

仮想メゾチントのための濃淡階調解析とそのモデル化

田崎 大輔[†], 加藤 恵^{††}, 水野 慎士^{†††}, 岡田 稔[†]

[†] 早稲田大学大学院情報生産システム研究科

^{††} 九州産業大学芸術学部美術学科

^{†††} 豊橋技術科学大学情報メディア基盤センター

あらまし: メゾチントは伝統的な凹版印刷技法の一つであり, その版は (a) 目立て, (b) 削り, (c) 磨き, の三工程を経て製作される. メゾチントの最大の特徴は, これら三工程によって得られる豊かな階調表現にある. 本論文では, 特に製版の三工程で起きている物理現象をモデル化することで, PBR (physics-based rendering) アプローチによるメゾチントの再現手法を提案する. 銅版画の専門家が制作した濃淡階調パターンを用いて, 製版工程と得られる階調の関係を解析する. そこで得られた知見に基づいて従来手法を改善する. 専門家による実際の銅版画作品を再現することで, 提案手法の有効性を示す.

A Gray-tone Analysis for Virtual Mezzotint and Its Modeling

Daisuke TASAKI[†], Megumi KATOU^{††}, Shinji MIZUNO^{†††} and Minoru OKADA[†]

[†] Graduate School of Information, Production and Systems, Waseda University

^{††} Faculty of Fine Arts, Kyushu Sangyo University

^{†††} Information and Media Center, Toyohashi University of Technology

Abstract: Mezzotint is one of the traditional copperplate printing techniques. A plate is set up going through three phases: roughening, scraping, and burnishing. An important characteristic of mezzotint is a gradation effect from black to white. In this paper the method simulating these phases and physical phenomena with a physics-based approach is discussed. The feasibility of the proposed method is demonstrated by observing and comparing real and virtual plate surfaces with predetermined patterns and an actual handcrafted work.

1 はじめに

メゾチント [1, 2, 3] は欧州を中心として 17 世紀の半ばに考案された伝統的な銅版画技法の一つである. 図 1 に示されるような黒から白への豊かな階調によって写実的な表現ができるため, 肖像画や名画の工業的な複製手法として広く活用されていた. 19 世紀に写真が発明されるとメゾチントは忘れ去られたが, 20 世紀に入り長谷川潔らの活動により, 単なる工業印刷技法ではなく芸術的な表現の一つとして認められるようになり, 現在に至っている. 銅版画にはメゾチント以外にも数多くの技法が存在するが, それらは共通して, (a) 製版, (b) インク詰め,

(c) インク拭き取り, (d) 印刷, の 4 つの工程によって制作される. メゾチントの作品は豊かな階調が特徴的であるが, これを得るためにメゾチントの銅版は, 目立て, 削り, 磨き, の 3 つの工程を経て製版される. 目立て工程では, ロッカーと呼ばれる道具を用いて版面全体に小さな刻点を彫る. このとき, 刻点の周りには銅が押し退けられてできるまくれが発生する. そして, この刻点とまくれにインクが残るため, 印刷後の作品に黒い効果となって現れる. 削り工程では, スクレーパと呼ばれる道具を用いてまくれを削り取る. そのため, まくれに残るインクが少なくなり, 印刷後の作品に中間調となって現れる. 特に作品中に真っ白な効果を与えたい場合は,

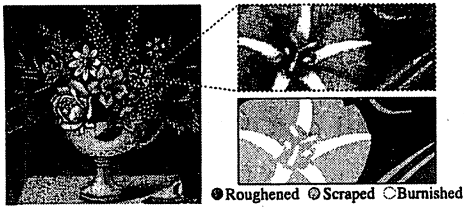


図 1: 長谷川潔によるメゾチント作品 [3]
(左: 1/6 倍, 右上: 実寸, 右下: 構成要素)

磨き工程でバニッシャと呼ばれる道具を用いて版面を磨く。メゾチントはこれらの工程によって豊かな階調が得られる技法であるが、版面全体を目立てる作業だけでも非常に手間がかかり、50×65cm 程度の大判の場合 30~40 日要するとされている [2]。このような銅版面の煩雑な作業を仮想空間上で再現し容易に扱えるものとする事で、銅版面を専門家だけの芸術作品にとどめておくのではなく多くの一般ユーザに開放することを本研究では目的としている。筆者らはこれまでに、非写実的画像合成 (NPR: non-photorealistic rendering)[4] の一手法として、特に作品の制作工程と各工程における物理現象を再現する物理モデル駆動 (PBR: physics-based rendering) に基づいた、銅版面の再現手法を提案してきた。[5] ではドライポイントと呼ばれる銅版面技法に注目し、仮想銅版面手法の全体構成を提案した。また [6, 7] では、銅版面の各種技法は製版工程の違いのみでその他の工程は共通という事実に基づき、製版工程における物理モデルを変更するだけで、ドライポイント以外の製版技法への拡張を示唆した。[8, 9] では特にメゾチントの再現手法を提案したが、実際の銅版面作品として書籍 [3] をスキャンした画像を用いていたため、メゾチントの制作工程や濃淡に対して十分な考察ができていなかった。そこで本論文では、メゾチントの制作工程を観察するとともに、実際のメゾチント作品を用いて濃淡階調を解析する。これらの知見に基づき、従来手法のモデルを改善する。実際のロッカーの振る舞いを模倣したジグザグ状に刻点列を生成するモデルを導入し、削りと磨きモデルに対して揺らぎ効果を与える。実際のメゾチント作品を入力とした合成実験をすることで、改善手法の有効性を示す。

2 関連研究

これまでに、いくつかの銅版面画像生成に関連する研究が報告されている。大野ら [10] は、エン

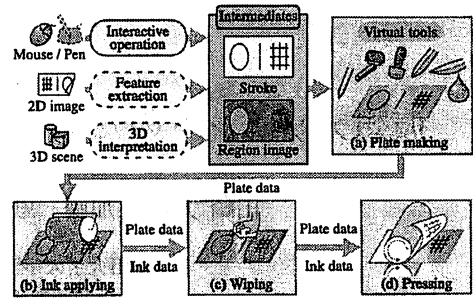
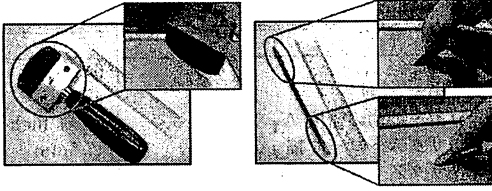


図 2: 仮想銅版面手法の構成

レーシングの制作支援ツールには、太さを持つ曲線の表現、破線ストローク及びそのパターンの自動生成が必要であるとし、これらの要素技術を用いたシステムを構築している。Leister[11] は光線追跡を応用した干渉縞を生成することにより、また Pnueli ら [12] は二次元画像の濃淡値の等ポテンシャル線を生成することにより、エンレーピング風のパターンを発生させている。Ostromoukhov[13] はピュランにより切削された版面の簡易モデルを定義し、入力輝度値に対する出力輝度値を定める閾値として用いている。これらの研究では、一般にエンレーピングと呼ばれる銅版面の一技法による作品がにじみの無い単純な線で構成され、濃淡は線の粗密で表されるという特徴に基づいて、描線をどのように配置するかという問題に主眼が置かれている。そのため、線面の再現手法 [14] なども外観上はエンレーピング作品に似ているといえる。また、実際のメゾチント作品の外観はハーフトーニング [15] やディザリングに似ている。特に、Ostromoukhov らは空間充填曲線とドロネー網を用いたディザリング手法 [16] を示しているが、生成画像の外観的特徴が結果的にメゾチントに似ていると述べている。これらの研究では、拭き取りや印刷などの工程に関する考察がされておらず、ABR アプローチによる単なる刻線の生成手法に終始している。しかしながら、実際の銅版面では刷り過程におけるインクの振る舞いが印刷結果に大きく影響するため、製版工程だけでなくその他の工程も考慮することが重要である。

3 仮想メゾチント

筆者らがこれまでに提案してきた仮想銅版面手法 [5] の全体のパイプラインは、実際の制作工程と同様に 4 つの工程から構成されている (図 2 参照)。そし



(a) ロッカー (b) 上: スクレーパー, 下: パニッシャ

図 3: メゾチントの製版工程で用いる道具

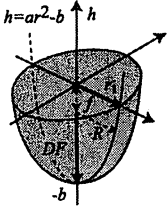


図 4: ロッカーによる刻点の形状関数

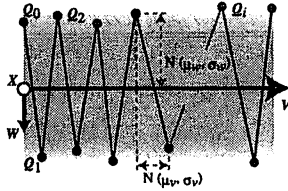


図 5: ジグザグ状の刻点列

て、メゾチントの製版工程はさらに、目立て、削り、磨きの三工程から構成されている [8, 9]。提案手法では中間表現を導入しており、入力データを一旦中間表現に変換することで、様々な入力デバイスを統一的に扱うことが可能となる。メゾチントに対しては、中間表現として領域画像を用い、削りと磨きの領域と回数を制御している。以下では、メゾチントの三工程について、実際の道具や版面の状態、そして銅版面を専門とする筆者の一人によって作られた実際の作品を解析することで、物理モデルの改善手法を示す。ただし、以下では仮想版面の形状はハイトフィールド $P = \{P(X) \mid X = (i, j) \in \mathcal{N}^2\}$ で表現されるものとする。

3.1 目立て

目立て工程では、図 3a に示される先端に無数の歯を持つ楕円形をしたロッカーと呼ばれる道具を用いる。ロッカーを版面に突き立て、左右にジグザグと揺らしながら進むことで、刻点列を版面に刻むことができる。この操作を従来手法 [8, 9] では、図 4 に示されるモデルによる刻点およびまくれをランダムに配置することで近似していた。改善手法では、実際のロッカー操作を模倣するために、図 5 に示されるようにジグザグ状に目立てを行う。ロッカーの巨視的な軌跡を始点 P と方向ベクトル V で表すとき、第 i 番目の操作の始点 Q_{i-1} と終点 Q_i を次式

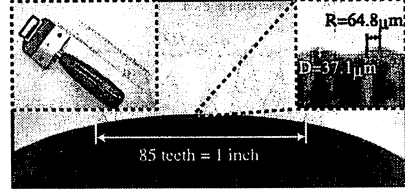


図 6: ロッカーの計測結果 ($N_t = 85$)

で定める。

$$Q_i = X + v_i \frac{V}{|V|} + w_i \frac{W}{|W|} \quad (1)$$

$$v_0 = 0 \quad (2)$$

$$v_i = v_{i-1} + N(\mu_v, \sigma_v^2) \quad (3)$$

$$w_i = (-1)^i N(\mu_w, \sigma_w^2) \quad (4)$$

ここで、 W は V に直交するベクトルで幅方向を表し、 $N(\mu, \sigma)$ は平均 μ 、標準偏差 σ の正規乱数を表す。この操作を $v_i < |V|$ が満たされている間繰り返す。

各操作で定まる線分に対し、図 4 に示される従来提案していた刻点形状関数 [8, 9] により仮想版面を変形させる。ただし、一つの刻点の深さ D と半径 R は、図 6 に示されるデジタルカメラで撮影した画像を用いて、 N_t に対応するピクセル数を基準として求めた。 N_t とは、1 インチあたりのロッカーの歯の数を表しており、市販されているロッカーとして #65, #85, #100 が一般的である。この値は刻点同士の間隔を定める際にも用いている。

3.2 削り

削り工程では、図 3b の上に示されるナイフ様の形状をしたスクレーパーと呼ばれる道具を用いて、目立て工程で版面に生じたまくれを削り取る。まくれを削る程、まくれに引掛って残るインクが少なくなるため、明るい濃淡階調が得られる。この現象は、図 7 に示されるように、仮想版面の高さを一定の割合で減少させるモデルで表現する。このモデルは、削りの箇所と回数を表わす中間表現である領域画像を参照して適用される。領域画像より対象領域 $R = \{R(X) \mid X = (i, j) \in \mathcal{N}^2\}$ が与えられると、仮想版面の高さは次式によって更新される。

$$p'(X) = \min \left\{ p(X), \alpha f_s(X) \max_{X \in R} p(X) \right\} \quad (5)$$

ただし、 α は減小率を表し、 $f_s(X)$ は二次元中点変位法によるフラクタル要素を表している。これにより削り操作の揺らぎを表現している。

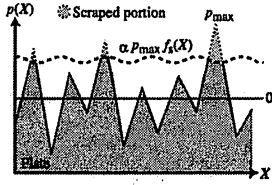


図 7: 版面の高さの減小による削り

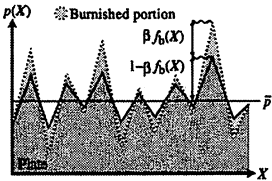


図 8: 版面の高さの平滑化による磨き

3.3 磨き

磨き工程では図 3b の下に示されるスプーンのような形状をしたバニツシャと呼ばれる道具で版面を磨き上げる。版面を磨くと、まくれが穴に押し込められて版面が平らになり、インク拭き取り工程にてインクが版面に残らないため、真っ白なハイライト効果を作品に与えることができる。この現象は、図 8 に示されるように、仮想版面の高さを一定の割合で平滑化させるモデルで表現する。このモデルは、削りモデルと同様に、磨きの箇所と回数を表わす中間表現である領域画像を参照して適用される。領域画像より対象領域 R が与えられると、仮想版面の高さは次式によって更新される。

$$p'(X) = (1 - \beta f_b(X))p(X) + \beta f_b(X) \frac{1}{N} \sum_{X \in R} p(X) \quad (6)$$

ただし、 N は領域 R 内のセル数を表し、 β は平滑率を表している。また、 $f_b(X)$ は二次元中点変位法によるフラクタル要素を表している。これにより磨き操作の揺らぎを表現している。

4 実験・考察

前節で提案したモデルを実装し実験を行った。本実験で用いた各種パラメータの値を表 1 にまとめる。仮想銅版は刻点の形状を良好に表すために 2,540dpi の解像度を持つ。これは 8.5×6.6cm の版面の場合、8,500×6,600 画素に相当する。第 3 で示した改善手法に加え、印刷工程において紙の変形モデル [17] を導入している。また、従来手法 [8, 9] では印刷工程に

表 1: 諸パラメータ設定値

Parameter	Value
刻点の半径 R	64.9 μm [†]
刻点の深さ D	37.1 μm [†]
ロッカーの歯の密度 N_t	80 歯/inch [†]
ジグザグストローク幅 μ_w	17.5mm [†]
ジグザグストローク幅の揺らぎ σ_w	1.0 μm
ジグザグストロークの歩幅 μ_v	0.3mm [†]
ジグザグストロークの歩幅の揺らぎ σ_v	0.1 μm
削りの減小率 α	0.9
削りの減小率の揺らぎ σ_{fs}	0.01
磨きの平滑化 β	0.9
磨きの平滑化の揺らぎ σ_{fb}	0.01
ガウス関数のマスクサイズ N_g	17

[†] 計測結果により定義。その他は予備実験に基づく。

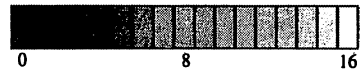


図 9: 削りと磨きの回数を示す階調

おけるインクの拡散モデルとして、ランダムウォークを採用していたが、印刷結果に不自然な白い点が目立っていた。これを緩和させるために今回はガウス関数によって拡散させるモデルを採用した。

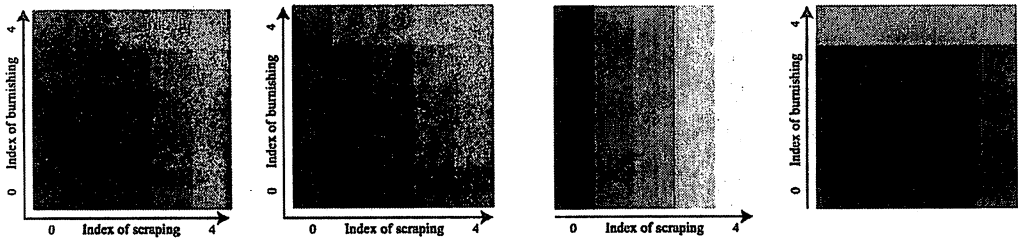
一般に、目立て工程は版面が均一になるまで繰り返され、階調は削りと磨き工程によって与えられるため、本実験では後者の 2 つの工程に注目する。削りと磨き工程に対する中間表現である領域画像は、本論文では図 9 に示される階調値を用いて対象領域と操作回数を表現するものとする。実験には濃淡階調パターンと作品を用いる。これらの版は銅版面を専門とする筆者の一人によって制作された。

4.1 濃淡階調パターンを用いた実験

図 10 に濃淡階調パターンを用いた実験結果を示す。実際の作品中では様々な階調が表現されるが、削りと磨き工程の印刷結果への影響を解析するために 5×5 (=25) 種類のパターン (図 10a 参照) を制作した。図 10b は提案手法による仮想メゾチントである。本実験では実際のメゾチントで得られる階調を表現するために 17×17 (=289) 種類のパターンを生成し、図 10a の各パターンの平均輝度値に適合するパターンを抽出した。このときの領域画像を図 10c および 10d に示す。

4.2 メゾチント作品を用いた実験

図 11 に、より実践的なメゾチント作品を用いた実験結果を示す。図 11a に示す実際のメゾチント作品のサイズは 8.5×6.6cm であるが、6.6cm 幅に切り取って示している。図 11b は提案手法による仮



(a) 実際の濃淡階調パターン (b) 仮想濃淡階調パターン (c) 削りの領域画像 (d) 磨きの領域画像
 図 10: 濃淡階調パターンを用いた実験結果 (サイズ: 10×10cm, 0.3 倍)

想メゾチント作品である。これを生成するために用いた領域画像 (図 11c および 11d) は、画像処理ソフトウェア上で手作業で領域分けをし、削りと磨きの操作回数を前述の濃淡階調パターンによる実験結果に基づいて決定することで生成した。図 11e および 11f はそれぞれ実際のメゾチント作品と仮想メゾチント作品の一部を 2 倍に拡大したものである。また、図 11g および 11h は領域画像を見やすくするためにエッジを強調させたものである。図 11i は印刷後の実際の版面である。印刷後にも版面には紙に転写されなかったインクが残っており、そのため版面の状態を確認することができる。図 11j は同様に印刷後の仮想版面の状態を OpenGL にて三次元表示したものである。

4.3 考察

図 10 に示す濃淡階調パターンによる実験結果を比較すると、実際のメゾチントよりも仮想メゾチントの方が高コントラストである。実際の版面上ではインクを拭き取った後でも油膜が残っており、これが印刷後に灰色のトーンとなって現れる。しかし、仮想メゾチント手法では油膜に関するモデルの考察がまだされていない。また、実際の拭き取りではインクを拭き取る部分と残す部分とで拭き取り方が異なり、印刷結果に強く影響する。しかし、現在の仮想メゾチント手法ではインタフェースが貧弱であるため、インクの拭き取り量を調節することが難しい。これらの現象に対する非常に簡略的なモデルとして、結果画像のコントラストを主観評価により調節している。より実践的な実験結果である図 11 を比較すると、コントラストの問題はあるが、外観的には実際のメゾチント作品を良く再現できている。しかし、実験に用いた領域画像は手作業で作成したため最適化されてはいない。ユーザの感性に合わせた領域画像の生成手法は今後の課題である。

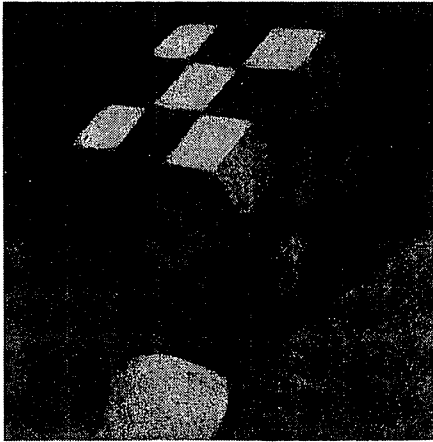
5 まとめ

本論文では、仮想メゾチントの改善手法を提案した。提案手法は実際のメゾチントの制作工程と同様に、目立て、削り、磨きの三工程を経て版面を成形する。目立て工程では、ロッカーの振り舞いを表現したジグザグ状に刻点列を生成するモデルを導入した。削りおよび磨き工程ではそれぞれ、手作業による揺らぎを付加した版面の高さの減小および平滑化モデルを導入した。これらの手法の有効性を確かめるために濃淡階調パターンを実際に制作し、観察および解析を行った。そして提案手法による仮想メゾチントパターンと比較することで、メゾチントの特徴である豊かな階調を表現可能であることを示した。より実践的な実験として実際に作成したメゾチント作品を入力として仮想的な複製を行い、提案手法の有効性を示した。実験に用いた実際の濃淡階調パターンおよびメゾチント作品は、銅版画を専門とする筆者の一人によって制作されたものである。

今後の課題として、インク拭き取り工程および印刷工程における油膜の影響のモデル化について検討する。また、中間表現である領域画像の自動生成手法や、筆圧感知ペン型タブレット等を利用したユーザインタフェースの構築についても検討予定である。

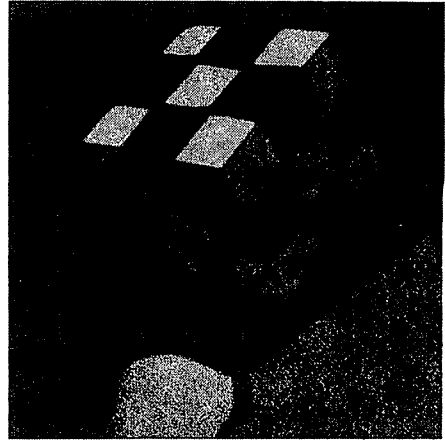
参考文献

- [1] 視覚デザイン研究所・編集室: “銅版画ノート”, 視覚デザイン研究所 (1988)
- [2] 深澤幸雄: “銅版画のテクニック”, ダヴィッド社 (1989)
- [3] 長谷川潔: “日本現代版画 長谷川潔”, 玲風書房 (1994)
- [4] 大野義夫: “フォトリアルでない CG 画像表現の手法について”, 情報研報グラフィクスと CAD, 95-CG-76-1, pp. 1-7 (1995)
- [5] D. Tasaki, S. Mizuno and M. Okada: “Virtual Drypoint by a Model-driven Strategy”, *Computer Graphics Forum*, Vol. 23, No. 3, pp. 431-440 (2004)



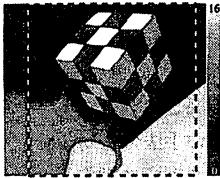
(a) 実際のメゾチント作品

(サイズ: 8.5×6.6cm, 実寸, 筆者の一人により作成)

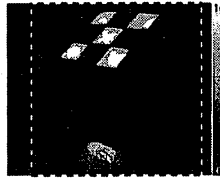


(b) 仮想メゾチント作品

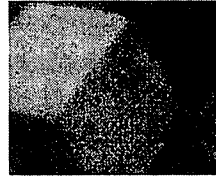
(サイズ: 8.5×6.6cm, 実寸)



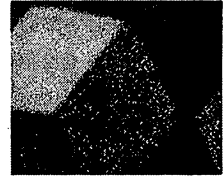
(c) 削りの領域画像



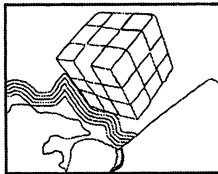
(d) 磨きの領域画像



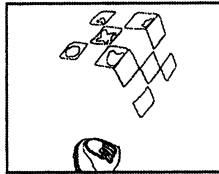
(e) 実際のメゾチント作品
(ROI: 1.6×1.3cm, 2倍)



(f) 仮想メゾチント作品
(ROI: 1.6×1.3cm, 2倍)



(g) 削りの領域画像のエッジ強調画像



(h) 磨きの領域画像のエッジ強調画像



(i) 実際の銅版の印刷後の状態



(j) 仮想銅版の印刷後の状態

図 11: 実際のメゾチント作品を用いた実験結果

- [6] 田崎大輔, 水野慎士, 岡田稔: “仮想銅版画技法とそのドライポイントとエングレービングへの応用”, 情報科学技術レターズ, Vol. 3, No. LJ-003, pp. 209-211 (2004)
- [7] 田崎大輔, 水野慎士, 岡田稔: “仮想銅版画とその各種製版技法への応用に関する一検討”, 情報研究グラフィクスとCAD, Vol. 04-CG-117, No. 20, pp. 115-120 (2004)
- [8] D. Tasaki, S. Mizuno and M. Okada: “Virtual Mezzotint using a Model-driven Strategy”, *Proc. of ACM-SIGGRAPH 2005 Posters*, 1 p. (2005)
- [9] D. Tasaki, S. Mizuno and M. Okada: “Model-driven Virtual Mezzotint Techniques”, *Proc. of Short Presentation of Eurographics 2005*, 4 p. (2005)
- [10] 大野義夫, 坊見利: “凹版印刷のための肖像画の対話的な生成手法”, 情報研究グラフィクスとCAD, 92-CG-58-14, pp. 89-96 (1992)
- [11] W. Leister: “Computer Generated Copper Plates”, *Computer Graphics Forum*, Vol. 13, No. 1, pp. 69-77 (1994)
- [12] Y. Pnueli and A. M. Bruckstein: “DigⁱDürer – a digital engraving system”, *The Visual Computer*, Vol. 10, No. 5, pp. 277-292 (1994)
- [13] V. Ostromoukhov: “Digital Facial Engraving”, *Proc. of SIGGRAPH '99*, pp. 417-424 (1999)
- [14] G. Elber: “Interactive Line Art Rendering of Freeform Surface”, *Computer Graphics Forum*, Vol. 18, No. 3, pp. C-1-12 (1999)
- [15] O. Veryovka and J. Buchanan: “Comprehensive Halftoning of 3D Scenes”, *Computer Graphics Forum*, Vol. 18, No. 3, pp. C-13-22 (1999)
- [16] V. Ostromoukhov and R.D. Hersch: “Stochastic Clustered-dot Dithering”, *J. of Electronic Imaging*, Vol. 8, No. 4, pp. 434-445 (1999)
- [17] 田崎大輔, 加藤恵, 水野慎士, 岡田稔: “仮想銅版画における拭き取りと紙の変形に関する一考察”, ビジュアルコンピューティングワークショップ2005 in 山口, No. 10, 6p. (2005)