

國立交通大學

資訊科學與工程研究所

碩士論文



研究生：朱浩為

指導教授：林正中

中華民國 一 百 年 九 月

鉛筆素描之寬筆觸效應實驗觀察

Wide Stroke Simulation in Pencil Sketch

研究生：朱浩為

Student : Hao-Wei Chu

指導教授：林正中

Advisor : Cheng-Chung Lin



Computer Science

September 2011

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百年九月


鉛筆素描之寬筆觸效應實驗觀察

學生：朱浩為

指導教授：林正中 副教授

國立交通大學資訊與工程研究所碩士班

摘 要



在鉛筆素描之模擬範疇中，本論文旨在討論寬筆觸如何以不同的濃淡、線條寬度以及筆筆之間的間距大小加以呈現之課題，並觀察其間的交互影響。做法主要分成三個步驟：1:根據影像中各種不同的灰階度加以分層。2：於各個分層後的灰階度設定每一筆的路徑和筆觸與筆觸間的距離。3：設定每一筆的寬度以及濃淡度。

此論文提出的方法以手繪素描真實筆觸呈現的角度切入，並佐以各種寬筆觸特性控制來探討其素描模擬結果。

Wide Stroke Simulation in Pencil Sketch

Student : Hao-Wei Chu

Advisor : Cheng-Chung Lin

Institute of Computer Science and Engineering

National Chiao Tung University

ABSTRACT

Approaches to wide stroke simulation in pencil sketch are presented in this thesis. The simulation is staged in three phases such that real taste of hand-drawn wide stroke with pencils can be mimicked.

- (1) Data preparation: quantization in intensity and image spatial space.
- (2) Building up of the paths of every stroke: determination of control points and generation of stroke paths.
- (3) Final Touch: controls over the agitation on stroke width, sweeping orientation etc. are engineered for a realistic look of the final result.

目 錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
目 錄	iii
圖片目錄	iv
第 一 章 簡介	1
第 二 章 相關研究	3
第 三 章 處理方法	8
3.1 系統架構.....	8
3.2 彩色灰階轉換	9
3.3 灰階度分層與取點.....	10
3.4 使用 Catmull-Rom Splines 畫曲線.....	15
3.5 筆觸線段骨架與壓力線之產生.....	16
3.6 表現重複繪畫以及不精確性.....	20
第 四 章 實驗結果	22
第 五 章 結論.....	37
參考文獻	38

圖片目錄

圖 2-1	左圖為原圖，右圖為向量圖. 文獻[3].....	4
圖 2-2	左圖為 DDA 執行結果，右圖為 LIC 執行結果. 文獻[1].....	4
圖 2-3	從 (x, y) 畫出正反向的 DDA 直線。文獻[3].....	5
圖 2-4	從 (x, y) 往正反向計算出的 LIC 曲線。文獻[3].....	5
圖 2-5	圖片擷取方式與擷取成果. 文獻[4].....	6
圖 2-6	多重紋理貼圖模擬筆觸的成果. 文獻[4].....	6
圖 2-7	粉蠟筆筆觸生成程序. 文獻[5].....	7
圖 2-8	左圖為將壓力集中在邊緣的表示 右圖為一般模擬的筆觸文獻[5]	7
圖 3-1-1	筆觸產生流程圖.....	9
圖 3-2-1	灰階影像轉換，左圖為原圖，右圖為使用 YUV 轉換之灰階影像圖.....	10
圖 3-3-1	灰階影像分十層後之結果圖.....	10
圖 3-3-2	分層示意圖.....	11
圖 3-3-3	分層標記示意圖.....	13
圖 3-3-4	線段分配示意圖.....	14
圖 3-3-5	取點後決定線段集合之方式.....	14
圖 3-4-1	Catmull-Rom Splines 示意圖. 文獻[4].....	16
圖 3-5-1	線段骨架示意圖. 文獻[4]	18
圖 3-5-2	筆觸壓力與距壓力點之距離的關係圖. 文獻[4]	18
圖 3-5-3	本論文實驗所得壓力線分布與線條呈現結果.....	19
圖 3-6-1	附著示意圖.....	21
圖 3-6-2	左圖為素描教本實際素描圖.文獻[7]，右圖為本論文實驗模擬出來的效果.....	21
圖 4-1	素描教本實際素描圖.文獻[7]手繪不同濃淡圖.....	22
圖 4-2	手繪不同濃淡圖之程式執行結果.....	22
圖 4-3	電腦產生規律性不同灰階度圖.....	22
圖 4-4	石墨顆粒附著量小、線條間隔小、鉛筆寬度窄.....	24
圖 4-5	石墨顆粒附著量小、線條間隔小、鉛筆寬度中等.....	24
圖 4-6	石墨顆粒附著量小、線條間隔小、鉛筆寬度寬.....	24
圖 4-7	石墨顆粒附著量小、線條間隔中等、鉛筆寬度窄.....	25
圖 4-8	石墨顆粒附著量小、線條間隔中等、鉛筆寬度中等.....	25
圖 4-9	石墨顆粒附著量小、線條間隔中等、鉛筆寬度寬.....	25
圖 4-10	石墨顆粒附著量小、線條間隔大、鉛筆寬度窄.....	26
圖 4-11	石墨顆粒附著量小、線條間隔大、鉛筆寬度中等.....	26
圖 4-12	石墨顆粒附著量小、線條間隔大、鉛筆寬度寬.....	26
圖 4-13	石墨顆粒附著量中等、線條間隔小、鉛筆寬度窄.....	27
圖 4-14	石墨顆粒附著量中等、線條間隔小、鉛筆寬度中等.....	27
圖 4-15	石墨顆粒附著量中等、線條間隔小、鉛筆寬度寬.....	27

圖 4-16	石墨顆粒附著量中等、線條間隔中等、鉛筆寬度窄.....	28
圖 4-17	石墨顆粒附著量中等、線條間隔中等、鉛筆寬度中等.....	28
圖 4-18	石墨顆粒附著量中等、線條間隔中等、鉛筆寬度寬.....	28
圖 4-19	石墨顆粒附著量中等、線條間隔大、鉛筆寬度小.....	29
圖 4-20	石墨顆粒附著量中等、線條間隔大、鉛筆寬度中等.....	29
圖 4-21	石墨顆粒附著量中等、線條間隔大、鉛筆寬度寬.....	29
圖 4-22	石墨顆粒附著量高、線條間隔小、鉛筆寬度小.....	30
圖 4-23	石墨顆粒附著量高、線條間隔小、鉛筆寬度中等.....	30
圖 4-24	石墨顆粒附著量高、線條間隔小、鉛筆寬度大.....	30
圖 4-25	石墨顆粒附著量高、線條間隔中等、鉛筆寬度小.....	31
圖 4-26	石墨顆粒附著量高、線條間隔中等、鉛筆寬度中等.....	31
圖 4-27	石墨顆粒附著量高、線條間隔中等、鉛筆寬度寬.....	31
圖 4-28	石墨顆粒附著量高、線條間隔大、鉛筆寬度小.....	32
圖 4-29	石墨顆粒附著量高、線條間隔大、鉛筆寬度中等.....	32
圖 4-30	石墨顆粒附著量高、線條間隔大、鉛筆寬度寬.....	32
圖 4-31	石墨顆粒附著度高.....	34
圖 4-32	石墨顆粒附著度中等.....	34
圖 4-33	石墨顆粒附著度少.....	34
圖 4-34	石墨顆粒附著度高.....	35
圖 4-35	石墨顆粒附著度中等.....	35
圖 4-36	石墨顆粒附著度少.....	35
圖 4-37	石墨顆粒附著度少.....	36
圖 4-38	石墨顆粒附著度中等.....	36
圖 4-39	石墨顆粒附著度高.....	36

第一章 簡介

計算機繪圖時最後畫面之呈現方式大致可分為擬真顯像 (Photorealistic Rendering, PR) 以及非擬真顯像 (Non- Photorealistic Rendering, NPR)。人們在 PR 的領域上，其所追求的是能夠顯示如照像一般品質的圖像越好，而針對 NPR 則是要求能有其較具特別風格的表示方式。近年來，人們對於 NPR 的研究越來越多，也因為這樣，各種表現方式紛紛被開發出來。不論是模擬鉛筆、蠟筆、粉蠟筆、水彩等等，都有相關的論文發表出來。

而鉛筆素描由於相較其他種方式少了顏色的表達，因此更注重於線條的表現方式。以線條的粗細輕重來描述物體的明暗深淺，並且藉由明暗光影來襯托主題。但是由於少了彩度的變化，因此鉛筆素描在明暗的階段上，分層的很詳細，在細小的明暗變化中，就能襯托出物體的立體感。因此，筆觸的表現對於鉛筆素描之影響是相當重大的。

本論文主要是探討寬筆觸的可能呈現方式。筆觸的性質大致可分類為粗細、長短、濃淡、疏密以及方向。手繪素描的筆觸在下筆輕重、筆觸軌跡、長短、間距和方向於整體上會有一致性表現，但是又兼具局部不規則之變異的特點。本論文針對這些考量分別以線條的濃淡、線條與線條間的距離以及線條本身寬度之變化控制來模擬出接近手

繪鉛筆素描的感覺。

接下來會在第二章介紹一些前人研究過的鉛筆素描成果，以及對於蠟筆、粉蠟筆等非鉛筆素材所呈現之素描作法。第三章說明此篇論文實驗的方法以及步驟。第四章是實驗結果的探討，最後第五章為結論。



第二章 相關研究

目前有許多模擬繪圖素材筆觸的方法，大部分是以輸入影像為基礎的 NPR 技術，產生各種不同風格、不同繪畫筆觸的效果。其中包括了鉛筆[1][2][3]、粉蠟筆[4]、蠟筆[5]、水彩等都有各自的做法。以下介紹兩種鉛筆的以及一種粉蠟筆的模擬筆觸的方式。

自動化鉛筆素描系統以 LIC (Line Integral Convolution) 和 DDA(digital differential analyzer convolution)線積分迴旋法較為常見，此方法是由輸入影像導出一個向量圖 V (圖 2-1) 與一個灰階雜訊圖 T ，經由線積分迴旋計算後就能獲得一張根據向量走向，因而作出方向性模糊化的筆觸效果圖 (圖 2-2)。以向量圖中各點 (x,y) 為中心點，沿著該點向量正向與反向的方向算出一條曲線，計算該點特徵量對曲線上各點之貢獻，就可以模擬出具有方向延展性的結果圖。DDA 與 LIC 不同的地方在於 DDA 只用目前像素位置上的向量所計算出來的 DDA 直線做計算 (圖 2-3)，而 LIC 則是讓這條線跟著所經過位置的向量方向轉向來產生一條曲線做計算 (圖 2-4)。接著再使用 DOG (difference of Gaussian) filter 來做邊緣的偵測以此產生輪廓，將兩種結合起來就可以模擬出鉛筆素描的效果。

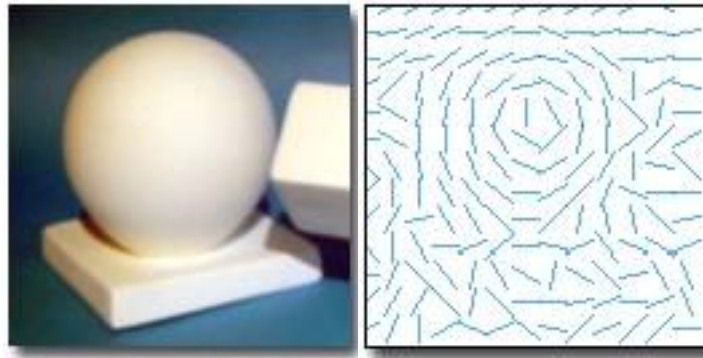


圖 2-1 左圖為原圖，右圖為向量圖. 文獻[3]

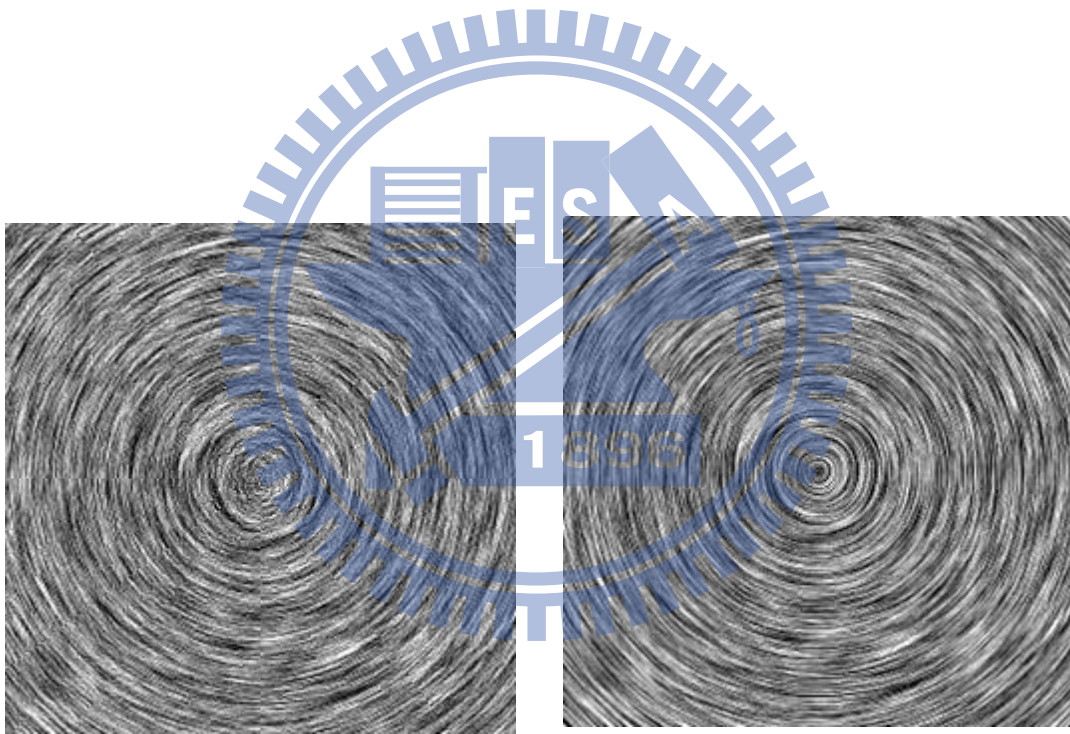


圖 2-2 左圖為 DDA 執行結果，右圖為 LIC 執行結果. 文獻[1]

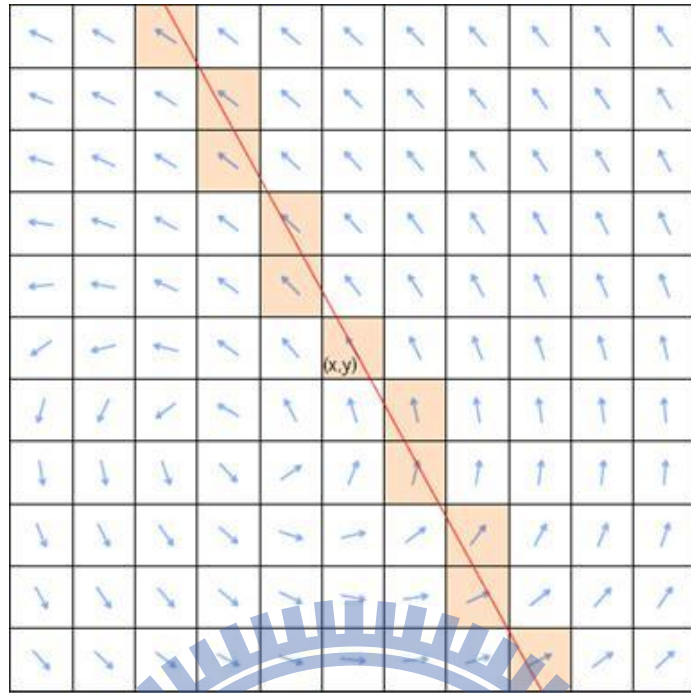


圖 2-3 從 (x, y) 畫出正反向的 DDA 直線。文獻[3]

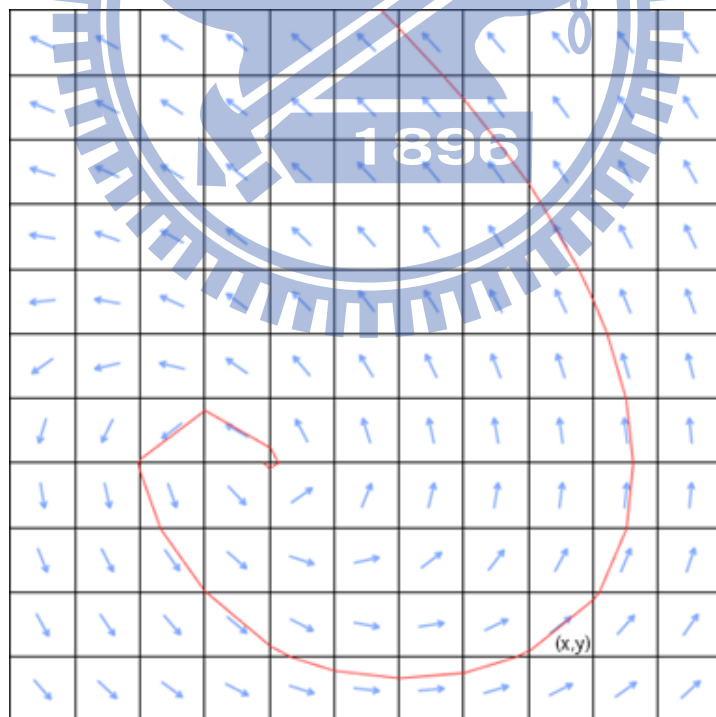


圖 2-4 從 (x, y) 往正反向計算出的 LIC 曲線。文獻[3]

文獻 [4]提出了另一種表現筆觸的方法。此論文將實際畫在紙上的筆觸拍照下來，分成了十二種不同角度的光源，每個光源間隔為30度，用來模擬以各種不同角度的繪畫現象（圖 2-5）。該論文利用這些圖片結合繪畫的角度，呈現出令人驚艷的筆觸效果（圖 2-6）。

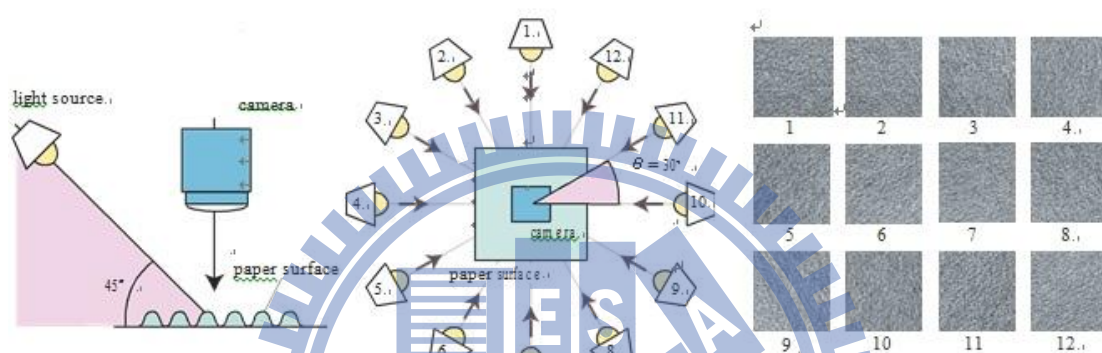


圖 2-5 圖片擷取方式與擷取成果. 文獻[4]



圖 2-6 多重紋理貼圖模擬筆觸的成果. 文獻[4]

不只是鉛筆筆觸之模擬，其他繪圖素材的模擬也有類似之研究。例如文獻[5]中就提到了有關粉蠟筆的筆觸模擬，所提出的方法為：先找出基本點以及線，在此線的兩點間，給予一個隨機的偏移值，再重新連接此線當作下筆路徑，最後再定義寬度（圖 2-7）。並且該文中也提出了表達不同壓力有不同深淺的作法（圖 2-8）。

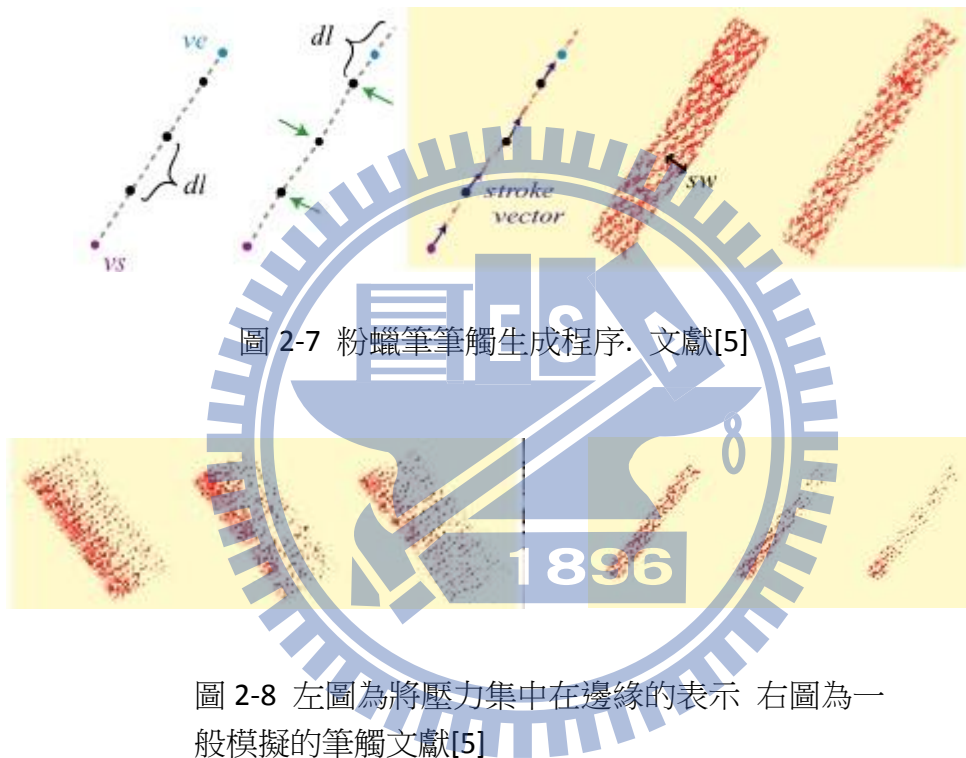


圖 2-7 粉蠟筆筆觸生成程序. 文獻[5]

圖 2-8 左圖為將壓力集中在邊緣的表示 右圖為一般模擬的筆觸文獻[5]

第三章 處理方法

為了讓產生的結果能夠讓人感覺是人類所繪畫而非機械自動產生，因此就必須要有吾人手繪特有的各種筆觸性質，諸如：筆觸的濃淡度不一致、無法畫出很精確的直線、下筆會有較為習慣的角度等。因此，我們參考了文獻[4][5]以及其他相關研究[2][3][6]所提出的筆觸繪畫產生法，並且針對筆觸濃淡、寬度與線距之參數變化組合加以模擬，產生了相當類似人類所繪畫的效果。

3.1 系統架構

本系統的主要流程為將灰階影像依灰階度分層，再就各分層內之分布特性取點。接著再將各點依照吾人繪圖的習慣連成不同線段並將之編號，最後對每條線依序進行筆觸效果處理(例如寬度、顏色深淺等)。詳細流程圖如圖 3-1-1 所示。

我們的方法捨棄了前人使用的 DDA 以及 LIC 的方法，追求以較為直觀的方法來模擬筆觸。前人使用 LIC 的方法模擬的素描感覺很逼真，可是缺少了某些手繪元素，例如重複繪畫、線條的抖動感覺等，我們特別針對這幾種缺憾來試著改善。

以下將依序介紹如何進行灰階分層、各分層取點並編號以及取點後如何使用 Catmull-Rom Splines 來畫中心線、針對所畫的中心線將其

轉變為我們想要的筆觸效果以及重複繪畫的呈現。

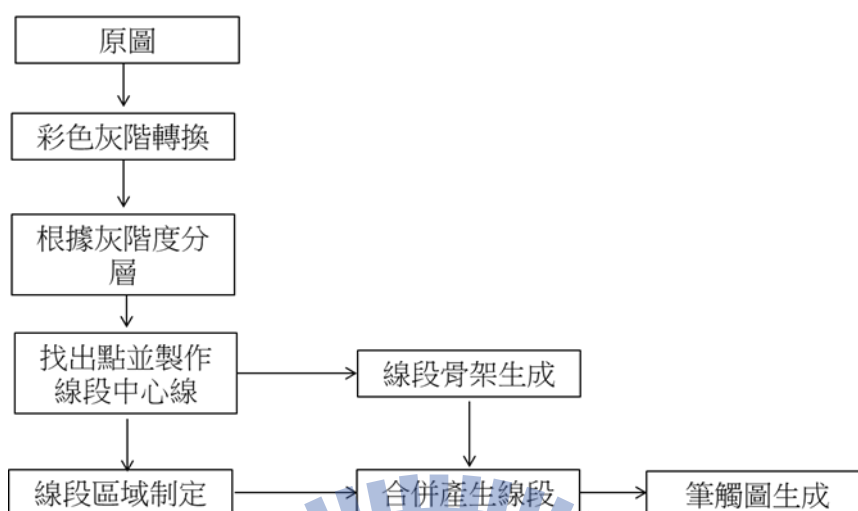


圖 3-1-1：筆觸產生流程圖

3.2 彩色灰階轉換

RGB 轉換成灰階主要有兩種作法，一種是 RGB 轉成 HIS，另外一種則是 RGB 轉 YUV。兩種公式分別如下：

HIS 的 I 值的轉換算式為：

$$I = 1/3 * R + 1/3 * G + 1/3 * B$$

YUV 的 Y 值所採用的轉換算式為：

$$Y = 0.299 * R + 0.587 * G + 0.114 * B$$

兩種方式都有用途，而其差異性在於，YUV 的 Y 反映了人眼對於不同 RGB 組成的亮度有較真實的對映，即用 YUV 的 Y 轉出來的灰階圖比較像人眼感覺得的亮度變化與分布狀況。

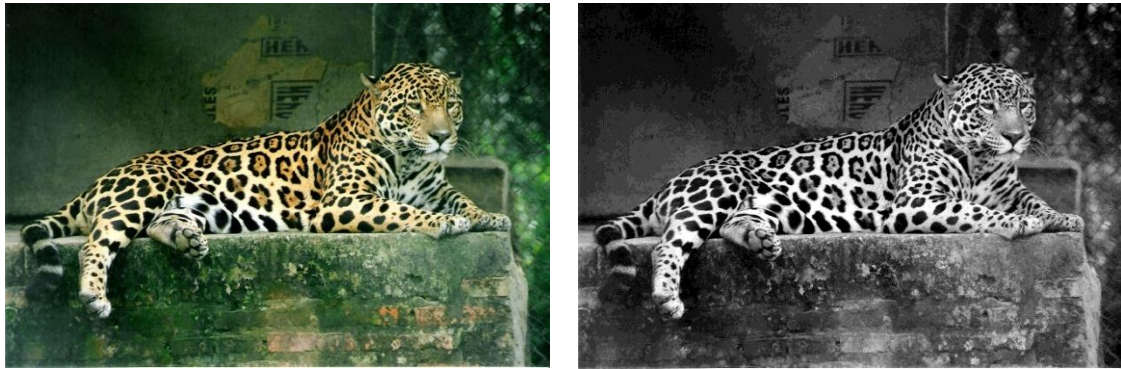


圖 3-2-1 灰階影像轉換，左圖為原圖，右圖為使用 YUV 轉換之灰階影像圖

3.3 灰階度分層及取點

為了讓每一筆的濃淡可以明確的區分，並且多樣化，我們將每張影像灰階度分十層，其分配如圖 3-3-2 所示。K0 為灰階值最淺的地方，這層我們不加以標記，設定為留白。K1 到 K9 依序由淺到深，其中 K1~K8 為平均分配，K9 因為較為極端，一般影像灰階並不會集中在這個地方變化，因此給予較大的分層區間。



圖 3-3-1 灰階影像分十層後之結果圖

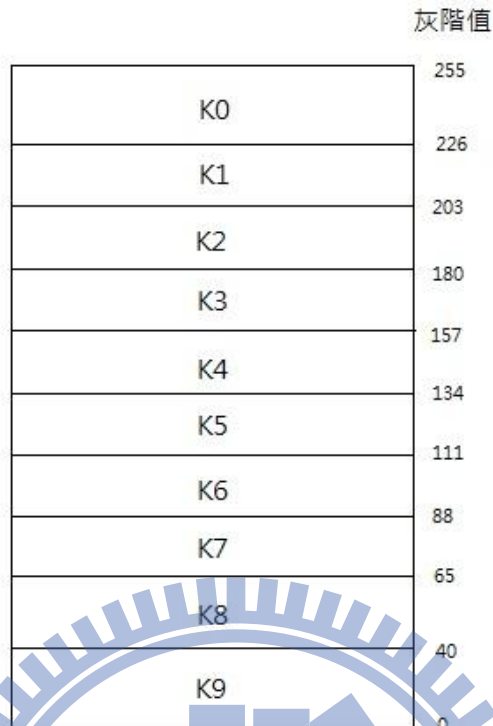


圖 3-3-2 分層示意圖

針對分配好的階層，本論文將各階層分別取點，這些點會在稍後作為繪圖的基準。取點的方式為：首先將整張圖切割成 10X10 像素的區域，對每一個區域的點讀取其灰階值，當某灰階值個數超過該區域的某一個百分比後(本論文設定為 25%)，則就該方塊紀錄做一個所屬灰階層的標記。其作法說明如下：假設某 10X10 區域中包含了像素灰階為 A,B,C,D 之組合，經過計算後，則該區分層記錄將產生 A,C,D 的註記，B 分層則因分佈面積過小不予考慮，如圖 3-3-3 所示。各分區之分層註記資料完成後，再根據相鄰之灰階分層記錄來準備取點並加以連成線段。其作法說明如下：假設在 6X6 分區中有灰階分層 A 之分佈如圖 3-3-4 左圖所示。A 分層連線之起點乃掃描該 6X6 分區過程(由

左而右，上而下)中所遇上第一個 A 分層分區之點，連線之下一預設點則為該點左下分區。如果左下分區無 A 分層記錄，則就既定範圍搜尋鄰近具有 A 分層之分區，以決定筆觸下一分區所在(如圖 3-3-5 所示)。

其程序細節如下：

```
for (分層 A~J)
```

```
  for (左到右，上到下掃描)
```

```
    if (該分區具有 A 分層之標記)
```

```
      記錄此分區於陣列 A1，並消除原標記
```

```
      if (此分區左下具有 A 分層之標記)
```

```
        記錄此分區於陣列 A1，並消除標記
```

```
      else if (此分區左方具有 A 分層之標記)
```

```
        記錄此分區於陣列 A1，並消除標記
```



```
      else if (此分區下方兩格具有 A 分層之標記)
```

```
        記錄此分區於陣列 A1，並消除標記
```

```
      else 此筆畫已完成，找下一個 A2 起始點
```

```
    else 找下一點
```

```
  end loop
```

```
end loop
```

此為考量到大部分人手繪時的筆順習慣，找下一點的方式皆為優先找左下方分區，並且針對彎曲度太大或是距離過遠的點忽略；忽略距離過遠的點原因為避免將不同分區誤認為相同一塊。本論文設定為超過 2 倍分割區域就認定並非同一分割區塊，彎曲度可接受範圍為 180 度到 270 度的範圍。

A	A	A	A	A	A	C	C	C	C
A	A	A	A	A	A	C	C	C	C
A	A	A	A	A	C	C	C	C	C
A	A	A	A	C	C	C	C	C	C
A	A	A	A	C	C	C	C	C	C
A	A	A	A	C	C	D	D	D	D
A	A	B	D	D	D	D	D	D	D
B	B	B	D	D	D	D	D	D	D
B	B	B	B	D	D	D	D	D	D
B	B	B	B	D	D	D	D	D	D

圖 3-3-3 分層標記示意圖，此為 10x10，如圖所示 A 有 30 個，B 有 12 個，C 有 28 個，D 有 30 個，其中 ACD 超過 25%，因此 ACD 在這個區域就會被標記起來，B 不到 25%，因此這個區域就不會標記 B。

				A	
			A		
		A			
			A		
A	A				
A	A				

				A1	
			A1		
		A1			
			A		
A2	A3				
A2	A3				

圖 3-3-4 線段分配示意圖，左圖為已標記為超過 25% 的點，右圖為針對這些點會被編排在一起成為同一條線的編號。其中 A1 於偵測時不會將 A2、A3 編排在一起的原因為距離過遠，A1 不將 A 編進去則是因為彎曲角度過大。A 不會納入 A2 與 A3 原因在於距離過遠。

	○(3)	○(1)	●	
		◎	○(2)	
			○(4)	

●: 已被納入點(分層 A)

◎: 連線下一點(左下分區)

○: 候補點之待搜尋分區

(1) (2) (3) (4) 搜尋優先順序

圖 3-3-5 取點後決定線段集合之方式

3.4 使用 Catmull-Rom Splines 畫曲線

影像灰階分層取點後之連結，如果單純的使用將兩相近點連結在一起的方法會顯得相當死板，產生較為嚴重的鋸齒狀之現象。就算將兩點間的距離縮短，依然會發現明顯的轉折點。因此，本論文參考文獻[4]利用 Catmull-Rom Splines 來改善這個問題。

Catmull-Rom Spline 基本上乃利用給定之 4 點所定義的一元三次參數曲線。該曲線將給定 4 點中的第二點作為起點(參數值為 0)，4 點中的第三點則為終點(參數值為 1)，如圖 3-4-1 所示。

Catmull-Rom Splines 公式：

$$C(x(t), y(t)) = 0.5 \begin{bmatrix} 1 & t & t^2 & t^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 2 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & -5 & 4 & -1 \\ -1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i & y_i \\ x_{i+1} & y_{i+1} \\ x_{i+2} & y_{i+2} \\ x_{i+3} & y_{i+3} \end{bmatrix}$$

$$C(x(t), y(t)) = 0.5 \begin{bmatrix} 1 & t & t^2 & t^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 2 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & -5 & 4 & -1 \\ -1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_i \\ P_{i+1} \\ P_{i+2} \\ P_{i+3} \end{bmatrix}$$

其中 t 為決定 P_{i+1}, P_{i+2} 中間各點之參數值，若是輸入 0 則為 P_{i+1} ，輸入 1 則為 P_{i+2} ，輸入 0 與 1 之間的值，就可以算出分布在 P_{i+1} 與 P_{i+2} 之間各點的對應座標。從這個式子可以發現， $C(x(t), y(t))$ 點不只受到 P_{i+1}

以及 P_{i+2} 影響，同時也受到 P_i 以及 P_{i+3} 的影響，因此這個方法所計算出來的位置，也會較為平滑、不突兀。 P_i 則需要另外加入 P_{i-1} ，由 P_{i-1} 、 P_i 、 P_{i+1} 、 P_{i+2} 決定，同理， P_{i+3} 也需要 P_{i+4} 參與。以本論文為例，將10個點座標當輸入(P_1 到 P_{10})，經過 Catmull-Rom Splines 運算過後，會在中間產生7個額外的點座標，介於 P_2 到 P_9 相鄰兩點之間，使其曲線較為平滑。由於此種方法只能計算給定4點的中間兩點間的位置，無法針對最前面與最後面的點處理，因此在線段的開頭與結尾的部分，會略顯呆版一些。

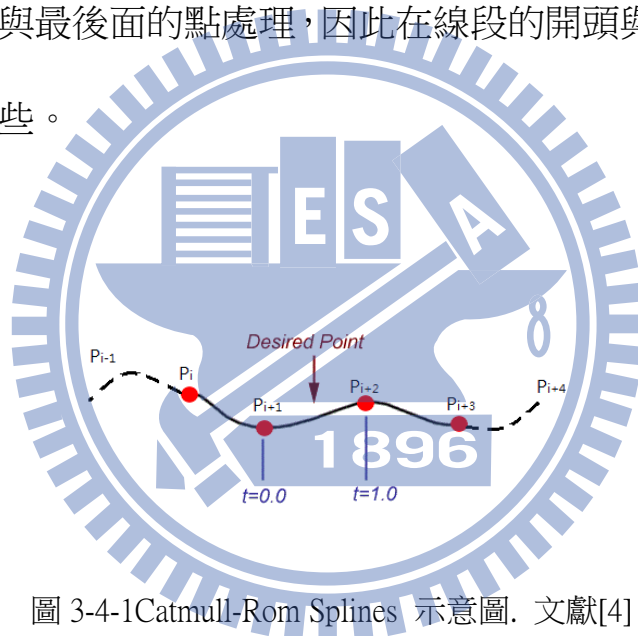


圖 3-4-1 Catmull-Rom Splines 示意圖. 文獻[4]

3.5 筆觸線段骨架與壓力線之產生

上一節所標記出的中心線是我們控制筆觸的軌跡走向，這就表示筆是沿著這條線繪圖。但是筆跟紙的接觸並非點對點，而是面對面，所以會有施力不均的現象。再考慮到紙的不平滑以及鉛筆是由石墨

粉組成，因此，整個線條通常會呈現出不連續的感覺。同時再加上人類並非機械，一筆畫之中施力點也不會固定，所以需要強調的地方也會不一樣。圖 3-5-1 為線段骨架圖，其中控制點(control points)就是輸入的點，筆觸中心點(stroke center points) 為我們使用 Catmull-Rom splines 的方法產生的點。由這些點構成的筆觸中心線，稱為筆觸軌跡(stroke path)。筆觸沿線下筆的壓力線，可由一系列之各筆觸軌跡截面(cross section)最大壓力點(maximum pressure points)構成。最大壓力點產生的詳細步驟為在筆觸軌跡截面上決定最大壓力點的位置，此點在筆觸軌跡截面上的位置會由前一截面的最大壓力點的位置以及介於 1 到-1 間的亂數決定。將這些點連接起來就成為最大壓力線(maximum pressure line)。

本論文決定最大壓力點之方程式如下：

$$p_1 = 0.7 \times p_0 + 0.3 \times R$$

p_1 ：新的壓力點

p_0 ：上一個壓力點

R：-1~1 之間的亂數

筆觸軌跡為繪圖筆劃線段行進的路徑，手繪時就根據這個方向前進。當筆沿著筆觸軌跡前進時，筆觸軌跡截面上各點壓力大小隨其距離截面最大壓力點之遠近而異，如圖 3-5-2 所示。由圖可看出距離最

大壓力點越遠的點，其壓力會較小，因此其所展現出來的石墨附著的疏密度也會不相同，如圖 3-5-3 所示。我們可以發現越接近最大壓力線的石墨附著點會較為密集，同時石墨附著在紙上的量也會較多，因此顏色會顯得比較深。關於此現象，3-6 會有較詳細的說明。

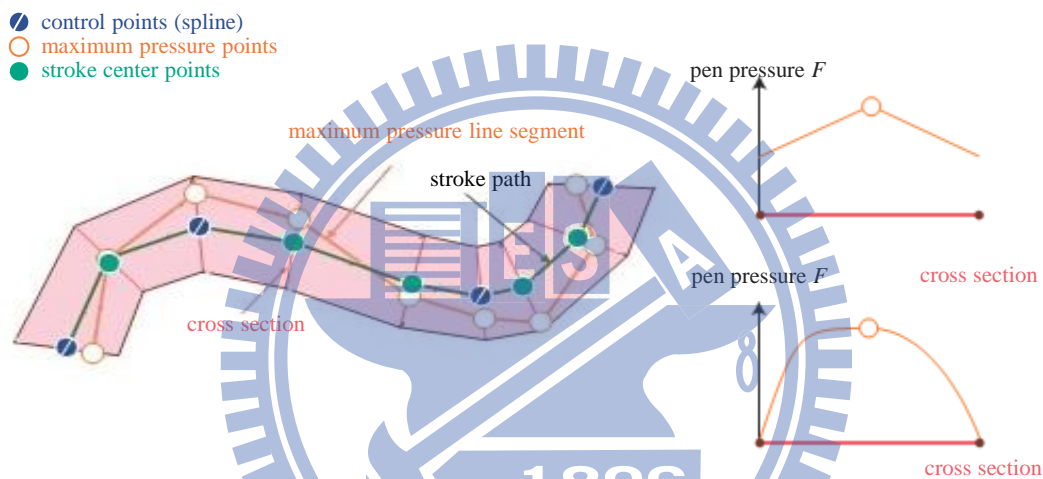


圖 3-5-1 線段骨架示意圖. 文獻[4]

圖 3-5-2 筆觸壓力與距壓力點之距離的關係圖. 文獻[4]

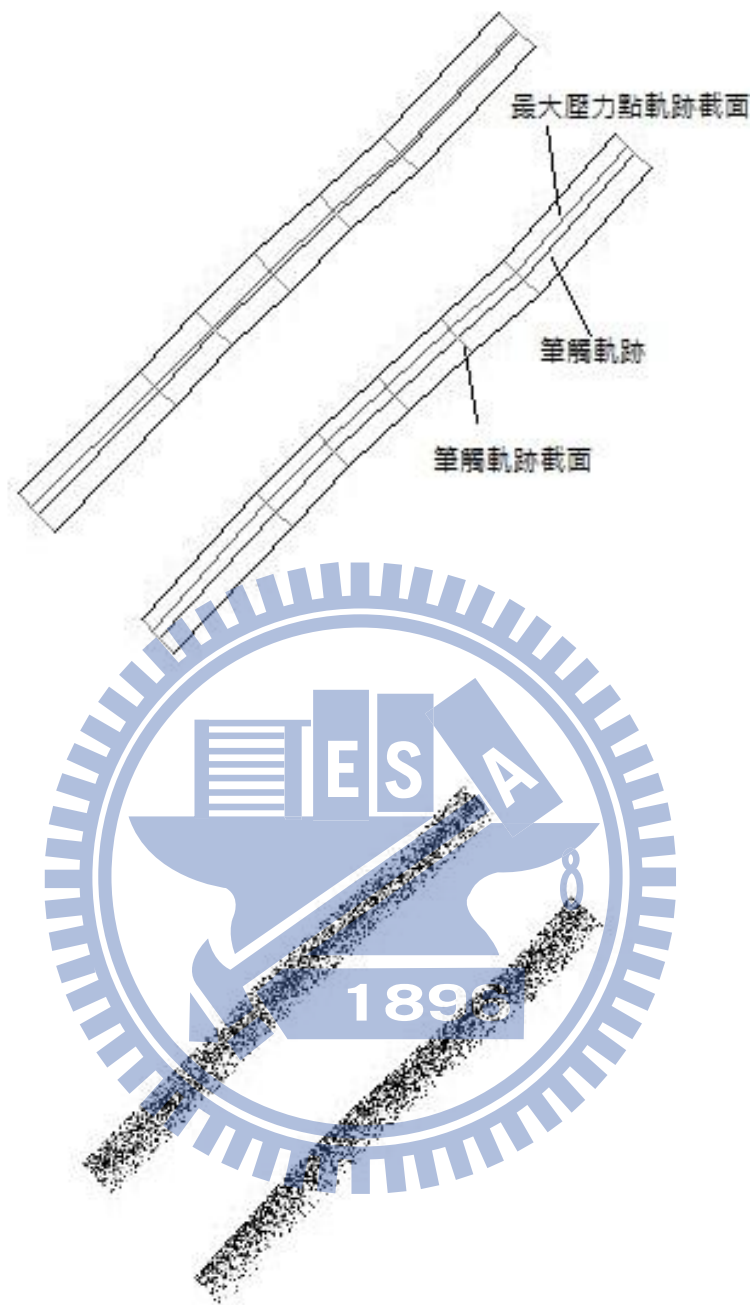


圖 3-5-3 本論文實驗所得壓力線分布與
線條呈現結果

3.6 表現重複繪畫以及不精確性

我們平常看到的黑色鉛筆線條，為石磨粉附著在紙上時所呈現出來的樣子。因此，用力的多寡、筆的性質或是紙的材質，都會影響石墨顆粒附著的多寡進而表現出不同的深淺（圖 3-6-1）。當紙上已經附著了石磨粉，重複覆蓋就不會是單純的 $1+1=2$ 。這是因為能附著在上面的容量有限，而且又是第二次繪畫，所以就產生了邊際效應，石墨因此變得較難附著。為了表現這種現象，我們利用此計算式子加以模擬(文獻[4])：



P：最後附著在紙上的石墨濃度

P_m：能附著在紙上石墨最大值，根據灰階度不同有不同最大值

P_n：這次繪畫原本應該有的附著石墨量，根據灰階度不同有不同初值

P_s：原本附著在上面的石墨量

而人們在素描時，不管是直線或是曲線，除非是使用工具，都會有些微的偏差，無法達到和機械一樣的工整。為了把這個現象表達出來，針對已經抓取的點，本論文在將其表現出來時也將其以亂數做小幅度的座標變動，如此一來，線與線之間的距離就不會完全平行，線條本身也不會很死板的使用相同角度，達到模擬人從事素描時的效果（圖

3-6-2)。

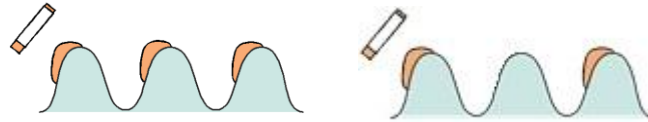


圖 3-6-1 附著示意圖，左圖為用力較大時的情況，右圖為用力較小可能發生的情況，石墨顆粒較不容易附著。

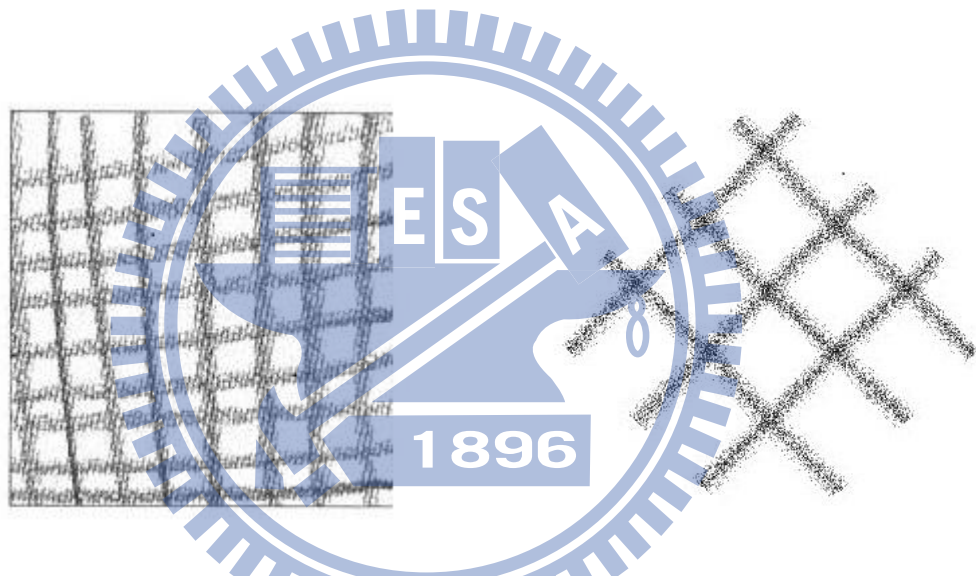


圖 3-6-2 左圖為素描教本實際素描圖. 文獻 [7]，右圖為本論文實驗模擬出來的效果

第四章 實驗結果

我們已經將第三章所述流程以 C++ 在 Windows 平台上實做出來，本章節以兩種圖為例，配以不同的參數，來討論各式各樣筆觸的效果。主要為三種不同的情況：碳粉濃度(各種不同的筆，其碳粉掉落度不一)、兩筆之間下筆的間隔以及筆的寬度。

由於手繪圖濃淡度無法呈現規律性(圖 4-1)，因此為了能較精確表達程式執行結果，改以電腦生成規律圖像為輸入圖(圖 4-3)。



圖 4-1 素描教本實際素描圖.文獻[7]手繪不同濃淡圖

圖 4-2 手繪不同濃淡圖之程式執行結果

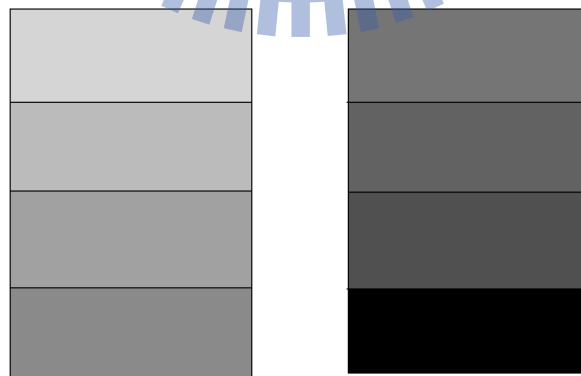


圖 4-3 電腦產生規律性不同灰階度圖

為了能有手繪的感覺，本論文在筆畫間隔與方向，筆觸軌跡與起

訖點位置之模擬添加了許多亂數的擾動處理，用來表現人類與機械不同的地方。以下的結果更是特別呈現了幾種明顯的區別：每條線之間の間隔會不一樣、線條不會有完美的直線或是曲線，會有一點點地抖動、下筆的力度雖然會盡力保持一定，但是每筆還是有所不同以及每筆的筆劃於一開始繪畫時，很難保持相同高度等等的效果。

我們以圖 4-4 來觀察，可以輕易發現右上角那個區塊於起點時有很明顯地不等高，但是也沒有那種刻意的感覺。也可以感覺出，因為每條線の間隔多少有些不同，因此有些地方會較深，有些地方會有明顯一條白色的空隙。而圖 4-6 可以明顯的看出線條與線條間，如果有重複的話，其顏色會較深。同時，這裡也有表現到如果重複繪畫，旁邊或多或少會有一些留白。

再從筆與筆間隔較大且筆觸較窄的圖 4-7 觀察，可以發現線條並非單純的直線，每條線都多少有些不同，有時偏左點，有時偏右，也有的是偏左或右之後又稍微回來一些。同時此圖由於線條與線條之間影響較小，我們也可以輕易地觀察到每條線的深淺有些不同，就算是相同的灰階度相同的寬度設定，不單是線條與線條不同，同一條直線也會有忽然寬一點，忽然窄一點的感覺。

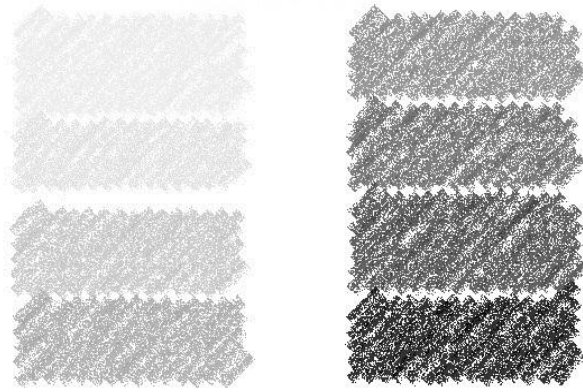


圖 4-4 石墨顆粒附著量小、線條間隔小、鉛筆寬度窄



圖 4-5 石墨顆粒附著量小、線條間隔小、鉛筆寬度中等

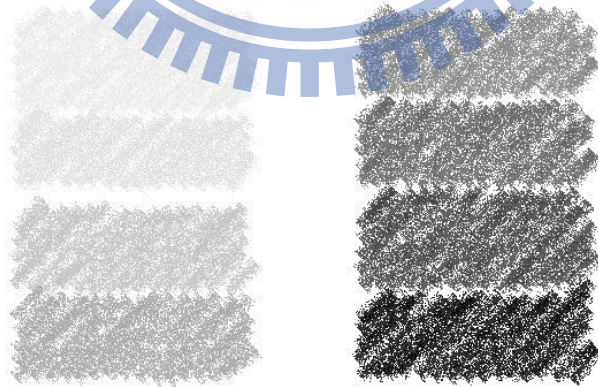


圖 4-6 石墨顆粒附著量小、線條間隔小、鉛筆寬度寬

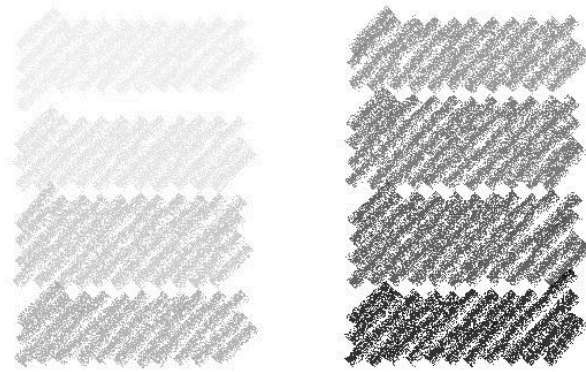


圖 4-7 石墨顆粒附著量小、線條間隔中等、鉛筆寬度窄

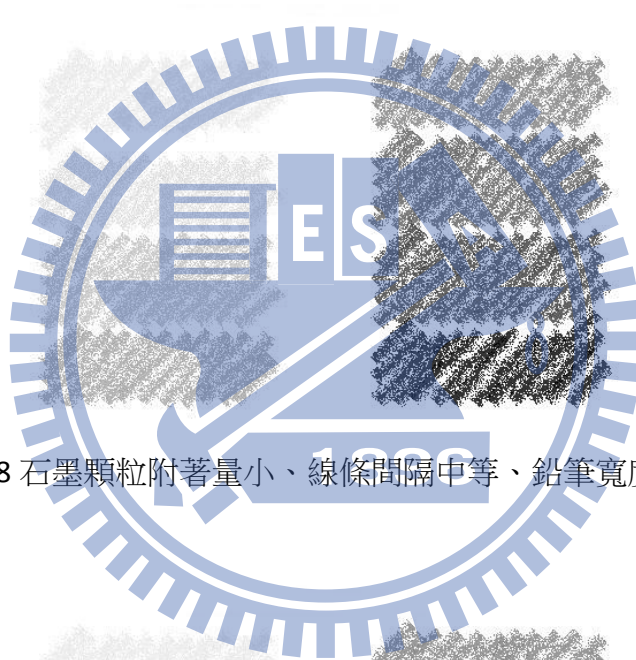


圖 4-8 石墨顆粒附著量小、線條間隔中等、鉛筆寬度中等

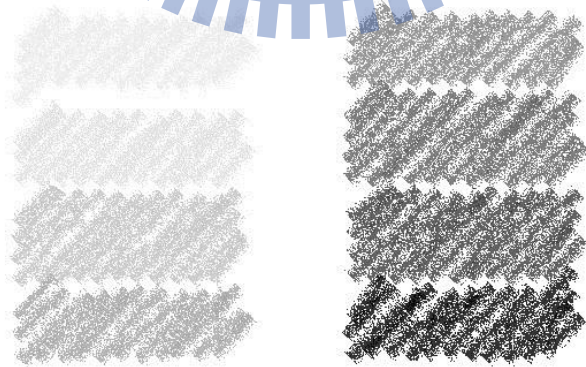


圖 4-9 石墨顆粒附著量小、線條間隔中等、鉛筆寬度寬

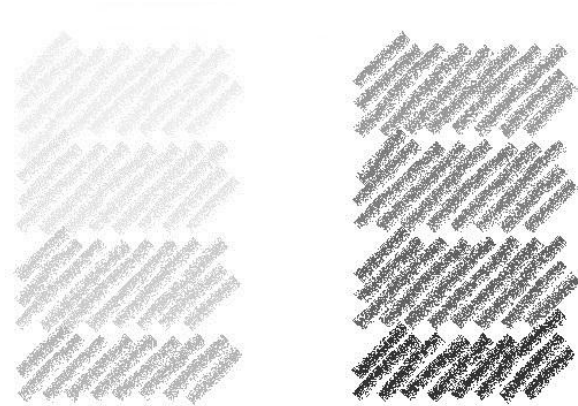


圖 4-10 石墨顆粒附著量小、線條間隔大、鉛筆寬度窄



圖 4-11 石墨顆粒附著量小、線條間隔大、鉛筆寬度中等

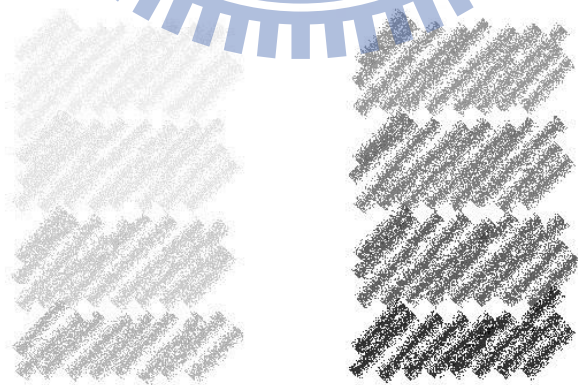


圖 4-12 石墨顆粒附著量小、線條間隔大、鉛筆寬度寬

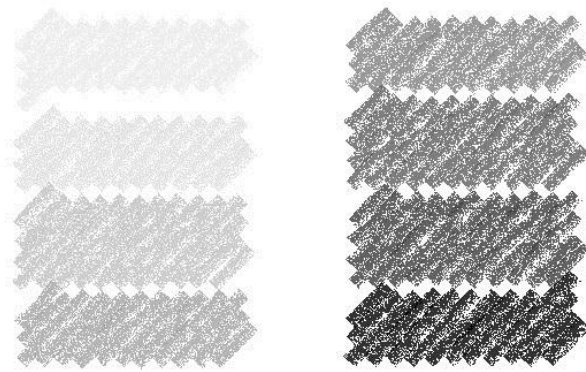


圖 4-13 石墨顆粒附著量中等、線條間隔小、鉛筆寬度窄



圖 4-14 石墨顆粒附著量中等、線條間隔小、鉛筆寬度中等

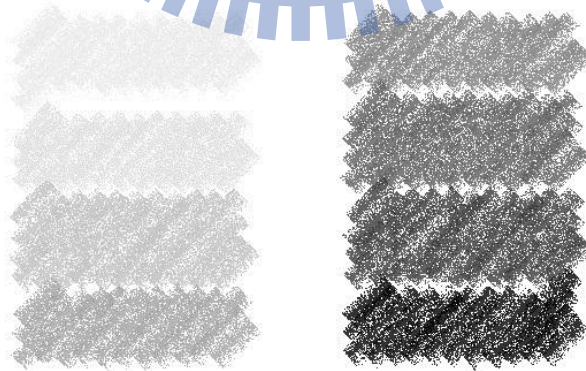


圖 4-15 石墨顆粒附著量中等、線條間隔小、鉛筆寬度寬

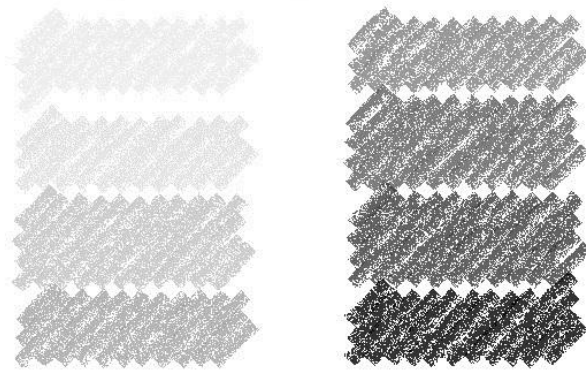


圖 4-16 石墨顆粒附著量中等、線條間隔中等、鉛筆寬度窄



圖 4-17 石墨顆粒附著量中等、線條間隔中等、鉛筆寬度中等

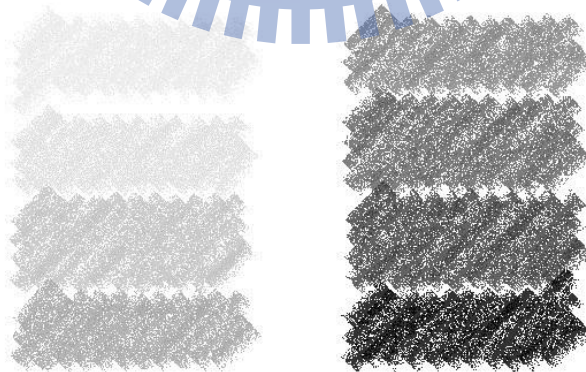


圖 4-18 石墨顆粒附著量中等、線條間隔中等、鉛筆寬度寬

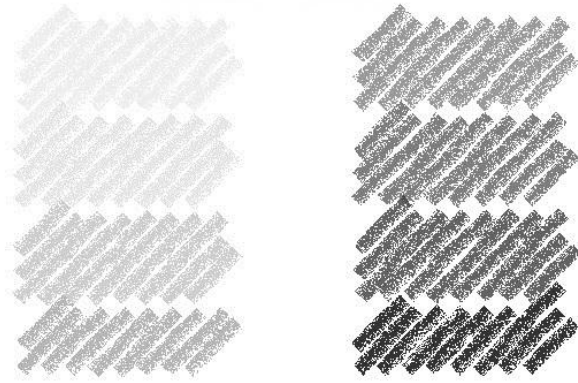


圖 4-19 石墨顆粒附著量中等、線條間隔大、鉛筆寬度小



圖 4-20 石墨顆粒附著量中等、線條間隔大、鉛筆寬度中等

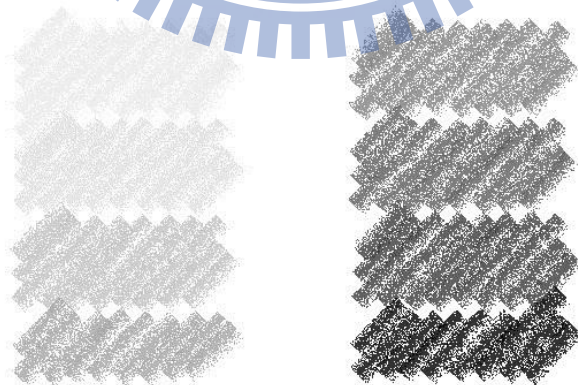


圖 4-21 石墨顆粒附著量中等、線條間隔大、鉛筆寬度寬

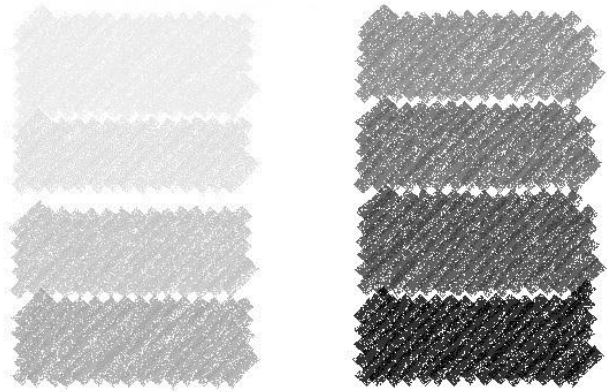


圖 4-22 石墨顆粒附著量高、線條間隔小、鉛筆寬度小



圖 4-23 石墨顆粒附著量高、線條間隔小、鉛筆寬度中等

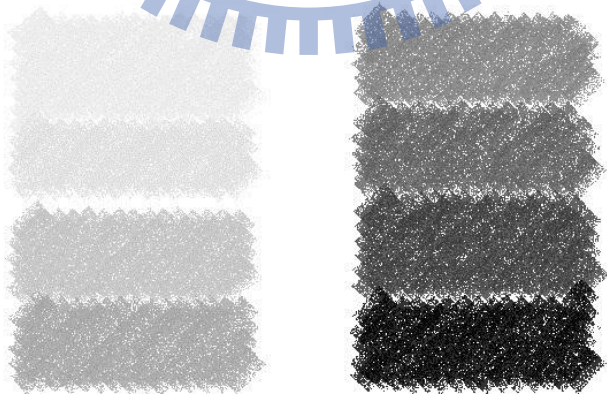


圖 4-24 石墨顆粒附著量高、線條間隔小、鉛筆寬度大

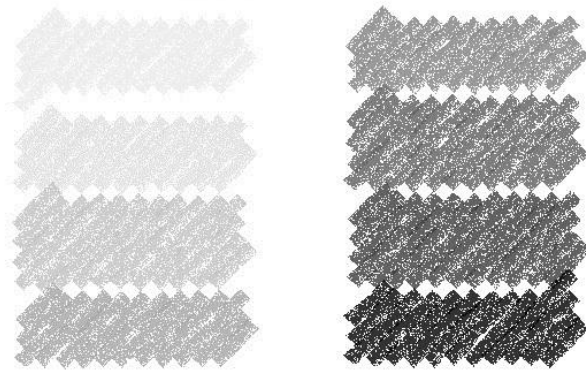


圖 4-25 石墨顆粒附著量高、線條間隔中等、鉛筆寬度小



圖 4-26 石墨顆粒附著量高、線條間隔中等、鉛筆寬度中等

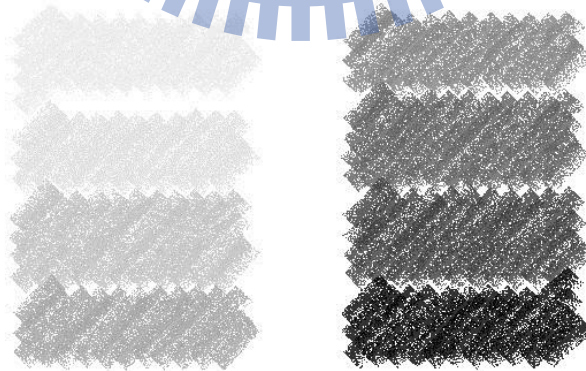


圖 4-27 石墨顆粒附著量高、線條間隔中等、鉛筆寬度寬

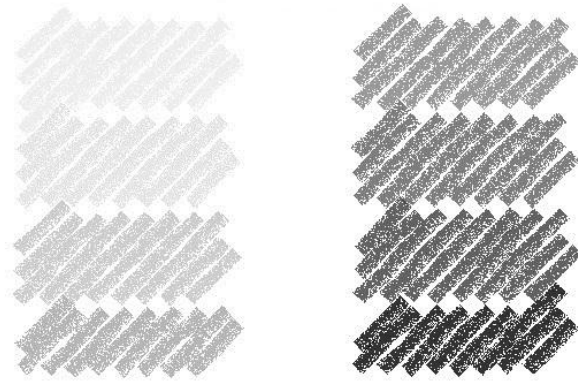


圖 4-28 石墨顆粒附著量高、線條間隔大、鉛筆寬度小



圖 4-29 石墨顆粒附著量高、線條間隔大、鉛筆寬度中等

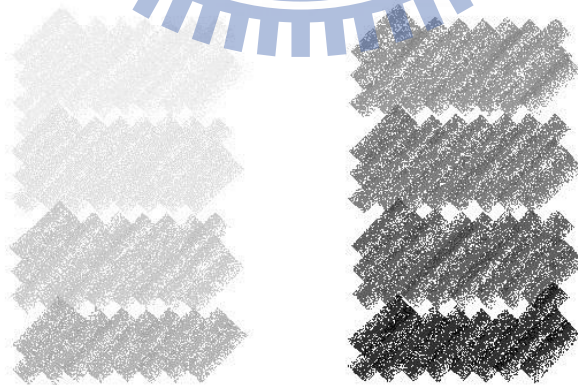


圖 4-30 石墨顆粒附著量高、線條間隔大、鉛筆寬度寬

為了表現寬筆觸單獨作用時的效果，我們特別使用了下面這些圖來實驗。分別建立在灰階度不同時，顆粒附著度較高、濃度較淡以及介於兩者之間的情況來展現。同時也觀察當筆觸濃淡度不同時，兩兩交錯會有甚麼樣的效果。

首先，圖 4-31 在交錯的地方，我們能夠很輕易地發現那邊的顏色特別深，並且這張圖由於線條與線條之間間隔相對大很多，也可以發現有些線可以畫得較直，有些線卻相對歪斜較多。同時可以觀察到相較於以往制式的函數轉換，此方法較能表達出手繪的感覺。而圖 4-33 在顆粒濃度較淡時（以手繪的感覺來說，就是拿一樣的筆，可是用的力氣相對較小，就會出現顆粒較難附著的現象。），其可見寬度要比圖 4-31 稍微狹小一些。

圖 4-37 表現了不同灰階度的線條如果作用在一起的現象。其交錯的部分，如果是灰階度相近時，顏色會明顯加深。但是如果灰階度差別過大時，淺淡筆劃影響深濃筆劃有限，交錯的地方跟比較深濃筆劃經過時的感覺差不多。

顏色較深時，三種顆粒附著度不同的線條表現：

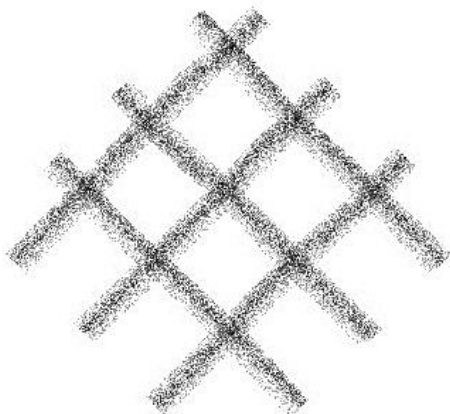


圖 4-31 石墨顆粒附著度高



圖 4-32 石墨顆粒附著度中等

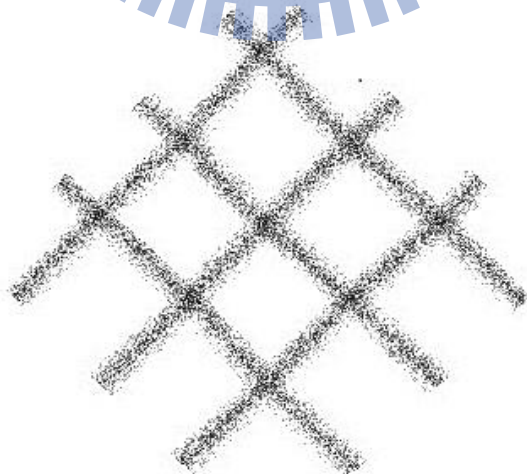


圖 4-33 石墨顆粒附著度少

顏色較淡時，三種顆粒附著度不同的線條表現：

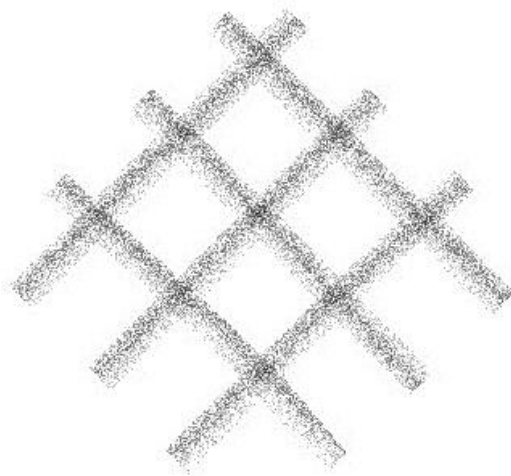


圖 4-34 石墨顆粒附著度高



圖 4-35 石墨顆粒附著度中等

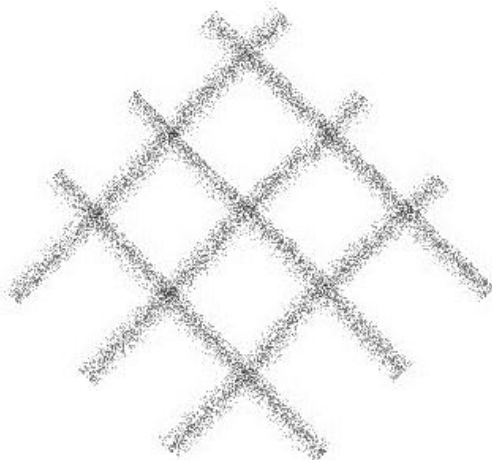


圖 4-36 石墨顆粒附著度少

灰階度不同時，六種線條濃淡度不同線條重疊之表現：

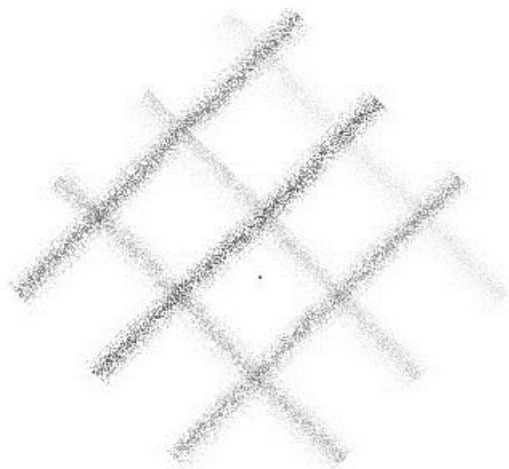


圖 4-37 石墨顆粒附著度少



圖 4-38 石墨顆粒附著度中等

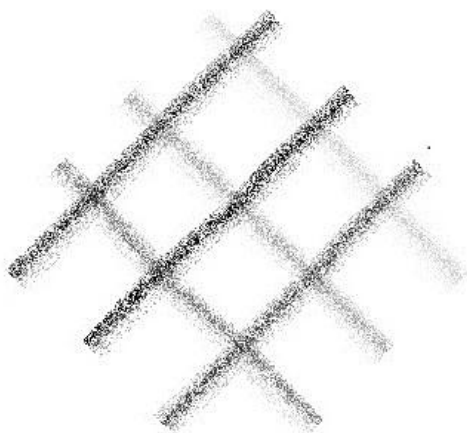


圖 4-39 石墨顆粒附著度高

第五章 結論

本篇論文從手繪素描的角度切入，基本上不以向量、模糊化等方式來模擬筆觸。而是從手繪素描真實筆觸相同現象加以思考，佐以鉛筆自然附著、紙張凹凸不定等條件來探討寬筆觸的表現方式，並以數種不同的參數變化來查看不同條件下產生的筆觸。

本論文的方法還有許多可以繼續改進或應用實驗的部分，例如：

- (1).尚未加入紙質效果，因此列印出來的情況與顯示在螢幕上的情況有所不同，同時列印時，顏色較淡會較不清楚。
- (2).可以結合文獻[3]，將 LIC 改為本論文產生之筆觸，可以模擬出以寬筆觸素描之效果。
- (3).對於顏色較深之部分，可以改以用顏色較淺之方式重複繪畫，如此可以模擬以 HB 鉛筆來描繪整張圖的情況。

參考文獻

- [1]. Brian Cabral and Leith (Casey) Leedon. “Imaging vector fields using line integral convolution” . Proc. of SIGGRAPH '93 (Anaheim, California, August 1-6, 1993). In Computer Graphics 27, Annual Conference Series, 1993, ACM SIGGRAPH, pp. 263-272
- [2]. Shigefumi, Y., Xiaoyang, M., Kenji, T., and Atsumi, I.(2004b).
“Enhanced LIC Pencil Filter” . Proceedings of International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization, 251-256.
- [3]. 李方碩、林正中, ” 繪圖筆觸控制因素之研究” , 碩士論文, 2007.
- [4]. K. Murakami, R. Tsuruno and E. Genda, "Multiple illuminated paper textures for drawing strokes," in Proc. of Computer Graphics International 05, pp. 156-161, 2005.
- [5]. Kyoko Murakami and Reiji Tsuruno, “Pastel-like rendering considering the properties of pigments and support medium,” ACM SIGGRAPH conference abstracts and applications, pp.227, 2002.
- [6]. H. Winnemoller, S.C. Olsen, and B. Gooch, "Real-time Video Abstraction," ACM Siggraph, ACM Press, 2006, pp. 1221 – 1226.
- [7]. 李銘龍, ”鉛筆技法解析”, 藝風堂.