

## 濃淡画像からペン画調画像への変換法

## —線描, 点描—

岩手大学工学部

(株)メイテック

岩手大学工学部

〃

〃

中川大介

山口恵介

藤本忠博

村岡一信

正会員 千葉則茂

〈あらまし〉 近年, コンピュータグラフィックスにおいて非写実的なレンダリング法の研究が盛んに行われている。本論文では, 挿し絵やテクニカルイラストレーションなどに用いられているペン画を取り上げ, 与えられた濃淡画像からペン画調画像を生成する手法について提案する。ペン画の基本的な技法には, 線で表す線描法と, 点の集まりで表す点描法がある。線や点のサイズが表示デバイスの解像度に依存していると, 低解像度のデバイス(モニタなど)では線や点が連結して模様が認識されるアーティファクトの発生が避けられない。本手法では線描の画像生成に  $1/f$  ノイズによる揺らぎを与えた平滑化直線と呼ぶ濃度分布を持つ直線を用い, 点描の画像生成に平滑化点と呼ぶ濃度分布を持つ点を用いることでアーティファクトの発生を低減させることができる。

キーワード: コンピュータグラフィックス, ノンフォトリアリスティックレンダリング, ペン画, 線描, 点描

〈Summary〉 Recently, in computer graphics, not only photo-realistic-rendering but also non-photo-realistic-rendering is researched briskly. In this paper, focusing on pen-and-ink illustration that is usually put in books or used for technical illustration, we propose a method for generating a pen-and-ink illustration from a given gray-scale image. There are two fundamental styles in pen-and-ink illustration: one is line drawing style that represents an illustration by lines, and the other is stipple drawing style that represents one by dots. If the size of a line or a dot depends on the resolution of display device, we have one serious problem; in low-resolution device, the generated illustration can be given an artifact, that is, artificial pattern caused by the connection of lines or dots. By the method proposed in this paper, such artifact can be reduced using smoothness-line, which is given the fluctuation by  $1/f$  noise, and smoothness-dot.

**Key words:** Computer Graphics, Non-photo-realistic rendering, Pen-and-ink illustration, Line drawing style, Stipple drawing style

## 1. まえがき

近年, コンピュータグラフィックス(CG)における画

“Generating Pen and Ink Illustrations from Gray-scale Images—Line and Stippling Drawing Style—” by Daisuke NAKAGAWA (Faculty of Engineering, Iwate University), Keisuke YAMAGUCHI (MEITEC Corporation), Tadahiro FUJIMOTO, Kazunobu MURAOKA and Norishige CHIBA (Faculty of Engineering, Iwate University).

像生成に関する研究は, 従来の写実的なレンダリング法のみならず, 油絵や水彩画風のいわゆる非写実的なレンダリング法についても盛んに行われている。ペン画は, 挿し絵, 漫画の背景, テクニカルイラストレーションなどに多く用いられ, 水飛沫や雲, 陰影やひだの細かな物体, 砂のような繊細な質感, 経年変化した物体の質感, 動物の体毛などのテクスチャの表現, あるいは, 実際には見えない流れのイメージ(例えば風の流れなど)の表現

などに向いており、CGによって高品質なペン画調画像を生成できればその有効性は高い。

ペン画の基本的な描画法には線描と点描があり、線描はペンのストロークの密度で濃淡を表現し(図1(a)参照)、点描はペンによって小さな点を打ち、その密度で濃淡を表現する(図1(b)参照)<sup>14),15)</sup>。CGにおけるこれまでの線描風画像の生成に関する研究には、写真などの濃淡画像から線描風画像を生成するもの<sup>6),13),17)</sup>と、3次元幾何モデルから生成するもの<sup>5),7)-12)</sup>とがある。更に、濃淡画像から生成する手法には、自動的なもの<sup>13),17)</sup>と、ユーザがシステムに介入するインタラクティブなもの<sup>6)</sup>とがある。一方、点描についてはペン画としての研究は見当たらず、関連するものとしてはハーフトーンに関する研究<sup>1)-3)</sup>が挙げられる。

通常、点や線をモニタやプリンタなどのデジタルなデバイス上で表現する際には、点の大きさや線の太さがデバイスの解像度に依存するため、隣接する点同士が連結して模様が発生したり、隣り合う線同士が連結して線が太くなるなどのアーティファクトの発生が避けられない。これまでの研究例では、主として高解像度のデバイスを前提とする事で、この問題を回避しているが、モニタなどの低解像度のデバイス上でペン画調画像を表示する場合には、画質低下を軽減する何らかの工夫を行わなければ高品質なペン画調画像は表現できない。素朴に出力画像に必要な解像度の数十倍の解像度を持つ作業領域を用意し、それに比例した大きさの点や線を用いてペン画を生成した後、出力画像の解像度へ平滑化縮小することで、アーティファクトを低減させることが可能であるが、出力画像の数十倍もの作業領域を必要とするという

問題がある。本論文では、このような作業領域を必要としない、低解像度のデバイスに表示した際のアーティファクトを低減させる、写真などの濃淡画像から線描風と点描風のペン画調画像を生成する手法について提案する。

線描風画像生成法では、平滑化直線と呼ぶ濃度分布を持つ直線と $1/f$ ノイズによりアーティファクトを低減させ、点描風画像生成法では、平滑化点と呼ぶ濃度分布を持つ点とディスク半径可変のポアソン・ディスク・サンプリングによってアーティファクトを低減させる。

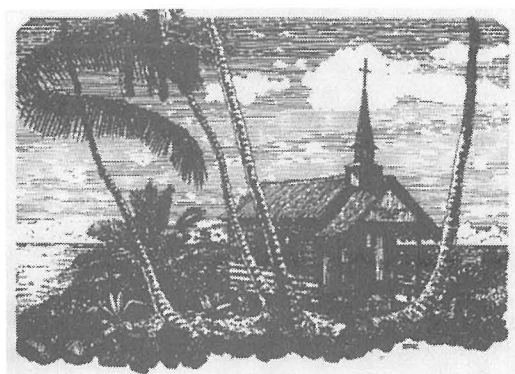
## 2. 線描風ペン画調画像生成法

ここでは、濃淡画像から線描風ペン画調画像生成の基本手法を示し、次に、流れのイメージを表現するための流れの方向を指定する線描風画像生成法を示す。更に、動物の毛などのテクスチャの流れを考慮した線描風画像生成法について示す。

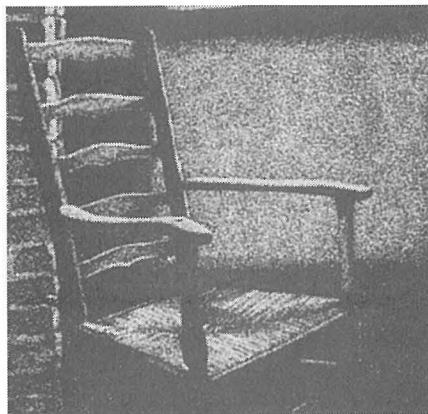
### 2.1 基本的な線描風画像生成法

基本的な線描風画像生成法は次のように(1)のテクスチャの準備段階と(2)の変換段階から成る。

- (1) 階調テクスチャの準備：適当な階調数を定め、その階調を表現するための線描風の階調テクスチャを用意する。
- (2) 変換(ここではマッピングと呼ぶ)段階：入力濃淡画像のピクセル値を読み取り、その値に対応する明るさを表現している階調テクスチャを選ぶ。階調テクスチャから、入力濃淡画像のピクセルの座標と同じ座標を持つピクセルを選び、その値を出力画像のピクセル値とする。テクス



(a) 線描画  
Line drawing style



(b) 点描画  
Stipple drawing style

図1 実際のペン画の例

Fig. 1 Examples of real pen-and-ink illustration

チャのサイズが入力画像より小さければ、同じテクスチャが繰り返し並べられているものとしてテクスチャ上の座標を定める。

階調テクスチャとしては、単一方向へ線が描かれているパターンを用いる。この階調テクスチャのための線分を単純なデジタル直線(直線をスキャン変換して得たピクセルの集合)で表現すると、モニタなどのような低解像度のデバイスでは階調を表現するのに十分な線の粗密が得られないことがある。そのため、本手法では、階調テクスチャを十分に高い解像度の画像として(理想的には無限解像度のアナログ画像)、ジャギーを取り除いた直線(平滑化直線と呼ぶことにする)を用いて生成しておき、それを必要な解像度に平滑化縮小して用いている。しかしながら、

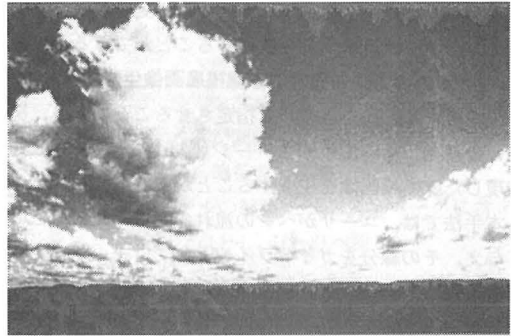
- ・デジタル画像への平滑化縮小のためのアーティファクト(幅の異なる濃淡の縞状のパターン)が発生する、
  - ・完全な直線のため、手描き風の印象がでない、
- などの問題が残る(図2(a)参照)。

そのため、直線に $1/f$ ノイズによる揺らぎを与え、上記の問題を低減させた(図2(b)(c)(d)参照)。 $1/f$ ノイズは体内や自然界に広く存在する基本的なリズムの揺らぎであり、人に心地よい印象を与えるものであることが知られているため<sup>19)</sup>、これを自然な印象を与えるノイズのモデルとして採用した。本手法では $1/f^\beta$ として、パラメタ $\beta$ により完全にランダムな白色ノイズ( $\beta=0$ )から相関の強いブラウン運動( $\beta=2$ )までをユーザが選択できるようにしてある。 $\beta$ は図3以降の画像では2を用いた。なお、 $1/f^\beta$ ノイズは以下の手順で生成した。

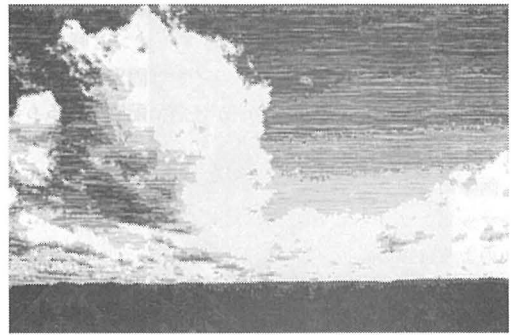
- (1) 周波数領域を表す1次元配列を用意する。
- (2) ノイズのパワースペクトルの大きさを $1/f^\beta$ に

比例させ1次元配列に設定する。

- (3) 1次元配列に逆離散フーリエ変換を施す。
- 階調テクスチャは、単純に一定方向に並べて配置して

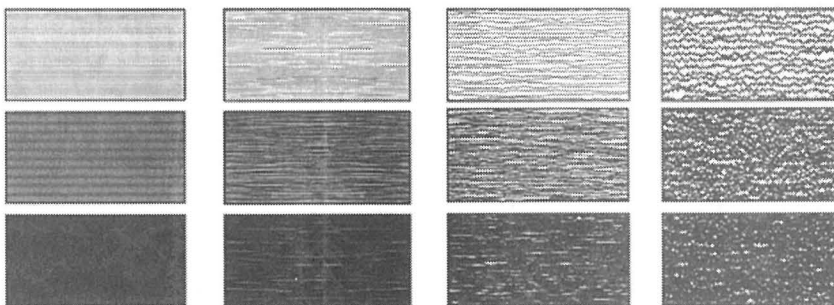


(a) 原画像  
Original image



(b) 生成画像  
Generated image

図3 基本的な線描風画像生成法による生成例  
Fig. 3 Example of image generated by fundamental line drawing style method



(a) 直線のみで生成したテクスチャ  
Texture by straight lines  
(b)  $\beta=2.0$   
(c)  $\beta=1.0$   
(d)  $\beta=0.0$

図2 自動生成による階調テクスチャ  
Fig. 2 Gradations of texture generated automatically

論文：濃淡画像からペン画調画像への変換法

いる。このため、ペンを一定方向に走らせたような線描風画像が得られる。

図3(a)の入力濃淡画像に本手法を適用した生成例を図3(b)に示す。本手法によって低解像度であっても線描画の細かな線のようなすを表現することができる。

2.2 流れの方向を指定する線描風画像生成法

線の流れの方向をユーザに指定させることにより、実際には存在しない流れのイメージ(図5(a)参照)などを表現した線描風画像を生成することができる。

本手法では、ユーザがペンの流れを連続した線分として与え、その線分をガイドラインとして、モーフィングの一手法であるワーピングにより階調パターンを画像にマッピングする。

ワーピングには文献16)の手法を用いた。ここで、文献16)のアルゴリズムを簡単に説明しておく。

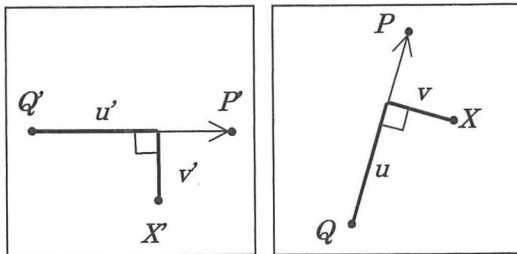
図4(a)を線分のテクスチャ、(b)を画像領域であるとし、線分PQおよびP'Q'をガイドラインと呼ぶことにする。テクスチャ側のガイドラインは固定とし、画像領域のガイドラインは、ユーザが任意に配置できるものとする。

画像領域のX座標に、テクスチャ領域のX'座標の値をマッピングすることでワーピングが行われる。X'は次のように求める。

- (1) 画像領域のガイドラインとXより図4(b)のu, vの長さを求める。
- (2)  $\|P-Q\| : u = \|P'-Q'\| : u'$  および  $u : v = u' : v'$  の関係を、テクスチャ領域のガイドラインに適用しX'を求める。

ガイドラインを構成する線分が複数の場合は、それぞれの線分について個別にテクスチャ領域の座標を求め、それらの重み付け平均をX'とする。

文献16)のアルゴリズムは以上であるが、ガイドラインに沿ってそのままワーピングすると、ガイドライン付近の流れが直線的となり不都合である(図5(a)参照)。



(a) テクスチャ領域 Texture (b) 画像領域 Destination image

図4 ワーピングアルゴリズム Fig.4 Warping algorithm

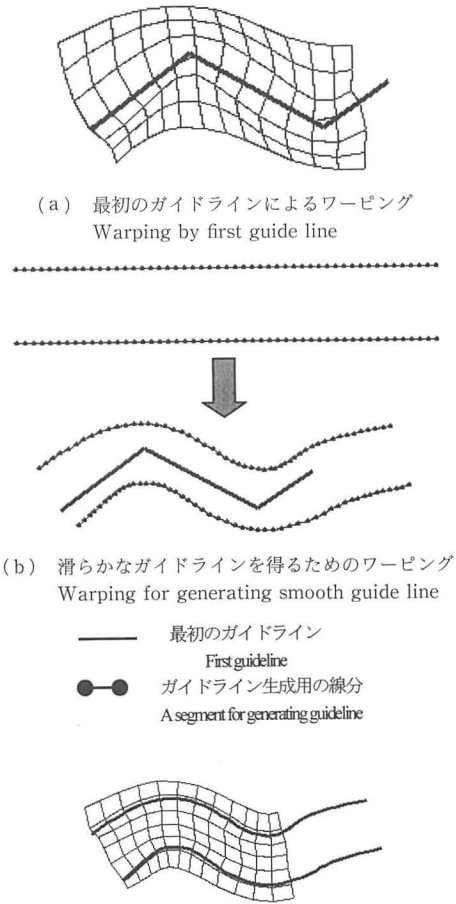
このため、本手法では次の処理により、ユーザが指定したガイドライン付近も滑らかな流れとなるようにしている。

- (1) あるサイズの四角形を考え、向かい合う両辺に短い線分を配置し、それを一度画像領域にユーザが指定したガイドラインに沿ってワーピングさせる(図5(b)参照)。
- (2) (1)でワーピングさせた線分を新たなガイドラインとして階調テクスチャをワーピングする(図5(c)参照)。

図6(b)に図2(a)を本手法により流れのイメージを表現した生成画像例を示す。

2.3 テクスチャの流れを考慮した線描風画像生成法

動物などを描いたペン画では、毛の流れに沿ってペンを走らせる(図7参照)など、対象物の表面のテクスチャ



(a) 最初のガイドラインによるワーピング Warping by first guide line  
(b) 滑らかなガイドラインを得るためのワーピング Warping for generating smooth guide line  
— 最初のガイドライン First guideline  
●—● ガイドライン生成用の線分 A segment for generating guideline

(c) (b)で生成したガイドラインによるワーピング Warping by guideline generated in (b)

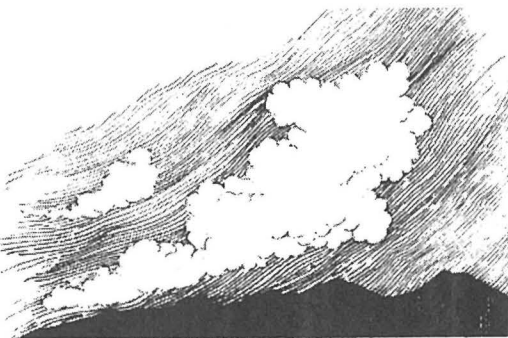
図5 ワーピング Fig.5 Warping

を考慮することが多い。ここでは、濃淡画像のテクスチャを解析し、テクスチャの流れに沿ってペンを走らせたような画像の生成法について示す。本手法では、(1)濃淡画像のテクスチャを解析してペンのストロークを生成し、(2)ペンのストローク領域を求め、(3)ペンのストローク領域に線描パターンを割り当てることにより画像生成する。以下にアルゴリズムを示す。

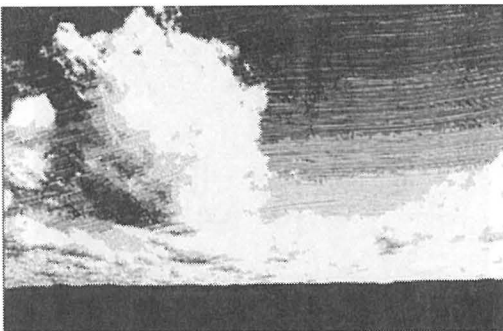
- (1) ペンのストロークの生成
  - (1-1) 最低追跡数(ペンのストロークを構成する点の数の下限値)の初期値を決める。
  - (1-2) 濃淡画像中の1点をランダムに選び、それをペンのストロークに含まれる点とする。
  - (1-3) 現在の点について、Sobelの微分オペレータ<sup>18)</sup>を図8に示す半径 $q$ の円の範囲に施し、その総和によって濃度勾配を求め、濃度勾配方向に直交するベクトルを求める(画像生成例では $q=5$ 、ベクトルの長さを6とした)。現在の点が以下の終了条件を満たしていれば(1-5)へ。そうでなければ(1-4)へ。

[終了条件]

- 条件1: 濃度勾配が閾値より小さい。
- 条件2: 求めたベクトルと前のベクトルとのなす角が閾値より大きい。
- 条件3: 追跡中のペンのストロークの先端が、既に配置されているペンのストロークを構成する線分に接近し、その距離が閾値より小さい(画像生成例では閾値を5とした)。
- (1-4) ベクトルの終点をペンのストロークに含まれる新たな点とし、(1-3)へ戻る。



(a) 流れのイメージを描いた線描画の実例  
Example of real line drawing style illustration having flow image



(b) 流れを付加した生成画像  
Generated image given flow

図6 流れのイメージを付加した例  
Fig. 6 Example given flow image



図7 テクスチャの流れを考慮した技法で描いた実際のペン画<sup>15)</sup>

Fig. 7 Example of real pen-and-ink illustration drawn by method using texture flow<sup>15)</sup>

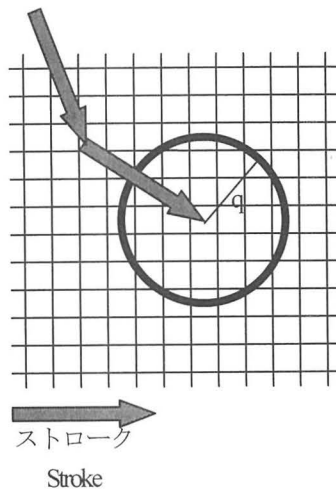
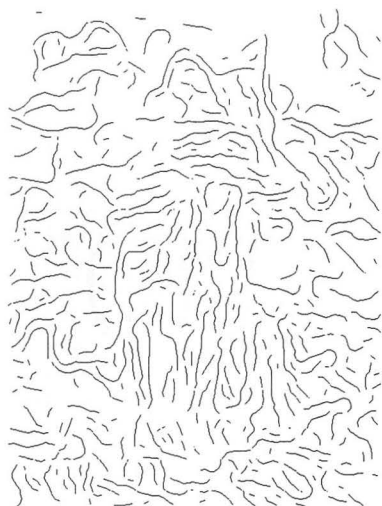


図8 Sobelの微分オペレータを施す範囲

Fig. 8 Range of application of Sobel differential operator

## 論文：濃淡画像からペン画調画像への変換法

- (1-5) ペンストロークに含まれる点の数が最低追跡数より大きければペンストロークとして登録し、(1-2)へ戻る。そうでなければ(1-6)へ。
  - (1-6) 最低追跡数を1減らし、閾値以下になったら終了。そうでなければ(1-2)に戻る。
  - (2) ペンストローク領域の割り当て
    - (2-1) 出力画像と同サイズの画像領域に、(1)で求めたペンストロークをデジタル直線として配置する(図9(a)参照)。デジタル直線を構成するピクセルには、ストローク領域を識別するためのID番号を付けておく。
    - (2-2) (2-2-1)～(2-2-5)を繰り返し、(2-1)のデジタル直線をシードとした領域を求める(図9(b)参照)
      - (2-2-1) 領域を構成するピクセルを1つ選びそれをピクセル*i*とする。
      - (2-2-2) ピクセル*i*の8近傍のピクセルの中から、次の条件1と2を満たすピクセルを選び(条件を満たすピクセルが2以上の場合はその中からランダムに1つを選ぶ)、ピクセル*i*と同じID番号を付ける。  
条件1: どの領域にもまだ含まれていない。  
条件2: ピクセル*i*との濃淡の差が閾値(画像生成例では256階調で閾値を32とした)以下である。
      - (2-2-3) 領域を構成するピクセルがまだ残っていれば(2-2-1)へ戻る。なければ(2-2-4)へ。
      - (2-2-4) ID番号が付けられたピクセルすべてを領域のピクセルとして登録する。
      - (2-2-5) 領域を構成するピクセルすべてについて、8近傍に(2-2-2)の条件を満たすピクセルが存在しなければ終了。そうでなければ(2-2-1)へ戻る。
    - (3) 線描パターンへのマッピング
      - (2)で求めた領域を線描パターンへのマッピング領域とし、(1)で求めたペンストロークをガイドラインとして2.2の手法によりマッピングする。なお、テクスチャの流れの方向が検出できない領域(背景など)には適当な線描パターン(画像例では斜線とクロスハッチング)を割り当てる。
- 図10, 11に動物の画像生成例を示す。頭部や胸部が毛の流れに沿った方向に描かれていることがわかる。図12に建物の例を示す。ベランダの部分や窓の格子などが流れに沿った方向に描かれている。しかしながら、これらの図には、流れがない背景画像にも流れのテクスチャが施され不自然に見える部分がある。本アルゴリズムでは濃度勾配を検出し、それに直交する方向を流れの方向としているため、濃淡の差が大きい部分を誤って流れとして検出してしまうことがある。このため、流れの検出方法の改良や、流れを描画したくない領域のストロークを対話的に削除する手法について検討中である。



(a) ストロークの配置  
Arrangement of stroke



(b) シードの広がり  
Spread of seed

図9 テクスチャの流れを考慮した線描風画像生成法  
Fig. 8 Line drawing style method using texture flow



(a) 原画像  
Original image



(b) 生成画像  
Generated image

図 10 テクスチャの流れを考慮した線描風画像生成例  
Fig. 10 Example of image generated by line drawing style method using texture flow



(a) 原画像  
Original image



(b) 生成画像  
Generated image

図 11 犬の線描画生成例  
Fig. 11 Example of image of dog generated by line drawing style method

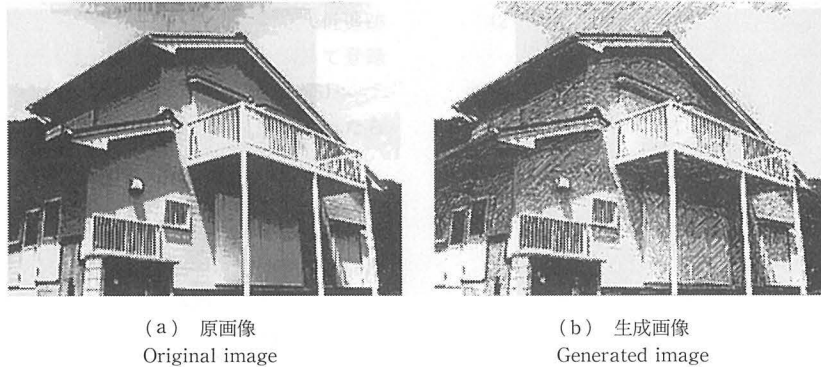


図 12 建物の線描画生成例  
 Fig. 12 Example of image of house generated by line drawing style method

表 1 線描風ペン画調画像生成時間

Table 1 Execution time for generating images by line drawing style method

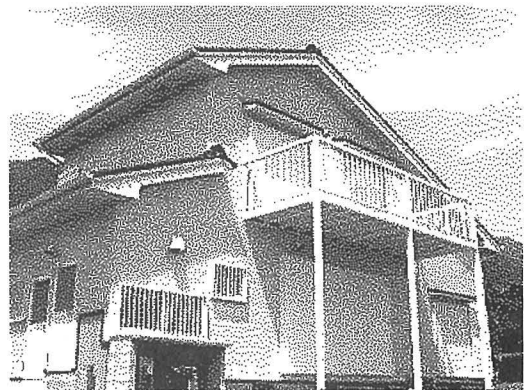
図	画像サイズ (pixels)	生成時間 (s)
図 10(b)	480×640	954.57
図 11(b)	284×454	357.65
図 12(b)	400×300	435.26

計算には DOS/V K 6-233 を使用した。線描画の画像生成時間を表 1 に示す。

### 3. 点描風ペン画調画像生成法

ここでは、濃淡画像から点描風ペン画調画像を生成する手法について示す。本手法では点描画生成のためにポアソン・ディスク・サンプリングを用いる。ポアソン・ディスク・サンプリングとは、領域に点をサンプリングする手法であり、各点に円状の禁止領域を割り当て、その内部の点を削除する事によって、点同士の距離を円の半径以上に保つ性質を持つ。

点描に関するこれまでの研究では、濃淡画像のハーフトニング手法としての事例は見られる一方、ペン画調画像の生成手法としての事例は少ない。通常のオーダードディザ法や誤差拡散法などのハーフトニング法では、点のサイズは表示装置のピクセルサイズとなるため、格子状に配置された点による連結パターンなどのアーティファクトが発生することが多く、手描きの点描とは印象が異なっている(図 13 参照)。そのため、本手法では解像度に依存しない平滑化点を用い点描を表現する。平滑化点とは、中心から周囲に向かって、インクが徐々に薄くなるように分布している微小な円である。この平滑化点の配置はポアソン・ディスク・サンプリング



(a) 誤差拡散法  
Error Diffusion



(b) (a)の左下拡大  
Enlargement of the lower left part of (a)

図 13 ハーフトニング法による生成例

Fig. 13 Example of image generated by halftoning method

により行う。これにより点の連結によるアーティファクトの発生を防ぐことができる。以下に、点描風画像を生成するアルゴリズムを示す。

- (1) 入力画像と同じサイズ(同じピクセル数)の点描



画を生成するための出力画像領域を用意する。この領域の各ピクセルは式(1)で定める分割数  $Div$  によって  $Div^2$  個のサブピクセルに分割される。

$$Div = \left\lceil \frac{\sqrt{2}}{r} \right\rceil \quad (1)$$

ここで、 $r$  は点の半径である。  $Div=3$  の場合の例を図14に示す。なお、サブピクセルは点の座標を実数で管理するための擬似的なものであり、濃淡値は1ピクセルあたり1つのみを保持する。

- (2) 計算の効率化のため、ポアソン・ディスク・サンプリングの候補点を、各サブピクセル内に1つずつランダムな実数座標で生成する。
- (3) 候補点からポアソン・ディスク・サンプリングを行い、点の座標を決定する。
- (4) (3)で求めた座標を中心とした平滑化点を、次のようにピクセルに書き込む(図15参照)。
- (4-1) 平滑化点を完全に包含するように平滑化点用サブピクセルを配置する(平滑化点用サブピクセルは、出力画像用のピクセルに対して1/30の大きさのものを用いた。すなわち平滑化点用サブピクセルを  $30 \times 30$  配置すると、出力画像の1ピクセルになる。なお図15では平滑化

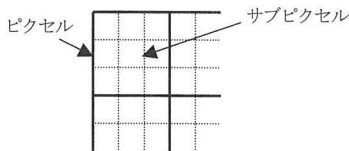


図14  $Div=3$   
Fig. 14  $Div=3$

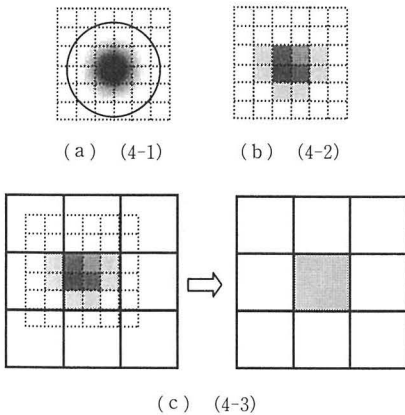


図15 平滑化点の生成  
Fig. 15 Generating smoothness-dot

点用サブピクセルの大きさが1/3の場合を示した)。

- (4-2) 平滑化点用サブピクセルに平滑化点の濃度を割当てて。
- (4-3) 平滑化点用サブピクセルを、出力画像の領域に重ね、出力画像のピクセルに重なっている平滑化点用サブピクセルの平均値をそのピクセルに加える。

濃度分布  $f$  には、式(2)で表される分布を用いている(図16参照)。

$$f(x) = \frac{2}{a^3} (x-a)^2 \left(x + \frac{a}{2}\right) \quad (2)$$

$$a = rc$$

ここで、 $x$  は中心からの距離、 $r$  は点の半径、 $c$  は出力画像の明るさを調整するためのパラメタである。生成画像に対するパラメタ  $c$  の効果を図19に示す。 $c$  が大きくなると出力画像が暗く(濃く)なり、小さくなると明るく(薄く)なることがわかる。(2)式による平滑化点は、中央が最も濃く、その周りは徐々に薄くなっているため、平滑化されていない点に比べて半径が同じ場合は濃度が約1/3となる。このため、入力濃淡画像とほぼ等しい明るさとするには  $c$  を約  $\sqrt{3}$  とすれば良い。しかしながら、ポアソン・ディスク・サンプリングのために、点の間隔は理想的な状態より疎となるため、 $c$  は  $\sqrt{3}$  よりやや大きくなる。図19の結果より、図20、21では  $c=2.2$  を用いた。

デジタル画像上でのポアソン・ディスク・サンプリングは、採用した点の周りに円形の禁止領域を書き込み、続くサンプリング点が禁止領域に属するかどうかで、その点を採用するかどうかを決定することでも実現できる。しかしながら、これによると、白の領域で点が採用されると、大きな禁止領域を張るので、近傍に黒の

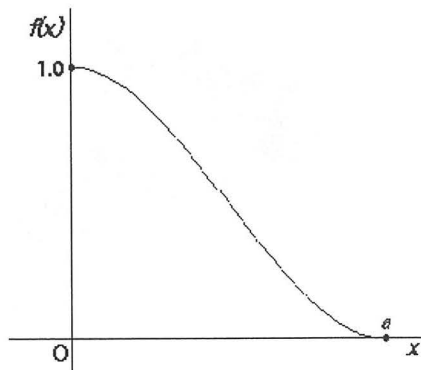


図16 濃度分布  
Fig. 16 Density distribution

領域があってもその領域には点が採用されないという不都合が生じる。この不都合を回避するため、本手法におけるポアソン・ディスク・サンプリングは、以下のように行う。

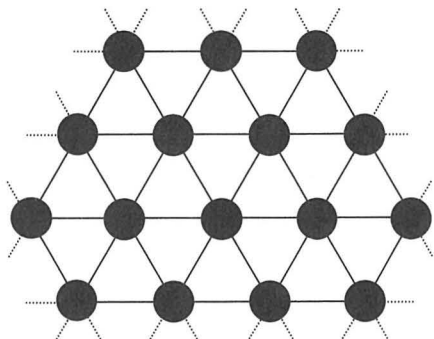


図 17 理想状態  
Fig. 17 Ideal state

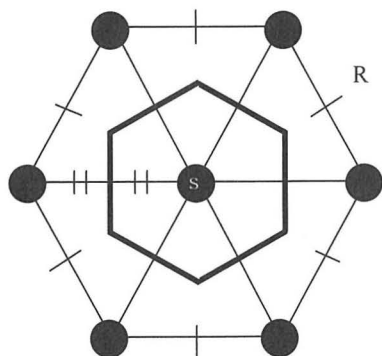


図 18 ポアソン・ディスク・サンプリングの半径  $R$  の計算

Fig. 18 Calculation of radius  $R$  of Poisson disk sampling

- (1) ランダムに候補点を選び、その点を中心とするディスクの中に他の点描の点が含まれるか調べる。
- (2) 含まれていなければ、候補点を新たな点描の点とし、含まれていれば候補点を選び直す。

ここで、ポアソン・ディスク・サンプリングの半径  $R$  (禁止領域の半径)の求め方について説明する。

入力画像が濃度  $d$  の等濃度画像であるとき、点描による等価な濃度  $d'$  は、空間に辺の長さ  $R$  の正三角形を敷き詰め、その頂点に点を配置することにより得られるものとする(図 17 参照)。

このとき、 $d'$  は図 18 の太線で囲まれた六角形領域の面積  $S_{hex}$  に対する中央の点の面積  $s$  の比として式(3)で求められる。

$$d' = \frac{s}{S_{hex}} = \frac{2s}{\sqrt{3}R^2} \quad (3)$$



(a) 入力画像  
Input image

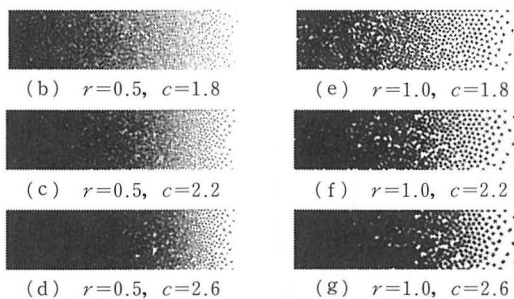


図 19 パラメタの影響  
Fig. 19 Effect of parameter



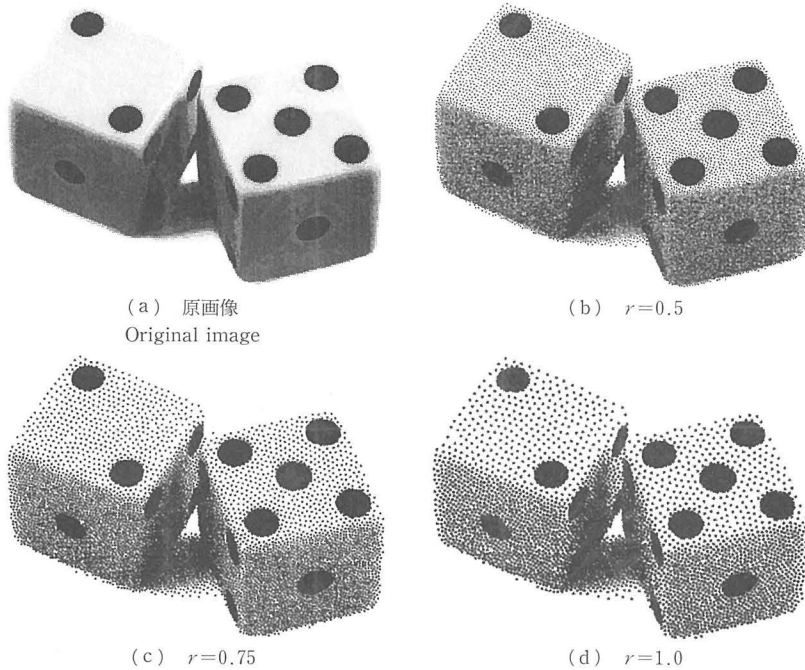
(a) 原画像  
Original image



(b)  $r=0.5$

図 20 点描画風ペン画調画像生成例(家)

Fig. 20 Example of image generated by stipple drawing style method(house)



(a) 原画像  
Original image

(b)  $r=0.5$

(c)  $r=0.75$

(d)  $r=1.0$

図 21 点描画風ペン画調画像生成例(サイコロ)

Fig. 21 Example of image generated by stipple drawing style method (dice)

表 2 点描画風ペン画調画像生成時間

Table 2 Execution time for generating images by stipple drawing style

図	画像サイズ (pixels)	生成時間 (s)
図 20	400×300	1536.5
図 21(b)	400×300	917.34
図 21(c)	400×300	505.47
図 21(d)	400×300	441.7

$$s = \pi r^2, S_{hex} = \frac{\sqrt{3} R^2}{2}$$

$d'=d$  とすると(3)式より禁止領域の半径  $R$  は式(4)で求められる。

$$R = \sqrt{\frac{2s}{\sqrt{3}d}} \quad (4)$$

本手法による画像生成結果を図 20, 21 に示す。点が連続してしまうようなアーティファクトは発生していないことがわかる。また、図 20, 21(b)(c)(d)より、任意のサイズの点によって点描画像を生成できることが確認できる。これらの画像生成時間を表 2 に示す。本手法による点描画像はアーティファクトは発生しないが、点描の点の形がすべて円形で、大きさも揃っているた

め、やや人工的な印象を受ける。このため、手描風の印象を与えるための改良が必要である。

### 5. おわりに

本論文では、デジタル画像によるアーティファクトの発生などを軽減する基本的な問題に関する検討を行い、線描や点描という基本的なペン画調画像を生成するための、

- ・濃淡画像から線描画を生成する手法
  - ・濃淡画像から点描画を生成する手法
- を提案した。

線描画の生成法では、平滑化直線と、その直線に  $1/f$  ノイズによる揺らぎを導入することで低解像度でもアーティファクトの少ない線描風画像が得られる。また、ワーピングにより、線の流れる方向をユーザが任意に設定できる。更に、濃淡画像のテクスチャを解析することにより、テクスチャの流れに沿ってペンを走らせたような線画を描くことができる。これは、特に動物の毛並みや人間の髪の毛などの表現に向く。

点描画の生成法では、平滑化点と呼ぶ濃度分布を持つ点と、ディスク半径を可変としたポアソン・ディスク・サンプリング法を示した。また、ディスク半径と濃淡との関係を明らかにした。これらより、アーティファ

## 論文：濃淡画像からペン画調画像への変換法

クトを抑えた点描画を生成することができる。

今後の課題としては、テクスチャの流れを考慮した線描風画像生成法において、背景などの流れのない部分にも流れを描く場合があるため、対話的に流れのストロークを除去する手法や、流れの検出法の改良が必要である。また、点描画において、手描風の印象を与えるための改良が必要である。更に、線描画生成法と点描生成法を統合し、線描と点描を混合したペン画調画像生成法の開発などが挙げられる。

### 参考文献

- 1) L. Streit, O. Veryovka and J. Buchanan. Non-photorealistic Rendering Using an Adaptive Halftoning Technique In Skigraph '99.
- 2) Oleg Verevka and John W. Buchanan. Halftoning with Image-Based Dither Screens. In GI '99, pp. 167-174.
- 3) L. Streit and J. Buchanan. Importance Driven Halftoning. In EUROGRAPHICS '98, pp. C-207-C-217.
- 4) O. Veryovka and J. Buchanan. Comprehensive Halftoning of 3D Scenes, In EUROGRAPHICS '99, pp. C-14-C-22.
- 5) Georges Winkenbach and David H. Salesin. Computer-Generated Pen-and-Ink Illustration. In SIGGRAPH '94, pp. 99-100.
- 6) Michael P. Salisbury, Michael T. Wong, John F. Hughes, and David H. Salesin. Orientable Textures for Image-Based Pen-and-Ink Illustration. In SIGGRAPH '97, pp. 401-406.
- 7) Georges Winkenbach and David H. Salesin. Rendering Parametric Surfaces in Pen and Ink. In SIGGRAPH '96, pp. 469-476.
- 8) Oliver Deussen, Jorg Hamel, Andreas Raab, Stefan Schlechtweg and Thomas Strothotte. An illustration technique using hardware-based intersections and skeletons. In GI '99, pp. 175-182.
- 9) Jorg Hamel, Stefan Schlechtweg and Thomas Strothotte. An Approach to Visualizing Transparency in Computer-Generated Line Drawings. Proceedings of Information Visualisation '98, pp. 151-156, IEEE Computer Society, 1998.
- 10) Takafumi Saito and Tokiichiro Takahashi. Comprehensible Rendering of 3-D Shapes. In SIGGRAPH '90, pp. 197-206.
- 11) J. Hamel and T. Strothotte. Capturing and Re-Using Rendition Styles for Non-Photorealistic Rendering. In EUROGRAPHICS '99, pp. C-173-C-182.
- 12) Gershon Elber. Interactive Line Art Rendering of Freeform Surfaces. In EUROGRAPHICS '99, pp. C-1-pp. C-12.
- 13) Mike Salisbury, Corin Anderson, Dani Lischinski and David H. Salesin. Scale-Dependent Reproduction of Pen-and-Ink Illustrations. In SIGGRAPH '96, pp. 461-468.
- 14) A. L. グブティル著, “ペンで描く—スケッチから細密描写まで—”, マール社(1979).
- 15) クローディア・ナイス, “ペン&インク—動物・植物・人物・風景を描く—”, マール社(1993).
- 16) Thaddeus Beier, Feature-Based Image Metamorphosis, SIGGRAPH '92, pp. 35-pp. 42.
- 17) 長坂好恭, 茅暁陽, 今宮淳美, CGによるデッサン風スケッチ画の自動生成渡邊広宣, グラフィクスとCAD/Visual Computing 合同シンポジウム(2000).
- 18) 長谷川純一, 興水大和, 中山晶, 横井茂樹, 画像処理の基本技法, 技術評論社(1986).
- 19) 武者利光, “ゆらぎの発想—1/f ゆらぎの謎にせまる—”, NHK出版(1994).

(2001年2月16日受付)

中川 大 介



平10, 岩手大学工学部情報工学科卒。平12, 同大学院博士前期課程修了。現在, 岩手大学大学院博士後期課程においてコンピュータグラフィックスに関する研究に従事。

山口 恵 介



平10, 岩手大学工学部情報工学科卒。平12, 同大学院博士前期課程修了。同年, (株)メイテック入社。

藤本 忠 博



平2, 慶應義塾大学理工学部電気工学科卒。平4, 同大学院博士前期課程修了。同年, (株)三菱総合研究所入社。平7, 慶應義塾大学大学院博士後期課程入学。平11, 単位取得退学。同年, 岩手大学工学部情報工学科助手。平12, 博士(工学)取得(慶大)。コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。情報処理学会会員。

村岡 一 信



昭52, 東北工業大学電子工学科卒。同年, 同大学研究生。昭52, 仙台電子専門学校教員。平1, 岩手県立盛岡短期大学講師。平3, 同助教授。平11, 岩手大学大学院博士後期課程修了。博士(工学)。平11, 岩手大学工学部助教授。コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。電子情報通信学会, 情報処理学会, IEEE, ACM, 各会員。

千葉 則 茂 (正会員)



昭50, 岩手大学工学部電気工学科卒。昭50~53, (株)日本ビジネスコンサルタント(現, (株)日立情報システムズ)勤務。昭59, 東北大学大学院博士課程情報工学専攻修了(工学博士)。以降, 東北大学工学部助手, 仙台電波高専情報工学科助教授, 岩手大学工学部情報工学科助教授を経て, 平3, 同教授。コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。画像電子学会, 電子情報通信学会, 情報処理学会, IEEE, ACM, などの会員。