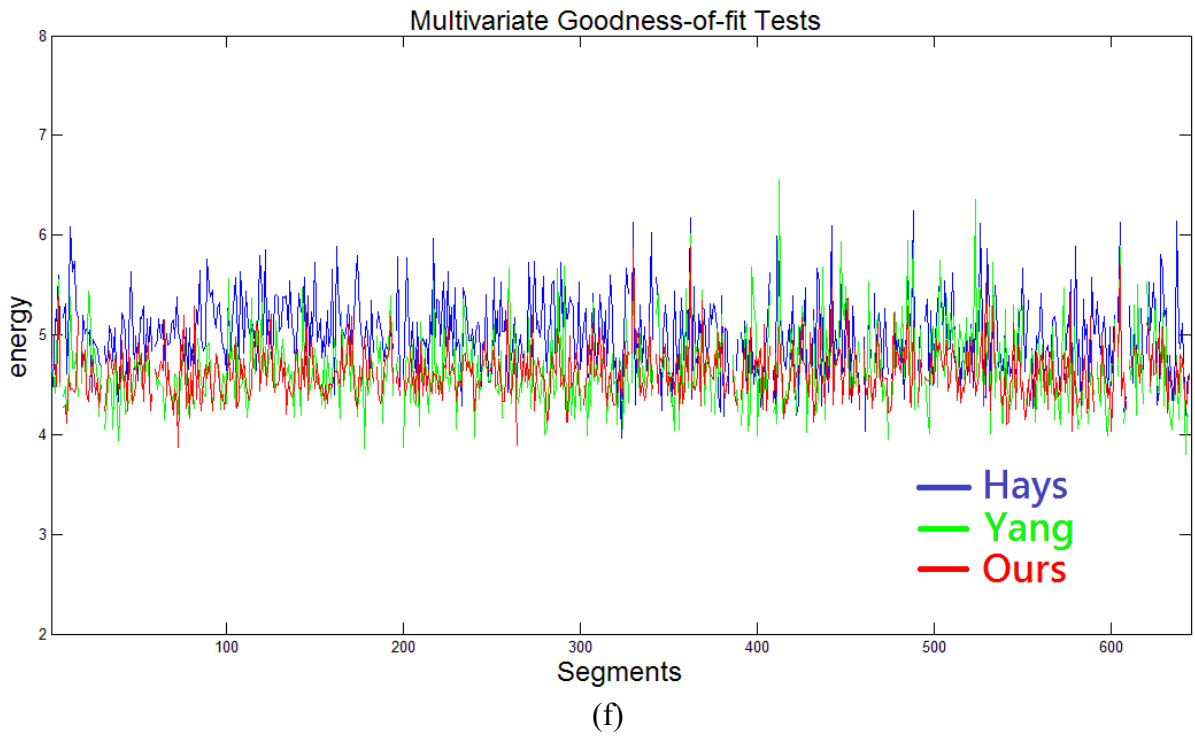
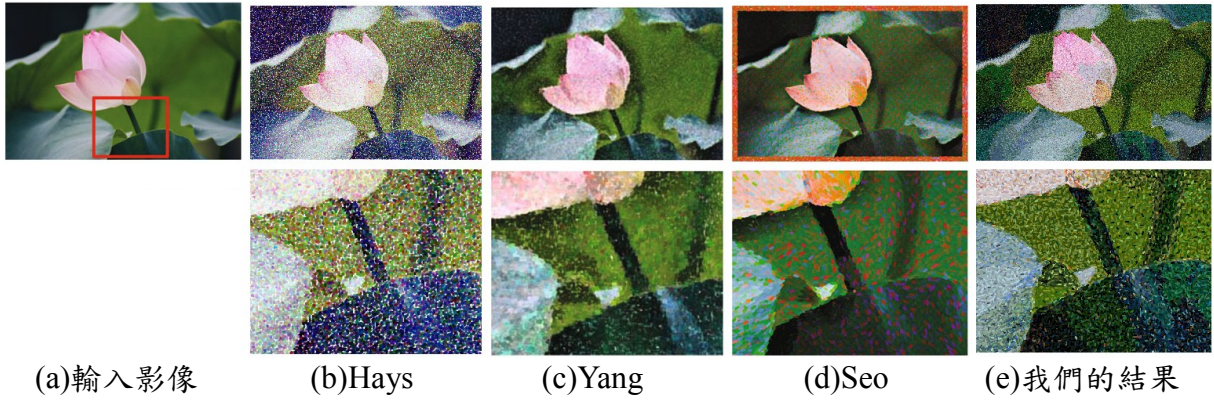


圖 23 pink flower。Yang、Seo 與我們的結果比較。  
 解析度： $1600 \times 1067$ ， $(h_s, h_r, m) = (60, 2, 40)$ 。  
 (實驗採納分割數, 總分割數) = (645, 1848)。

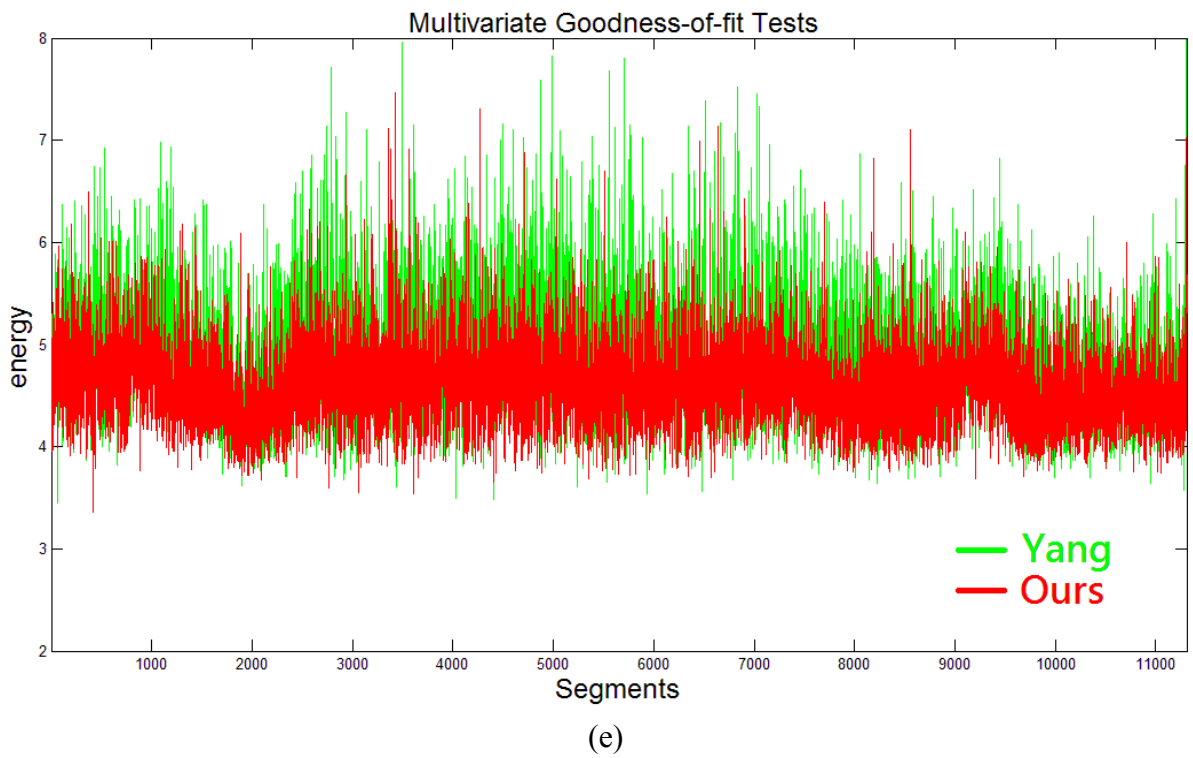
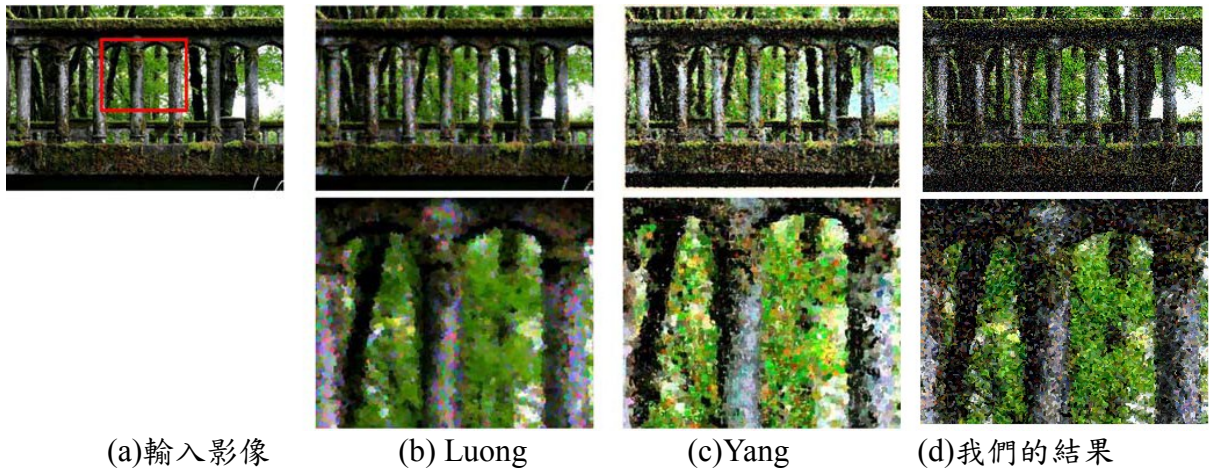


圖 24 columns。Luong、Yang 與我們的結果比較。  
 解析度： $1600 \times 1067$ ， $(h_s, h_r, m) = (50, 2, 30)$ 。  
 (實驗採納分割數/總分割數) = (11308/22465)



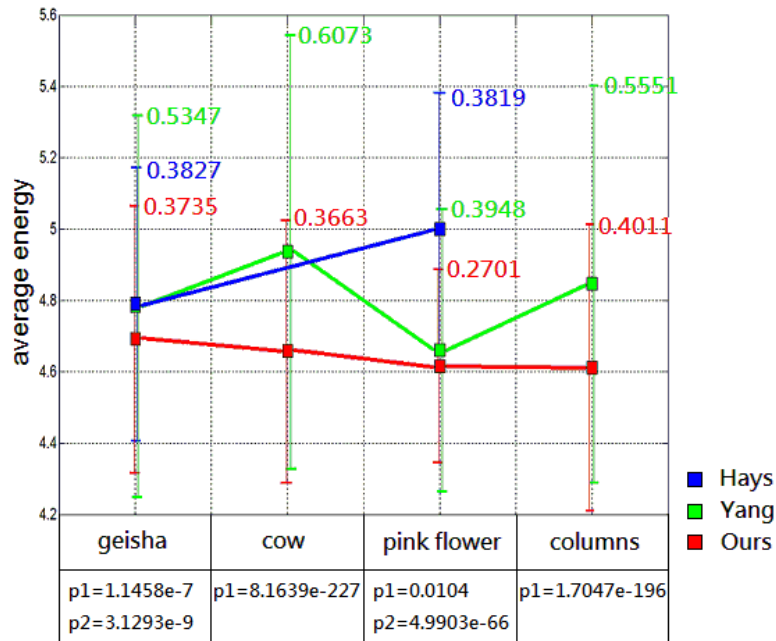


圖 25 多維度適合度平均能量值比較。其中數線中所標的數字為每個研究方法在每張圖中所得到的能量值標準差，而每個點延伸出的鉛直線為一倍標準差的信賴區間。而  $p1$  與  $p2$  分別代表我們的結果與 Yang 和 Hays 在能量值分布的  $p$ -value，可以看出這些  $p$ -value 值皆遠小於 0.05，表示我們的能量值分布狀況與他們的結果有顯著差異。

## 5.2 實驗二

由於本論文只取得了 Yang 的四張完整解析度圖檔，即實驗一所使用的 geisha、cow、pink flower、以及 columns，因此在本實驗中我們只與 Yang 進行使用者分析比較。

### 5.2.1 實驗二方法

在實驗開始以前，我們曾請教了具有藝術設計相關背景的人員進行訪談，詢問關於像秀拉這類藝術家的油畫模擬，該如何評斷不同模擬方法的好壞。首先是對於單純的寫生油畫評分而言，藝術家會認為一幅好的作品其主體要明確，以及注重其作品結果與真實場景的相似性，並具有立體感。其次是對於以同一景物的寫生或同一張照片的臨

摹，若要比較不同作者的作品優缺，其重點會放在色調與結構是否與原作或景物相似，顏色組成結構也必須要與秀拉相近。

對於訪談結果，我們設計了以下實驗，將實驗分成兩部分，第一部分是針對整體藝術好感度（Overall Artistic Impression）與色彩好感度（Color Impression），取我們的結果圖與 Yang 的結果圖讓使用者進行二選一，強制選出一張使用者主觀認為較好的結果。而第二部分則是針對結構性保留度（Structure Retention）與色彩保留度（Color Retention）將我們的結果圖與 Yang 的結果圖分別和輸入影像進行結構與色彩上的比對，並針對使用者的主觀判定結果給 1~5 分，1 分為最差，5 分為最好。

本次實驗共有 23 個使用者，共有 14 名男性與 9 名女性，年齡介於 20~30 歲之間。其中 21 位使用者具有電腦圖學背景，但沒有具有藝術相關背景的使用者。

## 5.2.2 實驗二結果

表格 1 使用者投票實驗

票數	A. 整體藝術好感度 896		B. 色彩好感度	
	我們的結果	Yang	我們的結果	Yang
geisha	10	13	5	18
cow	11	12	12	11
Pink flower	10	13	10	13
column	11	12	10	13
平均票數	10.5	12.5	9.25	13.75

由表格 1 可以看出，我們的結果在 23 個使用者的主觀票選中票數略低於 Yang 的結果，其原因可能在於我們在整體模擬點畫的操作過程較為簡單，而省略了許多細節的處理，例如光暈、色點大小的變化、色點邊緣的漸層等，使得整體好感度略低。

表格 2 使用者評分實驗

平均分數 圖片 \ 方法	C.結構性保留度		D.色彩保留度	
	我們的結果	Yang	我們的結果	Yang
geisha	3.96	3.82	2.96	3.61
cow	4.04	3.22	3.83	3.26
Pink flower	4.13	3.78	3.61	3.56
column	3.91	3.39	4.21	3.30
<b>總平均</b>	4.01	3.55	3.65	3.43
p-value	0.0017		0.1105	

而在表格 2 的比對保留度評分方面，23 位使用者在結構與色彩的給分平均結果呈現我們的保留度皆比 Yang 的結果來的好，因為我們對於輸入影像的操作，不會使輸出結果破壞原始圖片的結構，也由於色彩統計模型的機制，使得輸出結果得整體顏色不會偏離原始圖片的顏色太多。

其中，部分使用者表示他們並不知道秀拉是誰，也不了解秀拉點畫的特色，因此會選擇整體較為平滑而顆粒感較低的圖片，而知道秀拉點畫特色的人則較偏向選擇色點顆粒明顯的圖片。另外，也有部分使用者表示，尚未與原圖做比較之前，兩兩比較的實驗中，使用者會較偏好選擇整體亮度較高的結果圖，而不會選擇較暗的結果圖。

在此實驗中，我們所比較的 Yang 的結果在色點排列方式上，為了強調秀拉的十一原色特性而限制了可以使用的顏色，因此產生他們的色點混色排列方法 (color juxtaposition)；而我們認為秀拉的畫作色彩繽紛，因此我們使用統計方式計算各種顏色的組成方式，再隨機均勻的分佈在特定區域中，並強調了色點形狀分明的特性。此兩種不同的色點產生及排列方式，造就了截然不同的視覺效果。但無論是二選一的投票實驗，或是評分實驗，實驗的結果顯示我們的結果與 Yang 的結果雖然在外觀上有著顯著差異，但多數使用者對於審美的看法仍十分主觀，因而使得兩個實驗結果的分數都十分相近。

### 5.3 其它結果

圖 26 為與我們的點畫結果比較的秀拉原圖，將我們的點畫輸出結果取局部與秀拉的畫作比較。

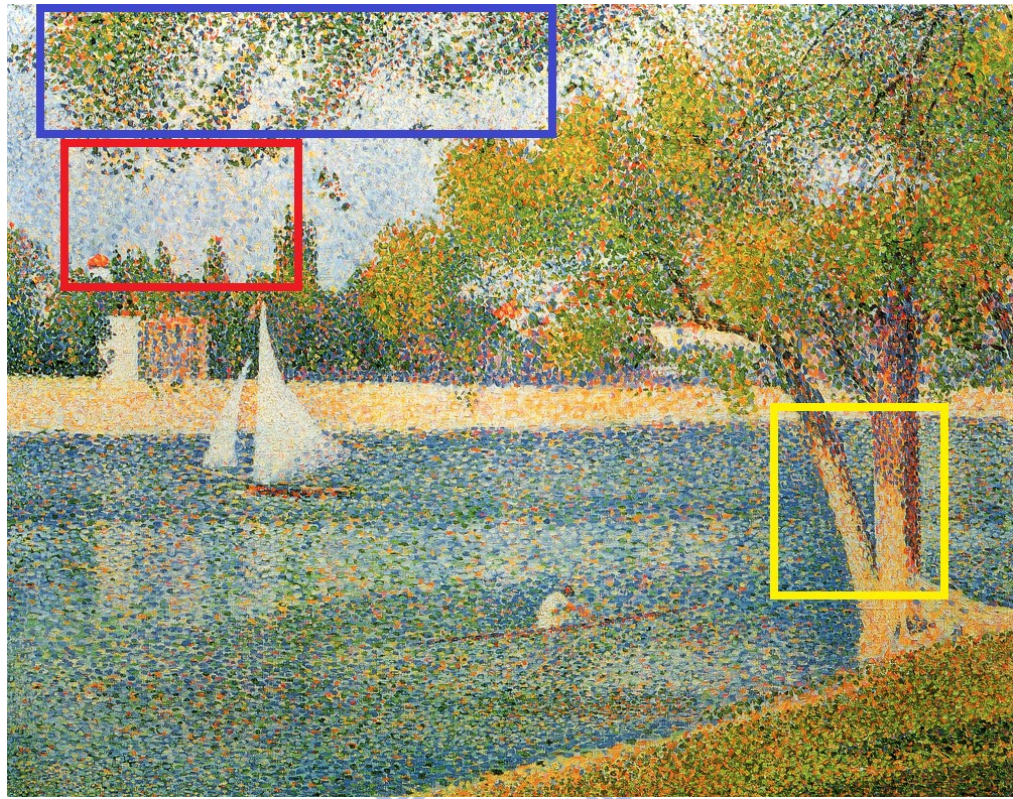
如圖 27，(a)小圖為我們的結果圖，(b)小圖為我們的結果在黃色方框中的局部放大圖，(c)小圖為圖 26 黃色方框的局部放大圖，由(a)(b)比較可以看出，我們在柱狀物等邊緣性質強烈的物體結構呈現與秀拉描繪樹幹的結構十分相似，因為我們利用梯度方向以及梯度值將靠近邊緣的橢圓色點擺在最上層，以突顯出物件的結構。

圖 28 為我們與秀拉點畫的顏色組成比較，(a)小圖為我們的點畫結果，(b)小圖為我們的結果在紅色方框中的局部放大圖，(c)小圖為圖 26 紅色方框的局部放大圖，由(a)(b)比較可以看出，在淺藍色的天空中我們摻了一些黃色色點，與在秀拉著色天空的部分也十分相近。

圖 29 為我們與秀拉點畫在樹葉結構上的比較，(a)小圖為我們的點畫結果，(b)小圖為我們的結果在藍色方框中的局部放大圖，(c)小圖為圖 26 藍色方框的局部放大圖，可以看出我們跟秀拉的樹葉色彩結構，除了綠色色點之外，也都富有橘色及藍色的色點。

最後，圖 30~33 為我們與先前研究結果的放大比較圖。圖 34~37 為我們方法的其他結果圖。

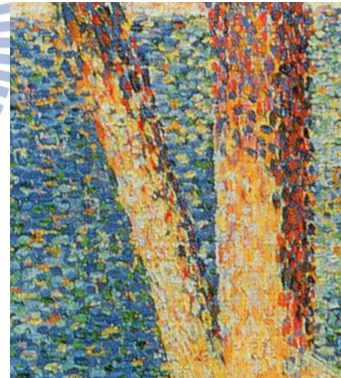




(a)



(b)



(c)



(d)

圖 26 與我們的結果比較的秀拉點畫「大捷特島的塞納河畔」。圖(b)、圖(c)分別為圖(a)中紅色方框與黃色方框的局部放大圖。

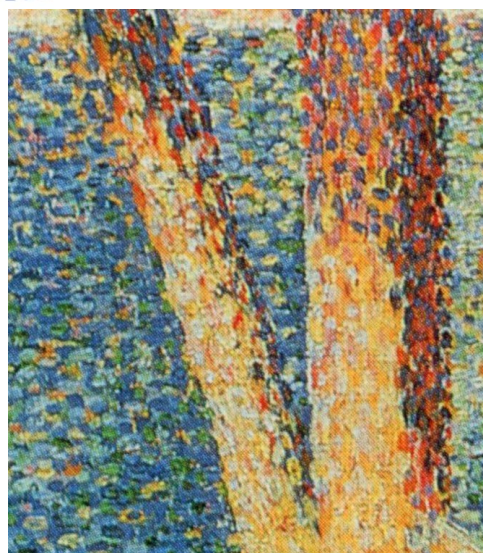




(a)



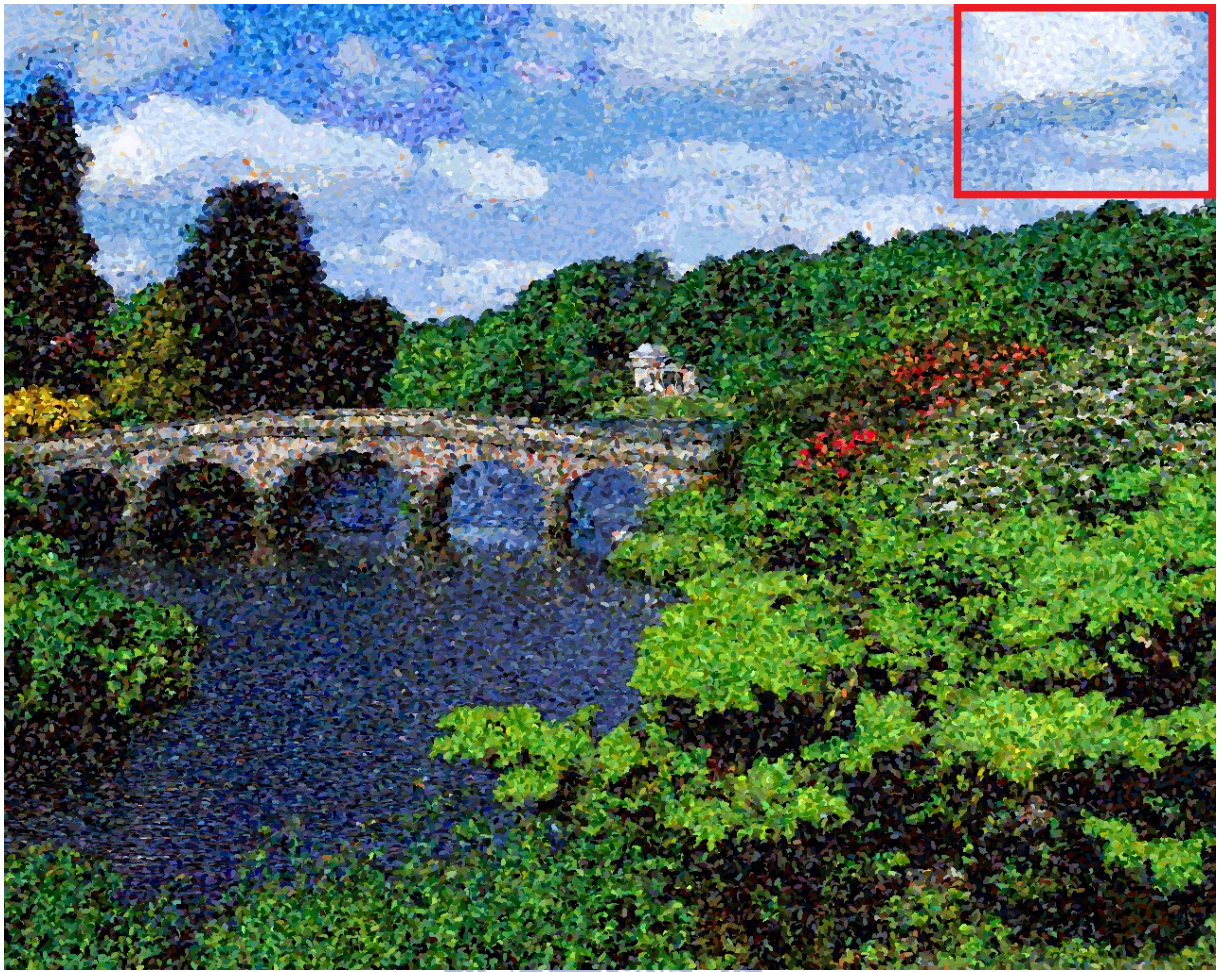
(b)



(c)

圖 27 我們的結果與秀拉點畫在邊緣結構上的比較圖。  
解析度： $1024 \times 1024$ ， $(h_s, h_r, m) = (20, 2, 20)$





(a)



(a)



(b)

圖 28 我們的結果與秀拉點畫在色彩結構上的比較圖。

解析度：1280×1024， $(h_s, h_r, m) = (20, 2, 15)$





(a)



(b)

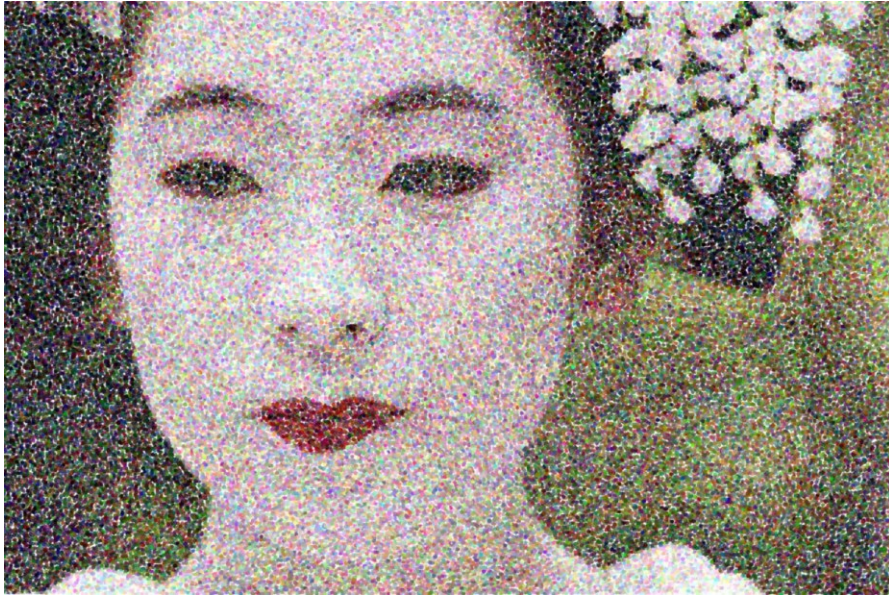


(c)

圖 29 我們的結果與秀拉點畫在樹葉結構上的比較圖。

解析度： $1600 \times 1200$ ， $(h_s, h_r, m) = (40, 2, 40)$

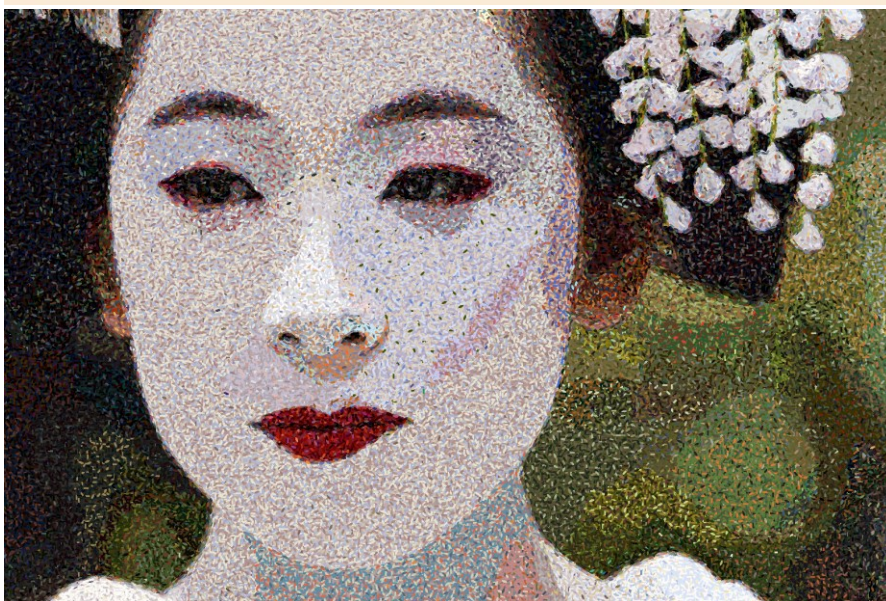




(a) Hays



(b) Yang



(c) 我們的方法

圖 30





(a) Yang



(b) 我們的方法

圖 31

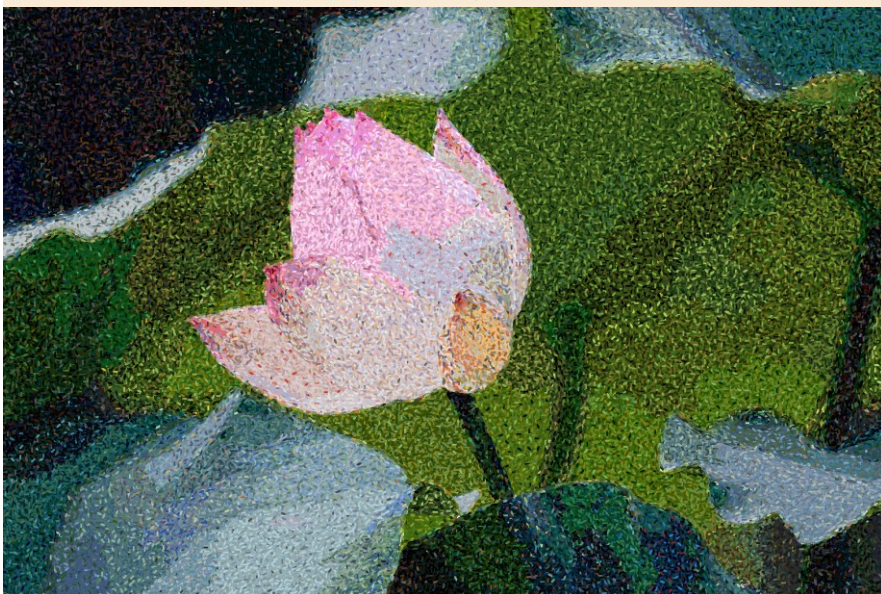




(a) Hays



(b) Yang



(b)我們的方法

圖 32





(a) Yang



(b) 我們的方法

圖 33



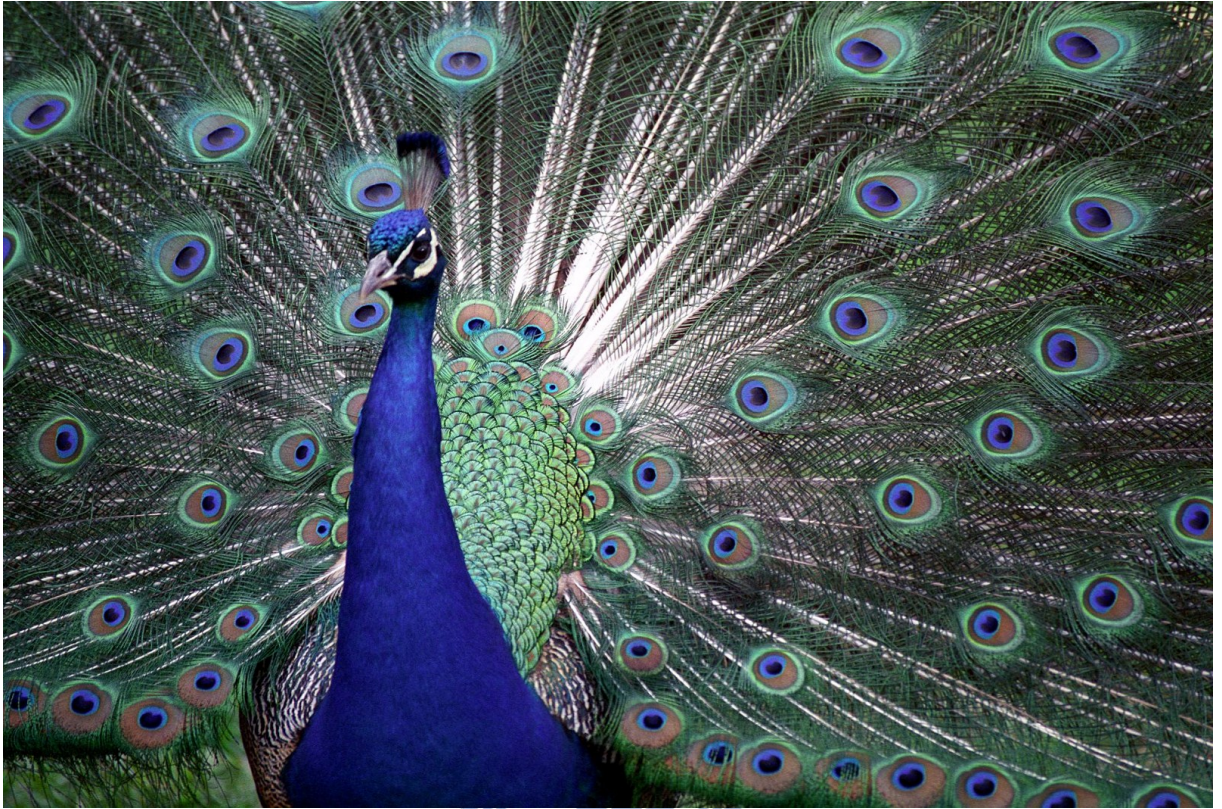


圖 34 解析度：1600×1066， $(h_s, h_r, m) = (30, 3, 30)$





圖 35 解析度：1280×1024， $(h_s, h_r, m) = (30, 2, 30)$





圖 36 解析度：1640×1230， $(h_s, h_r, m) = (40, 2, 30)$





圖 37 解析度：1240×768， $(h_s, h_r, m) = (30, 2, 30)$



## 5.4 結果討論

在我們的研究方法中，彩色影像分割的結果影響輸出點畫細緻度的程度很大，尤其在漸層的部分，如下圖 38 的天空部分，圖(a)的分割明顯比圖(b)粗糙，因此在漸層的部分表現較差。

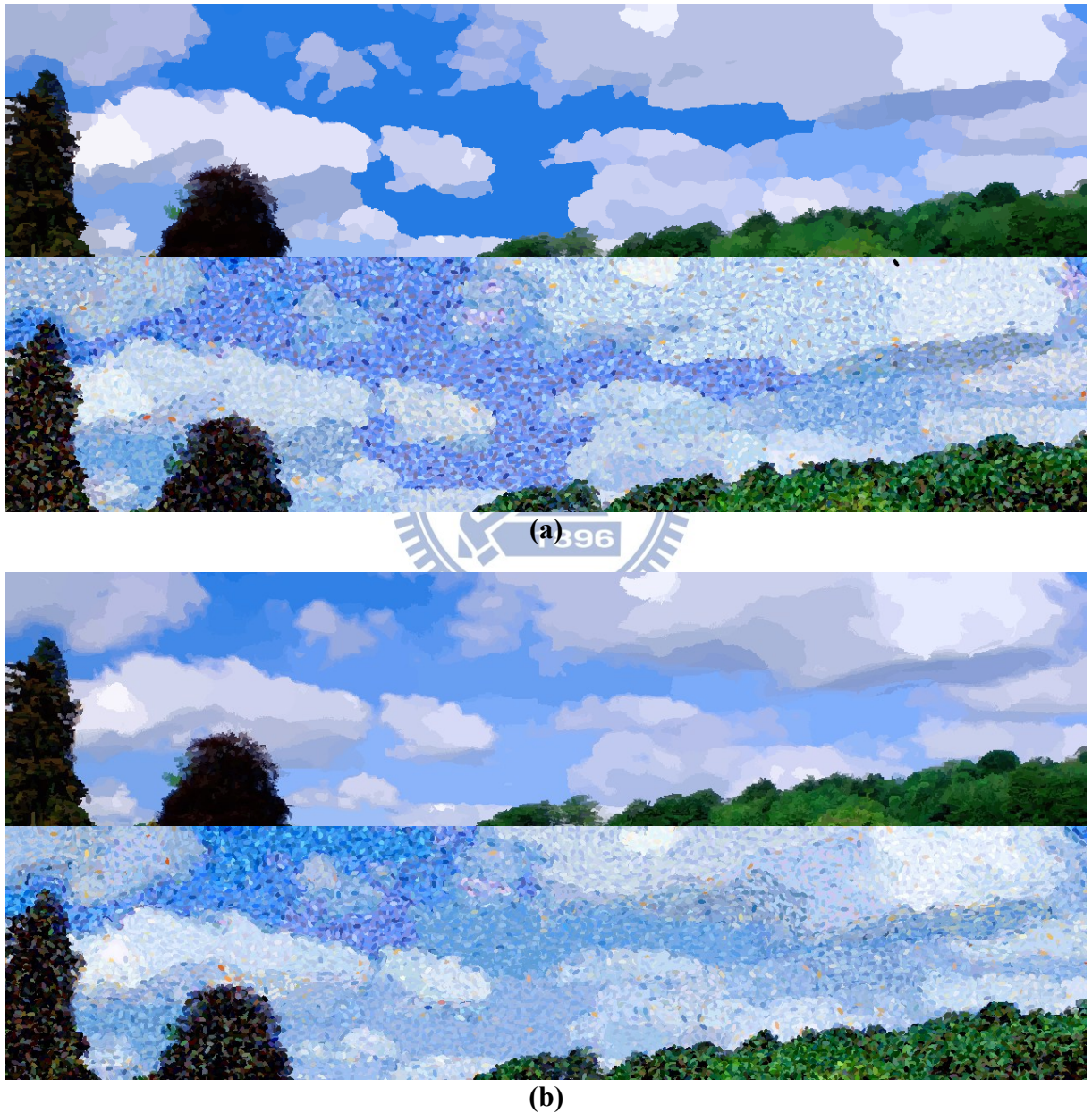


圖 38 (a)  $(h_s, h_r, m) = (7, .5, 20)$  。 (b)  $(h_s, h_r, m) = (20, 2, 15)$

影像分割的結果為本研究方法的一個限制，因為分割與分割之間有著明顯的顏色落差界線，因此在完成著色後的點畫中，如果有漸層的部分則容易產生不連續的狀況。但本方法在表現複雜影像畫面時則可以有良好的結果。

我們也可由圖 38 發現有些找到與分割區域對應的代表色與原本的分割區域顏色有些許落差，這可能歸咎於色彩統計模型中的代表色仍不夠使用，而我們在做產生新代表色的插值計算時所考慮的是在色距為 32 的 $8 \times 8 \times 8$ 方格中的 392 個空格填入新代表色，假如要再增加代表色，則必須考慮色距 16 的 $16 \times 16 \times 16$ 方格中的空格，如此可能會增加三千多個新代表色，整個色彩統計模型的代表色可能增加至八千多個，將大大增加原本計算比對代表色與藍雜訊取樣的時間。

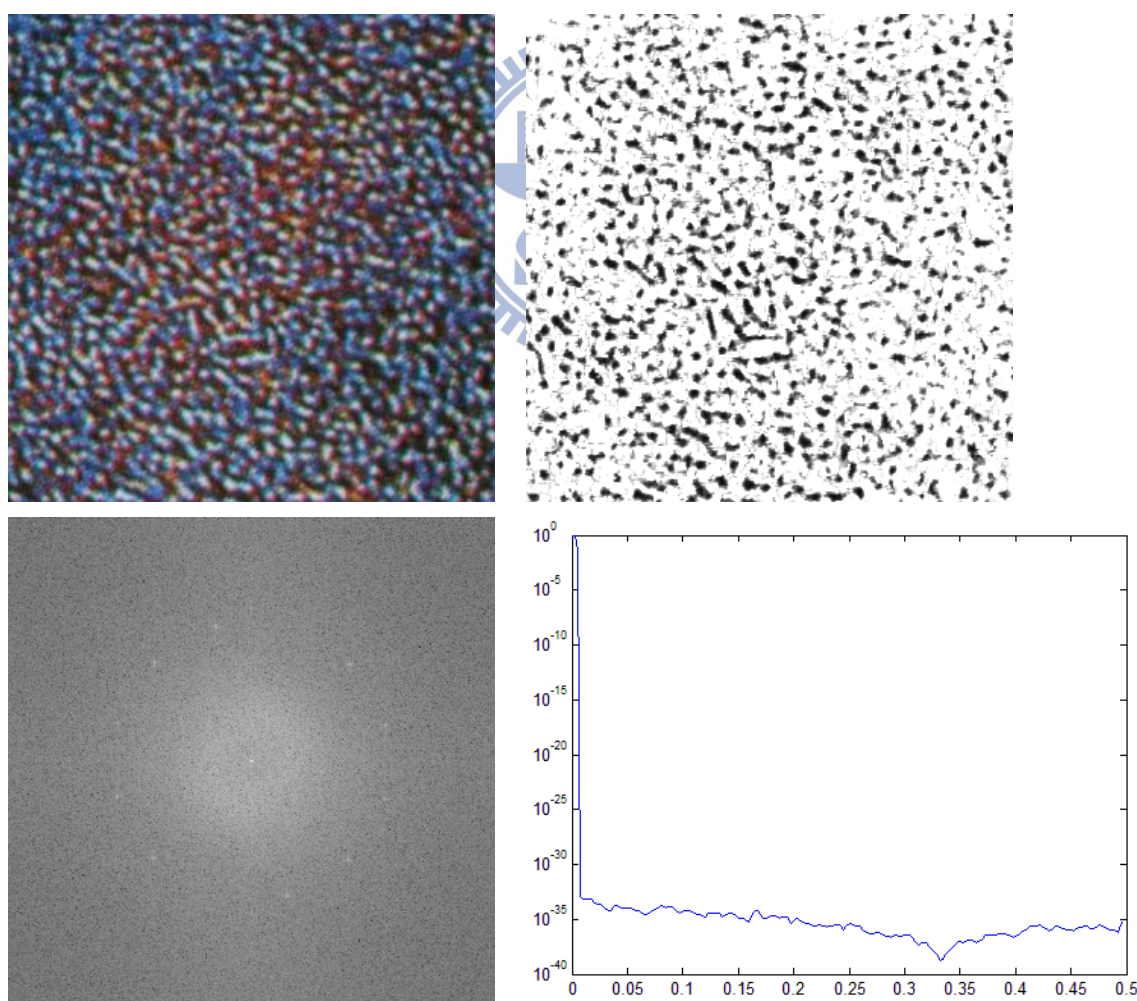
在藍雜訊的部分，事實上，本論文也實際取秀拉點畫擷取出色點的分佈狀況，每張秀拉點畫約取出十個看起來最為均勻分布的區塊，將其同樣顏色色點之間的影像當作一幅雜訊，並對其作傅立葉轉換，再由頻譜中心由內而外計算平均頻譜能量值（Power Spectrum）的測試，如圖 39，結果發現秀拉的色點並非是完美的藍雜訊性質，而是較符合隨機卻不均匀分布的白雜訊（White Noise）性質。我們認為其原因在於秀拉作畫時，其下筆的方式並不能保證同樣顏色的色點都保持在一個固定距離範圍之外，而有許多色點之間會十分靠近甚至彼此相連，因此打破了符合藍雜訊均勻性質的條件。但對在肉眼觀察的整體視覺上而言，我們不能否認在局部區域的色點看起來是均勻的分布。然而我們在模擬時，因為不像畫家在作畫時可以隨時在畫布上修改及補強，為確保模擬結果的協調性而避免相同顏色色點之間過分靠近或遠離，我們仍然採用符合藍雜訊性質的取樣方法。

另外，本論文也尚未找到一個可以自動且準確地判斷出適合加入光暈位置的方法，在以往的研究中，大多認為梯度值較大的邊緣位置很有可能是產生光暈的部分[15, 16]，然而，據我們的觀察，秀拉在許多邊緣性質強烈的地方並沒有加上光暈的效果，也在許多梯度值不高的地方加上了光暈（如圖 40）。此外，秀拉點畫中的光暈除了亮度的變化（變亮、變暗）之外，也包含了色相的變化，並且也要考慮光暈出現的條件，這使得我們在判斷光暈位置的工作變得更加困難。若要加上光暈，便需要讓使用者手工選擇位置操作，但此選出來的位置是否正確也十分主觀，而且光暈的顏色也不僅是亮度的



改變，因此在分析光暈的研究上，目前我們並沒有想到一個較準確的實現辦法。而若要以主觀判斷來增加光暈，我們目前可以以手動方式直接修改輸入圖片在邊緣位置的亮度及色相來達成，如圖 41。

最後，本論文採用我們在第三章所建立的色彩統計模型的一個限制是，我們目前的方法，如果在著色步驟時，搜尋到兩個以上與目標顏色最相似的代表色，其組成色並不相同，則我們無法判斷出哪一個代表色的顏色組成方式與目標影像的整體顏色最為搭配。若有此情況發生，我們則利用隨機的方式決定要採用的代表色。另外，因為我們已對秀拉的點畫進行事前處理並儲存分析結果，此色彩統計模型為一個短期內無法更新的固定資訊，因此對於大部分的狀況而言，同一個代表色的顏色組成只會有一種，無法隨著不同影像的色調風格而改變其組成結構。



(a)



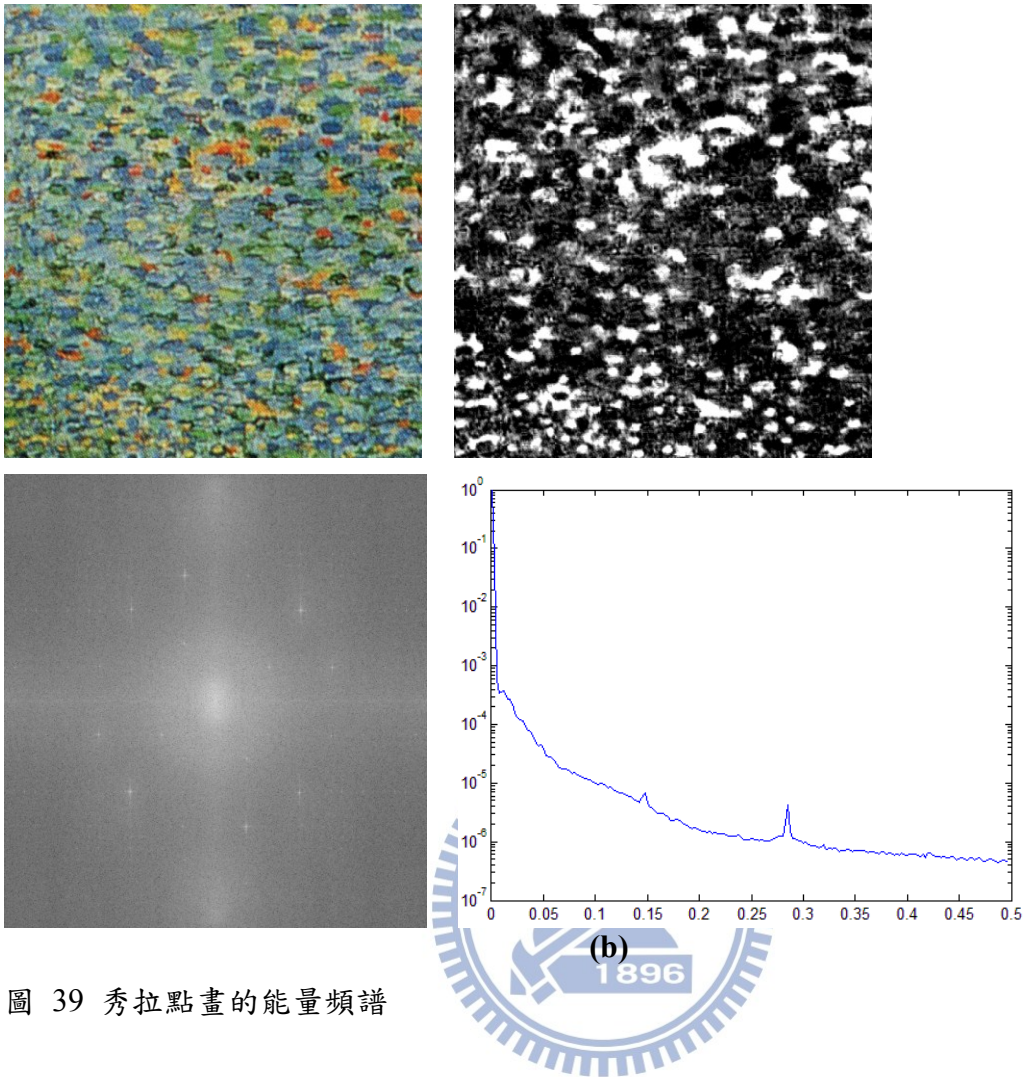


圖 39 秀拉點畫的能量頻譜

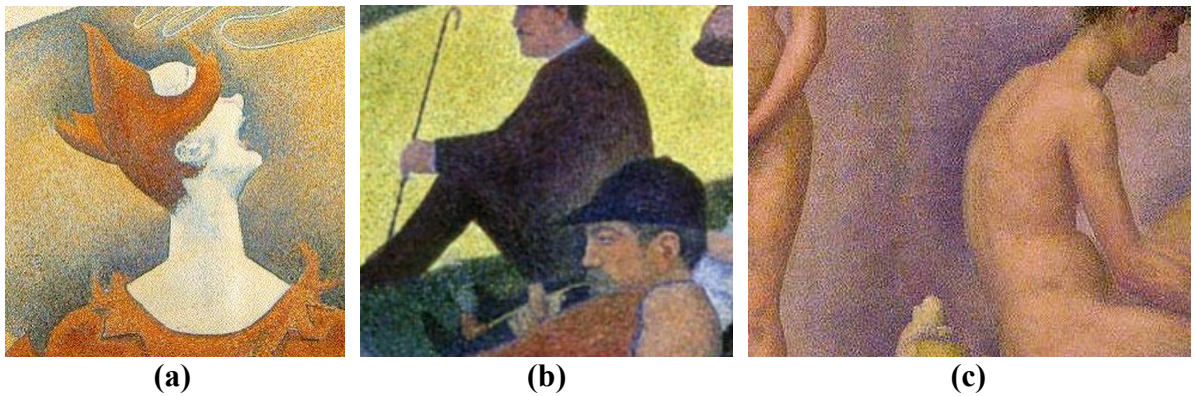


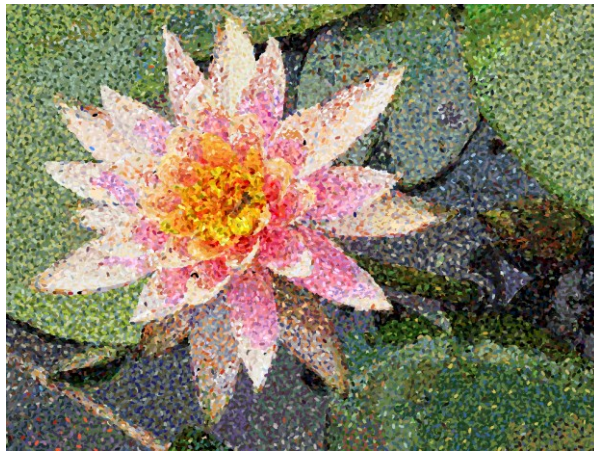
圖 40 (a)「馬戲團」局部圖，小丑的紅色頭髮在上方有明顯的深藍色光暈，但在同樣背景的左側頭髮邊緣部分卻完全沒有光暈。(b)「大捷特島的星期日下午」局部圖，後方穿西裝的男人與淺綠色草地有明顯的邊緣，卻沒有光暈；在前方的男人的深色帽子與後方男人的深色西裝交界處有明顯的白色光暈，但是在加上光暈之前，此交界處的邊緣性質十分不明顯。(c)「女模特兒」局部圖，在同樣的背景之下，右邊的女人與背景有著紫色的光暈，而左邊的女人與背景卻是白色的光暈。



(a)



(b)



(c)



(d)

圖 41 手動增加光暈結果。(a)為原始圖片，(b)為利用繪圖軟體手動增加光暈的影像。(c)和(d)分別為(a)和(b)的點畫結果。



# 第六章

## 貢獻與未來展望

### 6.1 貢獻

本論文提出了一個簡單而直覺的新方法來模擬藝術家點畫的顏色組合習慣與著色方式。在前處理方面，我們分析了藝術家真實點畫的著色習慣與結構，避免產生不必要的補色效果，並藉由學習這些收集來的資訊創造出藝術家沒有使用到的顏色，以及模擬這些新顏色的組成結構，也建構了色彩統計模型儲存各種顏色組合資訊供查詢使用，以符合能輸入任意彩色影像、並得到良好配色效果的標準。在方法上我們修改了多類藍雜訊取樣的作法，配合彩色影像分割以及查詢前處理所建立的色彩統計模型，可以準確的得知每個區域分割所要填入的顏色以及此顏色的組成結構與百分比密度，以完整的模擬藝術家的著色習慣。在結構上，我們計算輸入影像的梯度方向與大小，並藉此調整色點的旋轉方向以及排列方式，使得輸出的點畫結果保有良好的結構與邊緣特性。

### 6.2 未來展望

未來，我們希望可以更精確的分析由藝術家點畫收集而來的資訊，在產生藝術家所沒有使用到的顏色時可以有更準確的定義方法，以完整的模仿藝術家的顏色組成結構。另外，希望可以降低在彩色影像分割之後著色的不連續情形，使整體輸出點畫更加流暢。最後，希望可以在實作方法上降低參數的設定量，使模擬過程更加自動化。

## 參考資料

- [1] B. E. Bayer, "An optimum method for two level rendition of continuous tone pictures," *IEEE International Conference on Communications*, pp. 2611-2615, 1973.
- [2] J. F. Jarvis, C. N. Judice, and W. H. Ninke, "A survey of techniques for the display of continuous tone pictures on bilevel displays," *Computer Graphics and Image Processing*, vol. 5, pp. 13-40, 1976.
- [3] W. Floyd R, "An adaptive algorithm for spatial gray - scale," *Proc.Soc.Inf.Disp.*, vol. 17, pp. 75-77, 1976.
- [4] V. Ostromoukhov, "A simple and efficient error-diffusion algorithm," *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 567-572, 2001.
- [5] M. P. Salisbury, M. T. Wong, J. F. Hughes, and D. H. Salesin, "Orientable textures for image-based pen-and-ink illustration," presented at the Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 1997.
- [6] A. A. Efros and W. T. Freeman, "Image Quilting for Texture Synthesis and Transfer," *SIGGRAPH*, 2001.
- [7] A. Hertzmann, C. E. Jacobs, N. Oliver, B. Curless, and D. H. Salesin, "Image analogies," presented at the Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 2001.
- [8] Y. Chung-Ren, C. Ming-Te, L. Tong-Yee, and L. Wen-Chieh, "Stylized Rendering Using Samples of a Painted Image," *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, vol. 14, pp. 468-480, 2008.
- [9] H. Lee, S. Seo, S. Ryoo, and K. Yoon, "Directional texture transfer," presented at the Proceedings of the 8th International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering, Annecy, France, 2010.
- [10] O. Deussen, S. Hiller, C. V. Overveld, and T. Strothotte, "Floating Points: A Method for Computing Stipple Drawings," *Computer Graphics Forum*, vol. 19, pp. 41-50, 2000.
- [11] Q. Du, V. Faber, and M. Gunzburger, "Centroidal Voronoi Tessellations: Applications and Algorithms," *SIAM Review*, vol. 41, pp. 637-676, 1999.



- [12] A. Secord, "Weighted Voronoi stippling," presented at the Proceedings of the 2nd international symposium on Non-photorealistic animation and rendering, Annecy, France, 2002.
- [13] S. Hiller, H. Hellwig, and O. Deussen, "Beyond Stippling — Methods for Distributing Objects on the Plane," *Computer Graphics Forum*, vol. 22, pp. 515-522, 2003.
- [14] S. Jang and H.-K. Hong, "Stippling Technique Based on Color Analysis Advances in Multimedia Information Processing - PCM 2005." vol. 3768, pp. 782-793, 2005.
- [15] C.-K. Yang and H.-L. Yang, "Realization of Seurat's pointillism via non-photorealistic rendering," *The Visual Computer*, vol. 24, pp. 303-322, 2008.
- [16] S. Seo and K. Yoon, "Color juxtaposition for pointillism based on an artistic color model and a statistical analysis," *The Visual Computer*, vol. 26, pp. 421-431, 2010.
- [17] G. Arroyo, D. Martín, and M. V. Luzón, "A stochastic approach to simulate artists behaviour for automatic felt-tipped stippling," in *Evolutionary Computation (CEC), 2010 IEEE Congress on*, pp. 1-8, 2010.
- [18] D. Roguljic and V. Papic, "Procedure for non-photorealistic rendering in pointillist style," in *ELMAR, 2011 Proceedings*, pp. 111-114, 2011.
- [19] J. Hays and I. Essa, "Image and video based painterly animation," presented at the Proceedings of the 3rd international symposium on Non-photorealistic animation and rendering, Annecy, France, 2004.
- [20] A. Hertzmann, "Painterly rendering with curved brush strokes of multiple sizes," presented at the Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 1998.
- [21] T.-Q. Luong, A. Seth, A. Klein, and J. Lawrence, "Isoluminant color picking for non-photorealistic rendering," presented at the Proceedings of Graphics Interface 2005, Victoria, British Columbia, 2005.
- [22] S. Strassmann, "Hairy brushes," *SIGGRAPH Comput. Graph.*, vol. 20, pp. 225-232, 1986.
- [23] P. Haeberli, "Paint by numbers: abstract image representations," presented at the Proceedings of the 17th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, Dallas, TX, USA, 1990.
- [24] A. Hertzmann, "A survey of stroke-based rendering," *Computer Graphics and Applications, IEEE*, vol. 23, pp. 70-81, 2003.

- [25] D. Kim, M. Son, Y. Lee, H. Kang, and S. Lee, "Feature-guided Image Stippling," *Computer Graphics Forum*, vol. 27, pp. 1209-1216, 2008.
- [26] S. Y. Kim, R. Maciejewski, T. Isenberg, W. M. Andrews, W. Chen, M. C. Sousa, and D. S. Ebert, "Stippling by example," presented at the Proceedings of the 7th International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering, 2009.
- [27] M. D., "Stipple placement using distance in a weighted graph," *Computational Aesthetics in Graphics, Visualization and Imaging*, pp. 44-52, 2007.
- [28] D. Martín, G. Arroyo, M. V. Luzón, and T. Isenberg, "Example-based stippling using a scale-dependent grayscale process," presented at the Proceedings of the 8th International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering, Annecy, France, 2010.
- [29] A. Glassner, "Penrose tiling," *Computer Graphics and Applications, IEEE*, vol. 18, pp. 78-86, 1998.
- [30] W.-M. Pang, Y. Qu, T.-T. Wong, D. Cohen-Or, and P.-A. Heng, "Structure-aware halftoning," presented at the ACM SIGGRAPH 2008 papers, Los Angeles, California, 2008.
- [31] J. Chang, B. Alain, and V. Ostromoukhov, "Structure-aware error diffusion," presented at the ACM SIGGRAPH Asia 2009 papers, Yokohama, Japan, 2009.
- [32] H. Li and D. Mould, "Contrast-aware Halftoning," *Computer Graphics Forum*, vol. 29, pp. 273-280, 2010.
- [33] J. I. Yellott, "Spectral consequences of photoreceptor sampling in the rhesus retina," *Science*, vol. 221, pp. 382-385, 1983.
- [34] S. Lloyd, "Least squares quantization in PCM," *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 28, pp. 129-137, 1982.
- [35] R. L. Cook, "Stochastic sampling in computer graphics," *ACM Trans. Graph.*, vol. 5, pp. 51-72, 1986.
- [36] M. Cohen, J. Shade, S. Hiller, and O. Deussen, "Wang Tiles for image and texture generation," in *ACM SIGGRAPH 2003 Papers*, San Diego, California, pp. 287-294, 2003.
- [37] A. Lagae and P. Dutré, "A procedural object distribution function," *ACM Trans. Graph.*, vol. 24, pp. 1442-1461, 2005.
- [38] J. Kopf, D. Cohen-Or, O. Deussen, and D. Lischinski, "Recursive Wang tiles for



- real-time blue noise," *ACM Trans. Graph.*, vol. 25, pp. 509-518, 2006.
- [39] V. Ostromoukhov, C. Donohue, and P.-M. Jodoin, "Fast hierarchical importance sampling with blue noise properties," *ACM Trans. Graph.*, vol. 23, pp. 488-495, 2004.
- [40] L.-Y. Wei, "Multi-class blue noise sampling," presented at the ACM SIGGRAPH 2010 papers, Los Angeles, California, 2010.
- [41] D. Comaniciu and P. Meer, "Mean shift: a robust approach toward feature space analysis," *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, vol. 24, pp. 603-619, 2002.
- [42] B. Aslan and G. Zech, "Statistical energy as a tool for binning-free, multivariate goodness-of-fit tests, two-sample comparison and unfolding," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 537, pp. 626-636, 2005.

