

凹版印刷のための肖像画の対話的な生成手法 に関する研究

大野 義夫[†] 坊 晃利^{††}

[†]慶応義塾大学 理工学部 ^{††}横河電機

近年、紙幣などの有価証券に描かれている文字や模様などが、次々とCG技術によって作成され始めている。しかし紙幣の図柄として多く用いられる凹版印刷による肖像画は、今日でもその原版は彫刻家の手作業によって作成されている。その作業は、1本の線も間違えることが許されない非常に困難なものである。

本報告では、このような肖像画をCGの技術を用いて対話的に効率良く生成するためのDrawing Toolを提案し、そのために必要であると考えられる3つの要素技術について的手法を示した。さらにそれらの手法を用いた簡易的なDrawing Toolを作成し、それによる描画結果についての検討を行なった。

Interactive portrait generating technique for intaglio printing

Yoshio Ohno[†] Akitoshi Boh^{††}

[†]Faculty of Science and Technology, Keio University

^{††}Yokogawa Electric Corporation

In recent years, letters and figures on securities such as a bank note are made using computer graphics. Even nowadays, a portrait by intaglio printing, one of the most popular figures on a bank note, is relied on carvers' handiwork. This work is very hard because they have no margin for error. This paper proposes a drawing tool for making such a portrait interactively and efficiently using computer graphics, and proposes algorithms for three techniques which are necessary in order to design such a drawing tool. We describe a prototype of such a drawing tool based on those algorithms. Good results for practical use were obtained by this prototype.

1 はじめに

近年では、紙幣や図書券などの有価証券の作成において、CG(ComputerGraphics)の技術が数多く導入されるようになってきており、有価証券上に描かれる文字や模様などが次々とこれらの技術を用いて作成されるようになってきている。しかし、紙幣に多く用いられる肖像画については今日でもCGによって作成することは困難であるとされている。このような肖像画の多くは凹版印刷によるものである。以下ではこのような肖像画を凹版肖像画と呼ぶことにする。図1に凹版肖像画の例、図2にその一部の拡大図を示す。現在、この凹版肖像画の原版は十年以上もの鍛錬を積んだ彫刻家の手作業によって作られている。この彫刻の作業は、わずか一本の線を間違ってしまっただけでもやり直しがきかないなど非常に困難なものである。本研究ではこのような凹版肖像画をCGの技術を用いて対話的に効率良く生成するために図3のようなDrawing Toolを提案する。これは、凹版肖像画の元になる写真の画像データを計算機のフレームバッファ上に読み込み、ユーザが従来のDrawing Toolを使うような形で、スクリーン上に表示された画像を見ながらその上に上書きするようにして肖像画を描画するというものである。基本的に全ての画線の位置と太さはユーザが決めることになるので、対象とするユーザはそれらを定めることのできる程度の肖像画彫刻の経験者とする。入力デバイスは、彫刻に最も近い形での入力が見えたいと考え筆圧感知タブレットとした。このようなDrawing Toolを用いれば何度でもやり直しができ非常に効率良く凹版肖像画を作成することができると考えられる。本研究の目的は、このような凹版肖像画を描画するためのDrawing Toolを実現させるため、次の3つの要素技術を確立することである。

1. 太さを持つ曲線(ストローク)の表現方法
2. 破線ストロークの自動生成
3. ストロークパターン自動生成

凹版肖像画を構成する画線は、その全てが太さを持った曲線であると考えられる(以下では



図1: 凹版肖像画の例



図2: 図1の拡大図

これをストロークと呼ぶ)。したがって1の技術は、ここで提案する肖像画を描画するためのDrawing Toolには必要不可欠な技術である。2、3の技術は凹版肖像画の持つ規則性を利用して描画作業の一部を自動化するものである。凹版肖像画では濃淡を表現するために破線が多く用いられる。このとき破線のパターンは、そのストロークの位置における画像の濃淡に従うものである場合が多い。2の技術はこのような破線ストロークを自動的に生成するものである。

また、図1および図2を見ても分かるように、凹版肖像画では一本のストロークの両隣にそれに沿ったストロークをほぼ等しい間隔で描く、といった描写が非常に多く用いられてい

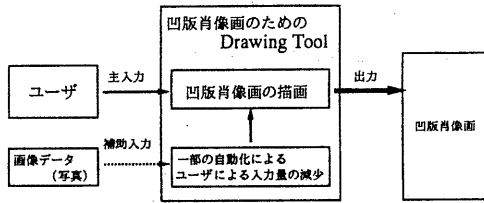


図 3: 凹版肖像画のための Drawing Tool

る. ここではこのような描写をストロークパターンと呼ぶことにする. 3の技術は, 入力された両端の2本のストロークからパターン内部のストロークを自動生成することによって, このようなストロークパターンの描画を行うものである. 本研究ではこれら3つの技術についての手法を示し, さらにそれらの手法を用いて肖像画を描画するための Drawing Tool を作成し, 実際に描画を行うことによってそれぞれの手法に対する検討を行った.

2 ストロークの描画方法

本節では筆圧感知タブレットによって入力されるストロークの位置及び太さ(ストローク幅)のデータから, 「骨格肉付法」を用いてストロークを描画する手法について述べる. 「骨格肉付法」とは, 文字フォントの作成手法の1つである. まずストロークの骨格線に対し, その線上の各点における筆圧値を用いて肉付けを行うことによりアウトライン上の点(側線点)を生成する. 次にこれらの側線点を曲線近似することによってアウトラインを生成し, その内部を塗りつぶすことによってストロークを描画する.

2.1 側線点の生成方法

本研究で提案する Drawing Tool では, ユーザがタブレット上でストローク幅に応じた筆圧を加えながら筆圧ペンを移動させることによって入力を行なう. まずこの筆圧ペンの軌跡をほぼ等間隔にサンプリングし, それらに適度のスムージング処理を施すことにより骨格線データを得る. ここでいう骨格線データと

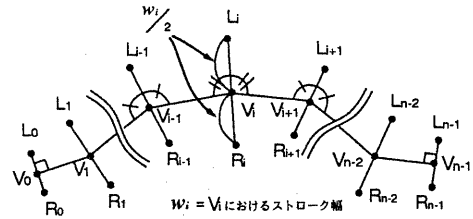


図 4: Strassmann による側線点の生成法(手法3)

は各点が, 座標 (x, y) と筆圧値 p をもつ点列のデータである.

次にこれらのデータに対して, Strassmann の提案する次のような手法を用いて骨格線の肉付けを行なう [3]. 図4に示すような骨格線において点 V_i におけるストロークの法線方向を, 線分 $V_{i-1}V_i$ と V_iV_{i+1} のなす角を2等分する方向とし, この方向に点 V_i におけるストローク幅 W_i の $1/2$ の距離だけ離れた点を両側にとり, それらを側線点 R_i, L_i とする. ここでストローク幅 W_i は筆圧値 p_i と比例関係にあるものとした.

2.2 アウトラインの生成方法

本研究のような肖像画を構成するストロークは, 一度描画された後も, それがユーザの満足できる形状になるまで数多くの変形が行なわれると考えられる. そのため, ここでは3次スプライン曲線などの大域性を持つ曲線ではなく, 区分的な3次 Bézier 曲線によってアウトラインを生成する. 図5のような側線点 L_{i-1}, \dots, L_{i+2} があるとする. このとき側線分 L_iL_{i+1} を次のような Bézier 曲線で近似する. まず L_i, L_{i+1} を通り, これらの点における法線方向に垂直な直線をそれぞれの点における接線とし, これを l_1, l_2 とする. 側線点における法線方向は前述した骨格線に対する手法を用いて求める. また線分 L_iL_{i+1} の2本の垂直3等分線を m_1, m_2 とする. 次に l_1 と m_1 との交点を C_1 , l_2 と m_2 との交点を C_2 とし, L_i, C_1, C_2, L_{i+1} の4点を制御点とする3次 Bézier 曲線を定義する. こうした処理をすべ

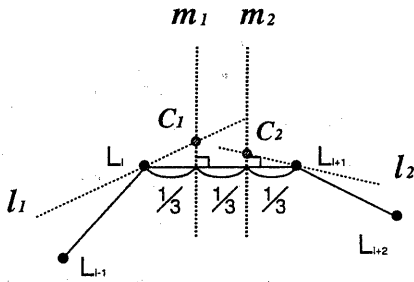


図 5: アウトラインの生成法

ての側線分に対して行なうことによって、アウトラインとなる 3 次 Bézier 曲線が得られる。このように接続された 3 次の Bézier 曲線は各セグメントの接続点(ここでは側線点)において C^1 の連続性を有する。

3 破線ストロークの自動生成

本節では 2 節で述べたような手法によって生成されたストロークを、その描かれた位置における画像の濃淡に対応した破線として描画する手法について述べる。凹版肖像画では破線による濃淡表現が非常に多く用いられている。このような破線のパターンは画像の濃淡にほぼ対応しているため、これを本節で示すような手法で自動で生成することでユーザの入力の手間を大幅に減らすことができる。

まずあらかじめ画像の濃淡に対応した破線のパターンをユーザが設定しておく。これはユーザによって異なった濃淡表現を可能にするためである。次に破線ストロークとして描画する骨格線のデータ点を 2.2 節で示した手法を用いて区分的な 3 次の Bézier 曲線として近似し、これを筆圧ペンの軌跡とする。次にこの曲線を細分割することによって曲線上に多くの点を発生させる。これらの点の位置における画像の濃淡値を参照することによって、ストロークの骨格線に沿った濃淡情報を得ることができる。この濃淡情報を用いて破線パターンの境界を求め、各区間をそれに対応した破線パターンを用いて破線ストロークの描画を行なう。

3.1 破線パターンの設定

本手法では破線パターンを次のように設定するものとした。

[black white]

ここで black は破線を構成する黒の部分の長さ、white は白の部分の長さであり、これを交互に繰り返すことによって破線が描画される。画像の濃度値を閾値を与えることによりいくつかのレベル(破線レベル)に分け、それぞれのレベルに対してこのような破線パターンを設定する。表 1 に破線レベル及び破線パターンの設定例を示す。ここで [1 0] はそのレベルが実線であることを示す。本手法では破線レベル及び破線パターンは描画を行なう前にあらかじめ決めておくこととしたが、破線ストロークを描画する際にそのつど設定あるいは変更ができるようにすることも可能である。

3.2 破線セグメントへの分割

区分的な 3 次の Bézier 曲線として近似された筆圧ペンの軌跡上に次のような de Casteljau のアルゴリズムを再帰的に用いる手法によって分割点を生成する。

1. Bézier 曲線の制御点 V_0, V_1, V_2, V_3 に対して、 $V_0 V_3$ 間の距離を計算する。
2. 1 で求めた距離があらかじめ決められた閾値 ($dist$) 以下であれば、それ以上の分割は行なわないものとし処理を終了する。もしそうでなければ 3 以降の処理を実行する。
3. de Casteljau のアルゴリズムを用いて、パラメータ $t = 1/2$ に対応する点で曲線を分割する。
4. 分割された 2 つの部分、すなわち $0 \leq t < 1/2$ の部分と $1/2 \leq t \leq 1$ の部分をそれぞれ 1 本の Bézier 曲線と考え、この順に 1 からの処理を繰り返す。

本研究ではここで用いる閾値を $dist = 1 \sim 2$ ピクセル程度が適当であるとした。

次にこうして得られた軌跡上の分割点それぞれについて、それに対応する画像の濃淡値を

表 1: 破線パターンの設定例 (8 階調画像の場合)

破線レベル	濃度値の範囲		破線パターン [black white]
	Min	Max	
レベル 1	0	3	[1 0]
レベル 2	4	5	[10 3]
レベル 3	6	7	[3 10]

順に参照することによって、ペンの軌跡に沿った濃淡値の変化を調べ、これが破線レベルを越えて変化する部分において、その閾値に最も近い点のパラメータを破線セグメントの境界パラメータとする。このとき用いる画像データは濃淡の変化を滑らかにするため、あらかじめ平滑化しておくことが必要である。

図 6 にこれらの処理の概念図を示す。ここで v_{i-1}, v_i, v_{i+1} は、軌跡上に生成された分割点である。

3.3 破線ストロークの描画

ここでは各破線セグメントをそれに対応する破線パターンで描画する手法について述べる。ここで必要とされるのは、破線の黒い部分から白い部分へ、あるいはその逆へと変化する軌跡上の点のパラメータ (反転パラメータ) である。まずこの反転パラメータの求め方について述べる。

ここでは表 1 の破線レベル 2 の場合を例にとって説明する。まずセグメントの始点となる境界点から順に各分割点の距離を累算し、この値が 10 ピクセルに最も近くなる点を最初の黒の部分の終点とし、これを第 1 の反転パラメータとする。次にこの点を始点として同様の処理を行ない、距離の累計が 3 ピクセルに最も近い点を次の黒の部分の始点とし、これを第 2 の反転パラメータとする。これらの処理を次の破線セグメントの始点に到達するまで行ない、セグメント内のすべての反転パラメータを求める。

ストロークの側線点の数は骨格線のデータ点の数と等しいので、この反転パラメータをそ

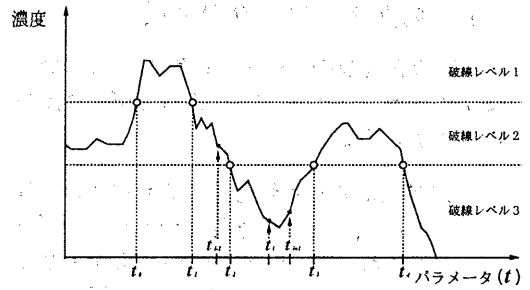


図 6: 破線セグメントへの分割

のままアウトラインの Bézier 曲線に適用し、黒の部分のみを描画し内部を塗りつぶすことによって破線ストロークを描画することができる。

4 ストロークパターンの自動生成

本手法では、パターン内部のストロークを両端の骨格線データを線形補完することによって生成する。このとき両端の 2 本の骨格線は、それを構成するデータ点の数が異なっている場合が多い。そのため、まずこれらの数を合わせ、データ点どうしの対応づけを行なわなければならない。そしてさらにこうして生成されるストロークパターンを自由な形状をした領域に描画することを可能にするためにクリッピング処理を行なう。

4.1 内部ストロークの生成

両端の骨格線のデータ点の数が異なる場合は、次に示すアルゴリズムによってデータ点の対応づけを行なう。

- 3.2節で計算した軌跡上の分割点間の距離を用いて、2本の骨格線上のすべてのデータ点における、軌跡全体の距離を1とした始点から各点までの距離の割合(この値を d とする)を求める。
- データ点の数の少ない方の骨格線について、すべてのデータ点を順に他方のデータ点の中で d の値の最も近い点と対応づける。
- データ点の多い方の骨格線において、まだ対応づけが済んでいないデータ点を、その点の d の値が両隣のデータ点の d の値を内分する比を求め、これを用いてデータ点の少ない方の軌跡の分割点の中でこの比に最も近い点と対応づける。

これらの各処理について図7のような比較的簡単な場合を例にとり説明する。4点 V_{00}, \dots, V_{03} によって構成されるデータ点の少ない方の骨格線を C_0 とし、5点 V_{10}, \dots, V_{14} によって構成されるデータ点の多い方の骨格線を C_1 とする。また1の処理によって求められるそれぞれのデータ点に対応する d の値を $d_{00}, \dots, d_{03}, d_{10}, \dots, d_{14}$ とし、それらの値は図に示す通りとする。

まず2の処理によって V_{00} から V_{03} までの点について、図に示す矢印のように C_1 上のデータ点との対応づけを行なう。

次に3の処理によって C_1 上の点でまだ対応づけの済んでいない V_{13} の対応づけを行なう。このとき d_{13} がその両隣の点における d_{12}, d_{14} を内分する比、すなわちこの場合は $3:2$ を用いて、 V_{02} と V_{03} の間の分割点の中の d_{02} と d_{03} を $3:2$ に内分する値 $d = 0.84$ に最も近い d の値をもつ点 v と対応づける。

このように対応づけを行なった後、対応する点どうしを結ぶ直線上で線形補間を行なうことにより、内部ストロークの骨格線のデータ点を新たに生成する。ここでは、両端の骨格

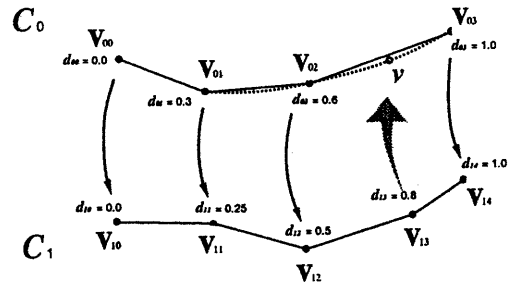


図7: データ点の対応づけアルゴリズム

線の全てのデータ点の対応づけを行なった後に、対応する2点間を線形補間することにより内部ストロークの骨格線のデータ点を新たに生成する。図7に示した場合において、2本の内部ストロークの骨格線を生成した例を図8に示す。

4.2 クリッピング処理

これまでに述べた線形補間による手法によって生成されるストロークパターンは、かならず全ての骨格線の始点及び終点が直線上に並ぶような領域にしか描画することができない。そこでこのようなストロークパターンが自由度の高い領域をもつことを可能とするためにクリッピング処理を行なう。

まず前述の手法によって生成されたストロークパターンに対し、ユーザが2本(1本でも可能)のクリッピング曲線を入力する(図9参照)。このクリッピング曲線の入力は2.1節における骨格線データの入力と同様に、筆圧ペンをタブレット上で動かすことにより行なうものとする。またこれらの曲線は折れ線データのまま扱うものとし、点の間隔は5~10ピクセル程度が適当であるとした。

次に2本のクリッピング曲線を構成する線分一本一本について順に、パターンを構成する骨格線の全ての骨格線分(各データ点を結ぶ線分)との交差判定を行ない、もし交点をもつ場合には、この点を新たな骨格線の端点とする。図9にクリッピング処理を行なった例を示す。

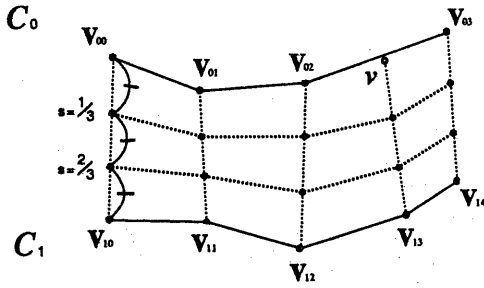


図 8: 内部ストロークの生成

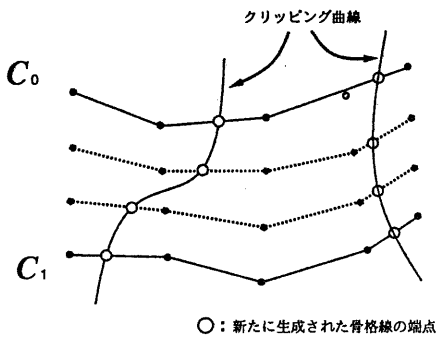


図 9: クリッピング

5 描画結果

次の図 10 から図 14 に描画結果の例を示す。図 10 はストローク 1 本を描画した例である。ここではストロークの端点の形状を自然なものとするために、その点でのストローク幅を半径とする半円を付け加えて表示した。図 11 は描画範囲を簡単な 3 つの破線レベルに対応した領域に分け、それぞれを図中に示した破線パターンを用いて描画を行なった例である。図 12 は実際の凹版肖像画を描画する場合と同様に写真の上に破線ストロークを描画した例である。図 13 はストロークパターンを描画した例である。図 14 は図 2 を画像データとしてフレームバッファに読み込み、その上をなぞるようにして本手法によるストロークパターンを描画した例である。

6 検討

図 10 に描かれたすべてのストロークは非常に自然であり、良好な結果が得られた。ストロークのアウトラインを構成する 3 次の Bézier 曲線は、各セグメントの接続点において C^1 連続である。そのためアウトラインは、その全体を通しての接線ベクトルの変化が連続であるような滑らかな曲線となっている。

図 11 及び図 12 の破線ストロークの描画結果はいずれもほぼ良好な結果である。実際の凹版肖像画では彫刻者によって濃淡の表現方法はさまざまである。本手法では、画像データの階調やそれに対する破線レベルの数及び破線パターンをユーザが自由に設定することにより、ユーザ独自の表現方法を用いた描画が可能である。

図 13 及び図 14 に示したストロークパターンの描画結果についても生成された内部ストロークの形状及び各ストロークの間隔は非常に自然なものである。図 14 はこのストロークパターンの自動生成技術を用いて実験的に肖像画の描画を行なった結果であるが、図 2 と比べてもわかるように、実際の肖像画で用いられているパターンに非常に近いものが生成されている。

7 結論

本研究では、現在非常に困難な作業によって作成されている凹版肖像画の原版を、対話的に効率よく生成するための Drawing Tool を提案し、そのために必要であると考えられる 3 つの技術についての手法を示した。さらにそれらの手法を用いて簡易的な Drawing Tool を作成し、これを用いて実験的な描画を行なうことにより、これらの技術の有用性を確かめることができた。

今後、より実用的な Drawing Tool を作成するためには、インターフェイスやストロークの彫りの深さの決定方法などの課題についても検討する必要があると考えられる。

また、本手法による描画結果の評価、および以上に述べた課題の検討については、ユーザである凹版肖像画作成の専門家の意見が非常に大切である。

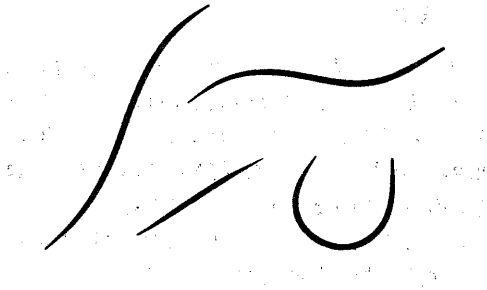


図 10: ストロークの描画例

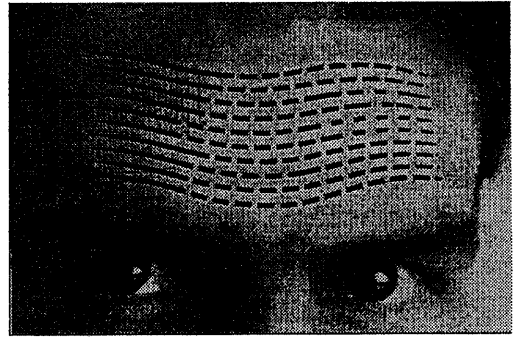


図 12: 破線ストロークの描画例 2 (写真の上書き)

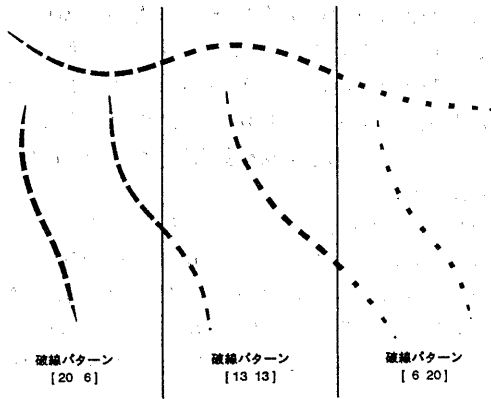


図 11: 破線ストロークの描画例 1 (破線レベル数 = 3)

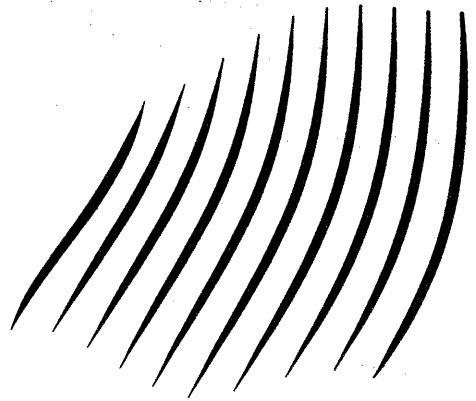


図 13: ストロークパターンの生成例

参考文献

- [1] 大蔵省印刷局編著, “凹版美術印刷 — 凹版彫刻による芸術作品,” 大蔵省印刷局, 1987.
- [2] 原田 耕一, 佐伯 哲二, 中前 栄八郎, “手書き文字作成のための筆圧入力装置の開発,” 信学会技研報告, IE87-86, pp.9-15, 1987.
- [3] Steve Strassmann, “Hairy Brushes,” Vol.20, pp.225-232, 1986.
- [4] Gerald Farin, “Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design — A Practical Guide,” Academic Press, 1990.

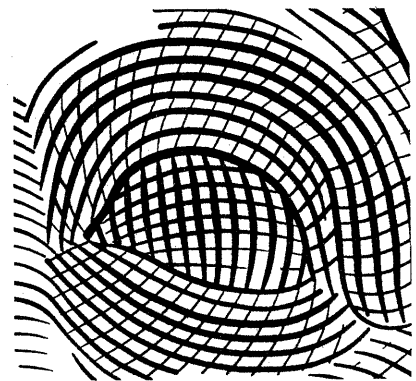


図 14: 肖像画の描画例 (図 2 の上書き)