

# 自然画像からの手描き風画像の生成法と その色計算

齋藤 豪 中嶋 正之

東京工業大学 情報理工学研究科

本稿は、ノンフォトリアリステックレンダリングの一つである手描き風表現による画像生成のアルゴリズムに関する研究会報告の第3報である。我々の提案アルゴリズムは自然画像を入力とし、画像解析の手法を用いて描画に必要な局所情報を検出し、その情報を基に手描き風画像の特徴を持つ画像を自動生成するものである。本稿では、現在までの手描き風自動描画アルゴリズムへの取り組みについての報告を行い、さらに絵の要素的な質向上の為に Kubelka-Munk の理論に基づく光の散乱、吸収を考慮した絵の具モデルの混色計算法と実装法について提案を行っている。

## Production of the Hand-Painted Images from Natural Images and its Color Calculation

Suguru SAITO Masayuki NAKAJIMA

Graduate School of Information Science & Engineering,  
Tokyo Institute of Technology

This paper is the third report about the algorithm for hand-painted images which are included in nonphotorealistic rendering pictures. In our methods, a natural image is first analyzed as input by image analysis techniques then the image which has the feature of the hand-painted image is created automatically. In the paper, we present our results about the hand-painted image until now and propose a new implementation of the calculation of paint-color-mixture based on Kubelka-Munk theory. The proposal implementation increases the quality of the image.

## 1 はじめに

画像や映像の表現法には写真のような表現と、そうでない表現がある。CG での表現法においては、写真のような表現、即ちフォトリアスティックレンダリング [1] [4] に関しては、既に実用的な技術として定着している。一方、手描きの絵のような表現法に関しては一部利用をされているが、その表現法としての質は低い。

本稿は、計算機上での手描き風画像の生成に関して述べるものである。第2節では我々の対象とする手描き風生成画像の表現法の中での位置付けを行い、第3節で現在までのそれら手描き風 CG に関する様々なアプローチについて概説し、第4節で我々の提案して来た手法について説明を行う。そして、そのなかで画像の表現上の質を向上させる為に問題となった絵の具の混色計算について第5節で詳しく述べる。最後に第6節で本稿のまとめを行う。

## 2 手描き風画像の表現としての位置付け

本稿で扱う手描き風画像は表現法としては筆やペン等の道具を用いることによって描かれる画像の特徴を持つものである。すなわち、三次元世界を二次元へ幾何学的に射影した点列で表される実写と異なり、実際には無い境界線が黒く描かれていたり、細かい領域は一筆で塗りつぶされていたりするといった“画像上の情報の省略や強調”がある表現方法である。

ただし人間が実際に物を描く際には、モチーフの持つ雰囲気をもより強調するように、変形することがある。例えば相撲の力士ならば、より力強くやより重量感のあるといったように実際の力士からデフォルメしたり、構図を変形して描く事がある。これは“対象物や対象空間の情報の省略や強調”である。計算機による似顔絵システムの研究 [28] ではこの種の処理を行うことを目標としているが、本稿で扱う手描き風画像では入力した写真の内容に踏み込んだ情報の変更は行わない。

以上を図で表すと、図1のようになる。

このように画像の生成対象を制限することにより、第4節で述べるように写真等の自然画像を入力として、物体認識処理を行うこと無く、手描き風画像を計算機により自動的に作成することが可能となる。

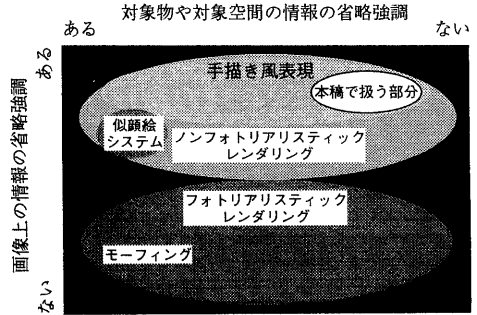


図1: 研究対象とする手描き風画像の表現上の位置付け

## 3 手描き風画像の様々な取り組み

本節では、前節で位置付けた手描き風表現法の限定範囲に関する研究について幾つか紹介する。手描き風の CG に関しては Haerberli による研究 [5] が先駆けとなっている。彼は手描き風画像を作成する三種のアプローチを既にそこで行っている。

第一は一般的な CG を作る際のモデルとして利用される三次元幾何モデルを特殊なレンダリングにより行うものである。この種の研究は油絵風 [6]、墨絵風 [7]、セルアニメ風 [8] 等のレンダリングに関するものがある [9] [12]。

第二はインタラクティブなツールを作るものである。計算機上に筆やペン、画材をモデル化して、実際の道具を使う場合と同様な表現を計算機上でユーザが行うようにする研究である。この種のツールには Fractal Design 社の Painter のような製品があり、また研究としては高木らの色えんぴつ描画ツール Pumpkins [13]、Salisbury らのテクニカルペン風描画ツール [14] 等がある [15] [17]。

第三は写真等の自然画像を入力として画像処理を施して、手描き風の画像に変換するものである。製品としては、Adobe の Photoshop 等があり、また研究としては点描画に関する研究 [18]、油絵風描画 [19] に関する研究等がある [20] [21]。

これら三種類のアプローチには各々利点があるが [22]、我々は、すでに多量に蓄積されている画像データが即座に利用可能であることから三番目のアプローチにより手描き風画像の自動生成の研究を行っている。

## 4 我々の今までの提案手法

ここで我々の今までの提案手法 [22] [29] [32] について概説を行う。

まず、描く前に画像処理の手法を用いて画像の局所領域毎の特徴を検出する。ここで得る情報は画像の局所的な方向性、方向性の確かさ、波長期待値、輪郭らしさである。方向性、方向性の確かさ、波長期待値は局所的な二次元フーリエ級数展開により得る。また、輪郭らしさに関してはガウス-グラディエントフィルタを用いて求める。

次にそれら局所情報をもとに描画を行う。我々が提案している描画法は二種類の方法に分かれる。

一つ目は、先ほどの局所情報をもとにして各局所情報に合った形状、方向の筆のストロークを描き込む方法である。各ストロークの描き込みの順番をランダムに行う方法 [22]、明度により描き込みに階層をつける方法 [32] がある。描画結果の例を図 2 に示す。

二つ目は、先ほどの局所情報をもとに局所領域毎に異方性フィルタを変化させてぼかす手法である。小さなフィルタを複数回畳み込むことにより大きなフィルタを施していることと同様な処理を行っている。この手法による描画結果例を図 3 に示す。

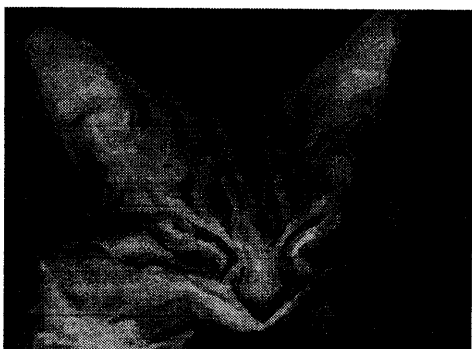


図 2: 筆のストロークを重ねる描画法による結果例

以上の結果のように、自動的な描画においても手描き風の画像が生成可能であることがわかる。

さらに、表現の要素的な質を高める為に、油絵の具の表面の光沢に関する表現を行う目的として、筆のストロークに対して厚み情報をテクスチャとして付加し、描画時にその厚み情報を“厚みバッファ”に格納し、描画後に表面の法線方向から光沢を計算するという手法の提案も行っている [31]。しかしこれまでは、水彩のような淡い表現、混色表現に関する質の向上は難しかった。

これは、絵の具の混色計算が加法混色に比べて複雑だからである。実際、CGに関連した絵の具の混色に関する厳密な研究は見られない。そこで、次節では絵の具の混色に関する色計算を

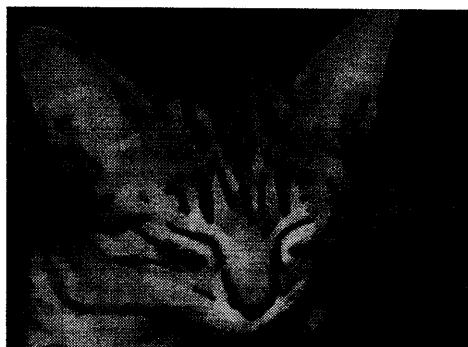


図 3: ぼかし処理による描画結果例

計算機上で行う為の我々の新しい方法について提案する。

## 5 Kubelka-Munk の理論を用いた色計算の実装法の提案

絵の具の混色は減法混色であるとされることが多いが、透過光のフィルタによる混色とは異なった計算をする必要がある [24]。すなわち、式 1 では計算できないのである。

$$p(\lambda) = \left( \prod_i f_i(\lambda) \right) l(\lambda) \quad (1)$$

なぜなら、絵の具の層の内部では光の吸収と共に散乱も起きているからである。

Kubelka と Munk は絵の具層内の光に対する特性を吸収と散乱によってモデル化した [25]。

そこで、まず簡単に Kubelka-Munk の計算方法を説明し、その実装法について述べる。

はじめに図 4 で示すように絵の具層内部における上下方向へのある分光エネルギーを  $j, i$  として、それらの絵の具の微小厚における変化量を散乱係数  $S$  と吸収係数  $K$  としたとする。すると  $i, j$  の変化量は式 2 で表される。

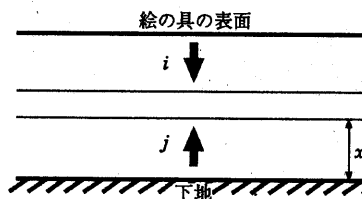


図 4: Kubelka Munk の式の原理図

$$dj = -(S + K)jdx + Sidx \quad (2)$$

$$-di = -(S + K)idx + Sjdx$$

式2を変形し、 $j/i$ を反射率 $R$ と置いた後、二つの境界条件を与えることにより、絵の具の任意の厚さにおける反射率の計算式である式3と厚さ無限大の場合の反射率の計算式である式4を得る。ここで、 $R_u$ は下地の反射率である。

$$R(x) = \frac{\frac{1}{R_\infty}(R_u - R_\infty) - R_\infty(R_u - \frac{1}{R_\infty})e^{Sx(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty)}}{(R_u - R_\infty) - (R_u - \frac{1}{R_\infty})e^{Sx(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty)}} \quad (3)$$

$$R_\infty = 1 + \frac{K}{S} - \sqrt{\frac{K^2}{S^2} + 2\frac{K}{S}} \quad (4)$$

さらに、 $K, S$ は微小厚における分光エネルギーの変化率なので複数の絵の具を混合した場合、 $K, S$ 値は式5のように和として表す事が出来る。ここで $m_i$ は絵の具 $i$ の比である。

$$K = \frac{\sum_i m_i K_i}{\sum_i m_i}, S = \frac{\sum_i m_i S_i}{\sum_i m_i} \quad (5)$$

また絵の具の濃度に対して、 $K, S$ は高濃度である場合を除いて比例関係にある。従って $K, S$ で絵の具を表す事は混合と濃度に関する色計算を容易に行えることを意味する。

#### 実装の準備

式3を実装するには、スペクトルに対する散乱係数 $S$ 、無限厚反射率 $R_\infty$ 、下層の反射率 $R_u$ の3定数の値が必要となる。ここで、 $S$ の値は直接的に計測することが難しい。そこでまず、絵の具の顔料の比重と隠ぺい力から隠ぺいに要する厚みを求める。さらにどの絵の具も隠ぺいに要する厚みが等しければ扱いやすいと考えて、9種類の顔料をサンプルとしてそれら厚みの平均 $t$ を得る。表1から $t = 0.002cm$ とした。次に

表1: 隠ぺいに必要な絵の具の厚さの平均

名称	比重	隠ぺい力 (cm <sup>2</sup> /g)		厚さ (cm)
		白紙	黒紙	
亜鉛華	5.55	-	40	0.0045
リトボン	4.2	-	50	0.0048
べんがら	4.75	3495	3220	0.000063
クロムパーミリオン	6.05	1070	655	0.0002
カドミウムレッド	4.75	540	460	0.00042
黄鉛	6.3	240	130	0.00086
酸化クロム	5.05	1240	1240	0.00016
紺じょう (プルシアンブルー)	1.85	1700	-	0.00032
群じょう	2.3	50	80	0.0067
隠ぺいに要す平均厚 $t$				0.002

式3を変形し、式6を得る。

$$\frac{(R - \frac{1}{R_\infty})(1 - R_\infty)}{(1 - \frac{1}{R_\infty})(R - R_\infty)} = e^{Sx(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty)}, \quad (6)$$

$$S = \log \frac{(R - \frac{1}{R_\infty})(1 - R_\infty)}{(1 - \frac{1}{R_\infty})(R - R_\infty)} \cdot \frac{1}{x(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty)}$$

ここで、 $x = t, R \cong R_\infty$ を代入することにより、 $S$ を得る。さらに式4を変形した式7により、 $R_\infty$ と $S$ から $K$ を得る事が出来る。 $K$ は式3では必要ないが混合による混色計算で必要になる。

$$K = \left(\frac{1 + R_\infty^2}{2R_\infty} - 1\right)S \quad (7)$$

以上のように、図5のような絵の具や顔料のスペクトル反射率の特性のデータから、その散乱係数 $S$ と吸収係数 $K$ を導く。

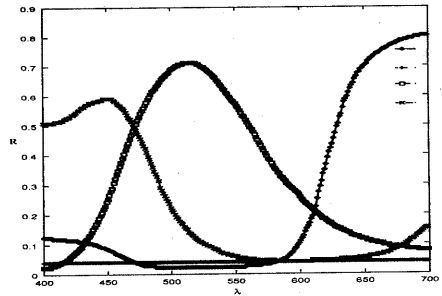


図5: 顔料のスペクトルデータの例

こうして、重ね合わせによる混色と混合による混色の計算を行う為のデータをそろえる。

#### データ構造と描画処理過程

絵を描く計算機上の各微小領域には書き込まれた絵の具の各スペクトルの散乱係数 $S$ 、吸収係数 $K$ を格納しなければならない。複数回絵の具を塗重ねる毎に $K, S$ を幾層分も格納するのは記憶容量が大量に必要となる。そこで、各微小領域に格納する情報を表2のように二層に簡略化する。最上層よりも下の層の光学特性は反射率 $R$ で表し、最上層のみ乾き切る前の塗り込みで混合混色が出来るように $K, S$ で表す。

また、最上層の絵の具の量 $q$ も混合混色の為に格納する必要がある。さらに、絵の具の部分乾燥に対応する為に最上層の乾燥量 $d$ も加える。以上から、微小領域あたりに最低必要となるデータは表2のようになる。

なお、可視帯域の標準数は標準数256との種々の混色計算結果での色差を考慮して今回は17とする。

次に微小領域のデータに対する操作について説明する。最低必要な操作は絵の具の描画、乾燥、色の可視化である。

#### ● 描画処理

描画処理は次のステップで各波長毎に行う。ただし、新たに塗る絵の具の量を $q_n$ 、散乱係数 $S_n$ 、吸収係数 $K_n$ とする。

表 2: 微小領域あたりに必要となるデータ

	波長			
	$\lambda_0$	$\lambda_1$	...	$\lambda_{(N-1)}$
上層	$K, S$	$K, S$	...	$K, S$
下層	$R_u$	$R_u$		$R_u$
最上層の量				$q$
最上層の乾燥量				$d$

1. 式 4 により  $K, S$  から  $R_\infty$  を求め、 $x$  を乾燥量  $d$ 、として 3 から反射率を求める。
2. 求めた反射率を  $R_u$  に代入。
3. 式 5 から  $K, S$  と  $K_n, S_n$  の  $q-d:q_n$  の内分比により新たな  $K, S$  を求めて代入

最後に  $q = q - d + q_n, d = 0$  を代入する。

● 乾燥処理

乾燥処理は  $d$  を増加させるだけである。

● 発色処理

発色処理は各スペクトル反射率を式 3 で計算し、それらから 2 度視野 CIE XYZ 表色系に JIS で定められた重係数 [26] を用いて変換する。ここで、入射光源は  $D_{65}$  を仮定している。さらにそこから、ディスプレイ用の RGB 表色系へ変換する。

以上が、実装法である。

実装法の特徴

本提案実装法による重ね塗り混色の安定性を式 1 で表される単純な減法混色と比較する。また、HVC 表色系等では計算が困難な厚みの変化による混色の複雑な変化に関する本提案手法の混色結果を示す。

単純な減法混色の実装には式 8 を用いる。

$$r = \left( \prod_i r_i \right) \cdot 1, g = \left( \prod_i g_i \right) \cdot 1, b = \left( \prod_i b_i \right) \cdot 1 \quad (8)$$

ここで、 $r_i, g_i, b_i$  は透過率である。またここで用いている  $rgb$  は sRGB [27] に準じている。この式を用いて表 3 に示す 13 の色で二層の混色を行う。下の層はそれぞれ 13 色の絵の具の色に対応する  $rgb$  を用い、上層は 13 色の色を透明に近い方から次第にそれらの色へ近づける。その混色結果を図 6(a) に、 $L^*a^*b^*$  の  $a^*b^*$  平面上で表す。□が下層の各色、■が厚い上層を重ねた時のそれぞれの色である。

一方提案手法の混色は次のように行う。はじめに、表 3 の絵の具の特徴量を前節で述べた方法で計算して用意する。次にそれら 13 の絵の具を各々厚く下塗りした領域を用意し、その各領域に対して 13 色の絵の具を次第に厚く塗り重ねる。その時の重ね合わされた色の変移を  $L^*a^*b^*$  の  $a^*b^*$  で図 6(b) に示す。なお、スペクトルの標本数は 17 とした。

表 3: 実験に用いる絵の具の顔料

顔料名	$Y_c$	$x$	$y$
クロムバーミリオン赤口	20.61	0.558	0.348
カドミウム赤	11.68	0.546	0.314
ローダミン B レーキ	9.12	0.508	0.259
群ジヨウ 2200	8.54	0.168	0.103
コバルトブルー	19.83	0.194	0.183
コバルトバイオレット	30.59	0.295	0.216
フタロシアニングリーン	4.19	0.236	0.320
エメラルド緑	47.54	0.259	0.411
カドミウム黄	52.92	0.502	0.456
黄鉛 5G	75.33	0.455	0.484
カーボンブラック	4.61	0.308	0.313
鉛白	91.09	0.314	0.321
カオリンクレ	82.93	0.319	0.328

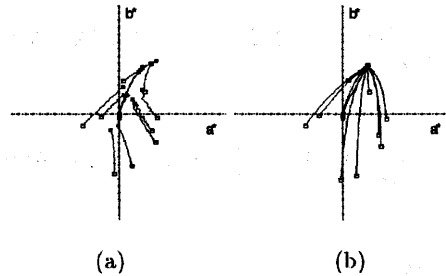


図 6: 塗り重ね混色での塗り重ね厚の変化に対する色の変移

単純な減法混色では絵の具層内での光の散乱を考慮しないため、本来の絵の具の色から重ね塗りの混色で  $L^*a^*b^*$  において図 6(a) で示すように最大 106 の色差が生じてしまう。また、色を重ねる毎に明度が落ちるので描画時において、望んだ色相、彩度と明度を同時に得る事が難しい。

一方、本提案実装法では下層に塗られた絵の具がどのような色であっても図 6(b) で示すように重ねる絵の具の量を増やす事により、重ねた絵の具の本来の色に収束する事が出来る。

また、図 7 は黄鉛 5G を他の色に次第に厚く塗り重ねた場合の色の变化を  $L^*a^*b^*$  の  $a^*b^*$  で表したものである。混色によるこのような曲線による変化は HVC などの三次元表色系の上では計算が困難であるが、本提案手法では再現が行えている例である。

## 6 まとめ

本稿では、手描き風画像の生成に関する研究の概説、我々の手描き風画像生成に関する研究の成果、絵の具の混色の計算方法の実装法についての提案を行った。提案した絵の具の色計算の実装法では、単純減法混色計算や HVC 表色系での混色計算では難しい混色の特徴を得ることができた。

今後は、本提案混色手法を用いたインタラク

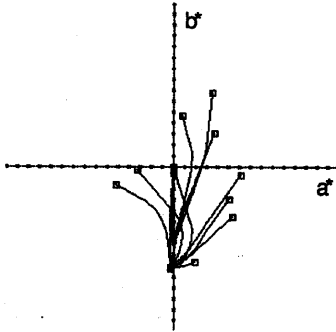


図7: 黄鉛5Gを各色に厚みを変えて塗り重ねた混色結果

タイプな描画ツールや自動描画ツールの検討を行う予定である。

## 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”, 情報処理学会研究報告 95-CG-76, pp.1-7 (1995)
- [2] 石原 亘: “まんがにおける具象物の半記号化された表示 - 非写真的写実レンダリングを論じるために -”, 情報処理学会研究報告 95-CG-76, pp.9-16 (1995)
- [3] 石原 亘: “SIGGRAPH '94 におけるノンフォトリアルリズムの研究の動向”, 情報処理学会研究報告 95-CG-76, pp.9-16 (1995)
- [4] Jhon Lansdown, Simon Schofield: “Expressive Rendering: A Review of Nonphotorealistic Techniques”, IEEE CG and Appli, Vol.15, No.03, pp.29-37 (1995)
- [5] P. Haerberli: “Paint By Numbers: Abstract Image Representations”, Computer Graphics, Vol.24, No.4, pp.207-214 (1990)
- [6] Barbara J.Meier: “Painterly Rendering for Animation”, SIGGRAPH '96 proceedings, pp.477-484 (1996)
- [7] 高橋 淳也, 張 青, 村岡 一信, 千葉 則茂: “セルオートマトンによる墨の振る舞いのシミュレーションとその樹木の水墨画レンダリング”, NICOGRAPH (1996)
- [8] 金子 満, 中嶋 正之: “次世代アニメーションシステムに関する研究 - ノンフォトリアルスティックアニメーションの生成 -”, 情報処理学会研究報告 95-CG-76, pp.23-30 (1995)
- [9] Takafumi Saito, Tokiichiro Takahashi: “Comprehensible Rendering of 3-D Shapes”, Computer Graphics, Vol.24, No.4, pp.197-206 (1990)
- [10] Georges Winkenbach, David H.Salesin: “Computer-Generated Pen-and-Ink Illustration”, SIGGRAPH94 proceedings, pp.91-100 (1994)
- [11] 関谷 英明, 高田 繁広, 近藤 邦雄, 佐藤 尚, 高田 静雄: “モノクロレンダリングのためのテクスチャ描画手法”, 情報処理学会研究報告 95-CG-76, pp.81-87 (1995)
- [12] 望月 義典, 近藤 邦雄, 佐藤 尚, 高田 静雄: “形状理解を容易にする特徴強調画像の生成”, 情報処理学会研究報告 95-CG-76, pp.73-80 (1995)
- [13] 高木 佐恵子, 藤代 一成: “水溶性色えんぴつ画における加水効果のCGモデリング”, 情報処理学会 研究報告 96-CG-80 pp.25-32 (1996)
- [14] Michael P.Salisbury, Sean E.Anderson, Ronen Barzel, David H.Salesin: “Interactive Pen-and-Ink Illustration”, SIGGRAPH94 proceedings, pp.101-108 (1994)
- [15] T.Cockshott et al.: “Modeling the Texture of Paint”, Computer Graphics Forum, Eurographics 92 Proc., Vol.11, No.3, pp.C217-C226 (1992)
- [16] Steve Strassmann: “Hairy Brushes”, Computer Graphics, Vol.20, No.4, pp.225-232 (1986)
- [17] Siu Chi Hsu, Irene H.H.Lee: “Drawing and Animation Using Skeletal Strokes”, SIGGRAPH '94 proceedings, pp.109-118 (1994)
- [18] T.Agui, H. Do, H. Nagahashi, M. Kaji: “Painting-like Image Generation”, 日本印刷学会誌, Vol. 31, No. 1, pp.40-48 (1994)
- [19] 染谷信彦, 宮原誠: “Wavelet 変換を用いた画像 modification: 手書き風表現”, 電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集, p.423 (1995)
- [20] B.Cabral, L.Leedom: “Imaging vector fields using line integral convolution”, SIGGRAPH'93, pp.263-270, (1993)
- [21] M.F.Barnsley: “Fractals Everywhere”, Academic Press (1988)
- [22] 齋藤 豪, 中嶋 正之: “計算機による手書き風画像の自動生成に関する研究”, テレビジョン学会誌, Vol.50, No.10 pp.1528-1535 (1996)
- [23] 日本色彩学会 編: “新編 色彩科学ハンドブック”, 東京大学出版会, 第20章 pp.683-743 (1980)
- [24] 山口 昌一郎, 川上 元郎: “色彩工学入門”, オーム社, p.21, (1963)
- [25] Von Paul Kubelka, Franz Munk: “Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche”, Zeitschrift für technische Physik, pp.593-601, (1931)
- [26] “JIS Z 8722-1971 2 度視野 XYZ 系による物体色の測定方法”, 日本工業規格, (1971)
- [27] “Colour Management in Multimedia Systems Default RGB Colour Space - sRGB part.2.1”, International Electrotechnical Commission, (1997)
- [28] 奥水 大和, 村上 和人, 中山 晶, 福村 晃: “似顔絵生成研究の現状と PICASSO システムの諸課題”, 画像の認識・理解シンポジウム 論文集 II pp.159-166 (1996)
- [29] 齋藤 豪, 中嶋 正之: “FFT を用いた写真からの手書き風画像の自動生成”, 情報処理学会 研究報告 95-CG-74 pp.11-16 (1995)
- [30] 齋藤 豪, 中嶋 正之: “手書き風画像の自動生成に関する研究 第3報”, 電子情報通信学会 96 年春季大会 D-563 (1996)
- [31] 齋藤 豪, 中嶋 正之: “計算機による手書き風画像の自動生成 第4報”, テレビジョン学会 96 年冬季大会 3-2 p.65 (1996)
- [32] 齋藤 豪, 中嶋 正之: “計算機による絵画風画像の自動生成 第5報”, 電子情報通信学会 97 年春季大会 D-12-176 (1997)