

## 水溶性色えんぴつ画における加水効果のCGモデリング

高木 佐恵子 藤代 一成

お茶の水女子大学 理学部 情報科学科  
〒112 東京都 文京区 大塚 2-1-1

一般に、CG画像には目が疲れやすいものが多い。画像のいたるところに焦点が合っていることや、ペンキで一様に塗ったような印象を受けることがその理由と考えられる。これらの解決手法は種々存在するが、我々は、両問題点を解決する目に優しい画像の一例として、色えんぴつ画に注目し、人に優しい機能を実現するデジタルペイントシステム：**Pumpkins** (a Painting Unit of Multi-Purpose Kind and INtelligent Stationery) の開発の一環として、色えんぴつ画作成機能の実現を試みている。

本研究では、色えんぴつ画の描画プロセスを明らかにし、プロセスにおいて重要な柱の1つである、加水操作フェーズの再現を試みる。マイクロ構造の観察より、加水効果の表現には1993年にB. Cabral 他によってSIGGRAPHで発表された、LIC (line integral convolution) [4] と呼ばれるアルゴリズムの利用を考えた。LICとは、与えられたベクトル場から得られる流線に沿って通過する各ピクセルの値を平均化して、中央のピクセルの新しい値とするフィルタリングである。本論文では、元のアルゴリズムを加水操作に適応するように拡張することにより、加水操作フェーズを再現する。

## Modeling of Pigment Spreading and Blending with Water in Water-Soluble Colored Pencil Drawings

Saeko Takagi and Issei Fujishiro

Department of Information Sciences, Faculty of Science,  
Ochanomizu University  
2-1-1 Otsuka, Bunkyo-ku, Tokyo 112, Japan

The authors have been developing a proprietary digital paint system named **Pumpkins** (a Painting Unit of Multi-Purpose Kind and INtelligent Stationery). The system can be differentiated from existing commercially - avail ones in that it provides artists and designs with a new drawing tool with water-soluble colored pencils. In this paper, the process of water-soluble pencil drawing is analyzed to reveal the fundamental two subprocesses: initial pigment distribution and redistribution of pigment with water. Then the latter subprocess is focused on, and spreading and blending of pigments with water is modeled by extending a recent image filtering **LIC**(Line Integral Convolution, B. Cabral, et.al., 1993).

## 1 はじめに

ここ数年の間にめざましい勢いで広く普及したCGであるが、一般に、CG画像には目が疲れやすいものが多い。ディスプレイ自身が目を疲れさせてもいるが、画像そのものに理由を限定してみた場合、特殊なアート作品を除いて、画像のいたるところに焦点が合っていることや、ペンキで一様に塗ったような印象を受けることが理由としてあげられる。その解決例として、前者については、レンズの効果を考慮したカメラの正確なモデリングにより、焦点外はぼやけるようなレンダリング手法の研究[1]がある。後者については、ラジオシティ法によるやわらかな陰影付け[2]や印象画家の作風を再現する研究(例えば[3])などがある。

本研究では、両問題点を解決するような目に優しい画像の一例として、独特のやわらかな風合いをもつ色えんぴつ画に注目する。色えんぴつは、油彩や水彩、水墨画などと異なり、コントロール性がよく、非常に細かなところまでも極めて正確に描くことのできる高い制御性を有する。また、紙の選び方、色えんぴつの握り方、削り方、動かし方などで対象の描写力を一段と上げられるというすばらしい特長がある。色えんぴつの質の向上に伴い、これらの機能が十分に活かされるようになり、色えんぴつ画も独自の美術分野を形成するようになってきた[8]。このような現状から、色えんぴつ画はCGの対象としても注目に値すると考えられる。しかし、色えんぴつ機能を搭載している既存の商用ペイントシステムは少なく、Art School (Fractal Design Corporation) のように機能をもってはいるが、色えんぴつ独自の描画手法を網羅していないケースがほとんどである。

このような背景から、我々は完全な色えんぴつ画作成機能を組み込んだ、人に優しい機能を実現するデジタルペイントシステム：Pumpkins (a Painting Unit of Multi-Purpose Kind and Intelligent Stationery) を開発中である。先行研究[11]をもとにして、本論文では、色えんぴつ画の描画プロセスを確立し、プロセスにおいて特徴的な加水操作サブプロセスの再現を試みる。まず描画プロセスを示し(第2節)、加水効果に注目して水溶性色

えんぴつ画のマイクロ構造を観察する(第3節)。加水効果モデルは、観察結果をもとにLIC (Line Integral Convolution) [4]と呼ばれる画像フィルタリングを拡張して利用することを考え(第3節)、実装する(第4,5節)。

## 2 色えんぴつ画

### 2.1 色えんぴつ画の描画プロセス

文献[9]を参考に色えんぴつ画の基本的な描画プロセスをブロック図に表現すると図1のようになる。

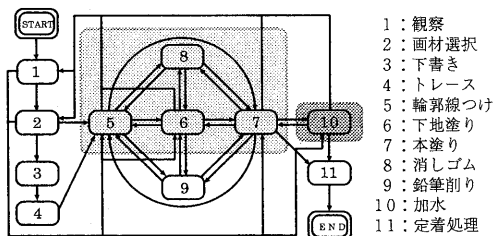


図1: 色えんぴつ画の描画プロセス

対象を十分観察する(1)ことから、描画は始まる。対象の観察はどんな芸術活動においても最初に行われるべき活動である。観察の後、描く対象に合った画材を選択する(2)。色えんぴつ画は紙の種類や色えんぴつのタイプによって大きく左右されるので、十分に吟味したい。

画材を選択後、別の紙に行った下書きをトレースし、輪郭線を描く方法(2→3→4→5)と、下書きをしないで直接輪郭線を描く方法(2→5)がある。どちらのプロセスを経ても、その後、下地塗り(6)、本塗り(7)を行う。下地塗りとは、見当をつけるために薄く塗ってみることや、グリザイユなどの重ね塗りの手法の前処理を指す。グリザイユとは“グレーの基調”を意味するフランス語で、あらかじめグレーなどの濃い色を塗ったベースの上に色を塗ることにより色に深みをもたせるという、古くから画家が用いてきた手法である。また、本塗りとは最終的な色を塗ることやバーニッシングという光沢をもたせる技法などを指す。輪郭線つけ、下地塗り、本塗りは適宜繰り返される。

また、消しゴム(8)と鉛筆削り(9)も必要に応じて使う。消しゴムは、単に間違いを消す、というだけでなく、ハイライト効果を出すなどにも利用でき、

消しゴムのもつ効果は単なる undo とは別のものである。また、色えんぴつは芯の形状により様々な表現が可能で、鉛筆削りを怠っては期待するような効果は得られない。“塗る”という操作自体も芯先をなめらかに削る効果があるので、その変化を積極的に利用する描画手法もある。

フェーズ 10 の加水とは、主に水溶性色えんぴつ画において多用される操作である。すべての色えんぴつはある程度水に溶ける [8] が、テレピン油や混色用の無色ペンなどの溶剤を用いれば、タイプを問わず、顔料を溶かすことができる。ただし、水溶性色えんぴつに水を用いた場合と、テレピン油を用いた場合では、粒子の流れ具合など、その効果に大きな差が生じるので、ここでは、水溶性色えんぴつと水との関係にだけ触れることにする。

加水は、水を加える対象や順序によって 3 タイプに分かれる [10] (図 2)。それは塗りの上に水を加える (タイプ 1) という最も一般的なものと、先に濡らした紙に描く (タイプ 2)、色えんぴつの芯を濡らして描く (タイプ 3)、というあまり使われない 2 つからなる。加水操作により得られる効果として、タイプ 1 では、なめらかな混色、なめらかな質感の表現、特に濃い単色で顕著に現れる鮮やかな表色などがあげられる。タイプ 1 を用いることで、より豊かな表現が可能となる。また、タイプ 2 では、にじませながら描くことができ、タイプ 3 では、なめらかに描け、表色も鮮やかになるといった効果がある。

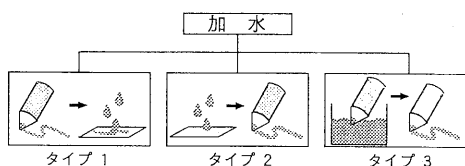


図 2: 3 タイプの加水

描画時は、常に対象を観察することと、色えんぴつを持ち換えるなどの画材の選択が必要なので、フェーズ 5, 6, 7, 10 から観察 (1) と画材選択 (2) への往復パスが存在する。

描画が終了と定着処理 (11) を行う。一種のラッカー溶液を画面上にスプレーすることにより画像を保護するという操作である。この定着処理をもって色えんぴつ画の描画プロセスは終了する。

## 2.2 2つのサブプロセス

ここで、色えんぴつ画の描画プロセスは大きく 2 つのサブプロセスに分割されることに注目したい。その 2 つとは、

1. 紙へ顔料を付着させるサブプロセス (5 ~ 8)
2. 加水操作サブプロセス (加水 (10) のタイプ 1)

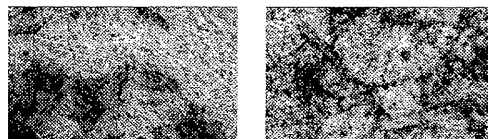
である。第 2 のサブプロセスを加水のタイプ 1 に限定したのは、タイプ 2, 3 は、紙を濡らすことや色えんぴつを濡らすことであり、その操作による効果は紙への付着状態として現れるものなので、紙へ顔料を付着させるサブプロセスへ含まれるからである。

一般的に、色えんぴつ画というと、第 1 のサブプロセスだけを考えがちであるが、第 2 のサブプロセスによる効果を無視しては、色えんぴつ画の表現力の豊かさは説明できない。よって、色えんぴつ画作成機能の実現は、この 2 つのサブプロセスをモデル化することにより可能であると考えられる。その際には、両サブプロセスが紙の肌理や色えんぴつのタイプの影響を受けることを考慮する必要がある。色えんぴつ粒子の付着状態自身はスキャナーなどを介してとり込むことができるので、本論文では、まず加水による粒子の動きの方に注目し、加水操作サブプロセスの実現を行う。

## 3 加水効果のモデリング

### 3.1 加水効果の観察

加水効果をモデル化するにあたり、そのマイクロ構造を明らかにする必要がある。そこで質感の異なる数種の紙を用いて水溶性色えんぴつ画を作成し、上面に水を塗る前後をデジタルマイクロスコープで観察した (図 3)。



a : 軽く塗った面

b : 加水後

図 3: ホワイトピーチケント 上面拡大図  
(倍率: 5000 倍)

その結果、どの紙においても、軽く塗っただけではまばらに付着していた顔料 (同図 a) が、水をふくま

せた筆でなぞることによって紙の繊維の隅々にまで行き渡ることが明らかになった(同図b)。この観察結果に基づき、加水効果のモデリングに、LIC[4]と呼ばれるフィルタリングの利用を考えることにする。

### 3.2 LIC とは

LIC は、1993年に SIGGRAPH で B. Cabral 他によって発表されたアルゴリズムで、与えられたベクトル場から得られる流線に沿って通過する各ピクセルの値を平均化し、中央のピクセルの新しい値とするフィルタリングである。平均化に参加させるピクセル群はカーネルと呼ばれる。図4にその原理の概念図を示す。画像にLICを施すと、与えられたベクトル場に沿って汚れた(smearred)ような画像が生成される。カーネルの長さが汚れ具合に影響することは、アルゴリズムを考慮すれば、容易に想像できる。

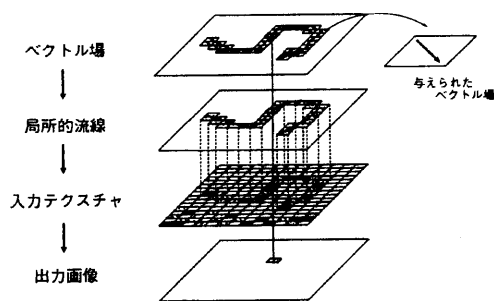


図4: LICの原理

LIC は、発表されて以来、主として流体データの可視化で用いられてきた。文献[5]では、LICの高速化とテクスチャアニメーションについて、また、文献[6]では、平面上に限られていたLICを曲面上まで拡張することなどについて論じている。どちらもアプローチは異なっているが、流体データを可視化することを目的としている。

文献[4]では流体の表現の他に、動作によるぶれの表現、芸術的な効果として写真を油絵風にする、といった試みもなされている。また、文献[5]では、LICについて、コンピュータアートからサイエンスフィクショナルビジュアルライゼーションまで、広範囲にわたり利用されていると述べられている。しかしながら、やはり流体の表現に関する利用が多い。

### 3.3 LICの拡張方針

第3.1項で、本来サイエンスフィクショナルビジュアルライゼーションで用いられてきたアルゴリズムであるにもかかわらず、LICを色えんぴつ画に利用する着想を述べた。その原点は、描画プロセスにおける加水フェーズのタイプ1(図2)の筆の方向を、LICにおけるベクトル場として与えることによって、加水効果の再現が可能なのではないか、と考えたことにある。そこで、実際にLICを利用した運筆のモデリングを考えると、色えんぴつ画とLICは表1のように対応づけられる。

表1: 運筆のモデリング

色えんぴつ画	LIC
筆の方向	ベクトル場
筆の速度	カーネルの長さ
筆跡	適用領域
筆の往復回数	LICの計算回数
手ぶれ	ベクトルに擾乱を付加

しかしながら、表1の対応づけはあくまでも元のアルゴリズムに存在している要素に運筆の要素をあてはめただけであり、それは全ての運筆の要素を網羅しているわけではない。例えば、運筆によるじみの方向性や筆圧の偏りなどは、元のアルゴリズムでは再現できない。そこで、本研究では次の4点を重視したLICの拡張を行うことにした。

1. 紙の色はにじまない
2. にじみの方向性
3. 水に溶解している顔料の量
4. 筆圧の偏り

この解決すべき4点が再現できれば、LICは運筆モデリングに利用できると考えられる。その具体的拡張方針は次のように定めた。

- a. 顔料の色を紙の色から区別
- b. すでに値の更新されたピクセル値を次のピクセル値の計算に反映
- c. 注目するピクセルからの距離に応じた重み付け
- d. 筆の中心に最も圧力がかかると考え、筆跡の中心から外側へ向かう拡散効果を付加

拡張すべき点と拡張方針とは、1はa、2はb,c、3はc、4はd、という対応をなす。2と3は現象として似ているので、拡張方針cが重なっている。

#### 4 加水モデルの実装評価と改良

実装は米国 SGI 社 Indy システム上で OpenGL により行った。拡張に関わらず、明らかに満たされるべき共通する基本的な事項として次の 3 点を設定した。

1. 現実の混色と同様の効果を得るため、カラーモデルには HSV を用いる [7]
2. LIC を施す領域として、筆跡に近い形状である、楕円を滑らせた軌跡を採用する
3. 粒子の流れを考慮し、ベクトル方向の先端のピクセルの値とする

サンプルとする画像はブルー系 4 色の色えんぴつ画をスキャナでとり込み、Pumpkins 独自のデータ型 [12] にした後、Pumpkins に入力し、表示した画像とする。また、共通するパラメータは、最初に与えるベクトル場は水平右方向、同じく最初に与えるカーネルの長さは 10 ピクセル（画像全体の大きさは  $500 \times 300$  ピクセル）で、領域は横 350 ピクセル、縦 80 ピクセル（楕円の長径 50 ピクセル、短径 40 ピクセル）とした。

#### 4.1 オリジナル LIC

最初に、基本共通項目を考慮した以外は元のアルゴリズムをそのまま実装した (図 5)。

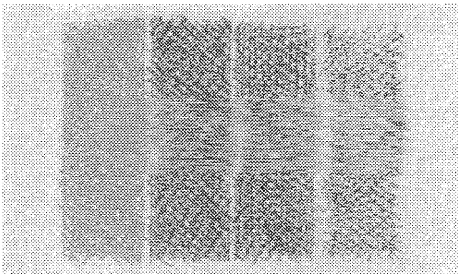


図 5: オリジナル LIC

更新式は次のように表せる:

$$pixel'(i, j) = \sum_{k=0}^{n-1} pixel(i-k, j)/n \quad (*)$$

座標は横方向  $i$ 、縦方向  $j$  とし、 $pixel, pixel'$  には、ピクセル値が格納されている。  $n$  はカーネル長 (ピクセル数) である。

図 5 の色と色の境界の無着色であった部分を見れば明らかのように、元のアルゴリズムでは、紙の色も色えんぴつの色と同様に混色している。問題点は他にも存在するが、紙の色も混色している点は、最も現実からかけはなれている点であり、最初に改良すべきであると考えた。

#### 4.2 顔料の色を紙の色から区別

前述の問題点を解決するため、紙の部分のピクセル値を平均化計算に参加させないようにすることにより、顔料の色を紙の色から区別する拡張を行った。これは、拡張方針 (a) に対応する。

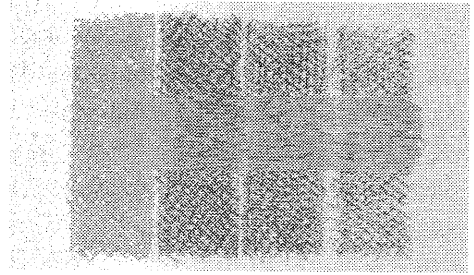


図 6: 顔料の色を紙の色から区別

図 5 における不自然な混色は解消された。しかし、加水という手法はなめらかな質感をもたらすものであるにもかかわらず、図 6 からは感じられない。

#### 4.3 計算値を次の計算に反映

なめらかな質感は、近隣ピクセルの色彩が似通ったものでなくては実現されない。その類似性は、運筆に因るものなので、にじみの方向性を考慮する必要がある。ここで、拡張方針 (b) を実装する。具体的には、ピクセル値を格納しているバッファを計算ごとに書き換えることなので、(\*) 式の  $pixel'$  が不要となる。ただし、計算順序を配慮する必要性が生じる。

図 7 の画像は、計算値の反映のほかに、カーネルの長さやベクトルに擾乱も加えたものである。これらは、てぶれや筆の毛の長さの不均一などを考慮したもので、より自然な効果のために必要と考えられる。

図 7 に示されるように、色がなめらかに混色している。しかし、着色部分と無着色部分との境界部においてなだらかに付着量が変わるところか、差が激しい。これは計算値を次の計算に反映させるだけ

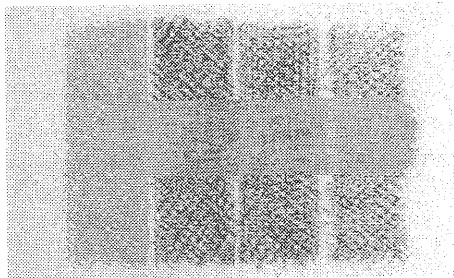


図 7: 計算値を次の計算に反映

では、拡張すべき点 (2) を解決しきれないという事実を示している。

#### 4.4 距離に応じた重み付け

さらに、拡張すべき点 (2) のもうひとつの解決法である、注目するピクセルからの距離に応じて平均化への貢献割合が変化するような重み付けを加えた。この拡張も実際の現象に即したものである。これまでの拡張も含めたピクセル値の新たな更新式を示す。

$$n' = n + (n \times \text{rand}(-1, 1))/3$$

$$ptb = \text{rand}(-1, 1)/5$$

$$\text{pixel}(i, j) = \sum_{k=0}^{N-1} \text{pixel}(i-k, j + \lceil ptb \times k \rceil) / N$$

$\text{rand}(a, b)$  :  $[a, b]$  の値をとる乱数

$n$  : 最初に与えたカーネルの長さ

$n'$  : 擾乱成分を付加したカーネルの長さ

$N$  : 長さ  $n'$  のカーネルのうち、  
顔料が付着しているピクセル数

$ptb$  : ベクトルの擾乱成分 (傾き)

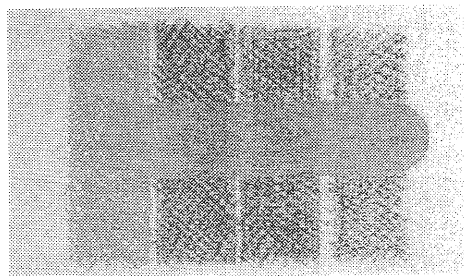


図 8: 距離に応じた重み付け

図 7 と図 8 を比較すると、図 7 では色が流れ過ぎ、という印象を受けるが、それが図 8 では解消されており、大分落ち着いた画像となっている。しかし、

紙の色が非常に細かい縞模様を形成しているようで、あたかも紙の色が流れているかのような印象を受ける。これはベクトル方向の影響の強い現れと考えられ、ベクトルに多少の擾乱成分を付加しても、本当に“擾乱”という程度であるため、効果が弱いものと考えられる。よって、次に拡散効果を明示的に付加することとした。

#### 4.5 拡散効果の付加

拡張方針 (d) の拡散効果の付加は、筆の中心に最も圧力がかかると考え、筆跡の中心から外側へ向かうように与えることにした。具体的には、ランダムに与えた確率が、閾値 (本実験では 0.2) より大きい場合には、 $\text{pixel}(i, j)$  のピクセル値の平均化計算後に上下の未計算のピクセルに対して次のような計算を施す:

$$\text{pixel}(i, j+1) = (\text{pixel}(i, j+1) + \text{pixel}(i, j))/2$$

$$\text{pixel}(i, j-1) = (\text{pixel}(i, j-1) + \text{pixel}(i, j))/2$$

拡散効果を付加するにあたり、領域内での計算順序が問題となる。上述の式が反映されるような計算順序は図 9 のようになる。

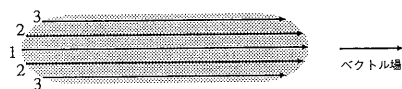


図 9: 領域内の計算順序

このように中心軸上でベクトル方向へ、次は中心軸から上下両方向の 1 列外側でベクトル方向へ、というように順に外側へと計算していくと上述の計算式が方針通りに作用すると考えられる。このように計算して得られた画像が図 10 である。

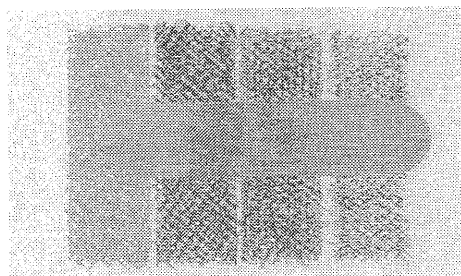


図 10: 拡散効果の付加

図 10 で気になる点は、色えんぴつ粒子の量には保存則が成り立ち、加水により着色領域が増えると、その分、色が薄くなるという事実が、これまでの拡張では考慮されていない点である。また、領域の始まり部分では、領域外の部分となめらかにつながるべきであるにもかかわらず、図 10 では決してそのようになってはいない。

#### 4.6 より適切なモデル

図 10 での問題点を解決するために、もともと無着色であった部分では、紙の色に近づけるため、彩度や明度を操作することにした。また、カーネルが領域外にかかる場合には、領域内の部分のみ計算に参加させることとした。その結果が図 11 である。

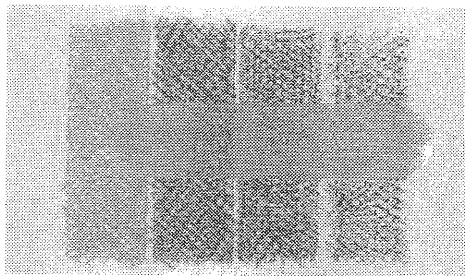


図 11: より適切なモデル

領域外ともなめらかにつながり、無着色であった部分への着色状態も自然である。このモデルが現時点での最終的拡張 LIC である。

#### 5 一般的色えんぴつ画への適用

一般的な画像として、システム名にもなっているカボチャを題材に、グリーン系 2 色、イエロー系 2 色、計 4 色の色えんぴつを用いて描き、前節と同様に Pumpkins 独自のデータ型へ変換後、表示したのが図 12a である。

そして、図 12a に最終的拡張 LIC (第 4.6 項) を適用したのが、図 12d である。LIC を適用した領域は、図 12c において変色している部分で、LIC をかける度に色相を一定量ずらして変色させたので、変色の度合いで回数がわかるようになっている。

また、ほぼ同様の領域を手描きでぼかしたのが、図 12b である。図 12b と図 12d との比較により、現実の加水効果に近いものが最終的拡張 LIC により

再現できたことがわかる。

#### 6 おわりに

本論文では、目に優しい画像として色えんぴつ画に注目し、その描画プロセスを明らかにして、2 つの重要なサブプロセス、紙へ顔料を付着させるサブプロセスと加水操作サブプロセスとを再現することで、色えんぴつ画作成機能が実現できることを見い出した。そして、色えんぴつ画のミクロ構造の観察から、後者のサブプロセスの再現に利用可能なアルゴリズムとして LIC の拡張を考案した。拡張した項目をまとめると次のようになる。

- カーネル長やベクトルに擾乱を加える
- 着色部分のみカーネル計算に参加させる
- 単なる平均化でなく、注目するピクセルに近いほど影響力をもつような平均化を行う
- 無着色部分が着色される場合、紙の色をいかに
- 領域の中心から外側へ向かう拡散効果を付加する
- 計算により更新されたピクセル値を次の計算に反映させる

考案した加水効果のモデリングの実装により、拡張された LIC が加水効果の再現に適していることが判明し、色えんぴつ画作成機能の基盤ができたといえる。

今後の課題として、既存の水溶性絵画のモデリングとの比較を行い、加水効果モデルの改良に役立てることがあげられる。また、CG による色えんぴつ風タッチの完全なモデリングに向けて、色えんぴつ画作成機能のもう 1 つの柱である、色えんぴつ粒子の付着モデルの構築を進めている。

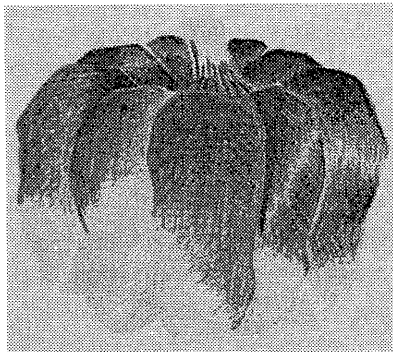
#### 謝辞

デジタルマイクロスコープの利用に御尽力頂いた、株式会社キーエンス MECT 事業部 片田 早人氏に感謝いたします。

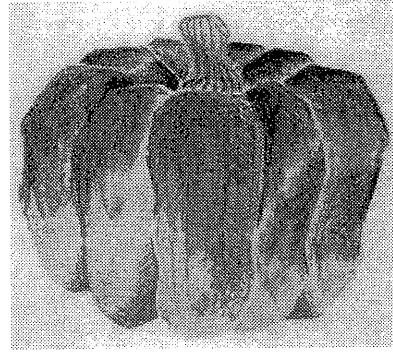
#### 参考文献

- [1] C. Kolb, P. Hanrahan, and D. Mitchell, "A realistic camera model for computer graphics," in *Proc. SIGGRAPH '95*, pp. 317–324, August 1995.

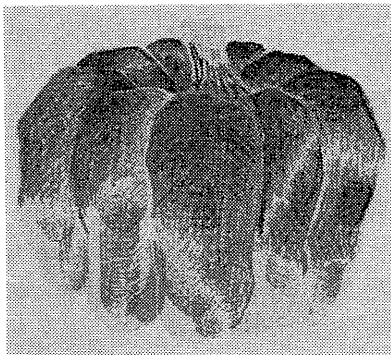
- [2] A. Watt, *Fundamentals of Three-Dimensional Computer Graphics*, Addison-Wesley, 1989.
- [3] S. Rache(601FX), *Martell - the Art of Cognac*, SIGGRAPH '95 Electronic Theater, August 1995.
- [4] B. Cabral and L. Leedom, "Imaging vector fields using line integral convolution," in *Proc. SIGGRAPH '93*, pp. 263 - 270, August 1993.
- [5] D. Stalling and H. C. Hege, "Fast and resolution independent line integral convolution," in *Proc. SIGGRAPH '95*, pp. 249 - 256, August 1995.
- [6] L. K. Forssell and S. D. Cohen, "Using line integral convolution for flow visualization: curvilinear grids, variable-speed animation, and unsteady flows," *IEEE TVCG*, vol. 1, no. 2, pp. 133 - 141, June 1995.
- [7] J. D. Foley, A. van Dam, et al., *Introduction to Computer Graphics*, Addison-Wesley, pp. 413 - 416, February 1994.
- [8] I. Hutton-Jamieson (大内誠司・川本道彦 訳), *色鉛筆で描く*, MPC, 1990.2
- [9] B. Poulin (川本道彦 訳), *基礎からの色鉛筆*, MPC, 1993.2
- [10] トリノ まさる, *水彩色鉛筆入門*, 日貿出版社, 1995.3
- [11] 高木 佐恵子, 藤代 一成, *Line Integral Convolution を用いた水彩色えんぴつ画の作成*, 情処全大, 第 52 回, 5H-8, 1996.3
- [12] 高木 佐恵子, *Pumpkins : 知的で優しい汎用文具のためのペインティングユニット - 水性色えんぴつ画における顔料付着と加水混色の CG モデリング -*, 平成 8 年度お茶の水女子大学理学部情報科学科卒業研究論文, 1996.3



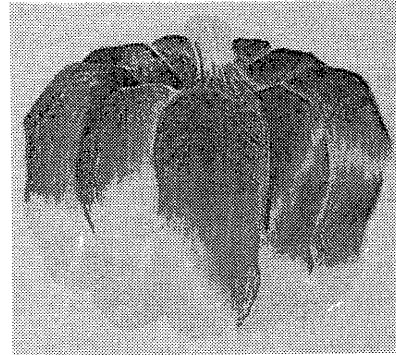
a : 一般的色えんぴつ画の表示



b : 手描き ぼかし画像



c : LIC 適用領域



d : 最終的拡張 LIC 適用

図 12: 一般的色えんぴつ画

筆を用いた手描き (b) と Pumpkins の加水効果機能 (d) とではほぼ同様の領域に加水操作を施したもの。現実の加水効果に近いものが構築したモデルにより再現されている。