

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

以墨汁特性分析為主之中國水墨畫擴散研究 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 94-2213-E-029-017-
執行期間：94年08月01日至95年10月31日
執行單位：東海大學資訊工程與科學系

計畫主持人：蔡清欉

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理：陳柏仲、劉振漢

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 96 年 02 月 15 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

以墨汁特性分析為主之中國水墨畫擴散研究

A research based on the physical characteristics of ink in Chinese Ink Painting

計畫編號：NSC 94-2213-E-029-017

執行期限：94年08月01日～95年10月31日

主持人：蔡清樞 東海大學資訊工程與科學系

計畫參與人員：陳柏仲 劉振漢 東海大學資訊工程與科學系

一、中文摘要

我們深入探討宣紙與墨汁的物理特性及其擴散時的互動關係，發現擴散時墨汁中的膠於乾燥過程中會將沉澱的碳顆粒黏著在纖維層中，改變纖維的結構，進而影響纖維的含水及吸墨特性，讓繪畫出來的圖形產生「搭墨」及類似「拒墨」現象，同時墨汁中的碳顆粒不均勻與宣紙纖維空隙大小會產生過濾效應，因而產生黑邊墨跡的現象。我們建構了一個擴散模型，墨汁中除了考慮水與碳的擴散因素外，並加入膠的參數，讓膠與碳在水分子蒸發時改變纖維結構，模擬出搭墨、拒墨的現象。在模擬過程中，其他學者常常僅對一滴或一筆的墨汁做擴散，我們依照畫家繪畫時的經驗，設定每一筆劃內墨汁的濃度、墨汁量、筆劃間隔時間及順序等輸入模型中，模擬出一個完整的作品。

綜觀本研究，我們除了依中國水墨畫使用媒材的物理特性建構出很好的模型，並且將其他學者未考慮到膠的因素納入討論，做

出其他系統無法呈現，而中國水墨畫家常用的「搭墨」、「拒墨」的現象，並以碳顆粒及纖維空隙關係發生的過濾效應，模擬「黑邊墨跡」，結果顯示我們的模型讓呈現的影像更能符合中國水墨畫獨特的風格。

關鍵詞：中國水墨畫 (Chinese Ink Painting)，
水墨擴散 (Ink Diffusion)，宣紙
(Xuan Paper)，墨汁 (Black Ink)，
非寫實照片顯像 (NPR)

Abstract

We explore deeply the diffusing relationship between the Xuan Paper and the physics property of ink. We find out that the processing of diffusing ink glue will make the precipitated carbon attached in the fiber and change the fiber structure. This influence in the fiber makes the paintings produced with a phenomenon of reserved stroke trace and

unlikely to absorb the ink. The ink of carbon granular structure is not well mixed with the fiber space of Xuan paper and then it produces Filtering Effect and the phenomenon of Edge-dark. To solve this problem, we construct a diffusion model to take into account the ink, carbon and parameter of glue factors. The method makes fiber change its structure when water molecule evaporate, and simulate the phenomenon of reserved stroke trace and the ink refusal. In the simulated process, other researchers usually make diffusion by a little ink. With artist drawing experience, we design the model for concentration, quantity, intermission and sequence to simulate a completed art.

To sum up the research, we construct a good model by physics property of Chinese Ink Painting, and take the missing factors of glue into discussion. It presents the phenomena of reserved stroke trace and unable to absorb the ink in Chinese Ink Painting which the current system can't achieve. It also simulates the Edge-dark by Filtering Effect, which occurred in the mix of carbon granular structure and fiber space. Our achievement makes the image conform with the specific style in Chinese Ink Painting.

Key word: Chinese Ink Painting, Ink Diffusion, Xuan Paper, Ink, NPR

二、緣由與目的

近年來資訊科技突飛猛進，尤其電腦運算速度不斷的成長，在影像處理上有很多人嚐試運用電腦模擬各種真實的照片 (Photo-realism) 或非真實的照片

(Non-Photo-realism)。中國水墨畫是一項最有特色的文化，但繪畫技巧實在太困難，未經過訓練的人無法登堂入室，完成一幅好的水墨畫作品，因此以電腦影像處理技術來模擬具有中國繪畫風格的水墨畫是一項值得探討的課題。

在電腦影像處理技術上，運用電腦模擬非寫實照片顯像 (Non-Photorealistic Rendering) 已有一段時間，舉凡素描、油畫、鉛筆、碳筆、水彩等等媒材均有相當多的研究[2]。然而墨汁在宣紙上的墨散現象實在太複雜，墨汁與宣紙初始狀態不同，擴散後的墨跡便大相逕庭。

本研究深入探討墨汁與宣紙的性質，發現墨汁中所添加膠的濃度除了會影響擴散速度外，墨汁乾燥的過程中碳顆粒會被膠穩固的黏結於纖維間而填塞纖維空隙，造成中國水墨畫「無法再修改」的特性，膠會在纖維間形成一層薄膜，降低毛細管現象，如同纖維中所含樹脂成分對吸墨性的影響，造成已滲入墨汁的宣紙開始有了拒墨性及搭墨現象。我們重新建構 Zhang[19]的模型，提出一個水墨擴散模擬方法，並參照水墨畫家在繪畫時的經驗，模擬出水墨畫擴散後的墨韻、”搭墨”及”黑邊墨跡”等現象，提供使用者依自己需求的特效，模擬出逼真且合理的擴散結果，並且將系統拿來模擬一個完整的作品，呈現具有中國水墨畫風格的影像，而不只是模擬一滴墨汁的擴散墨韻。

三、研究方法

水墨擴散主要是運用宣紙與墨汁的墨色暈潤效果，再加上畫家簡潔熟練的筆觸，表達繪畫的神韻，故作畫時碳粒子要多量的留存在紙張的內部，才能顯現墨的厚重感覺，而紙面與毛筆著墨區域的邊緣，應稍微沁出淡墨而有朦朧的韻味。在濃筆與淡筆交

疊處，濃墨墨汁會擴散進入淡筆上，呈現濃淡暈染的羽狀漸層紋路。運筆中兩筆筆跡之間若有較長間隔，交搭處會出現無墨色而微白的水痕（搭墨現象），則更有筆墨以外的趣味，這是水墨畫家追求的特殊墨韻效果。

水墨畫的擴散原本就是一種墨汁與宣紙交互作用的物理現象，而這種複雜的擴散作用不是利用簡單的貼圖方法或單純的擴散公式可以模擬出來的，因此本研究以影響水墨擴散最主要的因素——墨汁與宣紙為探討對象，重新建構一個模型，這個模型是以修改 Zhang[19]的方法為基礎，將每個宣紙單元視為一個性質不相同的纖維筒，並加入碳、水、膠三個墨汁主要成分於模型中，說明碳與膠於水份乾燥過程對於宣紙結構產生的影響。我們將墨汁在宣紙上的擴散現象以細胞自動機(Cellular Automata)的模式[27]模擬，在每一個 cell 中除了墨汁的動態擴散模組外，我們特別根據宣紙及墨汁特性，強調纖維、水、碳粒子與膠等因素的互動關係，模擬出水墨畫拒墨、搭墨及黑邊墨跡等現象，最後展示出水墨畫擴散後的墨跡及水墨畫家作畫時要求的特殊效果。

由於宣紙中纖維的分布狀態不定，每一個cell與其相鄰的八個cell均有相當大的關聯，故我們將Cellular Automata中cell的關係以Morre Neighborhood System來計算，如圖 1；每一個cell代表一個宣紙單位，我們以Papel(Paper Cell)表示。圖 2 為兩個相鄰Papel的結構圖，其中 B_i 代表Papel i的基量， B_k 代表膠凝固於纖維後產生阻塞的作用，墨汁未滲入纖維前 G_i 設為 0， C_i 代表Papel i的含水量， W_i 代表毛筆滲入Papel i內的水量，Papel i與相鄰的Papel k間墨汁透過毛細管流通，用 TH_k^i 代表水分子由Papel i擴散至Papel k的最低門檻。

$TH_k^i = B_i + G_i + C_i$ ，擴散最低門檻 TH_k^i 以上以虛線表示，代表墨汁可以擴散到相鄰Papel。

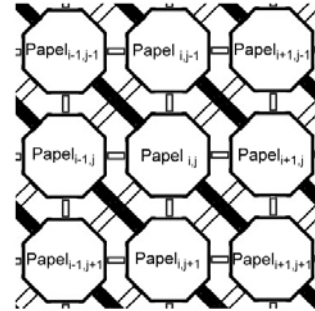


圖 1 Morre Neighborhood System

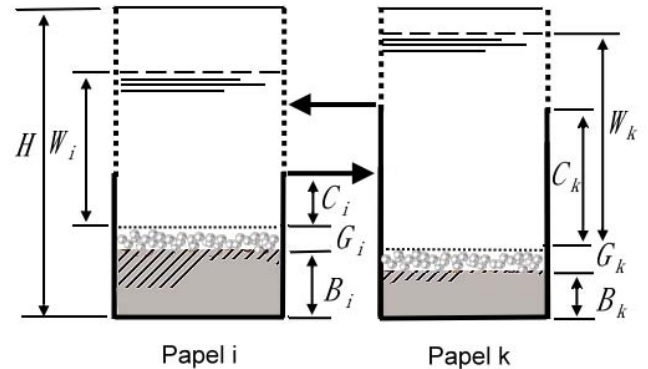


圖 2 兩個相鄰Papel 內部結構圖

水墨畫的擴散現象主要發生在墨汁與宣紙的互動關係，因此產生一張適當的宣紙結構極為重要，不同的宣紙結構應該呈現不同的擴散紋路。宣紙的結構是由隨機分佈的纖維、膠及少量雜質的紙漿組成，我們定義一個宣紙的結構，在每個Papel中包含宣紙的主要成分，其結構如下：

structure Paper() {

```

int Fibers;      //纖維數量
float W;        // 滲入 Papel 的水量
float C;        //纖維最大含水量
float I;        //含碳粒子數量
float G;        //膠數量
float B;        //Papel 的基量
float Gap;      //纖維間隙
float  $\Phi$ ;    //碳顆粒平均直徑
}

```

在此宣紙結構中，Zhang 僅定義紙張的 W 、 C 、 I 、 B 等參數，我們發現這樣的參數不足以表示紙張的真正特性，因此另外加上 $Fiber$ 、 G 、 Gap 、 Φ 等參數。宣紙上的纖維是以 Bezier function、sine curve 及 line 的方式產生，每一條纖維的位置及方向是呈現亂數分布，在纖維經過的 Papel 上將參數 $Fibers$ 加一，最後根據 $Fibers$ 數量估算出紙張上各 Papel 的基量 B 、含水量 C 及纖維間隙 Gap 等相關參數。圖 18 Papel i 內各參數中； H 代表宣紙的厚度，宣紙的厚度與纖維數量將提供水分積存的空間，宣紙越厚、纖維數越多，Papel 可以提供盛裝墨汁的數量及含水量越多，在提供相同的墨量下，墨汁擴散出去的範圍較小。

另外 B_i 、 C_i 分別是代表 Papel i 內含有碳酸鈣 ($CaCO_3$) 等雜質的基量，及纖維的含水量。因為纖維是以亂數的方式分布， B_i 及 C_i 在每一個 Papel 中應該不同，當 Papel i 上每經過一條纖維， B_i 便減去 ΔB 以便擴張 Papel i 的儲水空間，同時纖維的含水量 C_i 增加 ΔC ，纖維的密度增加，擴散的孔隙 Gap 變小，各參數設定如下：

$$(B_i, C_i) := (B_i - \Delta B, C_i + \Delta C),$$

$$Gap = 0.01 - K \cdot \frac{Fibers}{\max} \quad (1)$$

公式中 k 是纖維孔隙的係數， $Fibers$ 是個別

Papel 中的纖維數量， \max 是 Papel 最大的纖維數。最後再根據這些參數計算出水分子流出的最小門檻 $Pipe$ 。

作畫時墨汁傳送到宣紙上的數量與毛筆運筆的速度、毛筆含水量、墨汁濃度有關，因此我們將每一筆劃的墨汁定義如下

```

structure Ink () {
int x,y;      //筆觸中心座標
float S;      //運筆的速度
float  $W_{quantity}$ ; //毛筆含墨量
float  $I_c$ ;      //墨汁濃度
float  $\Phi_i$ ;    //碳顆粒平均直徑
float  $G_c$ ;    //含膠濃度
}

```

為了模擬墨汁在宣紙的擴散行為及擴散的一些特殊效果，我們將系統分成宣紙模組載入、讀取筆劃資料、墨汁擴散模組、顯像模組等幾個步驟並分開執行，系統模擬架構如圖 3。

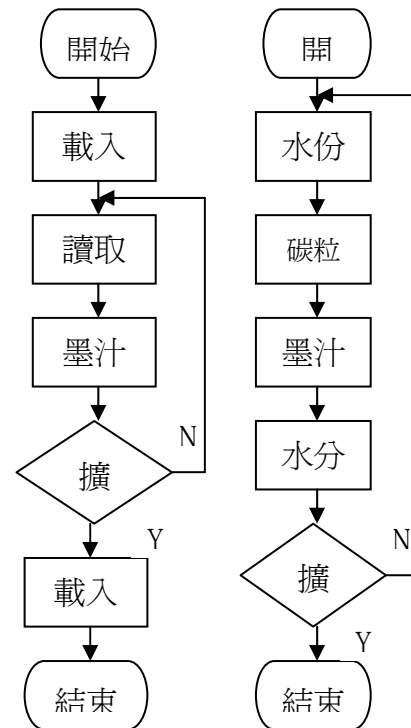
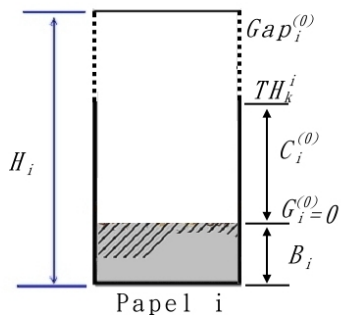
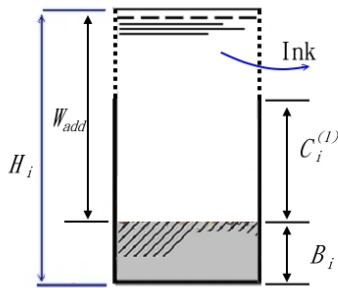


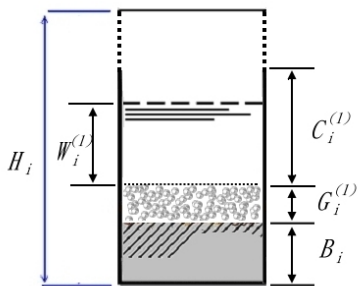
圖 3 系統模擬架構



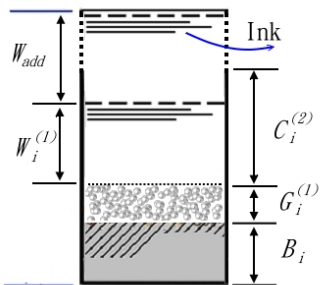
(a)



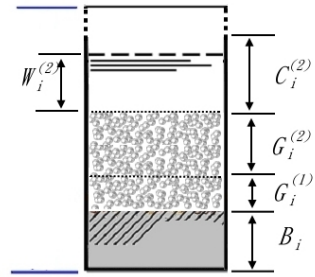
(b)



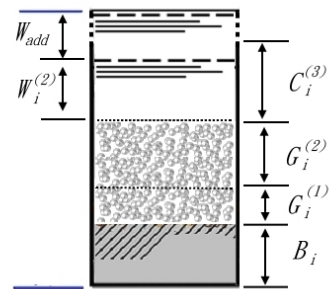
(c)



(d)



(e)



(f)

圖 4 墨汁擴散狀態圖，(a)未滲入墨汁，(b)加入第一筆，(c)第一筆擴散後，(d)加入第二筆，(e)第二筆擴散後，(f)加入第三筆

圖 4 是墨汁滲入Paper及水乾燥過程的示意圖，在每個擴散時間裡膠與碳的沉澱隨時在改變纖維空隙，進而影響第二筆以後墨汁的滲入。圖(a)表示尚未滲入任何墨汁，Paper內僅有固定的基量 B_i ，且未含有任何的膠及碳($G_i=0$)。圖(b)是加入第一筆後的情形， W_{add} 是加入的墨量，墨量超過擴散的門檻 TH_k^i ，墨汁開始向相鄰的Paper擴散。圖(c)是第一筆擴散及乾燥後的情形，膠於擴散過程中除部份隨著水擴散出去，一部分凝固後填塞纖維孔所佔有的空間，以 $G_i^{(1)}$ 表示，同時纖維含水量減少 ΔC ，擴散門檻 TH_k^i 跟著產生變化。圖(d)是加入第二筆的情形，因為

纖維筒的空間變小，能夠加入的墨量 W_{add} 顯著減少，這是拒墨現象發生的原因。圖(e)是第二筆被擴散及乾燥後的情形， $G_i^{(2)}$ 是膠再凝固而產生堵塞的空間。圖(f)是加入第三筆的情形，Papal的含水量 $C_i^{(3)}$ 變得更少，而能夠加入的墨量 W_{add} 甚少。

墨汁的擴散分三個維度分別模擬，水分子是擴散的載體，當水分子有擴散行為時，碳顆粒與膠才依一定比例擴散出去，當水分子靜止，碳分子則逐漸沉澱於纖維中，最後被膠完全凝固。

當毛筆接觸到宣紙表面時，纖維會將墨汁從毛筆吸入纖維層中，吸入的數量依毛筆上墨汁的數量、毛筆運筆速度及宣紙的纖維數量而定，毛筆移動速度慢，毛筆上的墨汁有比較充分的時間滲入宣紙的Papal內，當吸入Papal內的水量 W 填滿至宣紙表面，滲透的現象立即停止，毛筆含著剩餘的水量，直到毛筆移動到下一個Papal上。若毛筆移動速度過快或沒有墨汁，Papal內將填入較少或甚至不被填入任何墨汁，於書法寫作時，這種於筆跡中出現的白色未著墨的痕跡稱為「飛白」。墨汁滲入宣紙的數量 W_{add} 如公式 2。

$$W_{add}=(H-B-G-W_i)*W_{quantity}, \quad (2)$$

其中 $W_{quantity}$ 表示毛筆上墨汁的數量。墨汁滲入纖維層後，根據 Morre Neighborhood System，水份子開始向相鄰的八個 Papal 擴散，擴散的行為如公式 3。

$$W_i := W_i + \sum_{k=0}^{k=7} (\Delta W_i^k - \Delta W_k^i), \quad (3)$$

式中 ΔW 表示兩個 Papal 內水的流量， ΔW_k^i ，表示水由 Papal i 流向 Papal k， ΔW_i^k 表示水 Papal k 流向 Papal i。流動狀態如圖 22， $\Delta W_i^k, \Delta W_k^i$ 分別定義如下：

$$\Delta W_i^k := \max\{0.0, 0.125 \cdot a \cdot \min[(B_k + G_k + W_k) - (B_i + G_i + W_i), (B_k + G_k + W_k) - TH_i^k]\},$$

$$\Delta W_k^i := \max\{0.0, 0.125 \cdot a \cdot \min[(B_i + G_i + W_i) - (B_k + G_k + W_k), (B_i + G_i + W_i) - TH_k^i]\}$$

$$, TH_i^k := \max\{B_i + G_i, B_k + G_k + C_k\},$$

$$TH_k^i := \max\{B_k + G_k, B_i + G_i + C_i\}, \quad (4)$$

式中 a 表示擴散參數， TH_i^k 、 TH_k^i 分別表示 Papal k 流向 Papal i 及 Papal i 流向 Papal k 的最低門檻值。

實際作畫時，纖維中的水分會逐漸的乾燥，最後只剩下碳粒子呈現黑色的墨韻，因此我們在每次的擴散循環後便減去適量的水分子，如公式 5，

$$W_i := W_i - \Delta W. \quad (5)$$

當 Papal 內水分子的數量低於 Papal 擴散最低門檻 TH ，則此 Papal 不再向外擴散，直到有新的墨汁重新被填入。

碳粒子的擴散是伴隨著水分子的擴散而發生的，當水擴散越多，被攜帶而擴散到相鄰 Papal 的碳粒子也越多，碳粒子的擴散行為如公式 6。

$$I_i := I_i + \sum_{k=0}^{k=7} (\Delta I_i^k - \Delta I_k^i),$$

式中 $\Delta I_i^k, \Delta I_k^i$ 分別表示由 Papal i 流向 Papal k 及 Papal k 流向 Papal i 的碳粒子濃度，其定義如下：

$$\Delta I_k^i := \Delta W_k^i \left(\frac{I_i}{W_i} \right), \quad \Delta I_i^k := \Delta W_i^k \left(\frac{I_k}{W_k} \right). \quad (6)$$

I_i, I_k 表示 Papel i 及 Papel k 的碳粒子數

依照 Kunii[13]等學者的做法，認為墨跡邊緣水擴散時變化梯度較大，邊緣碳的濃度突然升高，依布朗運動現象碳粒子的移動距離較小，故會有碳的堆積而形成黑邊。我們認為除了以上因素，黑邊墨跡跟碳顆粒及纖維空隙產生的過濾效應應該也有很大的關係，況且畫家作畫必須在筆劃上多次重疊，水量的變化梯度經常改變，不像 Kunii 只是模擬固定的一顆墨滴。因此我們首先計算每一個 Papel 內纖維空隙的大小。

發生過濾效應的另一個因素是碳顆粒大小，當碳粒子的直徑 ϕ 大於纖維的孔隙 Gap ，過濾效應越嚴重，擴散到相鄰的碳粒子數量越少，尤其在筆跡邊緣，擴散開始時初始區邊緣附近的 Papel 水擴散變化量大，顆粒較粗的碳便被纖維攔阻下來，同時阻塞纖維空隙造成更嚴重的過濾效應，而筆劃的中心水流差異較小，碳顆粒懸浮在水中較容易隨擴散而移動，過濾效應不明顯，至於擴散區的碳粒子均已經過空隙的過濾，顆粒較小，故擴散後墨色均勻而且較淡。我們為模擬過濾效應，修改碳粒子擴散模組如公式 7。

$$\Delta I_k^i = \Delta W_k^i \left(\frac{I_i}{W_i} \right) \cdot e^{-\frac{\Delta W_k^i (\phi_i - \phi_k)}{Gap_i}},$$

$$Gap_i := Gap_i - \alpha \cdot \Delta I_k^i,$$

$$\phi_k = \phi_i - \beta \cdot \Delta W_k^i \quad \text{if } \phi_i \geq Gap_i,$$

$$\Delta I_k^i = \Delta W_k^i \left(\frac{I_i}{W_i} \right) \quad \text{if } \phi_i < Gap_i. \quad (7)$$

式中 ϕ_i 表示碳粒子的平均直徑， Gap_i 表示纖維孔的平均間隙，若碳粒子的平均直徑大於纖維平均間隙 $\phi_i \geq Gap_i$ ，較粗的碳

粒子被過濾下，擴散到相鄰 Papel 的碳粒子減少，且以指數的比率遞減，而在擴散區域，碳粒子的直徑小於纖維間隙 $\phi_i < Gap_i$ ，過濾效應不發生。

墨汁中添加的膠能夠完全融於水中，在水分子擴散時膠會隨著水擴散到相鄰的 Papel，而部分膠也會隨著水乾燥而逐漸黏著於纖維，擴散到鄰近 Papel 的膠濃度逐漸降低。膠的擴散現象如公式 8。

$$G_i := G_i + \sum_{k=0}^{k=7} (\Delta G_i^k - \Delta G_k^i),$$

式中 $\Delta G_k^i, \Delta G_i^k$ 分別表示由 Papel i 流向 Papel k 及 Papel k 流向 Papel i 的膠的數量，其定義如下：

$$\Delta G_k^i := \Delta W_k^i \left(\frac{G_i}{W_i} \right),$$

$$\Delta G_i^k := \Delta W_i^k \left(\frac{G_k}{W_k} \right), \quad (8)$$

G_i, G_k 是 Papel i 及 Papel k 內含膠的數量。

在筆跡擴散中，邊緣的碳粒子濃度較高及受到過濾效應作用，相較之下無法像膠與水快速的擴散至較遠的地方，筆跡的周圍便出現一道含碳較少白色水跡，當水分子乾燥時，膠逐漸凝固在纖維的表面，並填塞大部分的纖維孔，受到拒墨的現象，第二筆以後的墨汁也較不容易再滲透這到水跡內，因此在第一筆筆劃周圍出現白色的搭墨。我們假設水份乾燥的速率為 D_{rate} ，Papel 內膠凝固所佔空間 G_i 及纖維水含量 C_i 的變化如公式 9

$$G_i = G_i + \alpha \cdot \Delta G_i \cdot D_{rate},$$

$$C_i = C_i - \beta \cdot \Delta G_i \cdot D_{rate}. \quad (9)$$

其中 D_{rate} 表示水蒸氣乾燥的速率。當 $B_i + G_i + C_i$

> H 表示纖維層的孔隙幾乎被填塞，Paprel 的含水量修正為 $C_i = H - B_i - B_i$ 且 $TH_k^i = H$ 。

四、計畫成果自評

我們利用 Bourlan C++ Builder 軟體工具開發模擬程式，在 Intel Pentium III 1G MHz、512Mb 主記憶體，Windows 2000 作業系統的 PC 機器上模擬。為了將模擬出來的圖形與真實的中國水墨畫作比較，我們用墨汁在宣紙繪製幾個範例，並將筆跡檔分別輸入系統中模擬。首先模擬墨汁擴散的墨韻，我們將一個圓形的墨汁輸入擴散模型上，並設定各種的宣紙紋路，結果出現不同紋路的墨跡，如圖 25，在墨跡的邊緣產生不規則的墨韻，比 Kunii 擴散方程式擴散後的墨跡，圖 26，呈現出更接近真實的結果。在墨滴的墨散中調整墨汁的濃度，如圖 27，墨汁量越多，擴散的速度越快且墨跡範圍越廣。調整墨汁的碳濃度，模擬呈現的結果碳濃度越低，呈現的墨韻越淡，如圖 28。

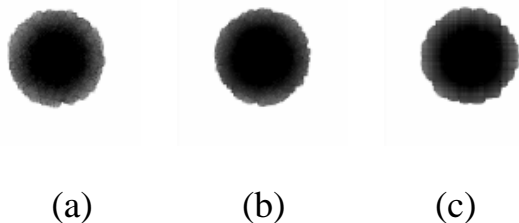


圖 25 以我們的模型模擬三種不同纖維紋路宣紙擴散後的墨跡，(a) bezier function，(b) line

為了執行墨汁滲入宣紙的行為，並計算宣紙內水分及碳的數量，我們首先讀取第一個筆劃的圖形，找出筆劃邊界，將筆劃內的圖形灰階值轉換成碳的數量，並依照作畫的需求輸入不同水量及膠量，滲入各對應的 Pape內，而圖形空白的部分表示毛筆未接觸的區域，水量、膠量及碳量皆設定為零，輸入的筆劃如圖 5。我們先讀取第一筆竹葉的

筆劃載入模型上，模擬擴散及拒墨現象，每一筆劃間隔 15 個擴散 steps（穩定約需 40 steps），模擬畫家繪畫時兩筆畫的時間差，然後依序讀取及模擬第二及第三筆資料。我們分別將三個筆劃設定成不同的碳濃度輸入系統，模擬各種碳濃度的筆劃交疊下呈現拒墨的現象，擴散後的拒墨結果如圖 6，圖 6(a) 是以真實的墨汁稀釋二十倍後畫在玉版宣紙上呈現出來的水墨畫，每一筆劃之間相隔約一秒。我們參照真實水墨畫的碳濃度，設定淡墨 $I_c=0.033$ 濃墨 $I_c=0.1$ 模擬，結果如圖 (d)(f)，經過比對發現與真正水墨畫拒墨現象符合。

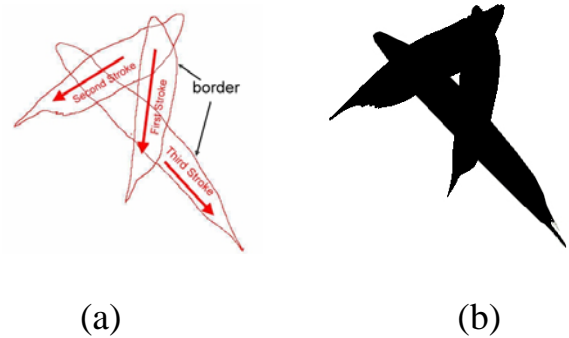
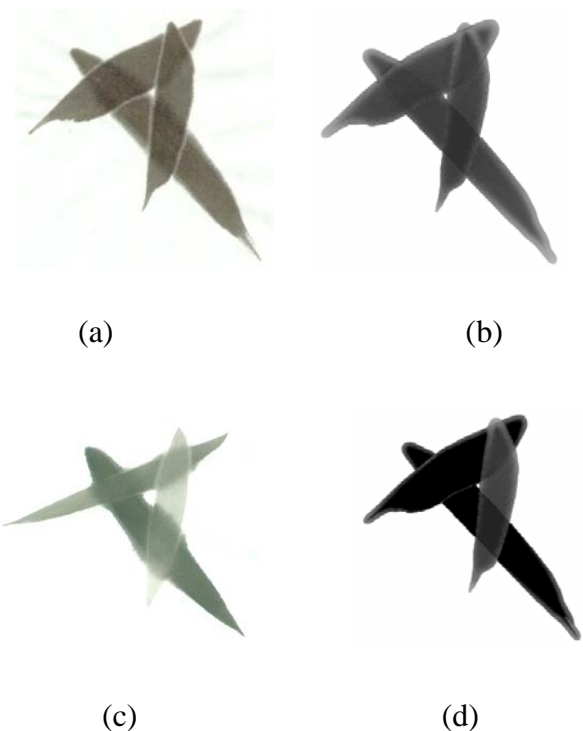


圖 5 筆劃資料，(a)筆跡邊界，(b)三筆筆跡圖形



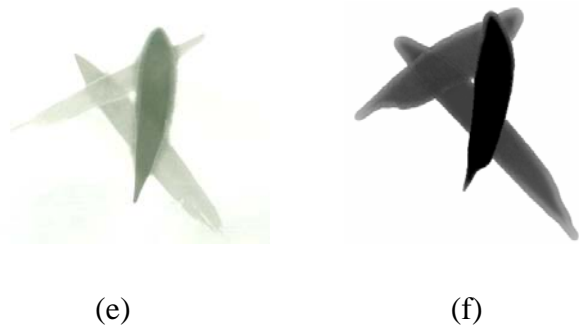


圖 6 模擬不同碳含量的拒墨現象，(a)、(c)、(e)為實際水墨畫，(b)、(d)、(f)是以我們的模型模擬出來的結果

在以上的模擬中，我們成功的模擬出拒墨的現象，在圖 6 三個竹葉間也可以清楚發現搭墨現象的存在。同時我們也能依照畫家的需求，適當的調整各筆劃擴散間隔的時間，模擬出不同的搭墨寬度，在搭墨現象上的模擬，我們可以做到別人達不到的效果。

本研究以水墨畫作畫時使用的墨汁及宣紙為模擬對象，探討墨汁在宣紙上的擴散行為，並提出簡易的擴散模型，計算水分子、碳分子、膠及宣紙纖維的互動關係。實作結果證明可以模擬出水墨的特殊效果，這個以墨汁特性為主的處理方法，可以達到其他方法無法模擬的效果，讓水墨擴散後的效果逼近水墨畫家的作品，並且呈現別人無法達到而真實水墨畫存在的特殊墨跡是本研究主要的貢獻。

五、參考文獻

- [1] 朱子弘. "國畫色彩研究." 藝術家出版社, 1984.
- [2] John Lansdown. "A Review of Nonphotorealistic Techniques." IEEE Computer Graphics and Applications, 1995, P29-P37.
- [3] Steve Strassmann. "Hairy Brushes." ACM SIGGRAPH, 1986.
- [4] M.P. Salisbury, S.E. Anderson, R. Barzel. and D.H. Salesin.

"Orientable Texture for Image-Based Pen-and-Ink Illustration." Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics & interactive techniques, ACM SIGGRAPH, ACM Press, pp. 401-406, 1997.

- [5] Peter Litwinowicz. "Processing Images and Video for an Impressionist Effect." Proceedings of ACM SIGGRAPH 97, 1997.
- [6] S.Z. Wen., Z.C. Shih. and H.Y. Chiu. "The Synthesis of Chinese Ink Painting." National Computing Symposium '99, pp. 91-100, 1999.
- [7] C.W. Hsu., D.L. Way. and Z.C. Shih. "The synthesis of rock texture in Chinese Landscape Painting." Proceedings of the 2000 International Computer Symposium, pp. 52-59, 2000.
- [8] Yung-Nien Chen. "Non-Photorealistic 3D Rendering in Chinese Painting System." M.S. Thesis, National Cheng Kuna University, 2001.
- [9] Ken Perlin. "An Image Synthesizer." In SIGGRAPH 1985, Computer Graphics Proceedings, pp. 199-201. ACM Press/ACM SIGGRAPH, 1985.
- [10] David Small. "Simulating watercolor by modeling diffusion, pigment, and paper fibers." In Proceedings of SPIE '91. February 1991.
- [11] Cassidy J. Curtis, Sean E. Anderson. "Computer-Generated Watercolor." Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, 1997, P421-429.
- [12] Guo Q, Kunii T. "Modeling the diffusion painting of 'sumie'." Modeling in computer graphics

- (Proceedings of the IFIP WG5.10), Berlin: Springer, 1991, p329-338.
- [13] T. Kunii. "A Diffusion Model for Computer Animation of Diffuse Ink Painting." Computer Animation '95 proc. Page 98-102 1995.
- [14] Sanboh Lee. "Ink diffusion in water." European Journal of Physics, February 20 , 2004/3/25.
- [15] Chung-Ming Wang etc. "On Realistic Ink Diffusion Synthesis for a Calligraphic Learning System." International Journal of Computer processing of Oriental Languages Vol. 16, No.2 2003 105-118.
- [16] Ren-jie Wang., CM Wang. "Toward a Physically-Based Ink Diffusion." M.S. Thesis, National Chung Hsing University, 2001.
- [17] Jintae Lee. "Diffusion rendering of black ink paintings using new paper and ink models." Computer & Graphics 25, 2001, 295-308.
- [18] Sheng-Wen Huang., Der-Lor Way., Zen-Chung Shih. "Physical-based Model of Ink Diffusion in Chinese Ink Paintings." Journal of WSCG' 2003, February 3-7, 2003.
- [19] Qing Zhang etc. "Simple Cellular Automaton-based Simulation of Ink Behavior and Its Application to Suibokuga-link 3D Rendering of Trees." The Journal of Visualization and Computer Animation, 10, 1999, 27-37.
- [20] Jintae Lee. "Simulating Oriental Black-Ink Painting." IEEE 1999.
- [21] Qinglian Guo., L. Kunii. "Nijimi" Rendering Algorithm for Creating Quality Black Ink Painting." IEEE Proceedings of the Computer Graphics International, 2003.
- [22] 李亞東. "中國製墨技術的源流." 科技史使文集, 十五輯, 1989, pp.113-127.
- [23] 詹悟."墨.", 台灣省立彰化社會教育館, 1994, pp. 53-80.
- [24] 張豐吉. "紙質分析.", 台灣省立彰化社會教育館, 1994, pp. 74-80.
- [25] Chung-Ming Wang., Ren-Jie Wang. "A Study of Photorealistic Ink Diffusion." Journal of Engineering, National Chung Hsing University, Vol. 14, No.1, pp.47-56, 2003.
- [26] Yung-tian Cho. "Preparation of Chinese painting paper from coba husk." Mast thesis of nchu, 1998.
- [27] Stephen Wolfram. Theory and Applications of Cellular Automata, World Scientific, Singapore, 1986.