

## モデル駆動による仮想銅版画とその課題

田崎 大輔<sup>†</sup>, 加藤 恵<sup>††</sup>, 水野 慎士<sup>†††</sup>, 岡田 稔<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 早稲田大学大学院情報生産システム研究科

<sup>††</sup> 九州産業大学芸術学部美術学科

<sup>†††</sup> 豊橋技術科学大学情報メディア基盤センター

あらまし: 我々は従来より NPR (Non-photorealistic rendering) の一手法として, 凹版印刷技法の一つである銅版画の再現手法を提案している. 提案手法の特徴として, 物理モデル駆動であること, すなわち, 単に銅版画画像を生成するのではなく, 実世界の制作工程における物理現象を再現することで, その工程や操作を仮想体験できることを目指していることが挙げられる. さて, 実際の銅版画の制作工程は, (a) 製版, (b) インク詰め, (c) インク拭き取り, (d) 印刷, の四工程から構成され, 銅版画には主に製版工程における道具や手法の違いにより数多くの技法が存在するが, その他の工程は各種技法においてほぼ共通である. 本論文では, 今後の研究課題を明確にするために, 実際の制作工程を調査するとともに, これまでに報告されている銅版画に関連する研究成果をサーベイする. また, 実際に印刷実験を行うことで得られた知見に基づき提案手法の精度向上を図る.

## Model-driven Virtual Copperplate Printing and Its Issues

Daisuke TASAKI<sup>†</sup>, Megumi KATOU<sup>††</sup>, Shinji MIZUNO<sup>†††</sup> and Minoru OKADA<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Graduate School of Information, Production and Systems, Waseda University

<sup>††</sup>Faculty of Fine Arts, Kyushu Sangyo University

<sup>†††</sup>Information and Media Center, Toyohashi University of Technology

**Abstract:** The authors have proposed a simulation method of copperplate printing as a non-photorealistic rendering method. The main characteristic in our method is based on a physics-based approach. In other words, by simulating some physical phenomena it aims to enable us to experience the making processes and operations in a virtual world. In general, the actual process of copperplate printing consists of four processes: (a) plate making, (b) ink applying, (c) ink wiping, and (d) printing. However there are some plate making method according to the differences among tools and how to deal with them, the other processes are common. This paper researches some physical phenomena occurred in the actual printing process, and surveys the recent studies about virtual copperplate printing. Then, this paper also indicates an improved method based on some experiments by actual copperplate printing.

### 1 はじめに

工芸的あるいは芸術的な作品・作風の模倣などを目的とした非写実的画像合成 (NPR: non-photorealistic rendering) に関する研究が近年注目されており [1], 油彩・水彩画や木版画など様々な芸術工芸作品の模倣が行われている. 特に絵画などの芸術作品の再現を志向した NPR では, 作品の外

観的特徴を模倣すればそのレンダリング手法は特に問題としない目視外観主体駆動 (ABR: appearance-based rendering) と, 作品の制作工程を再現し各工程における物理的な現象をモデル化する物理モデル駆動 (PBR: physics-based rendering) の二つの戦略が用いられる. PBR アプローチでは現実世界で起きている物理現象をコンピュータ上で再現するため,

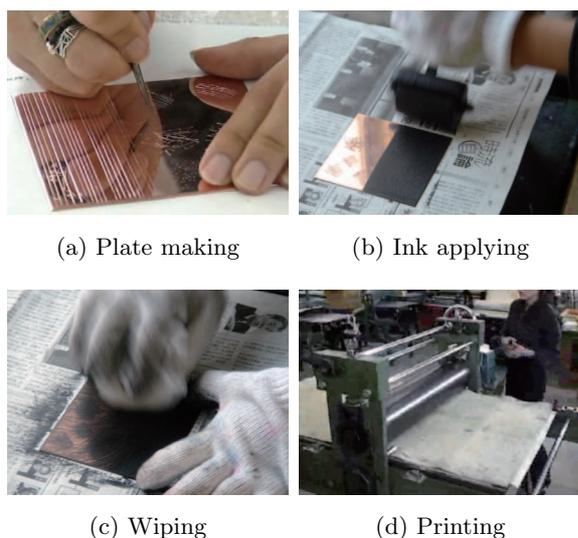


図 1: 銅版画の制作工程

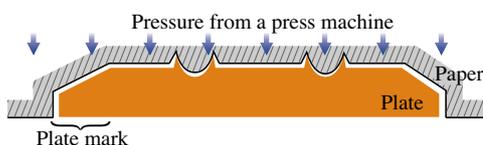


図 2: プレス機の圧力による紙の変形

生成画像は物理的な根拠を持ち、また外観上も良好な結果が得られることが期待される。筆者らはこれまでに、銅版画と呼ばれる凹版印刷技法のひとつに注目し、PBR アプローチによる再現手法を提案してきた [2]–[13]。本論文では、まず実際の銅版画について工程別に特徴を示す。次にこれまでに報告されている銅版画に関連する研究についてまとめ、筆者らが提案してきた仮想銅版画手法と比較する。そして、実際に印刷実験を行うことで得られた知見をまとめ、それに基づいて提案手法の印刷工程における紙の形状モデルを、銅版形状に従って変形する紙の巨視的な形状と、紙の弾力性、水分量、変形度合により変化する微視的な凹凸形状との和で定義する。このモデルを用いた合成実験をすることで、実際の銅版画で生じている紙の形状変化を良好に表現できることを確認した。

## 2 実際の銅版画制作工程

銅版画 [14]–[22] は欧州を中心として発展した凹版印刷技法のひとつであり、今日の工芸・芸術の一分野を形成している。一般に銅版画の制作は、(a)

製版、(b) インク詰め、(c) インク拭き取り、(d) 印刷、の四工程に分かれる (図 1)。銅版画の特徴としてプレス機の圧力によって印刷される紙が銅版の形状に沿って変形することが挙げられる (図 2)。このような紙の変形は銅版画特有であり、美術的にもその価値が認められている。その他の木版画やリトグラフなどの印刷技法ではこのような変形はほとんど見られない。以下、各工程の特徴について示す。

### 2.1 製版工程

銅版画には主に製版工程における道具や手法の違いにより数多くの技法が存在する。製版技法によって刻線形状が異なるため、拭き取り後のインク状態が変化し、印刷後の描線に違いが生じる。それらの技法は次の二つに大別することができる。

**直接法** 鋼鉄製の道具を用いて版面を直接切削する技法 [17, 18, 22]。ビュランで彫るエンレーピング、ニードルで引っ掻くドライポイント、ロッカー等で版面を目立てした後バニッシャ及びスクレーパで削磨するメゾチントなどの技法がある。

**間接法** 版面全体を覆った耐酸性の塗膜を部分的に剥離し、露出した版面を腐蝕液で蝕刻する技法 [14, 15, 16, 17, 20]。ニードルで線状に剥離するエッチング、松脂の粉で点状に版面を覆うアクアチント、ハケ等で比較的広い領域を露出させて深く腐蝕するディープエッチングなどの技法がある。

直接法のドライポイントやメゾチントでは刻線の周りに銅のまくれが生じ、このまくれに引っ掻かって残るインクによる描線のにじみが特徴的である。

### 2.2 インク詰め工程

銅版画で用いられる一般的なインクは、顔料と焼いた亜麻仁油を練ったものであり、顔料と油の比率により固さや粘度を調節して使用される。インク詰めでは、プレートウォーマを用いて銅版とインクを温めてインクを柔らかくし、ローラーやヘラを用いて製版された銅版の凹部までまんべんなく詰める。

### 2.3 インク拭き取り工程

インクの拭き取りは以下の三つの工程に分かれる。  
荒拭き 目の粗い寒冷紗を用いた大部分の不要なインクの拭き取り。

仕上拭き 目の細かい人絹を用いた版面を磨くような拭き取り。

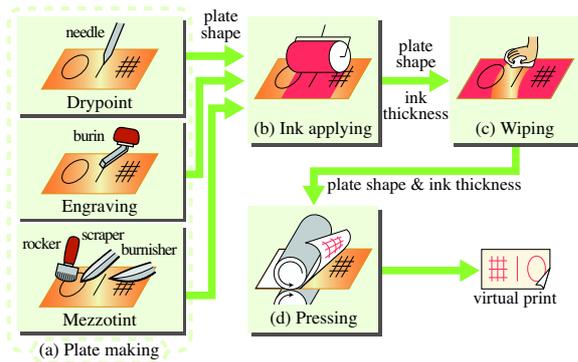


図 3: 仮想銅版画手法の構成

油膜取り 手の平や紙等を用いた版面に残った油膜の拭き取り。

寒冷紗や人絹を用いた拭き取りだけでは、版面に油の薄い膜が残ってしまい、この油膜が印刷後に薄いグレーのトーンとなって現れる。そこで、油分を取った手の平や手より大きめに切った PPC 用紙などを用いて油膜を拭き取る。方向や力加減を変化させた拭き取りや、汚れた寒冷紗による拭き戻しといった操作により、インクの残り方に作家の意図を強く反映させることが可能である。

#### 2.4 印刷工程

銅版画に適した紙の特徴として、プレス機の圧力に耐え得る厚さ及び弾力性や、水で湿った状態での強度などが求められる。これらの特徴を持つ紙としてファブリアーノ、BFK、ハーネミュレなどが用いられ、それぞれ紙の弾力性や繊維の肌理の細かさが異なる。これらは紙の商品名であるが普通名詞のように扱われ流通している。印刷に用いられる紙にはいくつかの種類があり、印刷する際には、水に浸して十分に湿らせることで柔らかくさせた紙を使用する。柔らかい紙ほど銅版の凹部まで喰い込みやすくなるため、微細な刻線の内部のインクまでも刷り取ることができるようになる。印刷には円圧プレス機を用いるが、版面にまくれが生じるドライポイントなどでは、まくれが非常に脆弱でありプレス機で印刷する度に変形するため、良好な刷り結果が得られる枚数は数十枚程度に限られる。

### 3 仮想銅版画

実際の銅版画の製版工程では硬い銅版を切削するためにニードルなどの鋭利な道具や、腐蝕液などの

取り扱いに注意を要する薬品を使用し、印刷工程では非常に大きく重い円圧プレス機を用いるため、銅版画は初心者が手軽に制作することが難しいといえる。そこで我々が提案する手法は、単に ABR アプローチにより銅版画画像を生成するのではなく、PBR アプローチにより物理的に正確な銅版画画像を合成するとともに、銅版画の制作工程を非専門家や子どもでも完全かつ手軽に疑似体験可能とすることを目的としている。

#### 3.1 関連研究

これまでに、いくつかの銅版画画像生成に関連する研究が報告されている。大野ら [23] は、エングレービ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[24] は光線追跡を応用した干渉縞の生成により、また Pnueli ら [25] は二次元画像の濃淡値の等ポテンシャル線生成により、エングレービング風のパターンを発生させている。Ostromoukhov[26] はビ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、一般にエングレービング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を置いている。そのため、線画の再現手法 [27] など外観上はエングレービ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 [28] 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 [29] を示しているが、生成画像の外観の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、実際の銅版画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。

銅版画の再現手法ではないが、Sourin[30] は銅板を用いた芸術技法のひとつであるエンボスを再現する手法として、銅板や道具の形状を関数表現で定義することで解像度に依存せずに銅板表面形状をレンダリングしている。また、Bosch ら [31] は版面に付

けた引っ掻き傷を計測し、BRDFを拡張した手法に基づくことで版面上の傷をレンダリングしている。

筆者らはこれまでに、銅版画の各種製版技法のうち、特にドライポイントに注目してPBRアプローチによる再現手法[2, 3, 4, 6, 7]を提案している。また[8, 9, 10, 11]では各種製版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いて製版工程の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、[12, 13]では特にメゾチントの再現手法を提案している。

### 3.2 各工程

以下、これまでに筆者らが提案してきた仮想銅版画手法について述べる。

**製版工程** 提案手法では、銅版の形状をハイトフィールド  $P = \{p(X) \mid X = (i, j) \in \mathcal{N}^2\}$  を用いて表現し、ニードル及びピュランによる切削、ロッカー及びハーフトーンコームによる目立て、スクレーパによる削り、パニッシャによる磨きをそれぞれモデル化している。

**インク詰め工程** 版面とハイトフィールドと1対1に対応するインクのハイトフィールドを用意し、版面を覆うように一定の高さで初期化している。銅版の温めやインクの粘度、油分の含有率などに関しては考慮していない。

**インク拭き取り工程** 布の形状を簡易的なバネモデルを用いて表現し、拭き取り方向によってインクの残り方を変化させることができる。しかし、布の種類や油膜の残り方などは考慮していない。

**印刷工程** プレス機の圧力で紙の繊維に沿って拡散するインクの振る舞いをランダムウォークにより再現している。しかしながら、紙の固さや湿り具合、版面への喰い込みなどは考慮していない。

## 4 実験及び考察

インクの固さや紙の種類、紙の湿り具合と印刷結果との関係を明らかにするために、インクと顔料及び亜麻仁油の混合比を5段階に変化させた場合(表1)、紙の種類を変化させた場合(表2)、紙を水に浸す時間を5段階に変化させた場合(表3)のドライポイントによる印刷実験を行った。表2の弾力性や肌理の細かさは主観評価によるものであるが、銅版画作家一般に認識されているものである。印刷に用

表 1: インクの固さ (体積比)

No.	固 1	固 2	固 3	固 4	固 5
材料	油 : インク		インク	顔料 : インク	
比率	1 : 1	1 : 3	1	1 : 3	1 : 1
固さ	柔 ←			→ 固	

表 2: 紙の種類

種類	ファブリアーノ	BFK	ハーネミュレ
弾力性	高 ←		低 →
肌理	細 ←		粗 →

表 3: 紙の湿り具合

No.	湿 1	湿 2	湿 3	湿 4	湿 5
時間	ゼロ	数秒	8 時間	8 時間+加湿	10 時間
固さ	固 ←				柔 →
油膜	多 ←				少 →

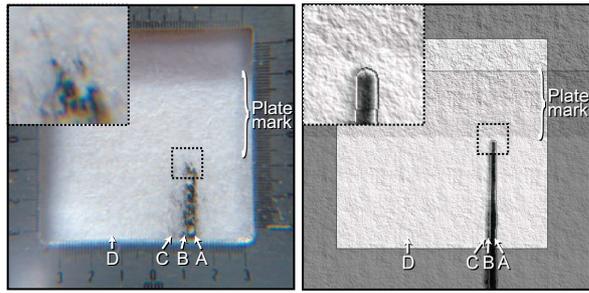
いた銅版はプレス機の圧力により版面が摩耗してしまうのを防ぐために、各条件に対して一枚ずつ用意した。印刷された描線(図4(a), (c), (e))を観察すると、(A)インクの顔料色、(B)インクの顔料と紙の並置混色、(C)油膜と紙の並置混色、(D)紙の色、の4パターンの着色が確認された。より長く浸した紙では紙の変形が大きく、プレス機の圧力によってできる銅版の辺縁の跡であるプレートマークが強く現れていることが確認された。また、凹部のインクをより多く刷り取っており、油膜による着色が均一になっていることも確認された。着色が均一になるのはプレス圧により紙の表面の凹凸が潰れるためであると考えられる。インクの固さの違いは含有する油分の割合であり、油分が多い程油膜が多く付着することが確認された。紙の種類の違いや水分量の違いは紙の柔らかさに関係するため、印刷後の紙の変形や表面の凹凸の潰れ方に影響すると考えられる。

これらの知見に基づき印刷工程における紙の変形モデルを定義する。まず、紙の巨視的な形状  $S$  を版面の形状  $P$  に合わせて次式で変形させる。

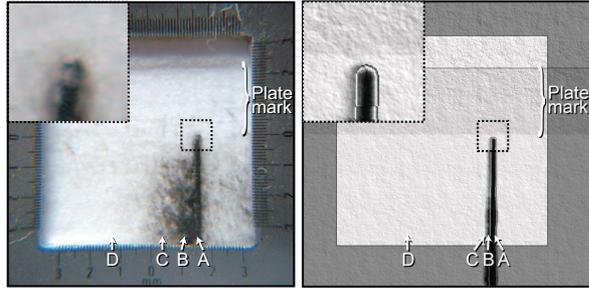
$$S_{i,j} = -(P_{i,j} + P_{\text{thick}}) \quad (1)$$

ただし、 $P_{\text{thick}}$  は銅板の厚さを表す。次に、紙の表面の微視的な凹凸形状は平均  $\mu = 0.5$ 、標準偏差  $\sigma$  の中点変位法によるフラクタル  $T_\sigma$  で表し、紙の弾力性  $E$ 、水分量  $M$ 、紙の変形度合  $D$  により潰れた紙の凹凸形状  $T$  を次式でモデル化する。

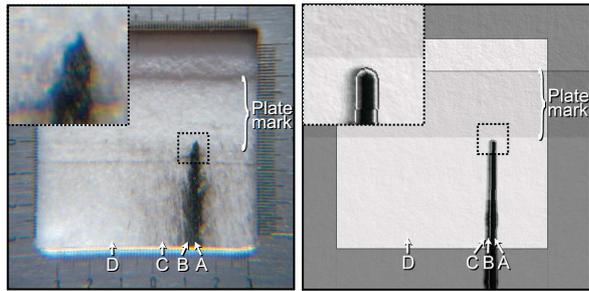
$$T_{i,j} = T_{\sigma,i,j} T_{\max} E(1 - M)(1 - D) \quad (2)$$



(a) No. 湿 1 (b) 水分量  $M = 0.0$



(c) No. 湿 3 (d) 水分量  $M = 0.5$



(e) No. 湿 5 (f) 水分量  $M = 0.8$

図 4: 実銅版画と仮想銅版画の水分量  $M$  による変化  
(全体:  $9.5 \times 9.5 \text{mm}$ , 約 4 倍拡大, 左上:  $1 \times 1 \text{mm}$ ,  
約 16 倍拡大, No. は表 3 に対応)

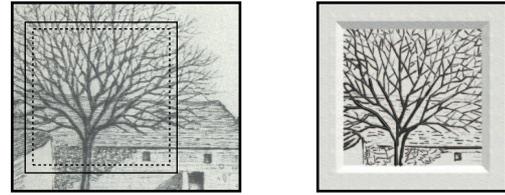
ただし,  $T_{\max}$  は凹凸の最大値を表し,  $T_{\sigma}$ ,  $E$ ,  $M$ ,  $D$  の定義域は  $[0, 1]$  である.  $D$  は  $S$  の変形量に依存するため, 次式のように注目セル  $S_{i,j}$  によって値が異なる.

$$D = \frac{1}{S_{\text{high}} - S_{\text{low}}} (S_{i,j} + P_{\text{thick}} - S_{\text{low}}) \quad (3)$$

ただし,  $S_{\text{high}}$ ,  $S_{\text{low}}$  は  $S$  の上限と下限を与える閾値であり,  $D$  が定義域を越えた場合は 0 あるいは 1 とする. これらにより, 最終的な紙の形状  $S'$  を次式で表す.

$$S' = S + T \quad (4)$$

凹凸形状  $T$  及びインク残存量  $I$  により紙とインク



(a) 実ドライポイント (b) 仮想ドライポイント

図 5: 実銅版画 [19] と仮想銅版画の比較

((a) の点線内:  $1.8 \times 1.8 \text{cm}$ , 実寸)

の物体特性  $M$  を次式でモデル化する.

$$M = \left(1 - \frac{I_{i,j}}{T_{i,j} + C}\right) M_s + \frac{I_{i,j}}{T_{i,j} + C} M_i \quad (5)$$

$M_s$ ,  $M_i$  はそれぞれ紙とインクの物体特性であり,  $C$  は紙のインク吸収容量を表す. また,  $S$ ,  $P$ ,  $T_{\sigma}$ ,  $T$ ,  $I$  は, 例えば  $S = \{S_{i,j}\}$  のように座標  $(i, j)$  によるハイトフィールドである.  $S'$  と  $M$  より, Phong の一般拡散面モデルを用いてレンダリングした画像を印刷結果とする.

水分量  $M$  の違いに注目して合成実験した結果を図 4(b), (d), (f) に示す. ただし,  $T_{\max} = 30 \mu\text{m}$ ,  $E = 1.0$ ,  $P_{\text{thick}} = 800 \mu\text{m}$ ,  $S_{\text{high}} = -127 \mu\text{m}$ ,  $S_{\text{low}} = 128 \mu\text{m}$ ,  $C = 10 \mu\text{m}$ ,  $\sigma = 0.3$  とし, 切削及びインク拭き取りデータは同一のものを用いた. 合成結果を見ると水分量の違いにより, 紙の表面の凹凸の潰れ方が変化し, プレートマークも表現されている. また, 実銅版画で観察された (A)~(D) が表現されており, 水分量が増す程インクの着色が均一になっている. 式 1 で示される紙の巨視的な変形は非常に簡易的なモデルであり, 紙の固さやプレス機の圧力などを考慮することでさらなる精度向上を図ることができる. インク及び油膜の広がり方が大きく異なるのは, インクの拭き取りモデルに問題があるためである. 実際の銅版画作品 [19] のストロークデータ [7] を用いた実験結果を図 5 に示す.

## 5 まとめ

本論文では, 銅版画の制作工程や各工程における版画や紙の状態等の結果に支配的な物理現象について調査するとともに, これまでに報告されている銅版画に関する研究成果をサーベイした. また, 実際に印刷実験をすることで, インク詰め及び拭き取り工程ではインクの固さ及び油分, 印刷工程では紙の弾力性及び水分量, プレス圧による紙の変形, 油

膜の付着が重要であることを示した。これらの知見に基づいて、紙の巨視的な変形と微視的な変形の和で印刷後の紙の形状を定義する物理モデルを提案した。特に微視的な変形は、紙の弾力性、水分量、変形度合によって変化させることができ、簡易合成実験を行うことで、実際の銅版画と同様な紙の変形を再現できることを確認した。

今後は、インクの固さやインク及び油膜の残り方などの、印刷以外の工程における現象について検討及び実装していく予定である。

## 参考文献

- [1] 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”, 情処研報グラフィクスと CAD, 95-CG-76-1, pp. 1-7 (1995)
- [2] 田崎大輔, 水野慎士, 岡田稔: “モデル駆動による仮想銅版画の基礎検討”, 情報技術レターズ, Vol. 2, No. LJ-009, pp. 231-233 (2003)
- [3] D. Tasaki, S. Mizuno and M. Okada: “A Fundamental Study on Virtual Copperplate Printing Based on Physical Model”, *Proc. of VSMM2003*, pp. 748-755 (2003)
- [4] 田崎大輔, 水野慎士, 岡田稔: “モデル駆動による仮想銅版画における諸問題”, 平 15 九州連大, No. 10-2P-19, 1 p. (2003)
- [5] 田崎大輔, 水野慎士, 岡田稔: “モデル駆動による仮想ドライポイント”, 情処会火の国情報シンポジウム 2004, No. B-2-2, 8 p. (2004)
- [6] 田崎大輔, 水野慎士, 岡田稔: “モデル駆動による仮想ドライポイント画像合成法”, VC/GCAD 合同シンポジウム 2004, pp. 119-120 (2004)
- [7] 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)
- [8] 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レーピングへの応用”, 情報科学技術レターズ, Vol. 3, No. LJ-003, pp. 209-211 (2004)
- [9] 田崎大輔, 水野慎士, 岡田稔: “仮想銅版画と各製版技法への応用に関する一検討”, 平 16 九州連大, No. 13-2P-14, p. 708 (2004)
- [10] 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”, 情処研報グラフィクスと CAD, Vol. 04-CG-117, No. 20, pp. 115-120 (2004)
- [11] 田崎大輔, 水野慎士, 岡田稔: “仮想銅版画技法の各種製版技法への応用に関する一検討”, 情処会火の国情報シンポジウム 2005, No. B-8-5, 8 p. (2005)
- [12] D. Tasaki, S. Mizuno and M. Okada: “Virtual Mezzotint using a Model-driven Strategy”, *Proc. of ACM-SIGGRAPH 2005 Posters*, 1 p. (to appear, 2005)
- [13] D. Tasaki, S. Mizuno and M. Okada: “Model-driven Virtual Mezzotint Techniques”, *Proc. of Short Presentation of Eurographics 2005*, 4 p. (to appear, 2005)
- [14] E. O. Slooten, M. Holtrop and P. Schatborn: “The Rembrandt House”, Waanders Publishers, Zwolle (1991)
- [15] G. Luijten: “Rembrandt’s Etchings”, Waanders Printers, Zwolle (2000)
- [16] R. Leaf: “Etching, Engraving and Other Intaglio Printmaking Techniques”, Dover Publications (1984)
- [17] 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)
- [18] 深澤幸雄: “銅版画のテクニック”, ダヴィッド社 (1989)
- [19] 長谷川潔: “日本現代版画 長谷川潔”, 玲風書房 (1994)
- [20] 中林忠良: “中林忠良の腐蝕銅版画”, 河出書房 (1995)
- [21] 青木茂: “世界版画史”, 美術出版社 (2002)
- [22] Tom Rassieur: “デューラー版画展”, 名古屋ポストン美術館 (2003)
- [23] 大野義夫, 坊晃利: “凹版印刷のための肖像画の対話的な生成手法”, 情処研報グラフィクスと CAD, 92-CG-58-14, pp. 89-96 (1992)
- [24] W. Leister: “Computer Generated Copper Plates”, *Computer Graphics Forum*, Vol. 13, No. 1, pp. 69-77 (1994)
- [25] Y. Pnueli and A. M. Bruckstein: “Dig<sup>i</sup>Dürer – a digital engraving system”, *The Visual Computer*, Vol. 10, No. 5, pp. 277-292 (1994)
- [26] V. Ostromoukhov: “Digital Facial Engraving”, *Proc. of SIGGRAPH '99*, pp. 417-424 (1999)
- [27] G. Elber: “Interactive Line Art Rendering of Freeform Surface”, *Computer Graphics Forum*, Vol. 18, No. 3, pp. C-1-12 (1999)
- [28] O. Veryovka and J. Buchanan: “Comprehensive Halftoning of 3D Scenes”, *Computer Graphics Forum*, Vol. 18, No. 3, pp. C-13-22 (1999)
- [29] V. Ostromoukhov and R.D. Hersch: “Stochastic Clustered-dot Dithering”, *J. of Electronic Imaging*, Vol. 8, No. 4, pp. 434-445 (1999)
- [30] A. Sourin: “Functionally Based Virtual Embossing”, *The Visual Computer*, Vol. 17, No. 4, pp. 258-271 (2001)
- [31] C. Bosch, X. Pueyo, S. Mérillou and D. Ghazanfarpour: “A Physically-Based Model for Rendering Realistic Scratches”, *Computer Graphics Forum*, Vol. 23, No. 3, pp. 361-370 (2004)