

浮世絵の知的アーカイブのための版木推定に関する基礎検討

寺井友一^{†*}, 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

^{††} 豊橋技術科学大学情報処理センター

*E-mail: terai@suou.waseda.jp

あらまし: 本稿では浮世絵の版木推定のための色分解手法について検討した結果を報告する。筆者らは既に浮世絵作品の工芸的特徴を考慮したアーカイブを目指した版木保存法を提案している。現存する浮世絵から各絵の具領域を抽出して版木切削領域を推定する手法であるが、浮世絵には重ね刷りによる混色表現があるため、その混色を色分解する必要がある。我々は既に初期問題として2色の水彩絵の具の重ね刷り画像を各絵の具領域画像に分離する色分解法を提案している。本色分解法では入力画像のCIE $L^*u^*v^*$ 色空間散布図の重回帰分析により水彩絵の具の近似物理モデルを逆問題解析している。本稿ではよりモデルに忠実な分布形状を示すことが期待される、CIE XYZ 色空間について実験を行いその有効性を検証する。また、色分解時のパラメータ設定の改良結果を報告する。

A Fundamental Study on Woodblocks Estimation for Intelligent Archive of *Ukiyo-e*

Tomokazu TERAII^{†*}, Shinji MIZUNO^{††} and Minoru OKADA[†]

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

^{††} Computer Center, Toyohashi University of Technology

*E-mail: terai@suou.waseda.jp

Abstract: In this paper we discuss on a color decomposition method to estimate woodblocks of *Ukiyo-e*. The authors focus on to preserve woodblocks considering the feature of *Ukiyo-e* as crafting. Since the purpose of the study is to estimate carved areas of woodblocks by extracting each printed area from a print, we need to decompose the color mixing of watercolors. The authors have already proposed a color decomposition method to separate printed area images from two-color overlapping of watercolors. The method solves the inverse problem with multiple regression analysis with CIE $L^*u^*v^*$ color distribution based on the approximate physical model of watercolors. In this paper CIE XYZ color space expected to be more suitable distribution to the proposed model is utilized to experiments and discussed. An improved method to determine parameters in color decomposition is also discussed.

1 はじめに

文化遺産を電子データとして記録し再現するデジタルアーカイブは、我が国においても国家戦略として位置づけられ [1], 多くの研究が報告されている。例えば油彩画を対象としたものとして、田中らは油彩画表面をマルチバンドカラーカメラにより計測

し、凹凸や光沢など作品の特徴を考慮することでリアルなレンダリング画像を得ている [2]。

筆者らは物理モデルに基づいて木版画画像をレンダリングする仮想木版画と浮世絵の知的アーカイブへの一応用 [5] について研究している。浮世絵は木版画工芸であり、同じ版木を用いても、版木と摺り技法に依存するため一枚一枚に固有の価値がある。

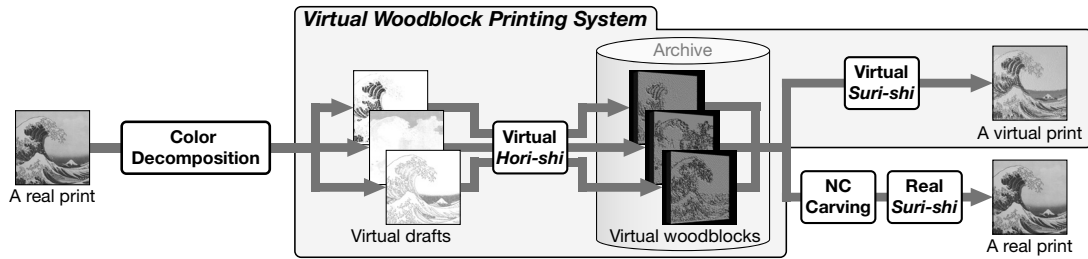


図 1: 浮世絵の知的アーカイブの手順

Fig. 1: Procedure of intelligent archive of *Ukiyo-e*

そのため、浮世絵の工芸的特徴を再現するためには版木を保存することが重要である。しかし、現存する浮世絵の版木は僅少・貴重であるため再利用できない。筆者らは既に、初期問題として水彩絵の具2色の重ね塗りによる混色を色分解し各絵の具領域に分離する手法を提案している [8][9]。特に、浮世絵には水彩絵の具の重なりによる混色があるため各版木を正しく推定することに注目している。本色分解法は水彩絵の具の近似物理モデルを入力画像の CIE $L^*u^*v^*$ (以下、単に $L^*u^*v^*$) 色空間散布図の重回帰分析により逆問題解析している。

本稿ではより良好な結果が期待される、CIE XYZ(以下、単に XYZ) 色空間について実験を行いその有効性を検証する。また、本色分解における抽出形状パラメータ設定の改良案についても報告する。

2 浮世絵の知的アーカイブ

浮世絵の知的アーカイブとは、筆者らによる仮想木版画システム [3] の付加機能である二次元画像入力による仮想版木の自動切削 [4] に対し、浮世絵画像を入力として与えることでその浮世絵の作られた当時の版木を推定復元し保存する手法である [5]。本知的アーカイブ手法の概略手順を図 1 に示す。まず、現存する浮世絵のスキャン画像を各絵の具領域を示す画像に色分解する。次に分解画像を仮想木版画システムへ入力することで仮想彫師の仮想版木自動切削機能により仮想版木が生成される。そして、生成された仮想版木に基づき仮想摺り師により仮想木版画画像を生成することができる。また、NC 切削による実版木の生成と人手による実木版画の生成によって、実物の復刻版を作成することも可能である。

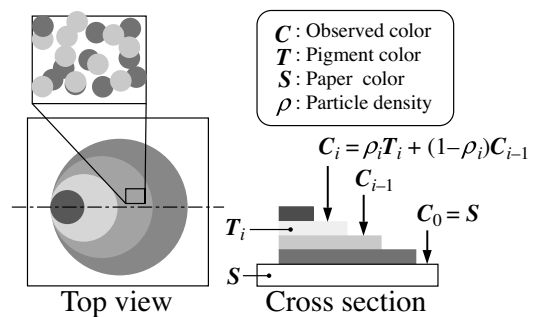


図 3: 水彩絵の具の粒子密度モデル

Fig. 3: Particle density model of watercolors

3 水彩絵の具の粒子密度モデル

粒子密度モデルは水彩絵の具の顔料を不透明粒子と仮定し、図 3 のように絵の具粒子とその隙間から観測される色との加法混色と近似的にみなしている。齋藤らは Kubelka-Munk による理論 [12] を直接的に実装した絵の具モデル [14] を提案し、優れた混色特性をコンピュータ上で再現しているが、非線型モデルであるため逆問題解析への利用が困難となる。それに対して粒子密度モデルは線型であり、近似精度は Kubelka-Munk 理論より低いが逆問題解析である色分解問題に適している。

3.1 粒子密度モデル

絵の具が n 層重ね塗りされると、第 i 層において観測される色空間ベクトル C_i は式 (1) で表される。

$$C_i = \begin{cases} \rho_i T_i + (1 - \rho_i) C_{i-1} & (0 < i \leq n) \\ S & (i = 0) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 T_i 、 ρ_i 、 S はそれぞれ第 i 層の絵の具顔料粒子の色空間ベクトル、第 i 層の絵の具顔料粒子密度、紙の色空間ベクトルである。

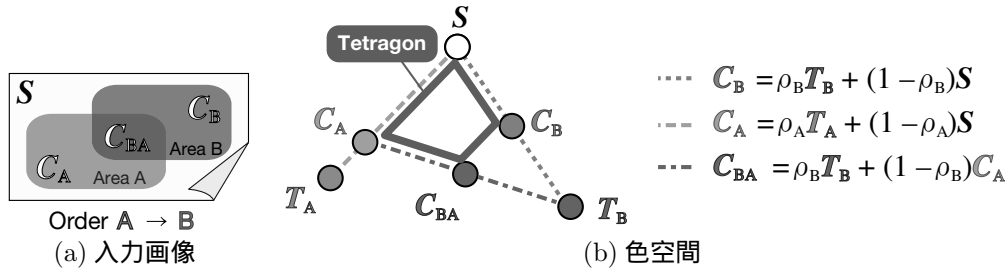


図 2: 2色刷りモデルの色空間における特徴

Fig. 2: Feature of two-color overlapping model in a color space

3.2 2色刷りに関する関係

2色の絵の具 A, B の均一な重ね刷り (図 2(a), A→B で絵の具 A が下層で絵の具 B が上層) を仮定すると, 紙色 S, A, B の重なり領域色 C_{BA} , 単色刷り領域色 C_A, C_B , の4色が観測される. 本モデルに基づく, 全ての観測色は加法混色 [11] の直線性を維持し, 三次元で表される色空間において図 2(b) のように, 三角形 $ST_A T_B$ 上に存在し, 観測色は四角形 $SC_A C_{BA} C_B$ (図 2(b)) を形成する. 以下, 本研究ではこの四角形を重回帰分析で推定することとし, 求める四角形を重回帰四角形という.

A が刷られる領域の色は C_A, C_{BA} , B では C_B, C_{BA} となる. ここで, 絵の具 B の粒子密度が $\rho_B = 1$ のとき, 下層を完全に隠蔽するため下刷りの絵の具 A の領域が推定できない. そのため本手法により2色の絵の具領域が推定可能な条件は $0 < \rho_B < 1$ である.

4 $L^*u^*v^*$ 色空間と XYZ 色空間の比較

従来手法では加法混色 [11] が色度図上で直線の軌跡で表せる [13] ため, $L^*u^*v^*$ 色空間を用いていた. しかし, 実際の水彩絵の具の色空間散布図は平面に近いがゆがみのある分布形状になっている. これは $L^*u^*v^*$ 色空間の明度が人間の感覚に合わせて XYZ 色空間から非線型変換されていることが原因であると考えられる. それを確認するために, $L^*u^*v^*$ 色空間の非線型変換元である XYZ 色空間で散布図を作成すると $L^*u^*v^*$ 色空間より平面に近い分布形状であった. さらに, [10] の実験で利用した5色中2色の組み合わせによる重ね刷り標本画像を各単色刷り領域について確認する. すなわち, 図4のように紙の領域が概ね半分を占めるように切り出したサンプル (100×100pixel, 200dpi) を用意し,

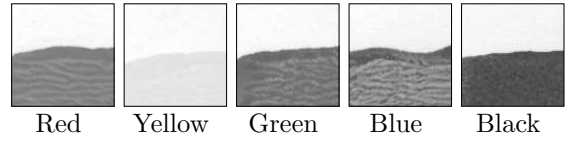


図 4: 水彩絵の具標本の切り抜き画像

Fig. 4: Images of clipped watercolor samples

各画像の第一主成分の寄与率 r を $L^*u^*v^*, XYZ$ の2つの色空間について比較した. 寄与率 r は, 各色空間散布図から得られる 3×3 の相関行列 ((2) 式) に基づく主成分分析により, (3) 式で求められる.

$$\Sigma' = \begin{pmatrix} 1 & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & 1 & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$r = \frac{\lambda}{p} \quad (3)$$

ここで, Σ' は対称行列であり, 色空間サンプル点の第 i 成分と第 j 成分の共分散を正規化したものを σ_{ij} としている. λ は第一主成分, p は各成分の正規化分散の総和である. これによると表1に示すように, XYZ 色空間の寄与率が全ての絵の具について $L^*u^*v^*$ 色空間より高いことがわかり, 寄与率の高さが主成分軸に対する分散の低さに対応するため, より直線に近い分布であると考えられる. そのため本研究では XYZ 色空間を用いて実験し, 従来の実験結果と比較する.

5 抽出形状パラメータ設定の改良

これまでの色分解手法において, 色空間内で各絵の具領域画素を抽出する形状を決定するパラメータは全て手動設定されていた. そこで, そのパラメータ設定を一部自動化させ, 手動設定の必要なパラ

表 1: 第一主成分の寄与率による比較

Tab. 1: Comparison of contribution for the principal component

	$L^*u^*v^*$ [%]	XYZ [%]
Red	99.4	99.9
Yellow	97.8	99.0
Green	71.3	100.0
Blue	96.5	99.1
Black	58.5	100.0
平均	84.7	99.6

小数点以下第 2 位を四捨五入

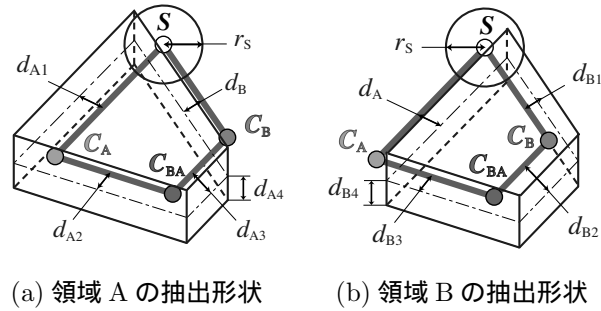


図 5: 改良した色分解時の各領域色に関する抽出形状

Fig. 5: The extracting shapes in color space

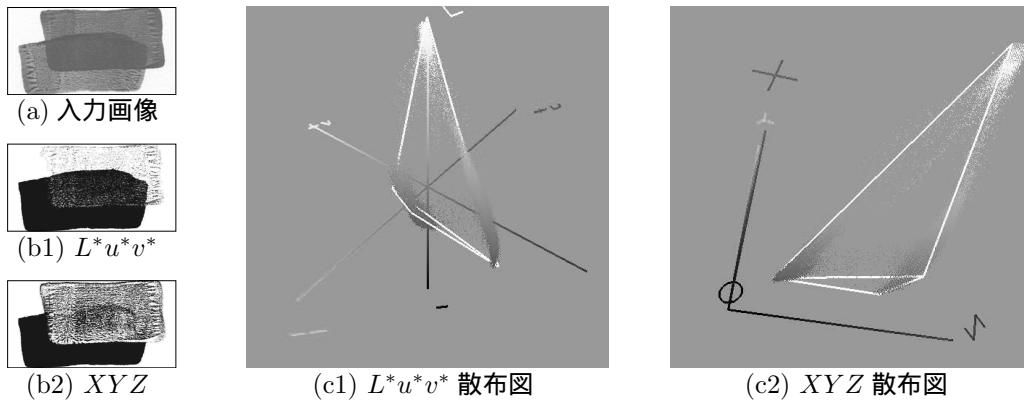


図 6: Blue→Green の $L^*u^*v^*$ 色空間と XYZ 色空間の比較

Fig. 6: Comparison of $L^*u^*v^*$ with XYZ for Blue→Green

メータを削減する．図 5(a) は図 2(a) の領域 A に関する色空間内の抽出形状であり，色空間において頂点 C_A , C_{BA} を抽出対象としている．図 5(b) はも同様に領域 B の抽出形状であり，色空間において頂点 C_A , C_{BA} を抽出対象としている．従来の抽出形状はパラメータ $d_{A1}, d_{A2}, d_{A3}, d_{A4}$ を同じ値を用いて手動で設定していた．しかし，実際の分布を最小に包むような自動設定により，従来よりも分布形状に適合させた．自動設定によるパラメータ方法は重回帰四角形をその面について垂直方向に掃引した四角柱を基準形状とした． $SC_A, C_A C_{BA}, C_{BA} C_B$ が接する各 3 つの側面および回帰平面に対するサンプル点との垂直距離の最大値をそれぞれ $d_{A1}, d_{A2}, d_{A3}, d_{A4}$ に反映させることで得られる．また，領域 B (図 5(b)) の抽出形状は領域 A の抽出形状 (図 5(a)) における SC_A に対する幅 d_{A1} と SC_B に対する幅 d_B が反

対となっている．A, B の各パラメータ値はそれぞれ個別に設定する．

6 色分解実験

$L^*u^*v^*$ と XYZ の 2 つの色空間における比較実験と，新たに定義した抽出パラメータの一部自動設定による実験結果を示す．従来，紙色 S の決定に用いている白色点は $L^*u^*v^*$ について $(L^*, u^*, v^*) = (100, 0, 0)$ としているが， XYZ では $(X, Y, Z) = (100, 100, 100)$ として簡易的に決定している．評価方法は，抽出された結果画像の目視による主観評価とした．

6.1 各色空間における成功率

実験には既存の手法 [10] を利用する．2 種類の水彩絵の具の重ね塗り標本に対し提案手法を適用した

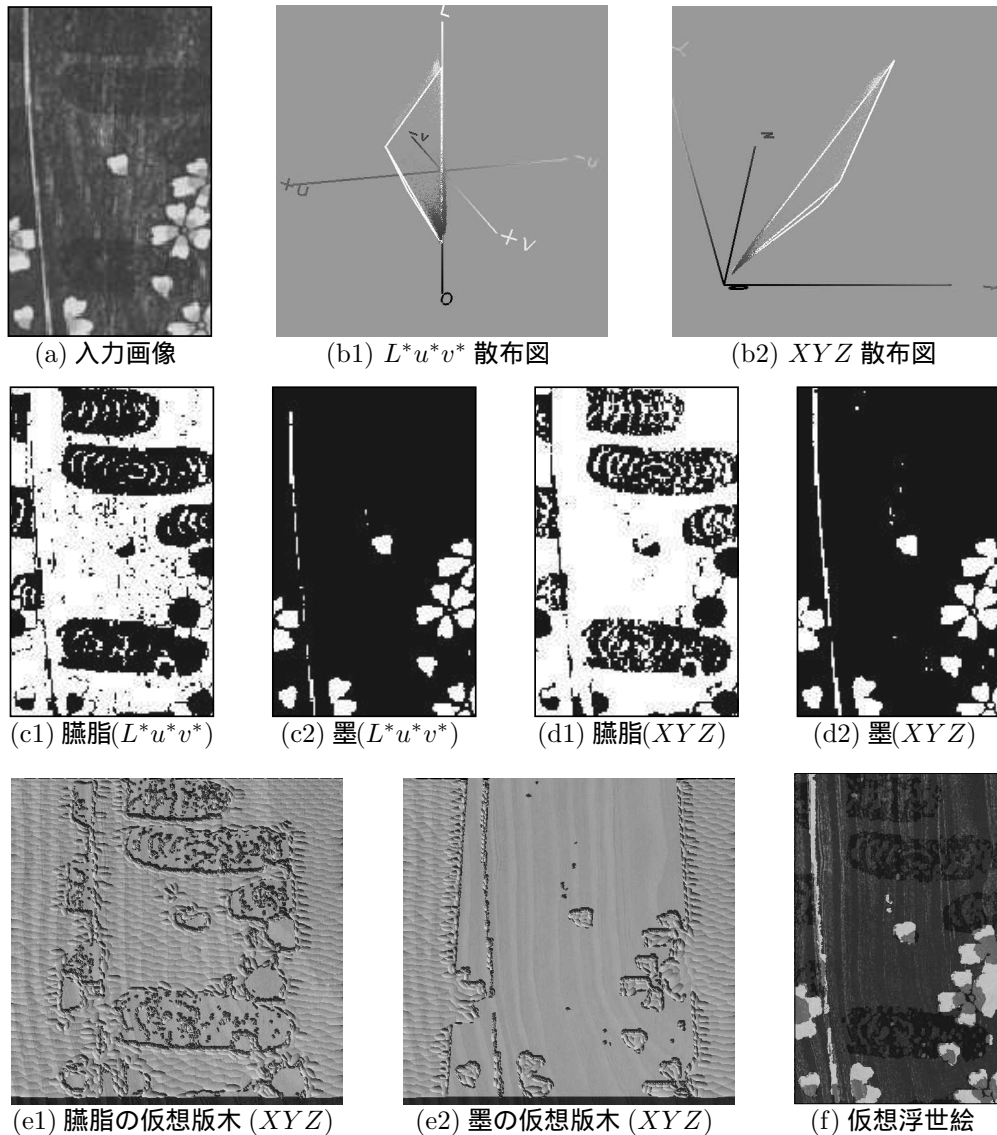


図 7: 浮世絵画像における $L^*u^*v^*$ と XYZ の比較と仮想版画による再現

Fig. 7: Comparison of $L^*u^*v^*$ with XYZ for *Ukiyo-e* and a reproduced virtual woodblock print

結果について説明する．図 5 に基づくパラメータ値を各標本について手動で決定した．その結果 $L^*u^*v^*$ 色空間における成功率は 20/20 (本実験時にパラメータを再調整することで新たに得られた)． XYZ 色空間では 18/20 となり，成功率は XYZ 色空間よりも従来用いていた $L^*u^*v^*$ 色空間の方が高いという結果になった．次にその原因を検討する．

XYZ において失敗した標本は Blue→Green と Yellow→Red の 2 つである．標本 Blue→Green (図 6(a)) の各色空間における色空間散布 (図 6(c1), (c2)) では，それぞれに推定された重回帰四角形と推定途中で決定された三角形と重ねて白線を描画させてい

る．比較すると，各色空間における混色クラスタが XYZ 色空間よりも $L^*u^*v^*$ 色空間の方が実際の上刷りの単色刷り領域のクラスタに対して近距離である．また刷りムラがあるため，単色刷りのクラスタから紙色クラスタにかけて分布に広がりがある．現在の抽出形状では直接の原因と考えられることは XYZ 色空間における混色領域が $L^*u^*v^*$ 色空間よりも狭くなっていることである．もう一方も標本の結果についても同様な問題がみられ， XYZ 色空間，三角形を決定する方法が適切でないことがわかる．

次に浮世絵の「鳥文斎 栄之: 螢狩り」[15] の一部のスキャン画像 (図 7(a)) について比較した． $L^*u^*v^*$

と XYZ の各色空間散布図はそれぞれ図 7 (b1), (b2) となり, 重回帰四角形の推定結果に大きな違いは見られなかった. また, 各色空間について得られた各色分解画像を図 7 にそれぞれ (c1), (c2) と (d1), (d2) に示す. 本抽出結果画像に若干の違いはあるが顕著な問題は現れなかった. 本浮世絵画像では臙脂と墨 (文献 [16] による目視判断) による重ね刷りがさている. XYZ による色分解結果を本研究室の版画システムに入力し, 生成させた仮想版木と仮想浮世絵をそれぞれ図 7 の (d1), (d2) と (e) に示す.

6.2 抽出形状パラメータ変更による実験

設定方法は重回帰四角形の領域を各変からその領域形状は本提案の抽出領域形状パラメータの一部自動化によって実験したところ, $L^*u^*v^*$, XYZ 共に従来の色分解結果画像に対し変化はみられず, 従来と同じ成功率となった. これにより本自動設定により自動設定の必要なパラメータを d_B にのみに焦点を当てることができる. この自動設定方法は浮世絵全体を対象とする色空間全体で別の絵の具によるクラスタに影響されるため問題となるが, 複数の絵の具が 2 色刷りの部分領域に適用することを想定すれば有効であると考えられる.

7 まとめ

本稿では, 版木推定において使用する色空間として XYZ が $L^*u^*v^*$ よりも色分解モデルに対し適切な分布形状をしていることを示した. XYZ 色空間による再実験を行った結果, $L^*u^*v^*$ 色空間による結果よりも成功率が低下したが, 実際の浮世絵による色分解実験では同程度の能力を示した. 色数が増えた場合の複雑化を避けるために XYZ 色空間を利用することは本質的に重要である.

今後の課題として, XYZ 色空間を利用した条件下においてより正確な四角形頂点の選定, 抽出領域形状の改良や頂点決定の最適化パラメータ設定の全自動化が求められる. また, 浮世絵全体を入力画像としたときの各絵の具領域色の分割統合による色分解法の検討, 日本の伝統色 [16] の色数限定による色分解支援の検討も行う予定である.

参考文献

[1] 清水宏一: “国家戦略化するデジタルアーカイブ”, 信学技報, IE2004-14, pp. 29-184 (2004-5)

[2] 田中法博, 駒田隆之, 富永昌治: “カラーカメラを用いた美術絵画の計測とレンダリング”, 情処論, Vol. 45, No. 1, pp. 350-361 (2004-1)

[3] S. Mizuno, M. Okada and J. Toriwaki: “An Interactive Designing System with Virtual Sculpting and Virtual Woodcut Printing”, *Computer Graphics Forum: The International J. of the EuroGraphics Assoc.*, Vol. 18, No. 3, pp. 184-193, 409 (Sept. 1999)

[4] S. Mizuno, T. Kasaura, T. Okouchi, S. Yamamoto, M. Okada and J. Toriwaki: “Automatic Generation of Virtual Woodblocks and Multicolor Woodblock Printing”, *Computer Graphics Forum: J. of the EuroGraphics Assoc.*, Vol. 19, No. 3, pp.C51-C58, C521 (Aug. 2000)

[5] 岡田稔, 水野慎士, 鳥脇純一郎: “モデル駆動による仮想彫刻と仮想版画”, 芸術科学会論文誌, Vol. 1, No. 2, pp. 74-84 (2002-6)

[6] 寺井友一, 水野慎士, 岡田稔: “水彩絵の具の重ね塗り効果の表現に関する基礎検討”, 情処研報, GCAD 研究会, 2002-CG-108-14, pp. 79-84 (2002-8)

[7] 寺井友一, 水野慎士, 岡田稔: “粒子密度モデルを用いた仮想木版画におけるぼかし刷りの検討”, *Visual Computing/グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2003*, pp. 87-92 (2003-6)

[8] T. Terai, S. Mizuno and M. Okada: “Color Decomposition of Overlapped Watercolors”, *Proc. of ICPR2004 - 17th Int'l Conf. on Pattern Recognition*, Vol. 2, pp. 919-922 (Aug. 2004)

[9] T. Terai, S. Mizuno and M. Okada: “A Color Decomposition Method for Preserving Ukiyo-e Woodblocks”, *Short Presentations & Interactive Demos of EUROGRAPHICS 2004 - 25th Annual Conf. of the European Assoc. for Computer Graphics*, pp. 53-56 (Aug. 2004)

[10] 寺井友一, 水野慎士, 岡田稔: “重回帰四角形推定による水彩絵の具の 2 色分解法の基礎検討”, 情報科学技術レターズ IT Letters, Vol. 3, LI-012, pp. 197-200 (2004-9)

[11] 大田登: “色再現工学の基礎”, コロナ社 (1997)

[12] Von P. Kubelka and F. Munk: “Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche”, *Zeitschrift für technische Physik*, pp. 593-601 (1931)

[13] 大田登: “色彩工学 第 2 版”, 東京電機大学出版局 (2001)

[14] 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)

[15] 菊地貞夫: “原色日本の美術 17 - 浮世絵 -”, 小学館 (1968-1)

[16] 福田邦夫: “日本の伝統色-色の小辞典”, 読売新聞社 (1987-5)