

國立交通大學

資訊科學與工程研究所

碩士論文

鉛筆素描草圖筆觸之模擬



Simulation of shape drafting in Pencil-Sketch

研究生：潘中皓

指導教授：林正中 博士

中華民國九十八年九月

鉛筆素描草圖筆觸之模擬

Simulation of Shape Drafting in Pencil-Sketch

研究生：潘中皓

Student : Chung-Hao Pan

指導教授：林正中

Advisor : Cheng-Chung Lin

國立交通大學  
資訊科學與工程研究所  
碩士論文



A Thesis  
Submitted to Institute of Computer Science and Engineering  
College of Computer Science  
National Chiao Tung University  
in partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of  
Master  
in

Computer Science

September 2009

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十八年九月

# 鉛筆素描草圖筆觸之模擬

學生：潘中皓

指導教授：林正中 副教授

國立交通大學資訊與科學工程研究所碩士班

## 摘要

本篇論文提出一套將影像自動轉換成鉛筆素描草圖的流程，我們的方法主要是將影像分為輪廓與斜線筆觸兩大部分處理，輪廓部分乃利用 FDoG 方法處理 ETF 影像向量流圖，擷取而得；再配合相對應之切線與曲率半徑資料來控制筆觸方向、長度、寬度及濃度，產生自然且富有變化性之鉛筆輪廓草圖素描。斜線筆觸則補強了素描另一層面之呈現。

此論文提出的方法以符合實際人工作畫流程的角度切入，增加了手繪的自然性而不需互動式人為的介入。

# Simulation of Shape Drafting in Pencil-Sketch

Student : Chung-Hao Pan

Advisor : Cheng-Chung Lin

Institute of Computer Science and Engineering

National Chiao Tung University

## ABSTRACT

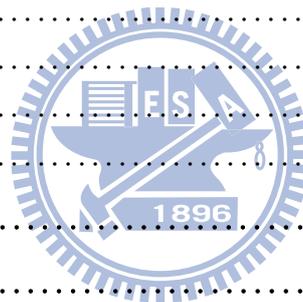
In this thesis, an automated process for simulating shape drafting in pencil-sketch is presented. In the system Silhouette process and hatching process comprised the core of the automation.

The silhouettes are extracted by FDoG operation on ETF map, along which such geometric information as tangents and radius of curvatures are exploited for presenting shape drafting strokes that gives hand-sketched looking. The hatching process enriches the sketch in the aspects other than silhouette handling.

The study presented in the thesis incorporates in the design the considerations on silhouette drawing as would be handled in general sketching practice by hand, and thus bring about remarkably more human-taste to be seen in the outcomes.

# 目錄

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
目錄.....	III
圖目錄.....	IV
第一章 簡介.....	1
第二章 相關研究.....	3
第三章 處理方法.....	10
3.1 系統架構.....	10
3.2 影像向量圖之精化：ETF.....	12
3.3 邊緣偵測.....	12
3.4 輪廓擷取.....	13
3.5 輪廓草圖筆觸產生.....	19
3.6 斜線筆觸.....	16
3.7 合成.....	25
第四章 實驗結果.....	26
第五章 結論.....	43
參考文獻.....	44



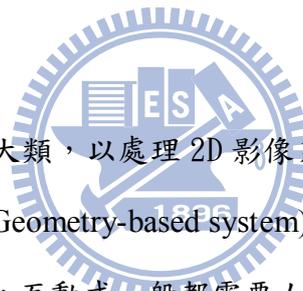
# 圖目錄

圖 2-1 (左)影像原圖.(右)影像向量圖. 文獻[26]	3
圖 2-2 從 $(x, y)$ 畫出正反向的 DDA 直線. 文獻[26]	4
圖 2-3 從 $(x, y)$ 往正反向計算出的 LIC 曲線. 文獻[26]	4
圖 2-4 ETF 的迭代	5
圖 2-5 FDOG:與其他邊緣偵測方法的比較	7
圖 2-6 FDOG 濾波	7
圖 2-7 FDOG 對雜訊的過濾	8
圖 2-8 FDOG 濾波	9
圖 3-1 系統流程圖	11
圖 3-2 EDGE TANGENT FLOW	12
圖 3-3 FDOG 參數比較	13
圖 3-4 線段擷取示意圖	14
圖 3-5 曲率示意圖	17
圖 3-6 FDOG 的分解	18
圖 3-7 輪廓草圖筆觸	21
圖 3-8 特徵筆觸加強	22
圖 3-9 (A)ETF. (B)FILTERED-ETF. (C)GRADIENT MAP. (D)FILTERED-GRADIENT MAP	23
圖 3-10 斜筆筆觸	24
圖 3-11 合成	25
圖 4-1 KELLY	26
圖 4-2 LENA	27
圖 4-3 馬	28
圖 4-4 國父	29
圖 4-5 超人	30
圖 4-6 CAMERON DIAZ	31
圖 4-7 SAM WORTHINGTON	32
圖 4-8 鳥	33
圖 4-9 樓房	34
圖 4-10 樓房與酒杯	35
圖 4-11 鄉村圖	36
圖 4-12 服裝走秀_1	37
圖 4-13 服裝走秀_2	38
圖 4-14 跑車_1	39
圖 4-15 跑車_2	40
圖 4-16 跑車_3	41



# 第一章 簡介

現今電腦科技的快速發展與進步，許多影像處理軟體能讓使用者非常容易的快速且方便對影像做操作，如 Photoshop、PhotoImpact 等，在「擬真顯像」(Photorealistic Rendering, PR) 中，運用電腦繪圖的技術以求影像品質近似真實影像為目標，鉅細靡遺的記錄整體狀況之影像技術，例如：應用於紀錄昆蟲外觀。相對於擬真顯像，「非擬真顯像」(Non-Photorealistic Rendering, NPR) 除考慮影像品質外，更要求特定目標的特徵呈現與突顯並忽略較細節部分。以藝術作品為例，非擬真顯像技術能讓原始相片影像產生像是根據不同素材、方法及風格而畫出的素描畫、油畫或水彩畫等具有豐富藝術感的作品。

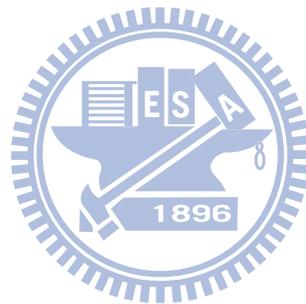


在 NPR 領域中可分成兩大類，以處理 2D 影像系統(Image-based system)為主的顯像方式，及以處理 3D 模型(Geometry-based system)為主的顯像方式。而操作方面，則分為互動式及全自動化兩種，互動式一般都需要人工介入調整參數，比如說筆觸的方向、位置，線條的粗細、明暗等等。而全自動化則是從影像輸入到結果呈現都不需使用者介入，例如影像處理軟體 Adobe Photoshop 的濾鏡功能。

在這篇論文中，提出一套自動將相片轉換成鉛筆素描草圖的流程，方法是以影像向量域(Image Vector Field)為骨幹，對向量資料加以分析與強化，並將影像分成輪廓(silhouette)以及斜線筆觸(hatching)兩大部分處理，以產生方向更平滑(smooth)且具特徵(salience)鉛筆素描草圖。

本論文的程式系統設計能夠讓使用者輸入圖片影像後產生鉛筆素描草圖，無需使用者額外輸入各種參數，透過多次實驗使自動產出的結果能讓使用者接受。第二章介

紹相關研究。第三章說明本論文系統架構與流程。第四章為實驗結果與說明。第五章為本篇論文的總結及未來研究方向。



## 第二章 相關研究

目前已有許多根據影像為基礎(image-based)的 NPR 技術可以產生許多具有藝術風格的圖像，包括油畫和水彩(painting)[1][2][3][4][5]、鋼筆畫(pen-and-ink illustration ) [6][7][8]、點畫(stipple drawing)[9][10]、馬賽克畫(mosaics)[11]、版畫(engraving)[12]、立體畫(cubist rendering)[13][14]以及鉛筆素描(pencil sketch)[15~27]。

在鉛筆素描領域，主要皆以影像向量域為基礎，Cabral 和 Leedom[27]提出以 LIC (line integral convolution) 和 DDA (digital differential analyzer convolution) 兩種方法，如圖 2-2 及圖 2-3 所示，以決定筆觸之方向，而 Mao[17] 等人利用 LIC 及 DDA 加上雜訊圖自動化產生類似鉛筆的筆觸，Yamamoto[20] 等人則加上色階強度的分層(layer subdivision)，強化用 LIC 來產生鉛筆筆觸的方法，再用 difference-of-Gaussian (DoG) filter 作邊緣偵測(edge detection)產生出輪廓，合成出鉛筆素描，文獻[22][24][25][26][27]則在向量域、雜訊圖以及分層上做強化，讓鉛筆筆觸及方向更符合手繪。Mignotte[19]使用模板(template)來產生出鉛筆輪廓的素描而 Semet[21] 等人則利用與互動式(interactive)從人工輸入參數產生高人為因子的鉛筆素描。

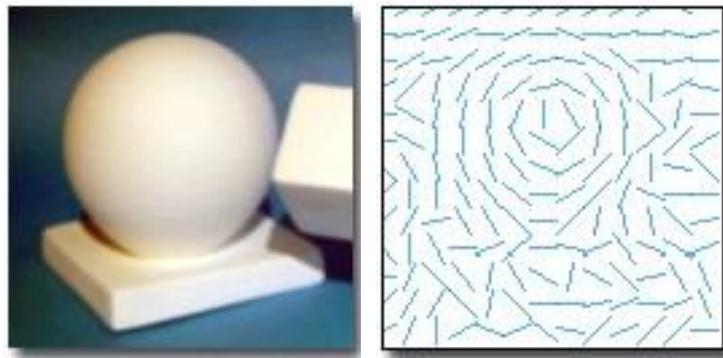


圖 2-1. (左)影像原圖.(右)影像向量圖. 文獻[26]

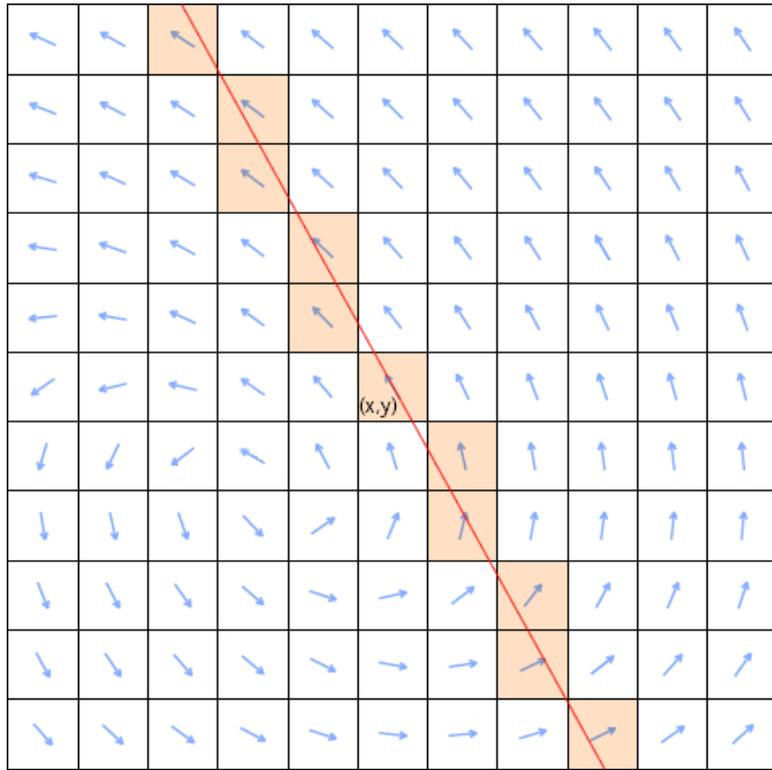


圖 2-2. 從  $(x, y)$  畫出正反向的 DDA 直線. 文獻[26]

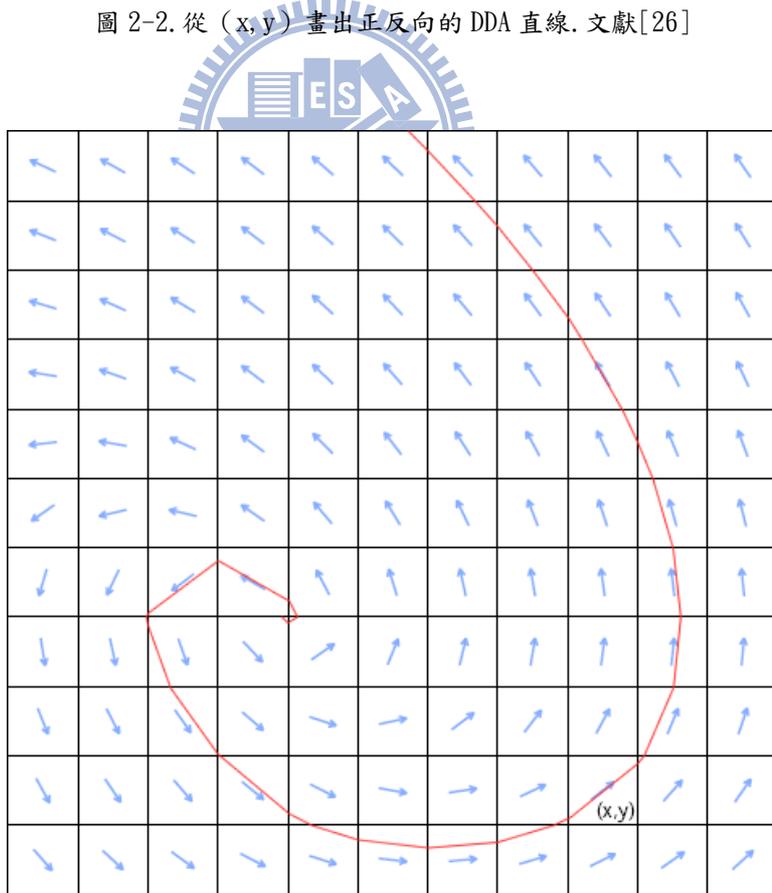


圖 2-3. 從  $(x, y)$  往正反向計算出的 LIC 曲線. 文獻[26]

在影像向量域中，Kang[29][30]等人提出 ETF(edge tangent flow)之處理技術，ETF 是從梯度向量精化而來，不但比原本向量圖更平滑，而且對於一些特徵性高的向量也會予以保留，ETF 也可迭代，隨著次數的增加，會有更好的效果，如圖 2-4 所示。

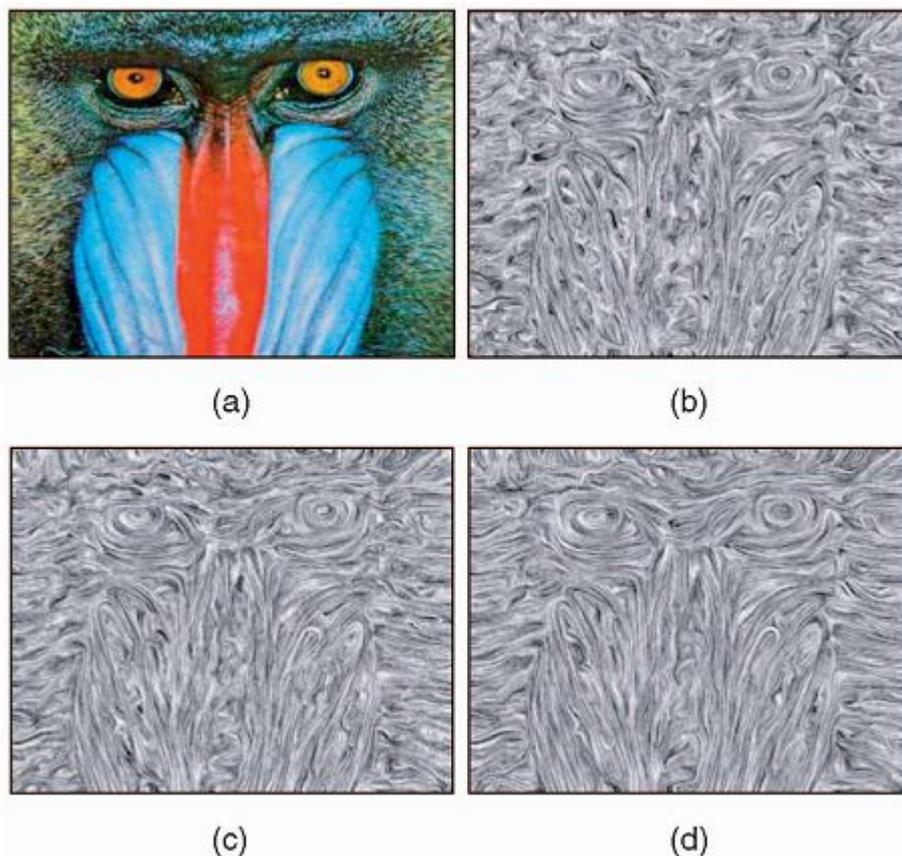


圖 2-4. ETF 的迭代(a)輸入圖.(b)第一次 ETF.(c)第二次 ETF.(d)第三次 ETF. 文獻[30]

設  $g_0(x)$  為經由 Sobel 運算所得灰階影像  $I_{XY}(P)$  之正規化梯度向量圖；將  $g_0(x)$  中各向量統一以逆時鐘方向旋轉  $90^\circ$ ，可得一切線向量圖  $t^0(P_0), P_0 \in X \times Y$ ，此即為初始切線向量圖。

ETF 切線向量圖之精化定義如下(文獻[30])：

$$t^{n+1}(P_0) = \frac{1}{k} \iint_{\Omega_\mu} \phi(P_0, P) t^n(P) w_s(P_0, P) w_m(P_0, P) w_d(P_0, P) dP \quad n = 0, 1, \dots \quad (1)$$

其中

$\Omega_\mu$  表示以  $P_0$  為中心，半徑為  $\mu$  之運算區； $P \in \Omega_\mu$  ( $\|P - P_0\| \leq \mu$ )，

$k$  為正規化參數，

$t^n(P)$  表示第  $n$  階切線向量圖在  $P_0$  點之切線向量(週期為  $2\pi$ )，

$w_s(P_0, P)$  為距離權重函式(spatial weight function)：

$$w_s(P_0, P) = \begin{cases} 1 & \text{if } \|P_0 - P\| < \mu, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2)$$

$w_m(P_0, P)$  為梯度強度權重函式(magnitude weight function)：

$$w_m(P_0, P) = [|\hat{g}(P) - \hat{g}(P_0)| + 1] / 2, \quad (3)$$

$w_d(P_0, P)$  為切線向量平行度權重函式(direction weight function)：

$$w_d(P_0, P) = |t^n(P_0) \cdot t^n(P)|, \quad (4)$$

$\phi(P_0, P)$  為  $t^n(P)$  方向調整式：

$$\phi(P_0, P) = \begin{cases} 1 & \text{if } t^n(P_0) \cdot t^n(P) > 0, \\ -1 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (5)$$

$w_m(\cdot)$  函式之設定著眼於保留落於  $I_{XY}(P)$  中輪廓或邊緣線條附近之切線向量；

$w_d(\cdot)$  函式之設定則著眼於保留 ETF 切線向量圖中，切線平行度較高之區域；

$\phi(\cdot)$  函式則著眼於將  $\Omega_\mu$  中與  $P_0$  夾角大過  $\frac{\pi}{2}$  之  $P$  切線方向  $\theta_p$  改為  $(\theta_p + \pi) \bmod 2\pi$ 。

而在邊緣偵測上，Kang[29][30] 等人提出以 ETF 向量流為基礎之 FDoG(flow-based difference-of-Gaussian)產生出比 Canny edge detector[31]、mean-shift filter[32]及 DoG 更平滑及保留特徵性的邊緣偵測法，而 FDoG 亦可增加迭代次數以獲得更精美的邊緣，FDoG 在雜訊的消除上也有顯著的效果，其成效如圖 2-5、2-6 和 2-7 所示。

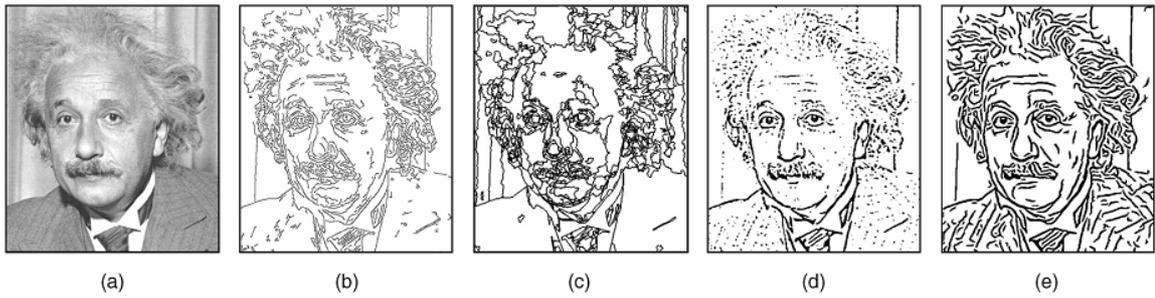


圖 2-5. FDoG:與其他邊緣偵測方法的比較。(a)輸入圖。(b)Canny。(c)Mean shift。(d)Isotropic DoG。(e)FDoG. 文獻[30]

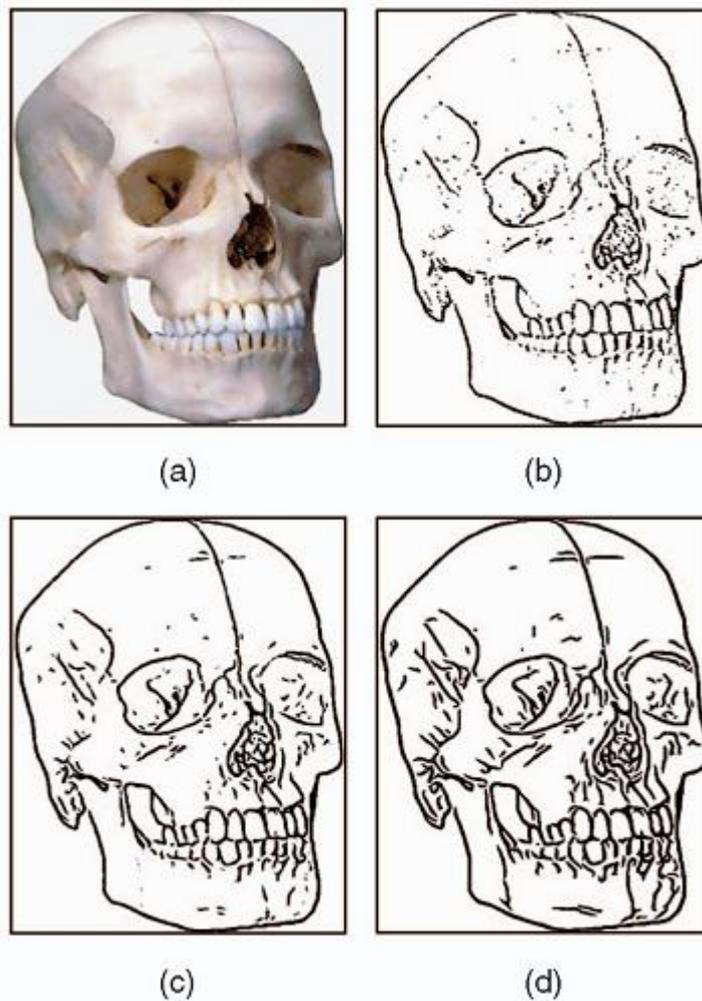


圖 2-6. FDoG 迭代。(a)輸入圖。(b)Isotropic DoG。(c)第一次 FDoG。(d)第三次 FDoG. 文獻[30]

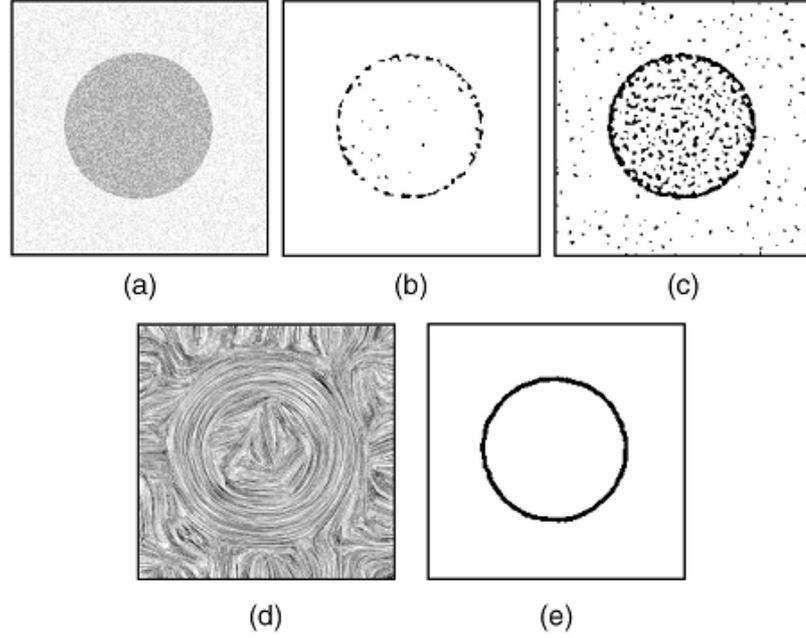


圖 2-7. FdoG 對雜訊的過濾. (a)輸入圖. (b)DoG1. (c)DoG2. (d)ETF. (e)FDoG. 文獻[30].

經由 FDoG 運算進行邊緣偵測之概念可由圖 2-8 說明如下。其中(a)小圖為灰階影像  $I_{HW}(X)$ ，(b)小圖為相對應之 ETF 切線向量圖。

假設  $c_X(s)$  為經過  $X_0$  點之切線向量曲線流， $s$  為曲線長度參數， $|s| \leq S$ ，

$$c_X(0) = X_0 ;$$

$t(c_X(s))$  為  $c_X(s)$  曲線在  $X$  點之切線向量；

$n_{X,s}(l)$  為與  $c_X(s)$  相交且垂直於  $c_X(s)$  之線段， $l$  為長度參數， $|l| \leq L$ ， $n_{X,s}(0) = X$ ：

$$\begin{cases} n_{X,s}(l) \cap c_X(s) = X \\ n_{X,s}(l) \perp c_X(s) \end{cases}$$

則 FDoG 運算定義如下：

$$H(X) = \int_{-S}^S \int_{-L}^L I_{HW}(n_{X,s}(l)) f(l) G_{\sigma_m}(s) dl ds, \quad (6)$$

$$\text{其中 } f(l) = G_{\sigma_c}(l) - \rho \cdot G_{\sigma_s}(l), \quad (7)$$

FDoG 運算式各定義項之考量如下：

(1)  $f(l)$  基本上乃以 DoG 函式近似 Laplacian-of-Gaussian( $\nabla^2 G$ )，目的在於兼

顧邊緣偵測及影像平滑處理。文獻[30]設定  $\sigma_s = 1.6\sigma_c$  ;  $\rho$  值定在  $[0.97, 1.0]$  範圍內，關係到雜訊靈敏度之控制。

- (2)  $I_{HW}(n_{x,s}(l))f(l)$  可解讀為在  $c_x(s)$  曲線橫截面(亦即  $n_{x,s}$  方向)施行一維 DoG 濾波。
- (3) 橫截面濾波後再透過  $G_{\sigma_m}(s)$  沿曲線方向(亦即  $t(\cdot)$  方向)施行一維高斯濾波作加總。

求得了  $H$  後，以下列 threshold 函式轉換成二值影像：

$$\tilde{H}_s(x,y) = \begin{cases} 0 & \text{if } H(x) < 0 \text{ and } 1 + \tanh(H(x)) < \tau, \\ 1 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (8)$$

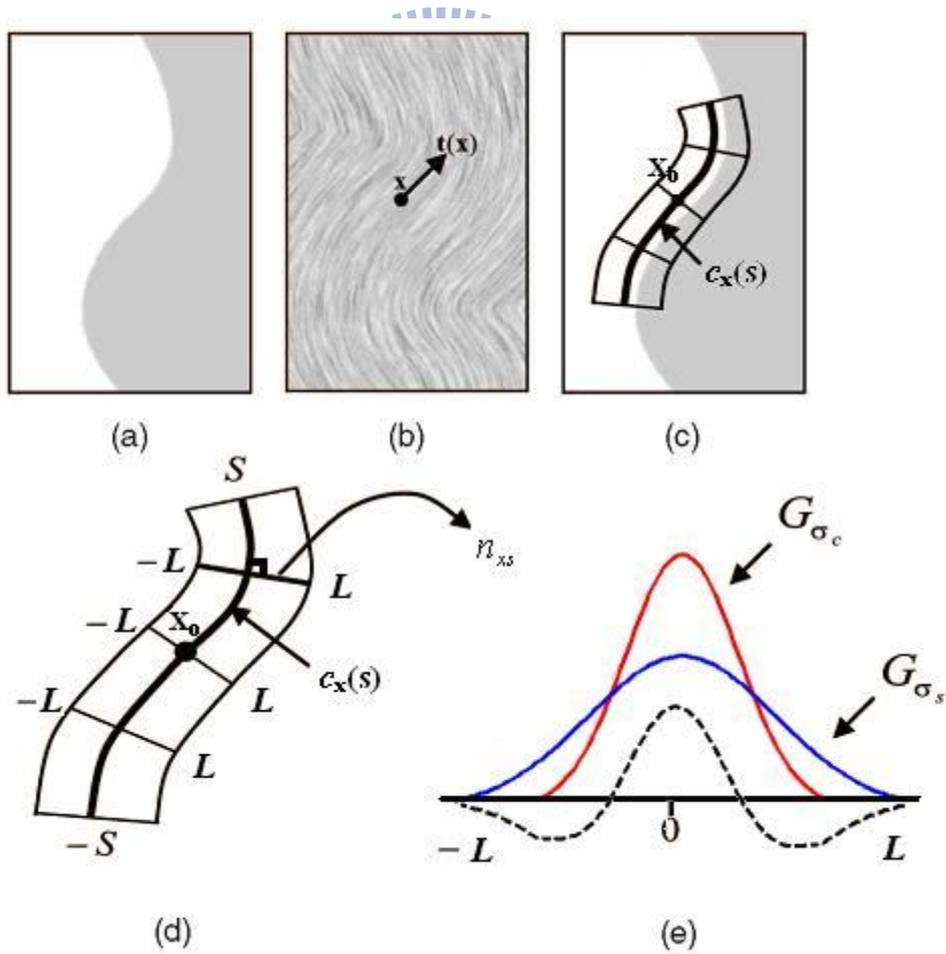


圖 2-8. FDoG 濾波. (a)輸入圖. (b)ETF. (c)kernel. (d)放大 kernel. (e)DoG. 文獻[30]

## 第三章 處理方法

在本論文中，將輸入圖像對其向量域做分析並精化，再分成輪廓及斜線筆觸兩大部分做處理，以貼近真實素描繪製流程的方法，透過一套自動化流程將影像轉成具有鉛筆素描風格的草圖。

### 3.1 系統架構

圖 3-1 是本論文系統程式的主要流程，左半部分為輪廓的產生及處理，而右半部分則是斜線筆觸的處理。

#### 3.1.1 輪廓部分

先計算出影像的梯度向量域，將其轉換成 ETF，並用 FDoG 偵測出邊緣[29][30]，再將其分為輪廓圖(silhouette map)以及特徵圖(feature map)；接著對輪廓圖分別作長、中、短三種鉛筆筆觸繪製出其輪廓，再與濾波過的特徵圖合成出最後輪廓。

#### 3.1.2 斜線筆觸部分

對於在影像大面積相同灰階值使用 Sobel 運算子會有許多點計算不出其向量，在斜線筆觸方面，不能完全使用 ETF 作為方向上依據，所以我們用一個 2D kernel 對 ETF 作方向上的平滑，再旋轉 90 度計算出大面積平滑梯度向量圖。之後將影像作灰階強度分為灰層(gray layer)及暗層(dark layer) [20]，分別以大面積平滑 ETF 圖及大面積平滑梯度向量圖為方向繪製筆觸，再加以合成為斜線筆觸。

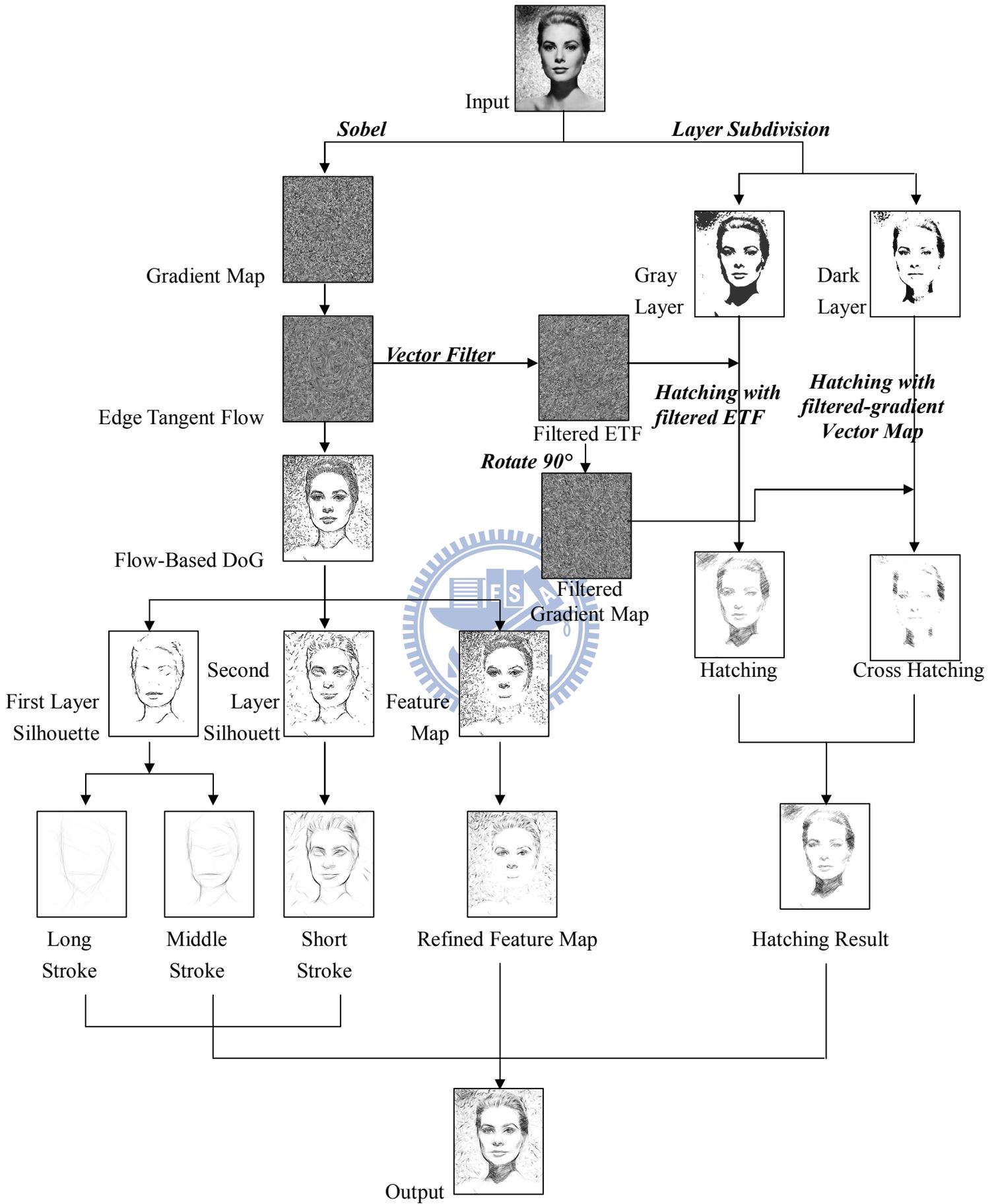


圖 3-1. 系統流程圖.

### 3.2 影像向量圖之精化：ETF

本論文係以影像向量圖為骨幹，來作邊緣偵測及控制輪廓筆觸、斜線筆觸產生的方向，然而梯度向量圖或是切線向量圖帶有的資訊十分雜亂且不夠平滑，在此我們使用 Kang[29][30]等人提出的 ETF，ETF 對梯度向量做了許多平滑處理及特徵保留，對筆觸提供了更精確的方向。較大的 ETF kernel 能夠使向量圖更加平滑，然而使用太巨大的 kernel 不但會造成向量圖失真，且所需時間也大幅增加。在衡量效能以及平滑程度的情況下，我們將 kernel 半徑設為 5，並使用該篇論文所建議的三次迭代。

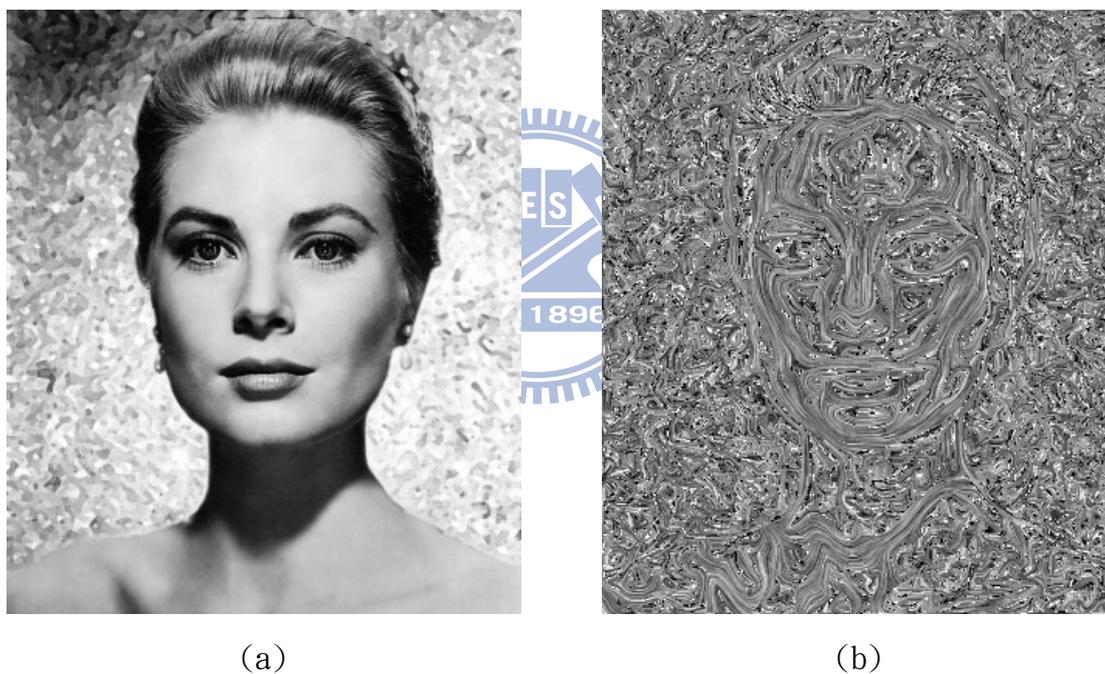


圖 3-2. Edge Tangent Flow. (a)輸入圖. (b)ETF.

### 3.3 邊緣偵測

在邊緣偵測上，使用先前所提到的 FDoG 運算[29][30]，FDoG 所提供的變數中  $\sigma_m$  是影響最小的，基於效能的考量設為 0.5，而  $\sigma_s$  控制了邊緣偵測圖線條的粗細，在此我們設為 0.5，讓線條粗細更近似鉛筆筆觸並保留更高的細節。

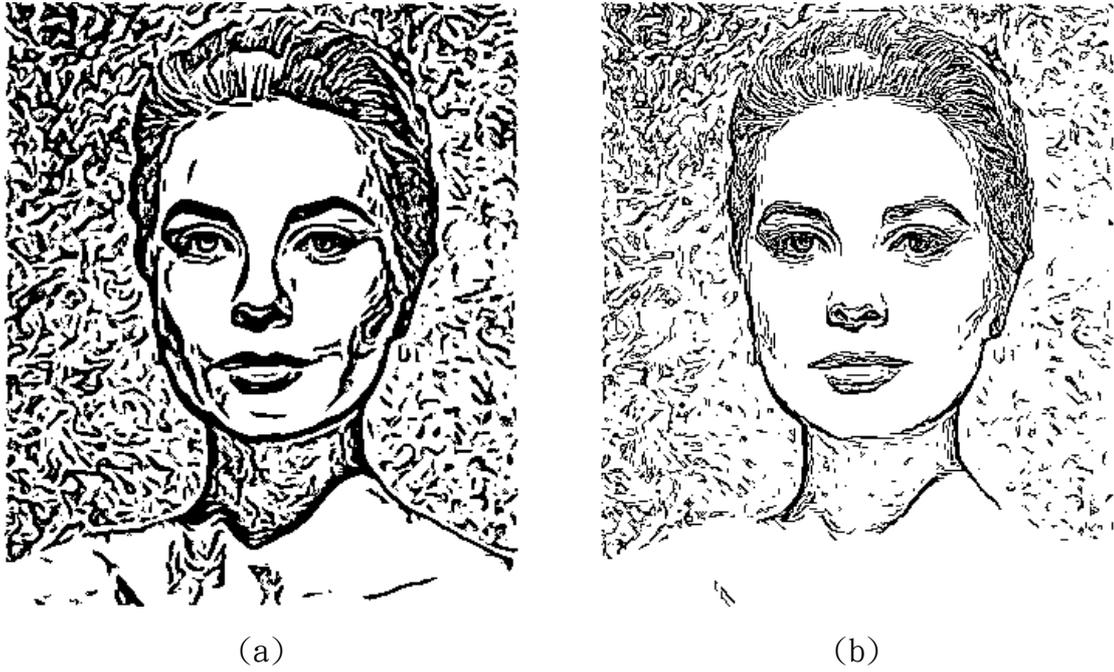


圖 3-3. FDoG 參數比較. (a)FDoG  $\sigma_s=1.0$ . (b)FDoG  $\sigma_s=0.5$ .

### 3.4 輪廓擷取

FDoG 所取得的邊緣偵測圖除了邊緣的輪廓外還帶有許多細微的特徵，而在之後筆觸產生時，需要對這兩部分分別作處理，所以我們從 FDoG 分離出不同層次的輪廓圖 (silhouette map) 及特徵圖 (feature map)。

### 3.4.1 輪廓圖擷取

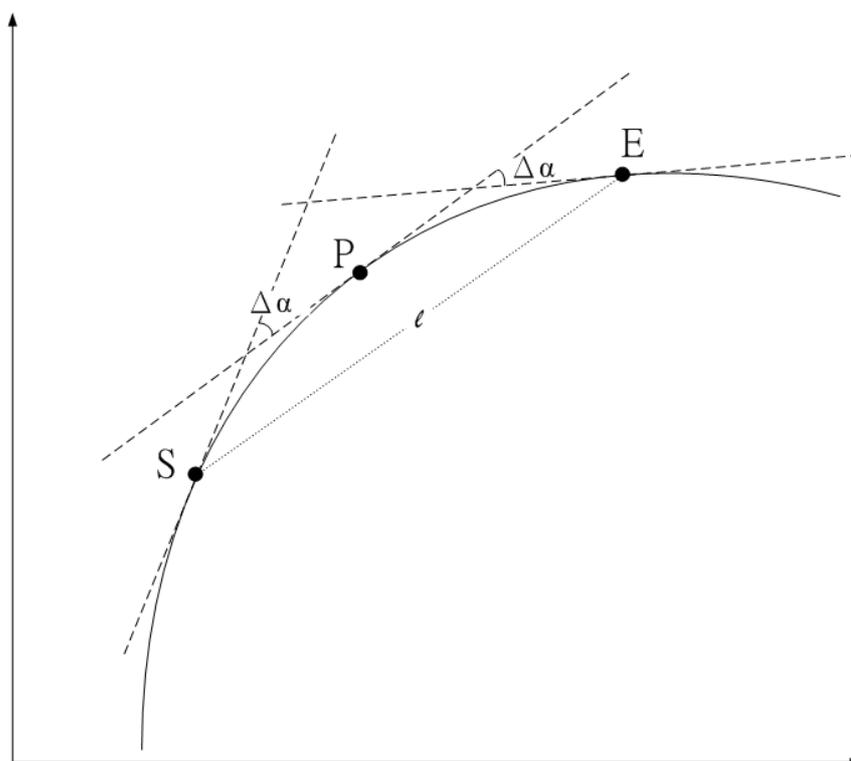


圖 3-4. 線段擷取示意圖.

欲以經過 FDoG 運算得到邊緣偵測結果(如圖 3-3)作為輪廓素描草圖之藍本,合於理想之素描草稿應具特點如下:

- (1) 在臉頰、下巴、頸緣、額際、肩膀乃至唇瓣等處以較長之筆觸描繪作為基本輪廓呈現;
- (2) 在眉梢、眼眶、唇瓣等處以中等長度筆觸描繪作為輪廓加強;
- (3) 其他髮線、眉毛、瞳仁、鼻下端等細節再以短筆觸作為細部處理。

再透過基本觀察,不難發現平滑輪廓上各點與其鄰旁各點之曲率差異不大;換言之若由邊緣偵測圖中某點 P 沿切線向鄰旁各點往外走訪延伸,若各點曲率與 P 點曲率差異小於臨界值,則 P 與各走訪點所構成之曲線應為平滑輪廓的一部分。

準此構想,由邊緣偵測圖結果圖(以下稱 EDGE 圖)中擷取長輪廓點  $X_L$  之處理程序定義如下:

令  $P \in \text{EDGE}$ ， $\text{EDGE}$  為由 FDoG 所導出之邊緣偵測圖。

$XLNG$  為  $X_L$  所構成之結果圖，

$\ell$  為長輪廓曲線之長度 ( $X_L$  點數)，

$\alpha_{\max}$  為曲率差上限，

$\kappa(P)$  為  $P$  點之曲率 (可由 ETF 圖導出)，

$t(P)$  為  $P$  點之切線向量 (ETF 圖資料)，

$I_L = [I_{L1}, I_{L2}]$ .

Start :  $\ell = 0$ ;

$P_0 \leftarrow P$ ;

$P^* \leftarrow P + t(P)$ ;

$\Delta\alpha = |\kappa(P) - \kappa(P^*)|$ ;

While(  $\Delta\alpha < \alpha_{\max}$  . AND.  $P^* \in \text{EDGE}$  )

{

$\ell ++$ ;

於  $XLNG$  圖中記下  $P^*$ ;

$P = P^*$ ;

$P^* = P + t(P)$ ;

$\Delta\alpha = |\kappa(P) - \kappa(P^*)|$ ;

}

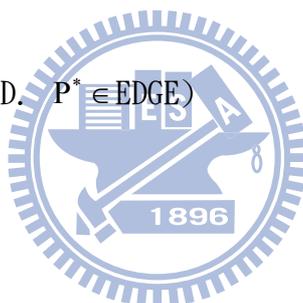
$P = P_0$ ;

根據  $P = P^* + t(P^*)$  找出  $P^*$ ;

$\Delta\alpha = |\kappa(P) - \kappa(P^*)|$ ;

While(  $\Delta\alpha < \alpha_{\max}$  . AND.  $P^* \in \text{EDGE}$  )

{



$$\ell ++;$$

於  $XLNG$  圖中記下  $P^*$ ;

$$P = P^*;$$

根據  $P = P^* + t(P^*)$  找出  $P^*$ ;

$$\Delta\alpha = |\kappa(P) - \kappa(P^*)|;$$

}

若  $\ell \in I_L$  則於  $XLNG$  圖中記下  $P$ ，否則註銷  $XLNG$  中相關  $P^*$  記錄;

圖 3-4 為長輪廓點  $X_L$  擷取程序示意圖， $S$  和  $E$  分別為由  $P$  點開始沿切線方向及逆切線方向走訪所得之終止點，經由同樣程序及另定之曲線長度區間  $I_M$  及  $I_S$ ，即可擷取不同長度與曲度之輪廓曲線。

就  $EDGE$  圖中各點計算其曲率，我們採用一個近似的方法來求得，即分別求得該點在  $ETF$  向量圖上前一個點及後一個點的曲率變化，再取平均來逼近該點的瞬間曲率；計算公式定義如下：

$$\kappa(P) = \frac{\Delta a(t(P_{prev}), t(P_{next}))}{2\Delta s}, \quad (9)$$

$$\begin{cases} P_{prev} + t(P_{prev}) = P, \\ P + t(P) = P_{next}, \end{cases}$$

$P_{prev}$  與  $P_{next}$  分別表示其  $P$  在  $ETF$  向量圖上的前導點及延伸點， $\Delta a$  表示兩向量間夾角，而  $\Delta s$  表示兩點在曲線上的距離，由於  $ETF$  皆為正規化向量，所以我們將  $\Delta s$  設為單位長度，如圖 3-5 所示。

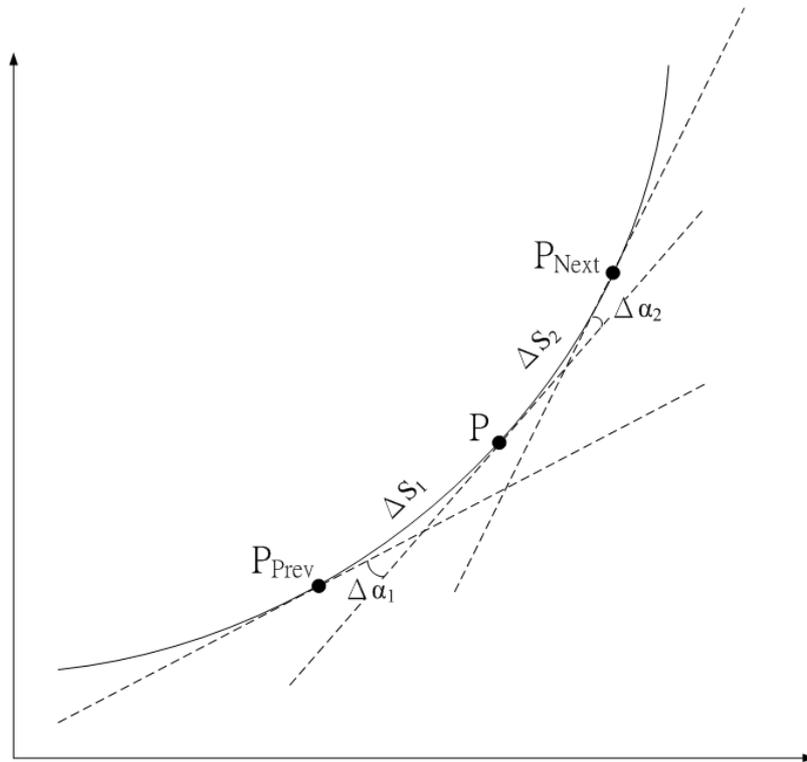


圖 3-5. 曲率示意圖.

在本論文，我們不希望長筆觸以及中筆觸將一些細部輪廓破壞掉，所以將 FDoG 所導出之邊緣偵測結果(即 EDGE 圖)分離成兩個層次輪廓圖，第一層長度區間  $I_L$  設成  $\left[ \frac{H+W}{20}, \frac{H+W}{8} \right]$ ， $H$  及  $W$  分別為影像長及寬，曲率差設為  $\frac{\pi}{2}$ ，取得長度較長、曲率較緩的線段產生長筆觸及中筆觸，而第二層長度區間  $I_M$  設為  $\left[ \frac{H+W}{40}, \frac{H+W}{20} \right]$ ，曲率半徑設為  $\pi$ ，取出較細部的輪廓產生短筆觸，輪廓層次比較如圖 3-6(b)(c)所示。

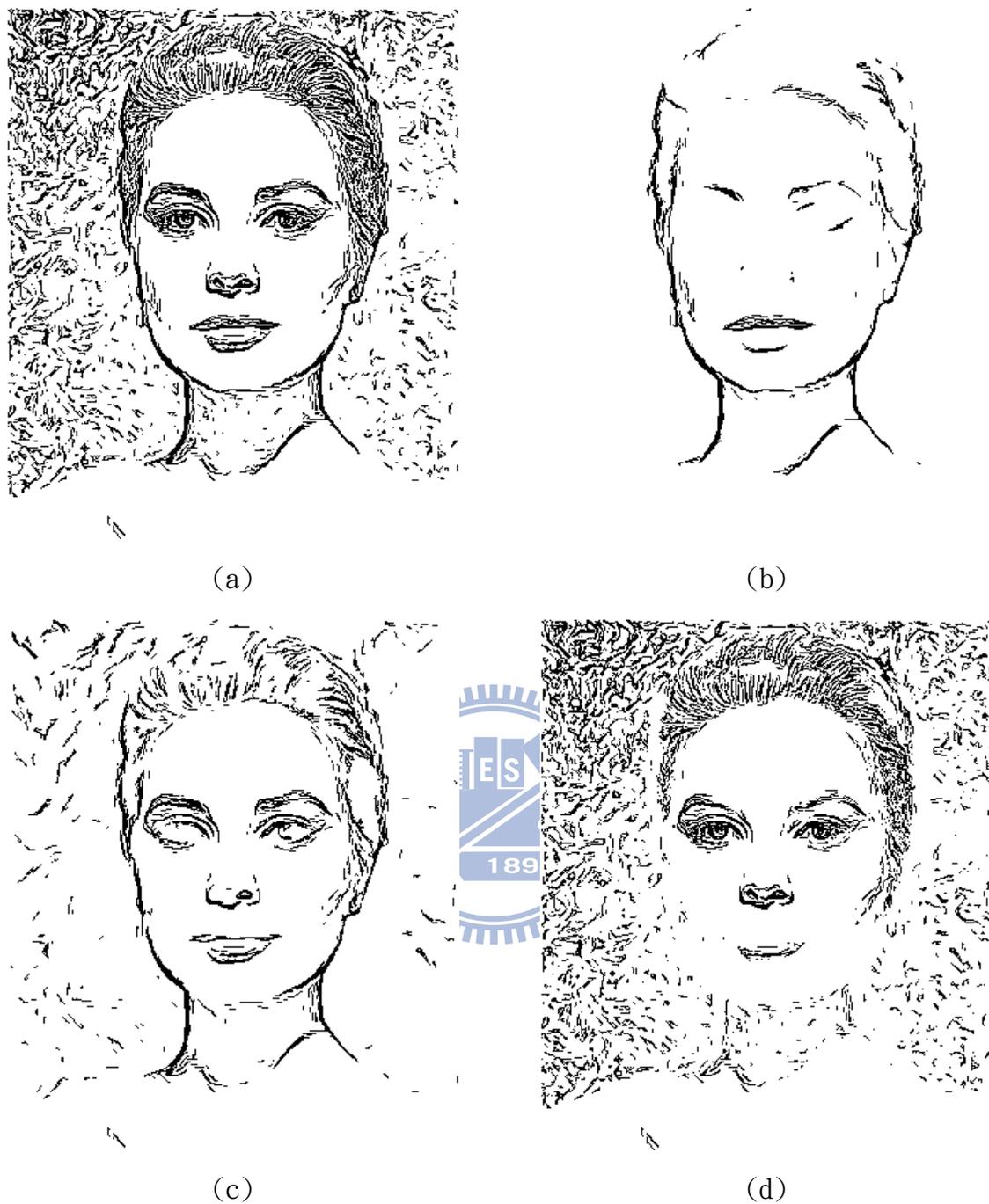


圖 3-6. FDoG 的分解. (a)FDoG. (b)第一層輪廓(FDoG<sub>1</sub>). (c)第二層輪廓(FDoG<sub>2</sub>). (d)特徵圖.

### 特徵圖擷取

在特徵圖的擷取上我們用 FDoG 所導出的邊緣偵測圖減去第一層輪廓圖而成為特徵圖，特徵圖會擷取出影像一些細節的部分，如圖 3-6(d)所示。

### 3.5 輪廓草圖筆觸產生

#### 3.5.1 輪廓草圖筆觸

Semet[21]等人提到，手繪鉛筆素描時，會先由長而淡的線描繪出大體輪廓，再漸漸加深濃度及縮短長度逐一將細部輪廓描繪出來，本論文以此鉛筆手繪流程為出發點，期以產生出近似人為筆觸的效果。

我們以直線筆觸做為勾勒輪廓的線條，以 ETF 向量圖作為筆觸產生的方向，筆觸的生成基本以三種範圍長度的筆觸來對輪廓作構圖，分別為長筆觸、中筆觸及短筆觸。為了使產生之筆觸視覺上看來更自然且有變化，我們以一個與實際作畫相符的手法並加入許多變數因子，來控制筆觸的長短、粗細及濃淡。

#### 3.5.2 輪廓筆觸長度變數因子

即使在同一長度系列的處理上，我們依然期望能在輪廓平緩處產生較長筆觸，而在輪廓較陡曲處產生較短的筆觸；所以我們以影像長寬為依據做為筆觸長度的基本長度因子，並以該點曲率半徑做為變數長度因子，將點  $x$  的筆觸產生長度公式  $S_l(x)$  定義如下：

$$S_l(x) = \beta(H + W) + \alpha(2\pi - \kappa(x)), \quad (10)$$

其中  $\beta$  為控制基本長度的常數參數， $H$  及  $W$  分別為輸入圖的長與寬， $\alpha$  則為控制變數長度的參數， $\kappa(x)$  則是在點  $x$  上的曲率，其公式意義在於以影像長寬和為依據定義出一個基本長度，再與該點的曲率半徑為變數長度相加而得筆觸的總長度。根據  $S_l(x)$  在  $x$  點所定義之筆觸長度，會與  $x$  點所在之曲率成反比。

在  $\beta$  的設定上，長、中以及短筆觸分別以長寬和的  $\frac{1}{100}$ 、 $\frac{1}{400}$  以及  $\frac{1}{800}$ ，而  $\alpha$  則分別設定為 10、5 及 2.5，接著將長筆觸與中筆觸作用於第一層輪廓圖上，而短筆觸作用於第二層輪廓圖。

### 3.5.3 輪廓筆觸寬度變數因子

由先前 FDoG 參數設定上，我們將變異數設為 0.5，讓邊緣偵測結果能近似鉛筆寬度，故輪廓筆觸的寬度即設定為經過該點線條的寬度，方法上走訪該點梯度向量並以 FDoG 二值圖為 threshold 來判斷走訪的寬度。

### 3.5.4 輪廓筆觸濃淡變數因子

長筆觸我們傾向使用力道較小、較淡的筆觸，而中、短筆觸則使用較暗的筆觸，在筆觸的重疊上，我們採用灰階強度的相加。為了貼近手繪流程，在同長度系列的筆觸濃淡，我們使用機率來控制筆觸產生的頻率，圖像灰階值較強的點，有較高的機率產生出筆觸，而利用筆觸重疊來表現出圖像深色輪廓。機率公式  $S_p(x)$  如下所定義：

$$S_p(x) = \gamma(1 - I(x)), \quad (11)$$

$S_p(x) \in [0,1]$ ，且數值愈高，代表機率愈大，我們假設圖像的灰階值範圍為  $[0, 1]$ ， $I(x)$  為影像在點  $x$  的灰階值，此公式表示灰階值愈趨近於 0(深色)，有更高的機會產生筆觸， $\gamma$  為控制變數，愈高愈有機率產生出筆觸，灰階也會隨之加深，長、中以及短筆觸在此我們分別設為 0.03、0.15 及 0.35。

產生出的長、中以及短筆觸，如圖 3-7 所示。



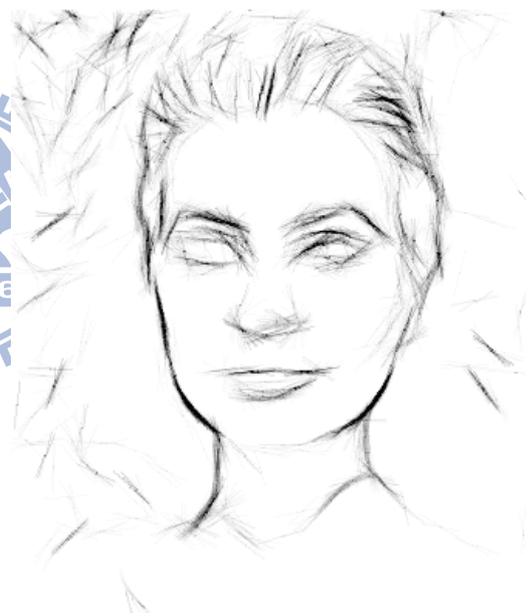
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 3-7. 輪廓草圖筆觸. (a)輸入圖. (b)長筆觸. (c)中筆觸. (d)短筆觸.

而分離出來的特徵圖，經由相同方法以極短筆觸作一定程度上方向性的模糊，以貼近鉛筆質感，如圖 3-8 所示。

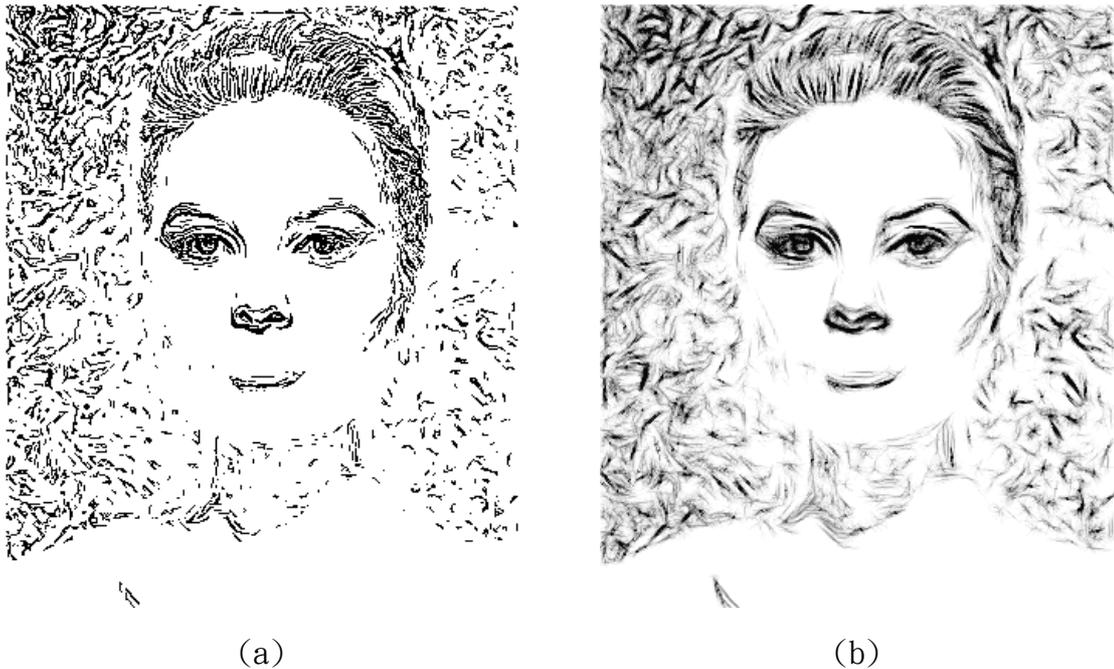


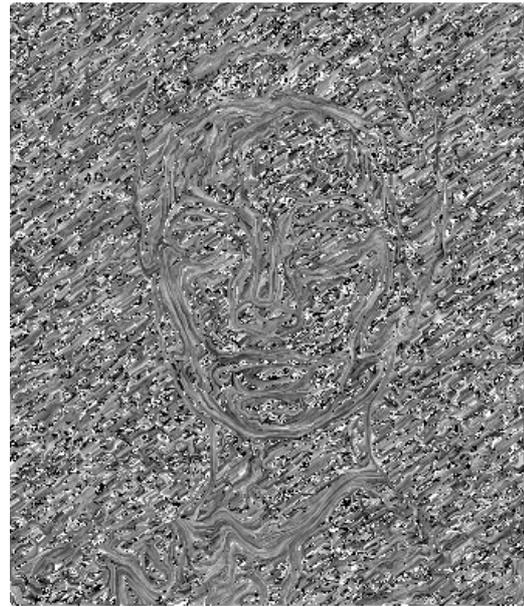
圖 3-8. 特徵筆觸加強. (a)特徵圖. (b)精化特徵圖.

### 3.6 斜線筆觸

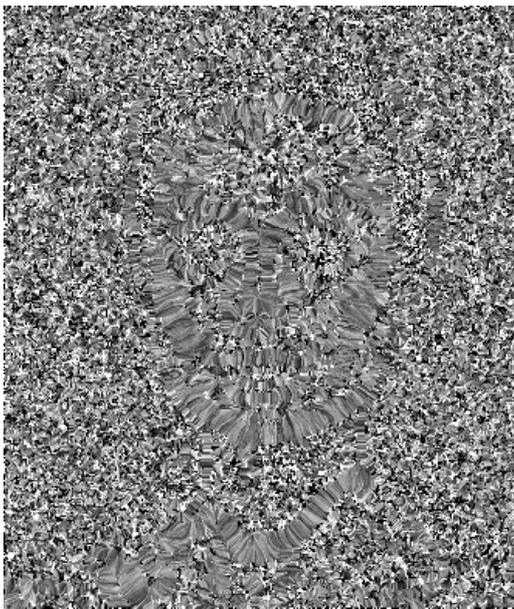
首先使用 Yamamoto[20]等人提出的分層法，將影像自動分為灰層及暗層，並用一個 2D kernel 對 ETF 向量圖作平滑化，接著旋轉 90 度產生出平滑梯度向量作為斜線筆觸產生的方向基礎。在 kernel 的設計上，為了獲得更高的一致性且消除向量圖上許多無向量的點，我們在 kernel 裡計算與核心點曲率差在範圍內的點的數量，若是數量超過設定的值，即將該點向量保留，反之則以其他向量取代，取而代之的向量是以手繪最常出現的 45 度及 135 度角，如圖 3-9 所示。在灰層，我們依著平滑 ETF 產生斜線筆觸，而暗層則對平滑梯度向量圖產生斜筆筆觸，如圖 3-10 所示。



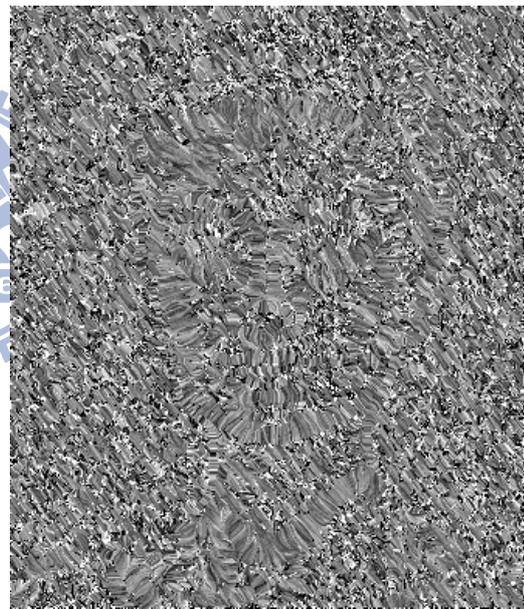
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 3-9. (a)ETF. (b)filtered-ETF. (c)Gradient Map. (d)filtered-Gradient Map.



(a)



(b)



(c)



(d)

圖 3-10. 斜線筆觸. (a)灰層. (b)灰層斜線筆觸. (c)暗層. (d)暗層斜筆筆觸.

### 3.7 合成

最後再將產生之筆觸輪廓、特徵圖以及斜線筆觸合成。

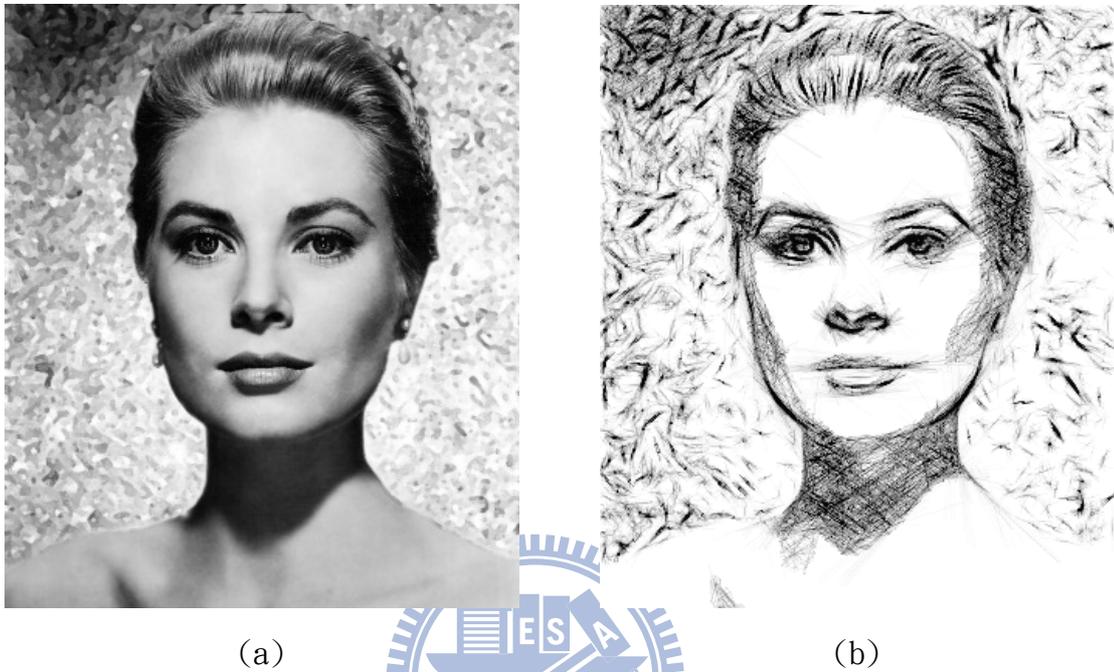


圖 3-11. 合成. (a)輸入圖. (b)合成結果.

## 第四章 實驗結果

前一章說明了本論文系統的觀念，我們在本章則將論文系統實作出來的結果與其他鉛筆素描文獻的結果圖來進行比較，圖 4-1 到 4-8 為與文獻[25] [26]作比較。

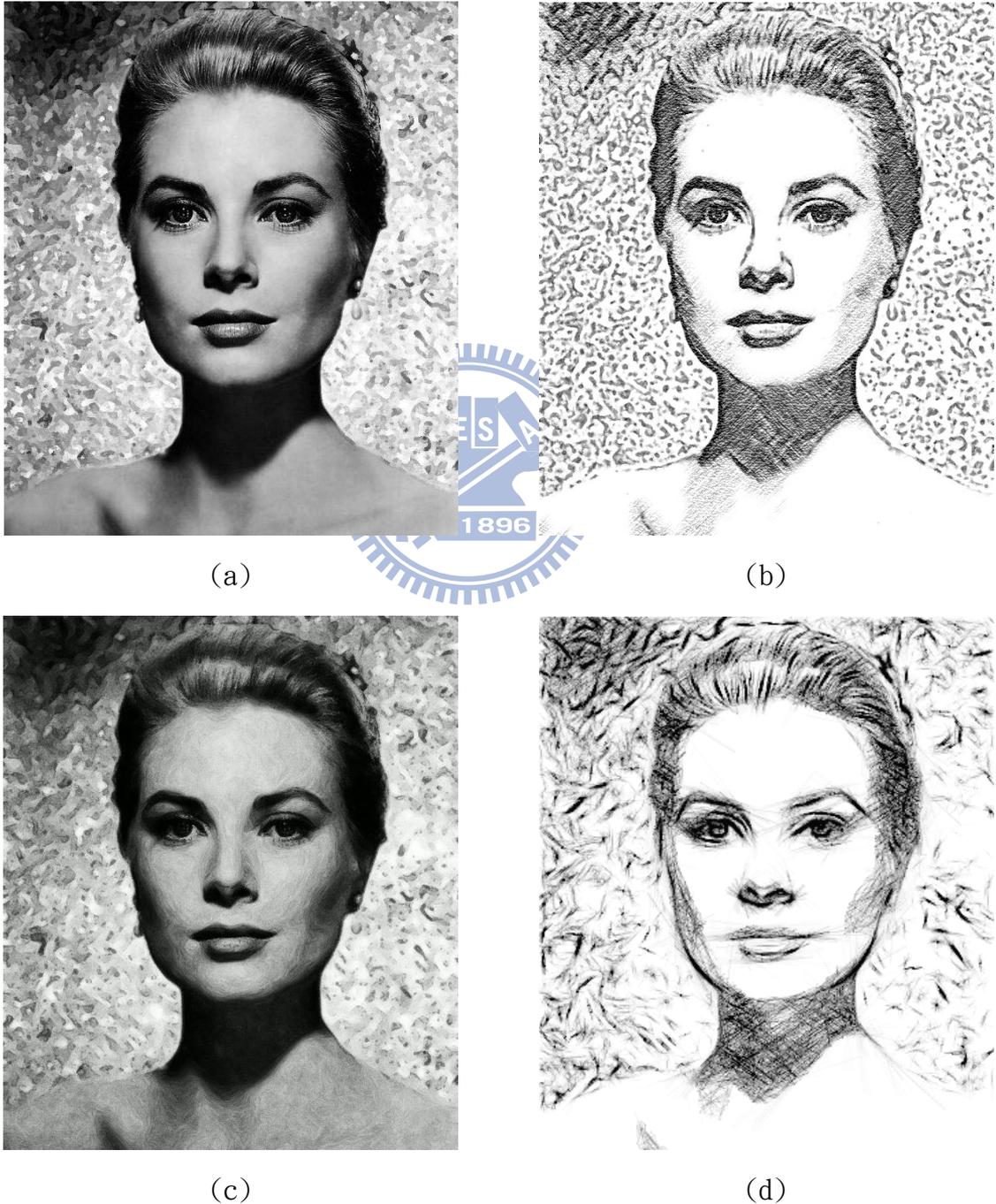


圖 4-1. Kelly. (a)輸入圖. (b)文獻[27]結果. (c)文獻[28]結果. (d)本論文的結果.



(a)



(b)



(c)

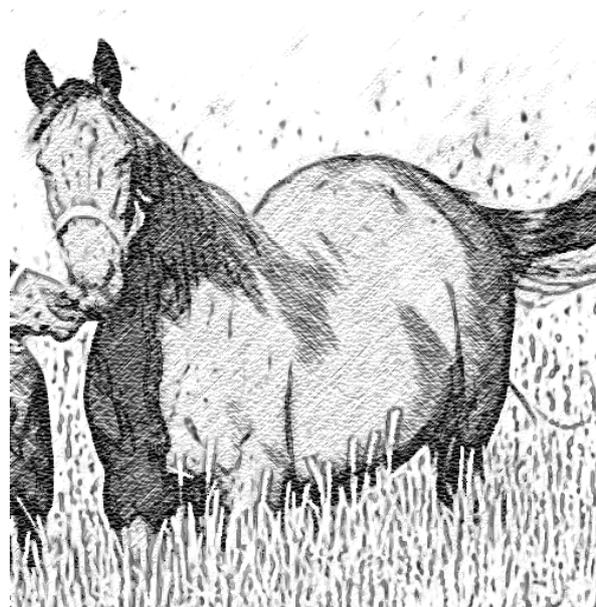


(d)

圖 4-2. Lena. (a)輸入圖. (b)文獻[27]結果. (c)文獻[28]結果. (d)本論文的結果.



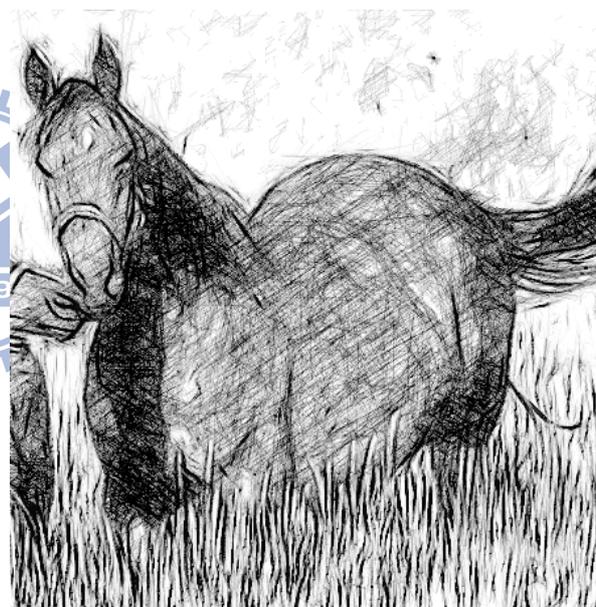
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 4-3. 馬. (a)輸入圖.(b)文獻[25]結果.(c)文獻[26]結果.(d)本論文的结果.



(a)



(b)

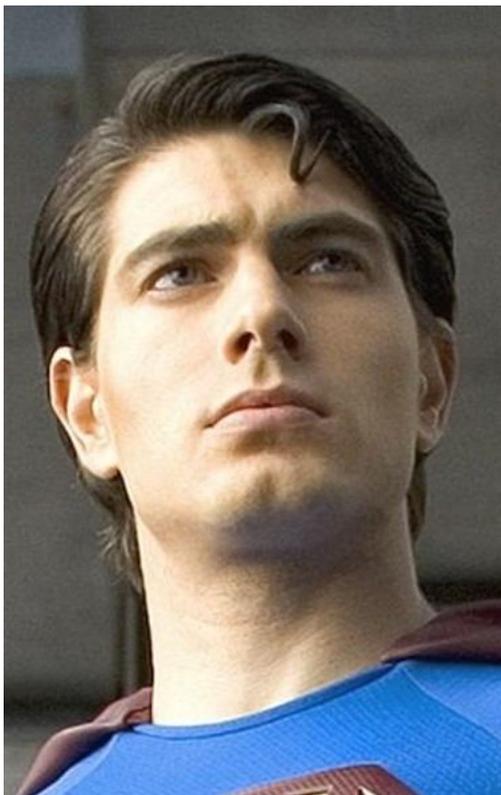


(c)



(d)

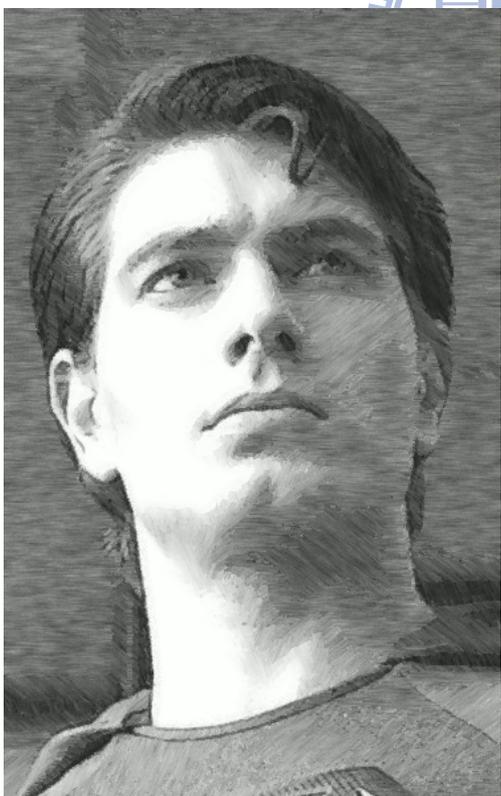
圖 4-4. 國父. (a)輸入圖. (b)文獻[25]結果. (c)文獻[26]結果. (d)本論文的結果.



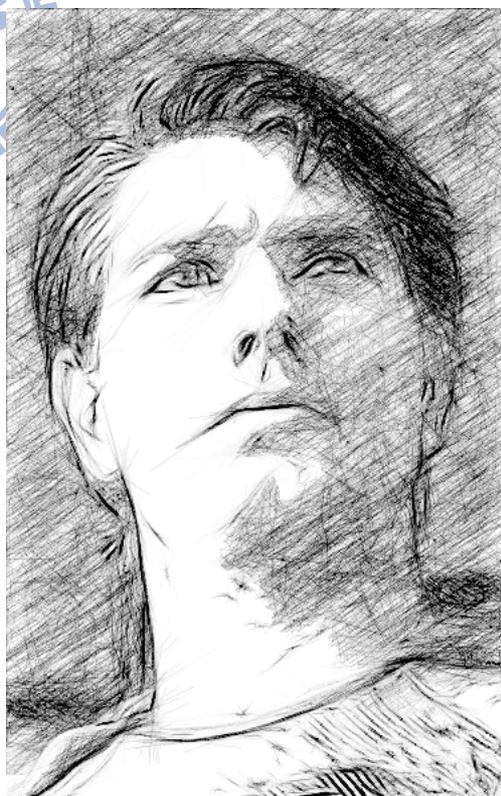
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 4-5. 超人. (a)輸入圖. (b)文獻[25]結果. (c)文獻[26]結果. (d)本論文的結果.



(a)



(b)



(c)



(d)

4-6. Cameron Diaz. (a)輸入圖. (b)文獻[25]結果. (c)文獻[26]結果. (d)本論文的結果.



(a)



(b)



(c)

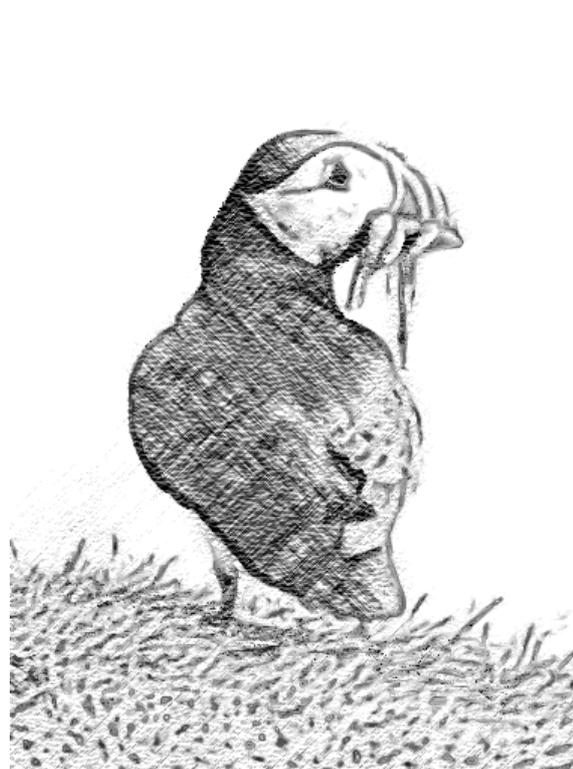


(d)

圖 4-7. Sam Worthington. (a)輸入圖. (b)文獻[25]結果. (c)文獻[26]結果. (d)本論文的結果.



(a)



(b)



(c)



(d)

圖 4-8. 鳥. (a)輸入圖. (b)文獻[25]結果. (c)文獻[26]結果. (d)本論文的結果.

由以上實驗可發現，以本論文流程所產生的圖，比單純使用向量模糊處理可產生更近似手繪的特性，而在輪廓方面，也比較突出，將非擬真的部分做了強化，增加手繪的特性。以下為一些其他影像作為測試對象之結果，圖 4-9 到 4-11 我們以風景圖作為測試對象，而圖 4-12 及 4-13，用一些服裝走秀圖作為測試，圖 4-14 到圖 4-17，則用一些車子作為測試影像。

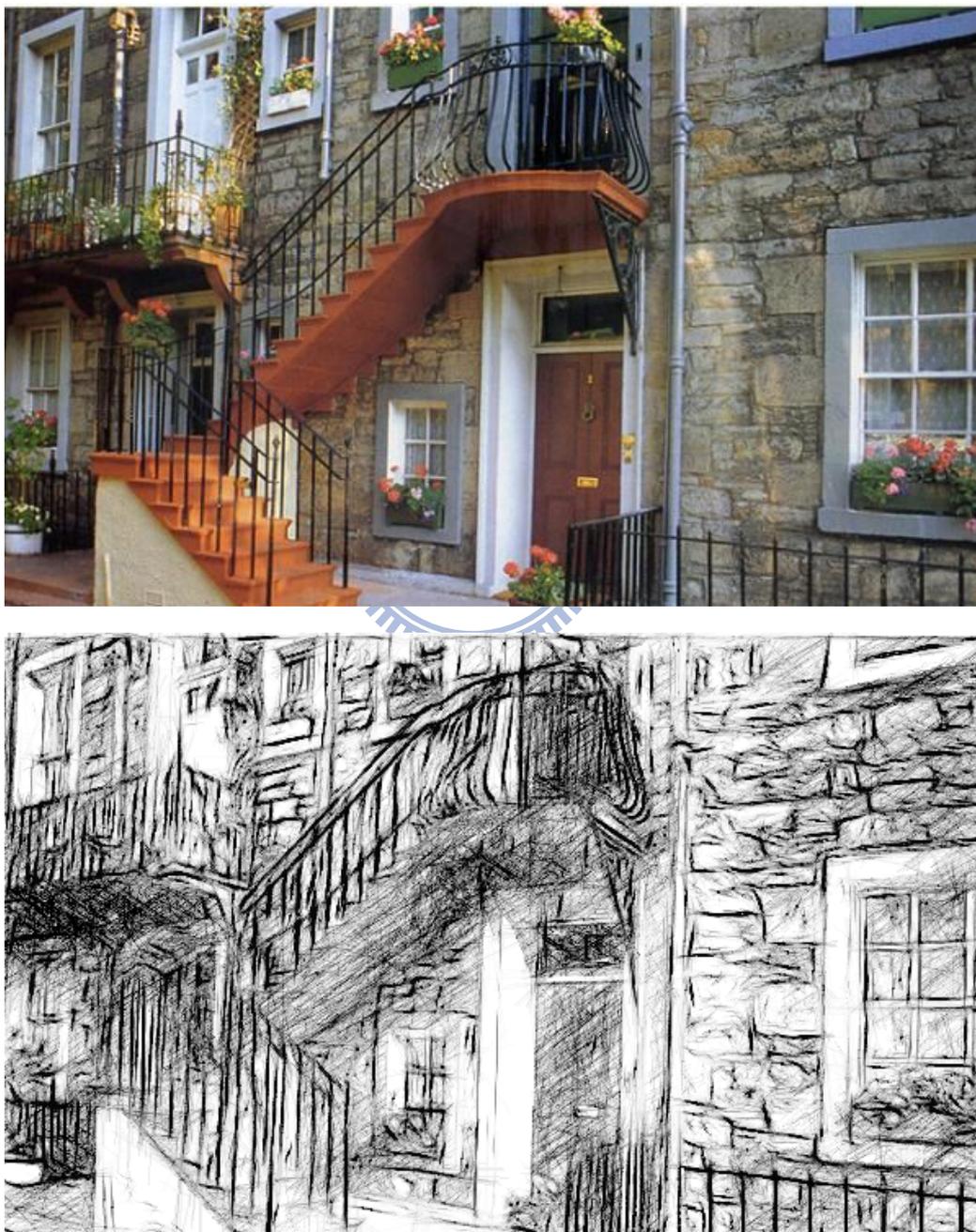


圖 4-9. 樓房.

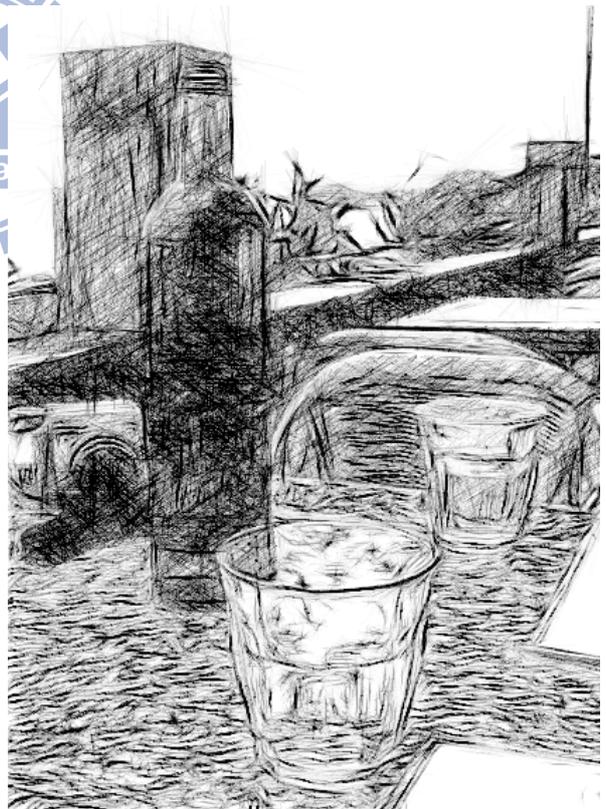
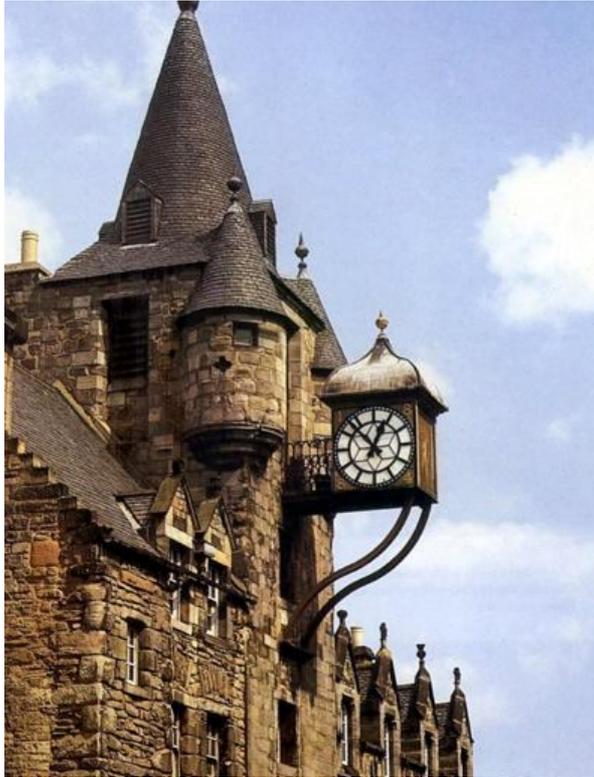


圖 4-10. 樓房與酒杯.

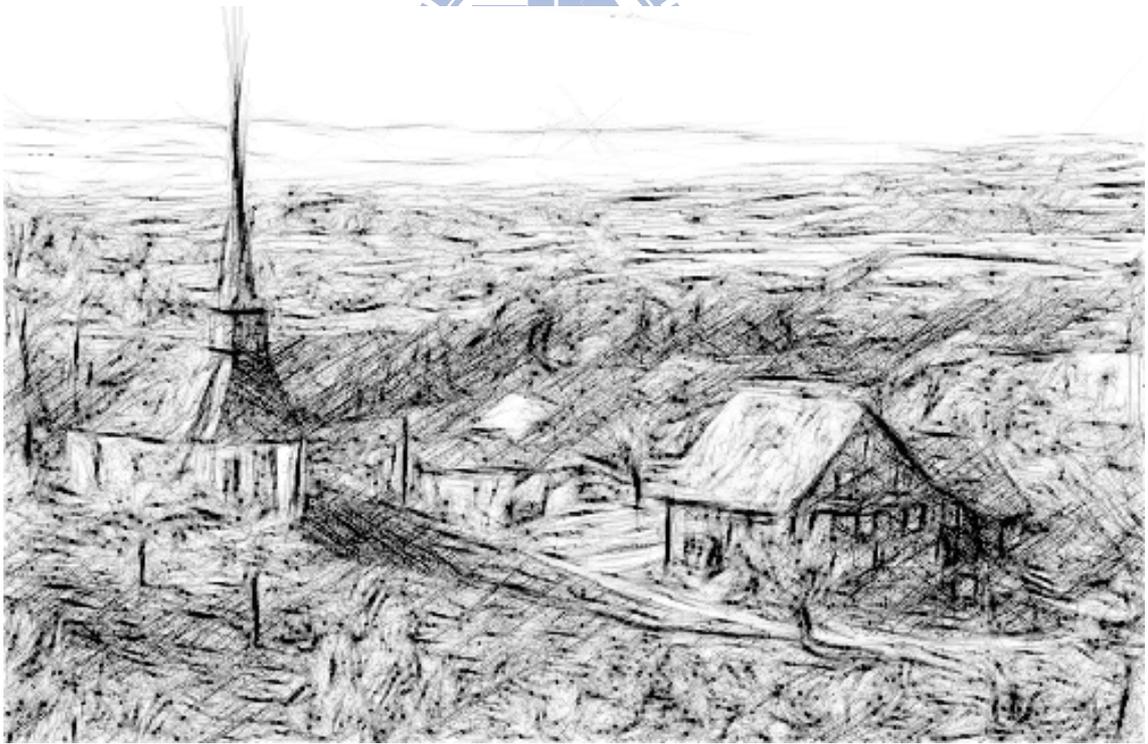


圖 4-11. 鄉村圖。



圖 4-12. 服裝走秀\_1.



圖 4-13. 服裝走秀\_2.



圖 4-14. 跑車\_1.



圖 4-15. 跑車\_2.

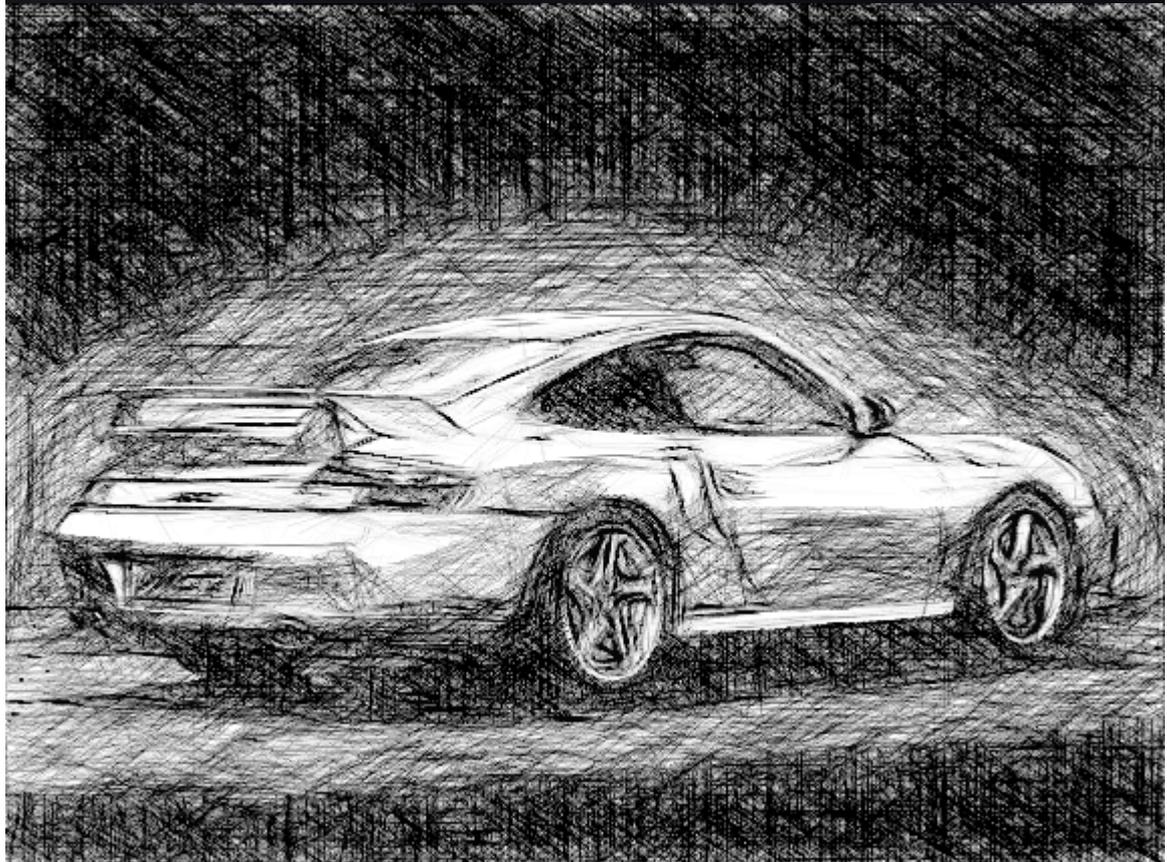


圖 4-16. 跑車\_3.

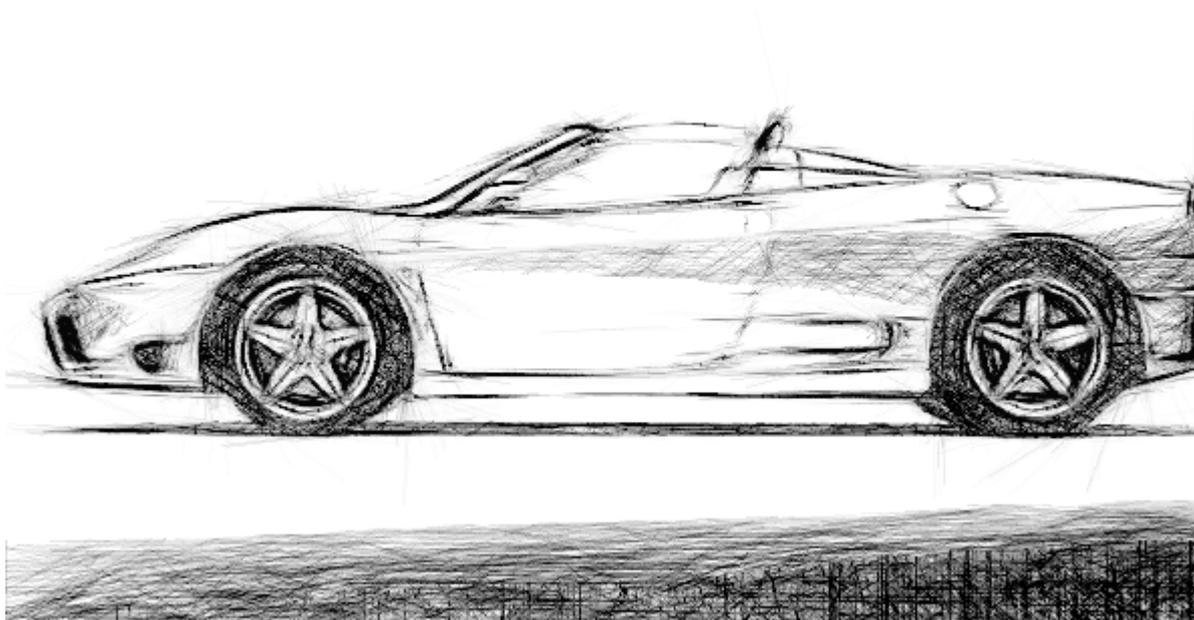


圖 4-17. 跑車\_4.

## 第五章 結論

本篇論文提供一套產生鉛筆素描草圖的自動化流程，讓使用者無須介入而自動由影像產生出近似手繪的草圖。然而，目前筆觸是完全由直線所構成，且長度是以圖像的長寬為基礎，對於畫面複雜的圖來說，許多小細節會顯得十分雜亂；而對於顏色對比過大的圖，畫面色階的分層會過於零碎，使的斜筆筆觸顯得十分不自然；Sobel 由於 kernel 過小，有許多點的向量計算不出來，如何設計一個更大的且精準的 kernel 也可以是個議題；而筆跡與力道這方面的因素在本論文比較少著墨，這是未來可以加以改進探討的地方。

在效能方面，ETF 及 FDoG 隨著 kernel 大小的與迭代的增加，運算時間會大幅增加，而 FDoG 在的邊緣偵測上，需要計算許多高斯濾波，需要相對較長的時間。Kang[30] 等人在 ETF 提出以兩個 1D kernel 取代 2D kernel 來降低時間而達到近似的效果，並也說到 FDoG 的實作上，以先計算出整個梯度強度圖來降低時間複雜度。而在本論文中的筆觸生成方法，在實作上可以在輪廓擷取時就將三種長度筆觸同時處理；在斜線筆觸方面，兩邊方向的也可以同時處理，以降低向量走訪次數，增加效能。

本論文從人工手繪的角度切入，彷彿就像一個畫家正著手對某張影像繪製素描，也因此讓影像更能從擬真進入到非擬真，結果也顯示在素描草圖的模擬是很成功的。

## 參考文獻

- [1] P. Litwinowicz, “Processing Images and Video for an Impressionist Effect,” Proc. ACM SIGGRAPH ’ 97, pp. 407-414, 1997.
- [2] A. Hertzmann, “Painterly Rendering with Curved Brush Strokes of Multiple Sizes,” Proc. ACM SIGGRAPH ’ 98, pp. 453-460, 1998.
- [3] Aaron Hertzmann, Charles E. Jacobs, Nuria Oliver, Brian Curless, and David H. Salesin, “Image Analogies” , In Proc. SIGGRAPH 2001, pages 327 - 340, 2001.
- [4] B. Gooch, G. Coombe, and P. Shirley, “Artistic Vision: Painterly Rendering Using Computer Vision Techniques,” Proc. Non-Photorealistic Animation and Rendering (NPAR ’ 07), pp. 83-90, 2002.
- [5] J. Hays and I. Essa, “Image and Video-Based Painterly Animation,” Proc. Non-Photorealistic Animation and Rendering (NPAR ’ 07), pp. 113-120, 2004.
- [6] G. Winkerbach, D. H. Salesin, “Computer-Generated Pen-and-Ink Illustration” , SIGGRAPH94 conference proceedings, pp. 91-100, 1994.
- [7] M.P. Salisbury, S.E. Anderson, R. Barzel, and D.H. Salesin, “Interactive Pen-and-Ink Illustration,” Proc. ACM SIGGRAPH’ 94, pp. 101-108, 1994.
- [8] M. Salisbury, M. Wong, J. Hughes, and D. Salesin, “Orientable Textures for Image-Based Pen-and-Ink Illustration,” Proc. ACM SIGGRAPH ’ 97, pp. 401-406, 1997.
- [9] O. Deussen, S. Hiller, K. Van Overveld, and T. Strothotte, “Floating Points: A Method for Computing Stipple Drawings,” Computer Graphics Forum, vol. 19, no. 3, pp. 40-51, 2000.
- [10] A. Secord, “Weighted Voronoi Stippling,” Proc. Non-Photorealistic Animation and Rendering (NPAR ’ 02), pp. 37-43, 2002.

- [11] A. Hausner, “Simulating Decorative Mosaic,” Proc. ACM SIGGRAPH ’ 01, pp. 573–578, 2001.
- [12] V. Ostromoukhov, “Digital Facial Engraving,” Proc. ACM SIGGRAPH ’ 99, pp. 417–424, 1999.
- [13] A.W. Klein, P.-P. Sloan, A. Finkelstein, and M.F. Cohen, “Stylized Video Cubes,” Proc. Symp. Computer Animation (SCA ’ 02), pp. 15–22, 2002.
- [14] J.P. Collomosse and P.M. Hall, “Cubist Style Rendering from Photographs,” IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics, vol. 9, no. 4, pp. 443–453, Oct.–Dec. 2003.
- [15] M. Sousa and J. Buchanan, “Observational Models for Graphite Pencil Materials,” Computer Graphics Forum, vol. 19, no. 1, pp. 27–49, 2000.
- [16] F. Durand, V. Ostromoukhov, M. Miller, F. Duranleau, and J. Dorsey, “Decoupling Strokes and High-Level Attributes for Interactive Traditional Drawing,” Proc. Eurographics Workshop Rendering (EGRW ’ 01), pp. 71–82, 2001.
- [17] Xiaoyang Mao, Yoshiyasu Nagasaka, Atsumi Imamiya, “Automatic Generation of Pencil Drawing From 2D Images Using Line Integral Convolution,” Proceedings of the 7th International Conference on Computer Aided Design and Computer Graphics (CAD/GRAPHICS’ 01), pp. 240–248, 2001.
- [18] Nan Li, Zhiong Huang, “A Feature-Based Pencil Drawing Method,” Proceedings of the 1st international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australasia and South East Asia, pp. 135, 2003.
- [19] Mignotte, M. “Unsupervised statistical sketching for non-photorealistic rendering models” , 2003 International Conference on Image Processing, 2003. ICIP 2003. Proceedings. pp. III-573–6 vol.2, 2003.
- [20] Shigefumi Yamamoto, Xiaoyang Mao, Atsumi Imamiya, “Enhanced LIC Pencil

- Filter” , IEEE Computer Graphics, Imaging and Visualization Proceedings, pp. 251~256, 2004.
- [21] Semet Y., O’Reilly U.M. and Durand F., "An Interactive Artificial Ant Approach to Non-Photorealistic Rendering", In Proceedings of GECCO 2004: Genetic and Evolutionary Computation Conference.
- [22] Ma-Chi Che, Cheng-Chung Lin, “From image to sketch: with the emphasis of visual targets” , Master thesis, 2004.
- [23] Jin Zhou, Baoxin Li, “Automatic Generation of Pencil-Sketch Like Drawings from Personal Photos” , IEEE International Conference on Multimedia and Expo, 2005.
- [24] Yen-Chi Chang, Cheng-Chung Lin, “Automatic Generation of Pencil Drawing from Photo” , Master thesis, 2005.
- [25] Chi-Cheng Chen, Cheng-Chung Lin, “Automatic Generation of Pencil Sketching with the Effects of Paper Texture” , Master thesis, 2006.
- [26] Fang-Shuoh Lee, Cheng-Chung Lin, “Study on the Control of Drawing Strokes” , Master thesis, 2007.
- [27] Zhao-Qing Huang, Cheng-Chung Lin, “Experiences on using long strokes across large areas in pencil sketch” , Master thesis, 2008.
- [28] B. Cabral, C. Leedom, ” Imaging Vector Field Using Line Integral Convolution” , SIGGRAPH93 conference Proceeding, pp.263~270, 1993.
- [29] Henry Kang, Seungyong Lee, Charles K. Chui, “Coherent Line Drawing” , Proc. ACM Symposium on Non-photorealistic Animation and Rendering, pp. 43~50, San Diego, CA, 2007.
- [30] Henry Kang, Seungyong Lee, Charles K. Chui, “Flow-Based Image Abstraction” , IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, pp. 62~76, 2009.

- [31] J. Canny. “A computational approach edge detection.” IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8(6) :679 – 697, 1986.
- [32] D. Comaniciu and P. Meer, “Mean Shift: A Robust Approach toward Feature Space Analysis,” IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 24, pp. 603–619, 2002.
- [33] Holger Winnemöller, Sven C. Olsen, Bruce Gooch, “Real-Time Video Abstraction” , ACM SIGGRAPH Paper, 2006.

