

# 水彩絵の具の重ね塗り効果の表現に関する基礎検討

寺井友一<sup>†\*</sup>, 水野慎士<sup>††</sup>, 岡田 稔<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> 中部大学工学部工業物理学科

<sup>††</sup> 豊橋技術科学大学情報処理センター

<sup>†††</sup> 中部大学工学部情報工学科

\*E-mail: ograsu@media.cs.chubu.ac.jp

**あらまし:** 本論文では, 仮想版画における多色刷りのクオリティ向上を目的として粒子密度モデルを用いた水彩絵の具の混色モデルの基礎検討を行う。多版多色刷り木版画制作では, 主として下絵描き, 彫り, 摺りの三過程から構成されるが, 摺り過程における重要な要素として版木・紙・絵の具・ばれんがある。各要素の振る舞いの相互作用によって版画が生成されるため, それらの振る舞いを詳細検討することは, 仮想版画の品質向上に必要不可欠である。本研究では, 特に絵の具を中心的に捉え, その重ね合わせによる効果を主眼においている。さらに実際の浮世絵を題材としたシミュレーション実験によりグラデーション効果における本手法の有効性を示す。

## A Fundamental Study on the Expression of Overlapped Multi-Color Printing of Watercolors

Tomokazu TERAJ<sup>†\*</sup>, Shinji MIZUNO<sup>††</sup> and Minoru OKADA<sup>†††</sup>

<sup>†</sup>Department of Engineering Physics, College of Engineering, Chubu University

<sup>††</sup>Computer Center, Toyohashi University of Technology

<sup>†††</sup>Department of Computer Science, College of Engineering, Chubu University

\*E-mail: ograsu@media.cs.chubu.ac.jp

**Abstract:** In this paper we study a color-mixing model based on the particle density model for increasing the quality of multi-color printing in the virtual printing method. Actual multi-color and multi-block printing strategy mainly consists of three processes: draft drawing, engraving and brushing, and the important items in the brushing process are printing block, paper, and color. Since a print is generated with interactions among their behaviors, to study their behaviors is very important to increase quality at virtual printing. In this study painting colors and effects of mixing of them are mainly focused. Availability of the proposed method for gradation effects in an Ukiyo-e is also indicated by a simulation experiment.

### 1 はじめに

CG (Computer Graphics) における非写実的画像合成法 (NPR: Non-Photorealistic Rendering) の応用例として, 絵画などの美術・芸術・工芸技法の模倣があげられる。NPRは, その基本戦略として生成過程を考慮せず外観の近似をはかる外観結果志向レンダリング (ABR: Appearance-Based Rendering)

と, 生成過程を近似物理モデルで表し, それにより結果的に外観の近似をはかる物理モデル志向レンダリング (PBR: Physics-Based Rendering) の二つに大別される。筆者らは, PBRに基づいた版画画像生成に関する一速の研究 [1][2] を展開しており, ここでは版画の画工, 彫工, 摺工の三工程における作業, 技術, 現象をモデル化に基づいた仮想版画シス

テムを構築している。さらに浮世絵の知的符号化・デジタル保存を目的とした応用の基礎検討も開始している [3]。本仮想版画システムは、版画生成過程に注目した物理モデルに基づいていることが特色である。仮想版画で物理モデルを導入する意義のある現象としては以下のものがある。

1. 版木の切削形状
2. 絵の具における水分量と程示色の関係
3. 紙-版木間の距離と程示色の関係
4. 色の重ね合わせの効果

2, 3 に関しては、大河内ら [4]、出口ら [5]、牛田ら [6] がそれらの物理モデルを検討し、仮想版画システムへの実装が成されている。しかし、従来提案されている多版多色刷り仮想版画では、実際的水性木版画にみられる色の重ね合わせが考慮されておらず、色空間における最近傍則によって単一色を割り当てる、という簡易な手法 [9] に基づいていた。このような簡易方式では多くの浮世絵にみられる複数色によるぼかし摺り [14] (グラデーション) において顕著な問題が生じる。

本論文では、水彩画、多版多色刷り木版画において見られる絵の具の重ね合わせの効果を表すための粒子密度モデル [12] を提案するとともに重ね刷りのシミュレーション実験を行う。また、特に多版多色刷り木版画を題材として、版木の自動合成のための色合成法について検討する。本論文は、木版画を例として示すが、重ね合わせのための基本戦略は水彩画においても同様である。版画の下絵に対応する入力画像としてカラー画像を用いる。多版多色刷り版画では、各色における摺りの順序を変更すると合成観測される色は異なる。そのために、多層の絵の具粒子が色としてどのように観測されるか、を表す粒子密度モデルを導入し、絵の具の重ね塗りによる色合成の効果を検討する。更に、実際の浮世絵作品の一つを例としてとりあげ、そこで施されているグラデーションを模擬的に再現して本方法の有効性を検討する。

## 2 仮想版画の概要

### 2.1 仮想版画システム

仮想版画は、仮想版木、仮想インク、仮想紙、仮想パレンをその要素として持つ。仮想版木は、その

形状が半空間と三値論理代数系による CSG (Constructive Solid Geometry) [7] に基づく曲多面体 [8] による仮想彫刻によって表されている。

仮想版木を生成する方法としてすでに次の 4 種類が提案されている。

1. 仮想彫刻システムによる用手法切削
2. 下絵となる 2D 画像の特徴抽出による自動切削
3. CSG による 3D モデルに基づく自動切削
4. 切削法の選択による会話的支援切削

### 2.2 多版多色刷り仮想版画

仮想版画によれば複数の仮想版木と複数の仮想絵の具により、多版多色刷り仮想版画の生成が可能である。従来の手法 [9] では、予め設定された限定色に基づいて色空間における最近傍則により、互いに排反な領域分割を行うことによって絵の具の色を割り当てていた。この方法は簡便な方法ではあるが、複数色によるぼかし摺りにおいて顕著な問題が発生する。実際の多色刷り版画にみられる重ね塗りの効果を反映した版木自動生成が望まれる。

多版多色刷り版画では、各色における摺りの順序を変更すると合成観測される色は異なる。ここで、未知の色を基準となる既知の複数色の重ねによって表すことを色分解といい、基準色から、その重ね塗りによって色を再現することを色合成という。

本研究の基本戦略としては以下の通りである。

- 粒子密度モデルによる色合成の検討
- 与えられたカラー下絵の色分解
- 各色の多色刷り用版木の作成
- デジタル版画の復刻版の作成

このために、本論文では、主として色合成の物理モデルについて実験し考察する。

## 3 水彩絵の具の粒子密度モデル

多版多色刷り仮想版画において、カラー下絵を用いた版木生成法として、予め限定した数種の色より  $L^*u^*v^*$  空間 [9] における最近傍則によって単一色を選択する手法が提案されている。しかし、実際の版画では複数色の重ねによる表現が多く行われている。Kubelka ら [11] は、絵の具層内の光に対する特性を散乱と吸収で表している。齋藤ら [10] は、

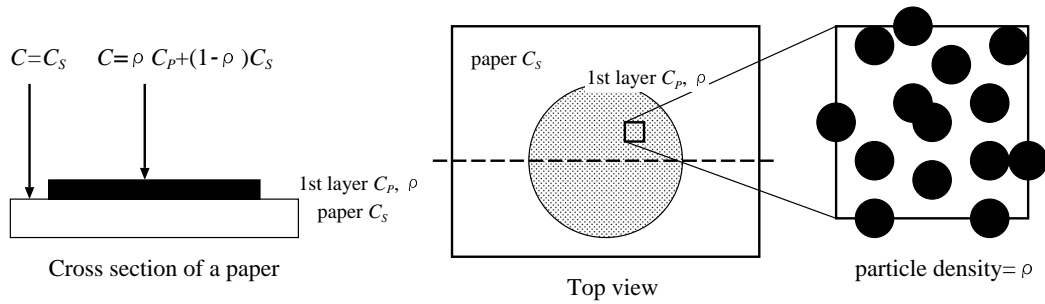


図 1: 単層粒子密度モデル  
Fig. 1 Single layer particle density model.

Kubelka-Munk 理論 [11] に基づく絵の具モデルを提案し、混色表現を実現している。しかし、このモデルが必要とする標本は、各絵の具の分光反射率であり、それを得るには実物の分光反射特性を測定しなければならない。浮世絵などの非常に古い作品を下絵とすると、現在では使用していない絵の具が存在することも考えられるため、浮世絵の知的保存を目的としている本研究には適用できない。そこで本論文では、絵の具の粒子密度モデルについて考察する。

### 3.1 粒子密度モデルによる色合成

油彩画などにおける複数の油性絵の具による重ね塗りでは、基本的に最後に描かれた最上層の絵の具が観測される。一方、水彩画の水分量が比較的多い場合では、インク粒子の沈澱、浮遊、滲みなどの効果があり、多くの技法を可能としている。また、水彩画でも水分量が比較的少ない、すなわち下地の絵の具が上層へ溶け出さない場合では下地の絵の具が一部透過して観測されるものの、絵の具の重ね塗り順序により、混色効果は異なる。

同様に、主として水彩絵の具が用いられる多版多色刷り版画における重ね刷りでは、最後の版の色のみが観測されるのではなく、版の順番、水分量などに依存して各版の色が合成観測され、その合成法は自明ではない。水溶性の絵の具を仮定すると、多版多色刷りされた多層の絵の具によって、各層の絵の具の色が合成されて観測される。そこで、絵の具は透明溶媒である水に不透明粒子が分布しており、絵の具を重ねて塗布したとき、その隙間から下層の絵の具粒子が観測される、という仮説を用いる。これによって次のような粒子密度モデルを検討する。

### 3.2 単層粒子密度モデル

紙に絵の具を塗布し、紙面に垂直な方向から観測する。このとき、色が  $C_P$  である絵の具の粒子が単位面積あたりに占める面積を絵の具の密度  $\rho$  とする。すなわち、密度  $\rho$  で絵の具の粒子色  $C_P$ 、密度  $1 - \rho$  で紙の色  $C_S$  が観測され、その結果、合成観測色  $C$  は次式で表される (図 1)。

$$C = \rho C_P + (1 - \rho) C_S \quad (1)$$

### 3.3 多層粒子密度モデル

色が  $C_S$  の紙に  $n$  層の絵の具を重ね塗りしたとき、第  $i$  層の絵の具の色を  $C_{P,i}$  とすると、表面において観測される色  $C_i$  は、

$$C_i = \rho_i C_{P,i} + (1 - \rho_i) C_{i-1}, (i > 0) \quad (2)$$

$$C_0 = \rho_0 C_S, (\rho = 1) \quad (3)$$

となる。ここで、 $C_i, \rho_i$  は第 0 層の紙面から数えて第  $i$  層の絵の具の色とその粒子密度である (図 2)。

## 4 粒子密度モデルによる色合成実験

ここでは 5 色の絵の具を用いた混色カラー標本の模擬とぼかし摺り表現の模擬を行い、実際の現象と比較することで粒子密度モデルを検討する。

### 4.1 混色カラー標本の模擬

5 色の混色カラー標本は、白色紙に対して水彩絵の具の 5 色中 2 色選択の順列 ( ${}_5P_2 = 20$  通り) による重ね塗りを行うことで作成した (図 4)。絵の具の粒子密度モデルにより、5 色の絵の具のカラー標本を再現するには、各絵の具に対する粒子密度モデルにおける色値と粒子密度を決定する必要がある。

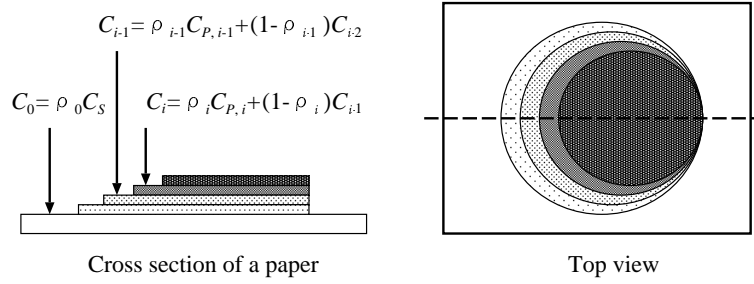


図 2: 多層粒子密度モデル  
Fig. 2 Multi layer particle density model

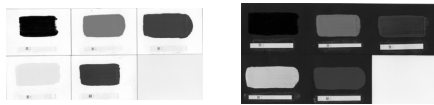


図 3: 単色塗りによるカラー標本  
Fig. 3 The color specimen by monochrome painting.

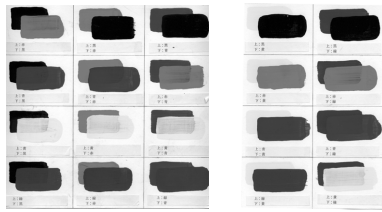


図 4: 2色の重ね塗りによるカラー標本  
Fig. 4 The color specimen by two painting colors.

色値が  $C_X$  である絵の具  $X$  を白色紙 (色値  $C_{S_w}$ ) 及び黒色紙 ( $C_{S_k}$ ) に塗布したときの観測色をそれぞれ  $C_{X,S_w}$ ,  $C_{X,S_k}$  とすると, 式 (1) より,

$$\begin{pmatrix} C_{X,S_w} \\ C_{X,S_k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_X & C_{S_w} \\ C_X & C_{S_k} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \rho_X \\ 1 - \rho_X \end{pmatrix} \quad (4)$$

と表される。これにより, 絵の具  $X$  の粒子密度  $\rho_X$  とその色値  $P_X$  は次のようになる。

$$\rho_X = 1 - \frac{C_{X,S_w} - C_{X,S_k}}{C_{S_w} - C_{S_k}} \quad (5)$$

$$C_X = \frac{C_{S_w} C_{X,S_k} - C_{S_k} C_{X,S_w}}{(C_{S_w} - C_{S_k}) - (C_{X,S_w} - C_{X,S_k})} \quad (6)$$

そこで, 白色紙, 黒色紙に対して絵の具を単色塗りしたもの (図 3) を, 画像スキャナ<sup>1</sup> (RGB 値) で

<sup>1</sup>EPSON GT7600, 72dpi

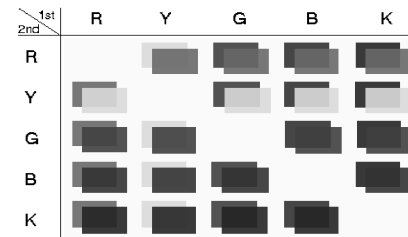


図 5: 2色の混色シミュレーション結果  
Fig. 5 The simulation for two colors.

読み込み, その値を式 (5), (6) に代入することで, 各絵の具の色値  $C_X$  と粒子密度  $\rho_X$  を求めることができる。ここで使用した絵の具は, 赤 (R)・青 (B)・緑 (G)・黄 (Y)・黒 (K) の5色である。また, スキャナの測定値は同じ条件下の塗膜面であってもむらがあるため, 測定領域を  $50 \times 50$  pixel とし, 合計 2500 画素について平均化した値を利用している。また, 利用した色値は RGB 値であるため, 式 (5), (6) への代入には, R, G, B 各成分ごとに独立して代入し, 計算している。また, 粒子密度  $\rho_X$  に関しては, R, G, B 各成分の計算値を平均化している。

求めた各絵の具の色値と粒子密度を元に多層粒子密度モデル (式 (3)) に従って混色の模擬をした (図 5)。ここで, 紙面から数えて第 1 層の絵の具を 1st とし, 第 2 層を 2nd とする。

図 5 より, 同じ組み合わせの混色値で観測される色は重ねる順により異なっており, 上層の色値に近いものとなっている。このことは, 絵の具の重ね順による混色値の相違という点で, 実際のカラー標本の現象を再現しているといえる。

次に, 同じ絵の具の色値と粒子密度を利用して, 5 色中 3 色選択の順列 ( ${}_5P_3 = 60$  通り) でシミュ

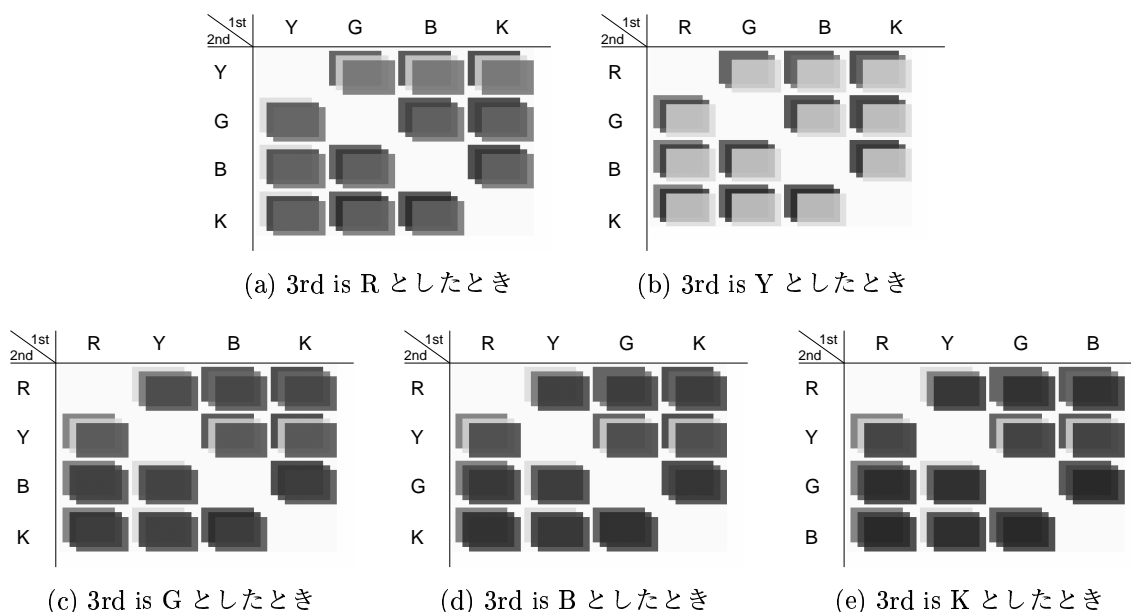


図 6: 3 色の混色シミュレーション結果  
 Fig. 6 The mixing simulation results of three colors.

レーションした (図 6) . ここで, 紙面から数えて第 3 層 (3rd) の絵の具を基準に 5 つの場合分けをしている.

図 6 より, 3 色の重なり部分に注目すると最下層の色が反映されていることがわかる.

#### 4.2 ぼかし摺りによる混色表現

多版多色刷り版面において, 絵の具の濃度は必ずしも均一ではなく他の色との境界付近などでぼかし摺りされていることが多い. この場合も例外ではなく, 絵の具の重なりによる混色表現は存在する. 絵の具の粒子密度モデルによるぼかし摺り表現を考えると最上層の絵の具の粒子密度  $\rho$  は, 下層の色値の遮蔽度を表しており,  $\rho$  の変化はぼかし摺りによるグラデーションの変化に対応すると考えられる.

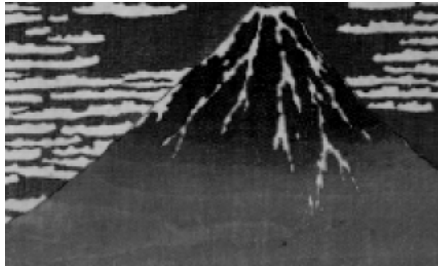
浮世絵の作品の一つである葛飾北斎の赤富士では山肌部分にグラデーション状のぼかし摺りによる混色表現が存在する. この作品は, 藍・代赭・薄墨・藍草が使用されており, これらの色は日本の伝統色と言われており, それらの CMYK 色値が文献 [13] で示されている. 当該グラデーション部は代赭 (CMYK=26, 74, 83, 0) と薄墨 (CMYK=8, 5, 6, 55) によっている [14]. このことを利用して, 赤富士の山肌部分における “代赭の均一摺り” と “薄墨のぼかし摺り” の重ね摺り部分による混色表現を粒子密度モデルにより模擬し, 実際の赤富士と比較し

た (図 7) . ここで, 色値は参照した CMYK を RGB に変換した値を使用し, 代赭の粒子密度は変化させず, 薄墨の粒子密度のみを変化させた. そして, 比較し易くするため, 模擬画像には実物画像の一部 (山の輪郭と頂上付近の雪) を合成した. 図 7 より, ぼかし摺りによる重ね合わせ表現に関して見ると, 実物と似ていることがわかる. しかし, 模擬画像の薄墨と代赭の色自体は実物と比べて明るくなっている. これは, 浮世絵のような歴史的な作品は, 絵の具自身のくすみ, 汚れ, 質的 (化学的) 変化などによる時間の変化によるものが原因として考えられる.

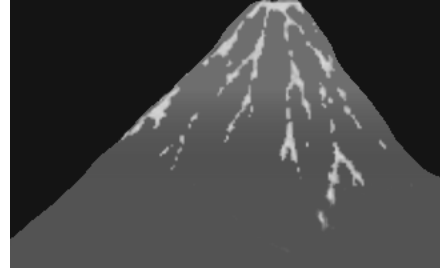
## 5 まとめ

本論文では, 粒子密度モデルによる水彩絵の具の重ね合わせ効果について色合成を模擬することで検討した. 今回得られた粒子密度モデルにおける混色模擬結果より, 実際の混色表現と類似した結果が得られた. しかし, 絵の具の粒子密度モデルでは, 絵の具の粒子自身を不透明物質とみなしており, 色の混色種類としては絵の具粒子の点描画による併置混色のみであるとみなしている. もし, 実際の絵の具粒子が色ガラスのように, 光を透過するのであれば, 減法混色の影響も考慮する必要がある.

今後, 粒子密度の各パラメータの測定を行い, 限定された絵の具の種類によって与えられたカラー下



(a) 実物画像



(b) 模擬画像

図 7: 富嶽三十六景: 凱風快晴 (葛飾北斎) によるグラデーションの比較

Fig. 7 A comparison of virtual printing for an Ukiyo-e: 'Red Fuji' from 'The Thirty-Six Views of Mt. Fuji' by Hokusai.

絵を表すための色分解法を検討する。また、本研究の結果より実際に版木を生成し、版画風画像を生成することが検討課題として残されている。木版画では、色自身の合成そのものに加えて、今回扱った、赤富士にみられるような版の木目による効果、あるいは紙の持つテクスチャによる効果など、それらそのものを特徴とする作品も多く見られ、無視できない。また、木版画では塗り工程の塗りむらと摺り工程のバレン操作のむら、水彩画では筆運びなどによる塗りむらなどの効果もある。しかし本研究では、版画における色の合成そのもののモデル化を基礎としたため、それらの検討は行っていない。的確な確率モデルによりそれらは表現可能であると考えられるが、今後の検討課題とする。

## 参考文献

- [1] 水野慎士, 岡田稔, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: “仮想彫刻-仮想空間における対話型形状生成の一手法”, 情処論, Vol. 38, No. 12, pp. 2509-2516 (1997-12)
- [2] 水野慎士, 岡田稔, 鳥脇純一郎: “仮想彫刻システムを用いた版画画像の生成”, 画像電子学会誌, Vol. 26, No. 4, pp. 325-332 (1997-8)
- [3] 梨谷克仁, 水野慎士, 岡田稔: “知的符号化に基づく浮世絵の保存の一方法”, 情報処理学会研究会資料, グラフィクスと CAD 研究会, 01-GCAD-104-7, pp. 25-28 (2001-9)
- [4] 大河内俊雄, 水野慎士, 岡田稔, 鳥脇純一郎: “仮想版画-自動切削による仮想版木作成支援と多版多色りの検討”, 信学論 D-II, Vol. J83-D-II, No. 12, pp. 2698-2706 (2000-12)
- [5] 出口徹, 水野慎士, 岡田稔, 鳥脇純一郎: “仮想版画における着色量とにじみの検討”, 第 60 回情処全大, No. 3ZA-09 (2000)
- [6] 牛田明秀, 水野慎士, 岡田稔: “仮想木版画における物理モデルの基礎検討”, 情処研報, グラフィクスと CAD 研究会, 01-CG-102-3, pp. 13-18 (2001-2)
- [7] 水野慎士, 岡田稔, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: “CSG を用いた仮想彫刻”, 情処研報, グラフィクスと CAD, 95-CG-73-7, pp. 49-56 (1995)
- [8] 水野慎士, 岡田稔, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: “曲面多面体の CSG モデリングに関する一考察”, 信学技報, PRU94-88, pp. 23-30 (1994-12)
- [9] 水野慎士, 笠浦毅, 大河内俊雄, 山本眞司, 岡田稔, 鳥脇純一郎: “Automatic Generation of Virtual Woodblocks and Multicolor Woodblock Printing (招待講演)”, Visual Computing / グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2000, 慶応義塾大学, pp. 101-106 (2000-6)
- [10] 齋藤豪, 中嶋正之: “Kubelka-Munk の理論を用いたデジタルペインティングのための絵の具モデル”, 信学論, Vol. J82-D-II, No. 3, pp. 399-406 (1999-3)
- [11] Von P. Kubelka and f. Munk, “Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche,” Zeitschrift für technische Physik, pp. 593-601 (1931)
- [12] 岡田稔, 水野慎士: “水彩絵の具の重ね合わせ効果とその表現に関する検討”, 情報処理学会第 62 回全国大会特別トラック (2) 講演論文集, 慶応義塾大学, No. 1D-03, pp. 9-12 (2001-3)
- [13] 福田邦夫: “日本の伝統色-色の小辞典”, 読売新聞社 (1987-5)
- [14] 小林忠, 他: “浮世絵の歴史”, 美術出版社 (1998)