

メタマ推定に基づく RGB 画像からの被写体の 測色値予測（第二報：評価）

長谷川隆行^{†,††} 飯野浩一^{††} 津村徳道[†]
中口俊哉[†] 三宅洋一^{†††}(正会員)

[†] 千葉大学大学院融合科学研究科

^{††} 凸版印刷株式会社

^{†††} 千葉大学フロンティアメディカル工学研究開発センター

〈あらまし〉 第一報では、デジタルカメラの RGB 画像から任意照明光下における被写体の測色値を予測する手法を提案した。第二報となる本稿では、提案手法の評価について述べる。シミュレーションによる評価では、提案手法の予測精度を、照明光、カメラの分光感度、被写体の種別、および色予測モデル構築に使用する母集団データの複数の組み合わせについて検証した。その結果、精度、および母集団データの選択に対する安定性のいずれについても、従来手法に対する提案手法の優位性が確認された。また、デジタルカメラで撮影して得た画像を用いた実験により、提案手法は実際の画像に対しても有効であることが示された。

キーワード：メタマ推定，被写体測色値予測，デジタルカメラ

〈Summary〉 Part I of this article proposed a novel method that predicts colorimetric values of an object under an arbitrary illuminant from an RGB image photographed by a digital still camera. In this paper, the performance of the proposed method is evaluated. Computer simulations were carried out to evaluate the color prediction accuracy for various combinations of illuminants, camera sensitivities, object categories, and population data used for constructing color prediction models. The results show that the proposed method outperforms conventional methods in terms of both accuracy and robustness against selection of population data. An experiment using a digital camera image also showed that the proposed method is of practical use for actual images.

Key words: metamer estimation, object color prediction, digital still camera

1. 緒 言

商業印刷や画像アーカイブなどの分野では、画像の出力や表示において物体の正確な色再現が求められる。商

品カタログに掲載する画像の色は、実物とできるだけ一致していることが望まれる。また、美術品や文化財の画像アーカイブでは、インターネットや図録を介しての公開、研究資料としての複製、修復に備えた現状記録などの活用において、対象資料の色の正確な記録と再現が求められる。画像の初期生成手段としてはデジタルカメラが広く用いられているが、正確な色再現の要求を満たすためには、カメラのイメージセンサで発生したセンサ応答に対して所望照明光下における被写体の測色値を割り当てる必要がある。

デジタルカメラのセンサ応答から被写体の測色値を求める際の問題は、完全な一対一変換が成立しない点にあ

“Object Color Prediction from an RGB Image Based on Metamer Estimation (Part II: Evaluation)”

Takayuki HASEGAWA^{†,††}, Koichi HINO^{††}, Norimichi TSUMURA[†], Toshiya NAKAGUCHI[†], Yoichi MIYAKE^{†††} (Member)

[†] Graduate School of Advanced Integration Science, Chiba University

^{††} Toppan Printing Co., Ltd.

^{†††} Research Center for Frontier Medical Engineering, Chiba University

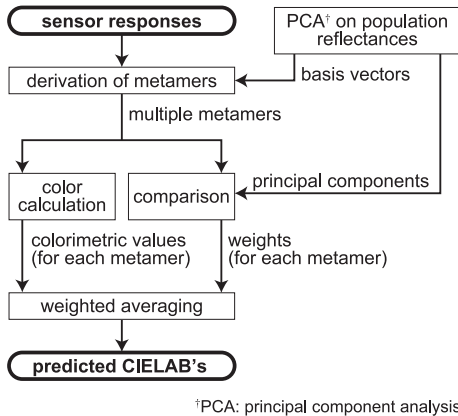


図 1 提案手法による測色値予測の流れ

Fig. 1 Color prediction procedure of the proposed method

る。これは、被写体の分光反射率がカメラのバンド数以上の情報量を持つことに起因する。通常、物体の分光反射率はカメラの入力バンド数 3 を超える次元の情報量を持つが^{(1)~(3)}、撮影によってその情報量は三次元にまで縮退されてしまう。この場合、複数の異なる分光反射率から同一のセンサ応答が生成される可能性が生じる。それら複数の分光反射率が観察照明光下で異なる測色値を持つとき、センサ応答から被写体の正確な測色値を一意的に導出することができない⁽⁴⁾。

第一報では、被写体の測色値とカメラのセンサ応答の間に生じる多対一の関係から、与えられたセンサ応答に対する最適な被写体測色値を解析的に決定する手法を提案した⁽⁴⁾。

図 1 に、提案手法による被写体測色値予測の流れを示す。提案手法では、被写体と分光反射率の統計的特徴が類似した物体（例えば、自然物、布生地、油彩画などのカテゴリから選択）の母集団分光反射率データから、主成分分析により、分光反射率を少数の基底ベクトルの線形和で表す線形モデルを構築する。被写体測色値予測のアルゴリズムでは、まず、この線形モデルの基底ベクトルを用い、与えられたセンサ応答に対応する分光反射率を複数導出する。本稿では、これらの分光反射率をカメラメタマと呼称する。次に、母集団分光反射率データの統計的な特徴が主成分分布に現れることから、これを参照して各カメラメタマの被写体としての実在性を推定する。そして、各カメラメタマから均等色空間における測色値を算出し、カメラメタマの実在性に基づく加重平均として被写体測色値の予測値を決定する。

本稿では、照明光やカメラ分光感度特性、および母集団分光反射率に対する予測精度の依存性を評価し、手法の

汎用性についての検証を行う。第 2 章では、統計的特徴の異なる分光反射率データ群、複数の照明光分光エネルギーおよびカメラ分光感度を用いて、コンピュータシミュレーションにより測色値予測精度の評価を行う。また、実際にデジタルカメラで撮影した画像に対する手法の適用性を検証する。提案手法のように母集団データを用いる被写体測色値予測手法では、予測精度は母集団データに依存する。母集団データの選択の仕方や母集団データのサンプル数が予測精度に与える影響について、第 3 章で検証する。

2. 予測精度の評価

2.1 シミュレーションによる評価

提案手法による被写体測色値予測の精度を種々の条件で評価するため、コンピュータシミュレーションを行った。以下に、シミュレーションに使用したデータや評価方法の詳細、および結果について述べる。

2.1.1 評価方法

シミュレーションでは、下記に示す分光データを用いて算出したセンサ応答から、提案手法により被写体の測色値を予測し、実際の測色値との色差 ΔE_{ab}^* を求め、これを評価基準とした。同様の方法により、従来法として重回帰分析法^{(5),(6)}、および Wiener 推定法⁽⁷⁾の精度を評価し、比較対象とした。重回帰分析法では、式 (1) に示す測色値予測モデルを用いた⁽⁴⁾。

$$\hat{\mathbf{t}}_{XYZ} = \mathbf{L}_f \cdot f(\mathbf{t}_{RGB}) \quad (1)$$

$$f(\mathbf{t}_{RGB}) = [R, G, B, R^2, G^2, B^2,$$

$$RG, GB, BR, RGB, 1]^T$$

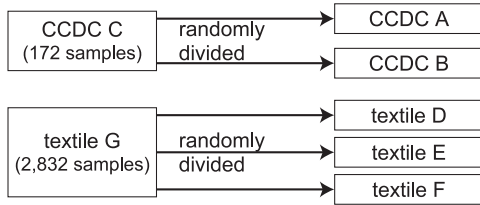
ただし、 $\hat{\mathbf{t}}_{XYZ}$ は被写体測色値の予測値である。また、 $\mathbf{L}_f$ は 3×11 の変換行列であり、センサ応答と三刺激値が既知である母集団データをもとに、重回帰分析によって決定される。また、Wiener 推定法においては、式 (2)、(3) に示す分光反射率推定モデルを用い、推定された分光反射率 $\hat{\mathbf{r}}$ から算出した測色値を被写体測色値の予測値とした。

$$\hat{\mathbf{r}} = \mathbf{G} \mathbf{t}_{RGB} \quad (2)$$

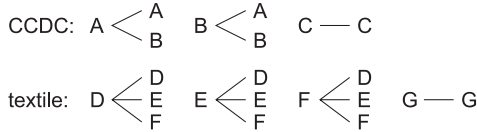
$$\mathbf{G} = \mathbf{R}_{rr} \mathbf{H} \left(\mathbf{H}^T \mathbf{R}_{rr} \mathbf{H} + \mathbf{R}_{nn} \right)^{-1} \quad (3)$$

ただし、 $\mathbf{H}$ は撮影照明光の分光エネルギーとカメラの分光感度の分光積から成る行列、 $\mathbf{R}_{rr}$ は分光反射率母集団データの自己相関行列、 $\mathbf{R}_{nn}$ はセンサ応答に生じるノイズの自己相関行列である。すべての分光データは、380 nm から 730 nm の波長域を 10 nm 間隔でサンプリングした離散データとした。

シミュレーションに使用する分光反射率データとしては、ColorChecker DC (X-Rite) から抽出した 172 の



(a) Generation of data subsets



(b) Data pairs (model - test) for evaluation

図2 シミュレーションに使用した分光反射率データ

Fig. 2 Spectral reflectance data used for the computer simulation

色票の実測値（以下，CCDC C），および，ISO 16066 (SOCS)⁸⁾ に含まれる 2,832 個の textile サンプル（以下，textile G）を使用した．分光反射率データは，精度評価と色予測モデル構築の二つの用途に用いた．精度評価では，分光反射率データからセンサ応答を算出し，ここから提案手法と重回帰分析法，および Wiener 推定法により測色値を予測した．色予測モデル構築に関しては，分光反射率データを母集団データとして，提案手法の場合には主成分分析に，重回帰分析法の場合には式 (1) における行列 $\mathbf{L}_f$ の決定に，Wiener 推定法の場合には式 (3) における行列 $\mathbf{R}_{rr}$ の決定に使用した．モデル構築用データと評価用データの組み合わせが予測精度に与える影響を確認するため，図 2 に示す手順によりそれらの組み合わせを決定した．CCDC C は無作為に 2 等分してサブセット CCDC A, B を生成し，textile G は無作為に 3 等分してサブセット textile D, E, F を生成した（図 2 (a)）．モデル構築用データと評価用データの組み合わせは，CCDC については A-A, A-B, B-A, B-B, C-C の 5 通り，textile については D-D, D-E, D-F, E-D, E-E, E-F, F-D, F-E, F-F, G-G の 10 通りとした（図 2 (b)）．同じ記号の対は，モデル構築用データを評価用データとして用いたことを意味する．

照明光の分光エネルギーデータとしては，相関色温度 2,994 K のタングステンランプの実測値，相関色温度 5,743 K のストロボランプの実測値，および標準照明光 D₆₅ の分光データを使用した．撮影照明光については，一般的な撮影環境で主に使用される照明として，タングステンランプとストロボランプを選択した．また，観察照明光については，美術品の画像アーカイブを想定し，インターネット上での画像公開のケースとして標準照明光

表 1 シミュレーションに使用した撮影照明光と観察照明光の対

Table 1 Taking and viewing illuminant pairs used for the simulation

	Taking illuminant	Viewing illuminant
Pair 1	Tungsten lamp	Std. illuminant D ₆₅
Pair 2	Strobe lamp	Tungsten lamp

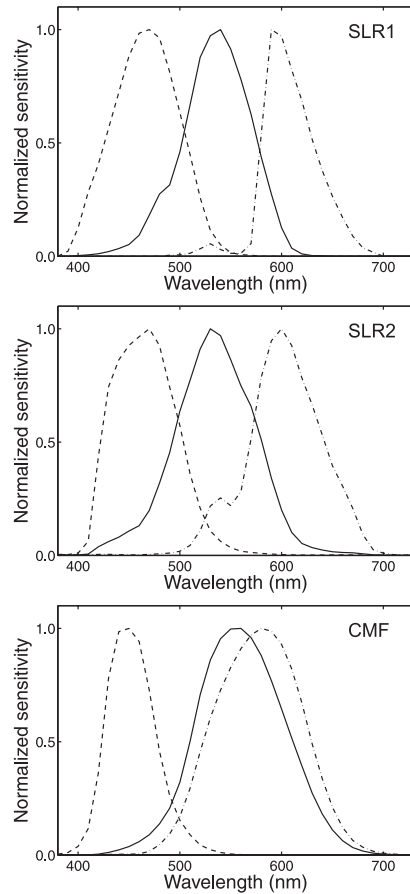


図3 シミュレーションに使用した 3 通りのカメラ分光感度

Fig. 3 Three camera spectral sensitivity sets used for the computer simulation

D₆₅ を，展示場環境における美術品の色をシミュレートするケースとしてタングステンランプを選択した．撮影照明光と観察照明光の組み合わせは，表 1 に示す 2 通り（タングステンランプと標準照明光 D₆₅ の組，ストロボランプとタングステンランプの組）とした．

カメラの分光感度データとしては，図 3 に示す SLR1, SLR2, および CMF の 3 通りを用いた．SLR1 および SLR2 は市販の一眼レフデジタルカメラの分光感度測定

値である。また、CMF は CIE 1931 標準観測者の等色関数を単峰性、非負の条件で線形変換したものである⁹⁾。照明光の分光エネルギーとの組み合わせに応じて算出した μ -factor¹⁰⁾ を表 2 に示す。 μ -factor は、波長空間内において撮影照明光の分光エネルギーとカメラの分光感度の分光積が張る部分空間（以下、撮像素部分空間）と、観察照明光の分光エネルギーと等色関数の分光積が張る部分空間（以下、観察系部分空間）の一致度を示す指標であり、両者が完全に一致する場合に値は 1 となり、一緻度が低下するほど 0 に近づく性質を持つ。

提案手法による被写体測色値予測で使用する分光反射率低次元線形モデルの次元は、CCDC C および textile

G を主成分分析した際の累積寄与率 99.9% を基準とし、それぞれ 6, 7 とした。

実際の撮影で発生するノイズの影響を検証するため、上記で述べた評価に加え、センサ応答にノイズを加えた場合のシミュレーションを行った。ノイズは、市販一眼レフデジタルカメラのノイズ評価結果に基づき、センサ応答の大きさに対して 0.5%, 1.0% の標準偏差 σ を持つガウスノイズとした。

2.1.2 結果

図 4～図 7 に、提案手法と重回帰分析法、および Wiener 推定法の測色値予測精度の比較結果を示す。撮影照明光にタングステンランプ、観察照明光に標準照明光 D₆₅ を用いた場合の結果は、平均色差が図 4 に、最大色差が図 5 に対応する。また、撮影照明光にストロボランプ、観察照明光にタングステンランプを用いた場合の結果は、平均色差が図 6 に、最大色差が図 7 に対応する。それぞれのグラフは、2 通りの被写体種別（CCDC, textile）と 3 通りのノイズレベル（ $\sigma = 0.0, 0.5, 1.0\%$ ）から成る組み合わせのいずれかに対応する。各グラフには、3 通りのカメラ感度（SLR1, SLR2, CMF）のそれぞれについて、モデル構築用データと評価用データのすべて

表 2 撮影照明光と観察照明光の対に対するカメラ分光感度 SLR1, SLR2, および CMF の μ -factor
Table 2 μ -factor of camera-sensitivity sets SLR1, SLR2, and CMF for each taking and viewing illuminant pair

Illuminant pair (taking/viewing)	Sensitivity set		
	SLR1	SLR2	CMF
Tungsten/D ₆₅	0.824	0.867	0.965
Strobe/tungsten	0.922	0.953	0.975

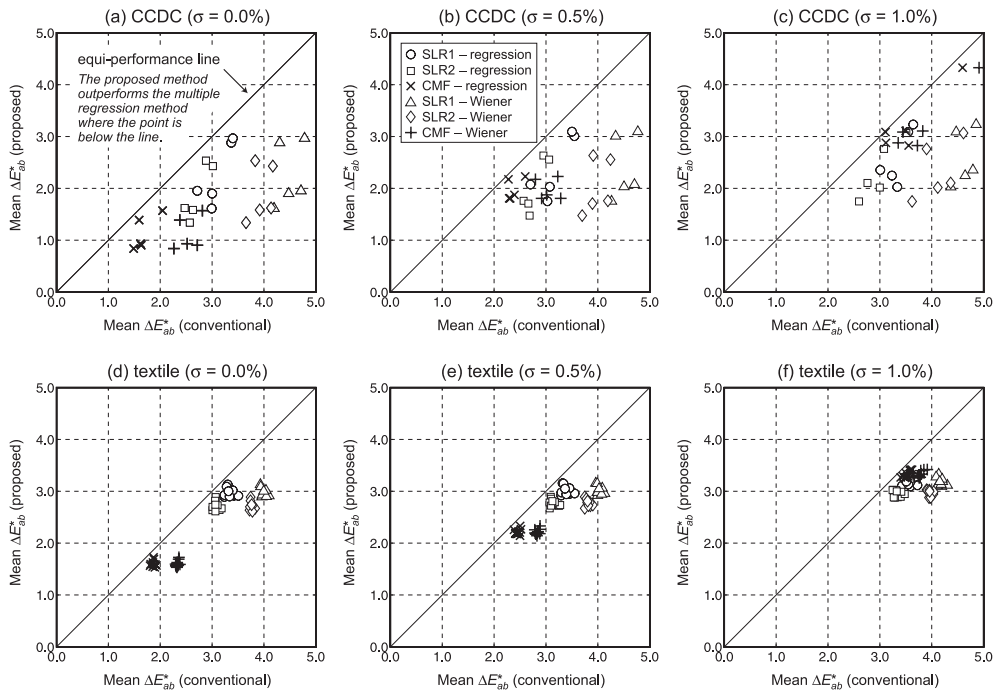


図 4 精度比較結果 1. 評価基準：平均色差，撮影照明光：タングステンランプ，観察照明光：標準照明光 D₆₅

Fig. 4 Performance comparison result 1. Criterion: mean color difference, taking illuminant: tungsten lamp, viewing illuminant: standard illuminant D₆₅

の対（CCDC の場合には 5 通り，textile の場合には 10 通り）の結果がプロットされている．グラフの横軸は従来手法（重回帰分析法と Wiener 推定法）の色差，縦軸は提案手法の色差を表し，原点から対角方向に伸びる直線より下のプロットは提案手法の精度が従来手法より優れていることを意味する．

平均色差，最大色差ともに，モデル構築用データと評価用データの組み合わせや分光反射率の種別によらず，すべてのケースで提案手法の精度は従来手法と比較して優位であるか，または同程度であることが確認できる．特に，図 5 において提案手法と従来手法の差が顕著に現れている．

図 4，5（撮影照明光：タングステンランプ，観察照明光：標準照明光 D_{65} ）と図 6，7（撮影照明光：ストロボランプ，観察照明光：タングステンランプ）との比較では，全体としていずれの手法も後者の方が色差が小さいことがわかる．一方，表 2 より，本実験で使用したカメラ分光感度では，図 4，5 の結果に対応する撮影照明光と観察照明光の対より，図 6，7 の結果に対応する対の方が，SLR1，SLR2，CMF のいずれについても μ -factor が大きいことがわかる．

測色値予測手法の精度と μ -factor との間には，センサ応答にノイズを加えない場合の各手法の原理から，以下の関係が導き出せる．提案手法で導出されるすべてのカメラメタマは，波長空間内で撮像系部分空間と直交する部分空間内に存在する．また，Wiener 推定法により導出される分光反射率推定値もこの部分空間内に存在する．三刺激値は分光反射率から観察系部分空間への直交射影と等価であるため， μ -factor が 1 で撮像系部分空間と観察系部分空間が一致するとき，提案手法におけるすべてのカメラメタマ，および Wiener 推定法における分光反射率推定値は被写体分光反射率と同一の測色値を持ち，測色値の予測誤差は 0 となる．また，撮像系部分空間と観察系部分空間が一致するとき，センサ応答と被写体三刺激値の間には線形変換が成立し⁴⁾，重回帰分析法では式 (1) の行列 L_f にこの線形変換が包含されるため，測色値の予測値は被写体測色値と一致する．いずれの手法においても， μ -factor の値が低下するに従って予測誤差は増大する．図 6，7 に示す色差が図 4，5 の結果より小さいのは，上述した μ -factor と予測精度の相関に起因したものである．

ノイズの影響については，センサ応答に加えるノイズ

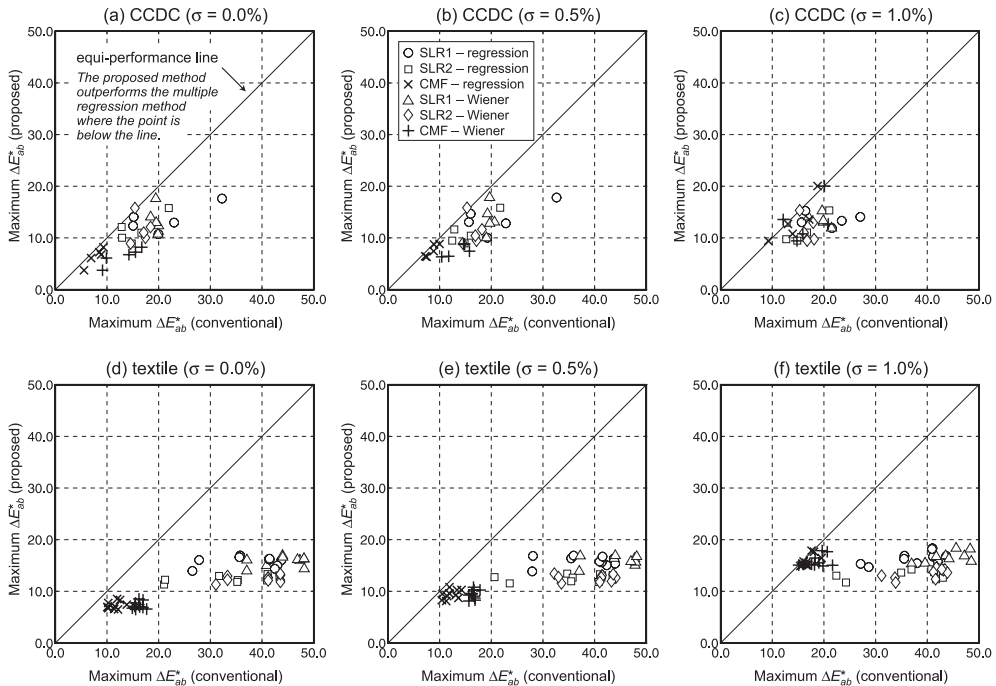


図 5 精度比較結果 2. 評価基準：最大色差，撮影照明光：タングステンランプ，観察照明光：標準照明光 D_{65}

Fig. 5 Performance comparison result 2. Criterion: maximum color difference, taking illuminant: tungsten lamp, viewing illuminant: standard illuminant D_{65}

の大きさによらず、全体の傾向として提案手法の精度が重回帰分析法、および Wiener 推定法を上回っていることが確認できる。ただし、分光感度 CMF については、ノイズレベルが大きくなるにつれて手法間の差異が小さくなる傾向が現れている。図 3 より、分光感度 CMF では、green と red チャンネルが非常に近い分光特性を持っていることがわかる。このような分光感度特性では、ノイズによって信号の分離性が低下するために、予測誤差のばらつき、すなわち色差の分散が大きくなり、その傾向が最大色差に現れていると考えられる。平均色差については、すべてのケースで提案手法の予測精度が従来手法よりも高い結果となっている。分光感度 CMF より信号分離性の良い SLR1 と SLR2 については、 $\sigma = 0.0, 0.5, 1.0\%$ のいずれについても、平均色差、最大色差ともに、提案手法の優位性が確認された。

2.2 画像による評価

前節ではコンピュータシミュレーションにより測色値予測手法の精度を評価し、従来手法に対する提案手法の優位性を確認した。本節では、実際にデジタルカメラによって撮影した画像に対する手法の適用性について検証する。

2.2.1 評価方法

デジタルカメラによる撮影を行い、画像から被写体の測色値を予測する実験を行った。図 3 に示す分光感度 SLR2 を持つ市販の一眼レフカメラにより、ColorChecker DC を色票面に対して垂直方向から撮影した。撮影照明光にはストロボを使用し、色票面の垂直方向に対して約 45° の方向から、被写体全面をなるべく均一に照射した。

撮影データから、入射光量に対して線形な画素値を 16 bit/channel で得た。各色票の画素値を抽出し、分光データから計算上得られるセンサ応答の値とスケールを一致させるため、白色色票を基準として正規化した。観察照明光としてタングステンランプの分光エネルギーを用い、提案手法、重回帰分析法、Wiener 推定法のそれぞれについて測色値を予測した。Wiener 推定法においては、撮影画像からチャンネルごとに得たノイズの統計量を式 (3) の R_{nn} に用いた。

使用する色票は前節で述べたシミュレーションと同一の CCDC A, B, C とし、モデル構築用データと評価用データの組み合わせは A-A, A-B, B-A, B-B, C-C の 5 通りとした。各色票の分光反射率からタングステンランプ照明下での測色値を計算し、予測値との色差を評価基

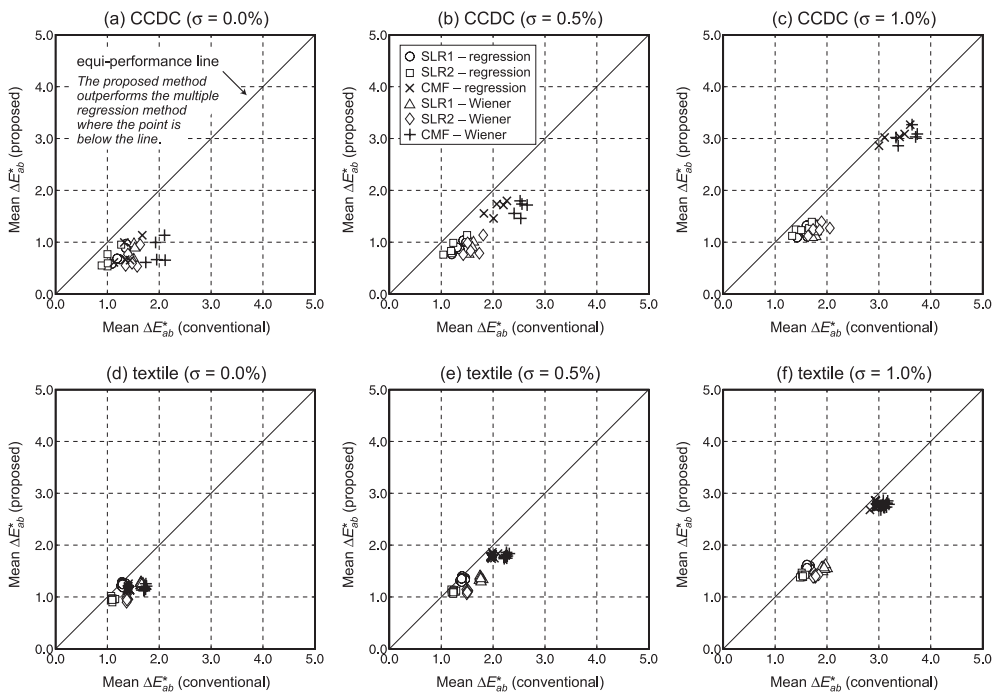


図 6 精度比較結果 3. 評価基準：平均色差，撮影照明光：ストロボランプ，観察照明光：タングステンランプ

Fig. 6 Performance comparison result 3. Criterion: mean color difference, taking illuminant: strobe lamp, viewing illuminant: tungsten lamp

準とした。

2.2.2 結果

提案手法、重回帰分析法、Wiener 推定法による測色値予測精度を表 3 に示す。

手法間の比較では、前節のシミュレーションと同様の傾向が現れている。平均色差では、モデル構築用データと評価用データの組み合わせによらず、すべてのケースで提案手法の値が最小となった。また、最大色差に関しては、提案手法はすべてのケースで Wiener 推定法よりも値が下回り、一つのケースを除いては重回帰分析法より

も高い精度が得られた。

実際にカメラで撮影して得た画像を使った評価では、センサ応答に含まれるノイズの他に、各種分光データの測定に伴う測定誤差や、被写体の撮影時と分光反射率測定時の幾何条件のずれなどが精度に影響を及ぼす。表 3 に示す結果より、これらの誤差要因を含む実際の撮影系においても、提案手法では十分に高い精度が得られることが確認され、実際の画像に対しても有効であることが示された。

3. 母集団データへの依存性の評価

提案手法や重回帰分析法などでは、色予測モデルの構築に母集団データを用いるため、母集団の選択の仕方、および母集団サンプル数に対する予測精度の依存性を、コンピュータシミュレーションにより評価した。

3.1 評価方法

本シミュレーションでは、母集団への依存性を評価するとともに、手法の汎用性を合わせて検証するため、第 2 章で述べたシミュレーションとは異なる分光反射率データとして、油絵の具の分光反射率実測データ 622 個を用いた。撮影照明光の分光エネルギーにはタングステンラ

表 3 測色値予測精度 (ΔE_{ab}^*). ME: メタマ推定法 (提案手法), MR: 重回帰分析法, WE: Wiener 推定法
Table 3 Color prediction accuracy (ΔE_{ab}^*). ME: metamer estimation method (proposed method), MR: multiple regression method, WE: Wiener estimation method

Data sets (model-test)	Mean			Maximum		
	ME	MR	WE	ME	MR	WE
A-A	1.6	1.8	2.2	4.7	5.6	8.3
A-B	1.8	2.0	2.2	4.9	7.2	6.6
B-A	1.7	1.9	2.2	6.8	5.8	9.4
B-B	1.7	1.8	2.1	3.8	5.7	6.2
C-C	1.7	1.8	2.2	5.8	6.1	8.9

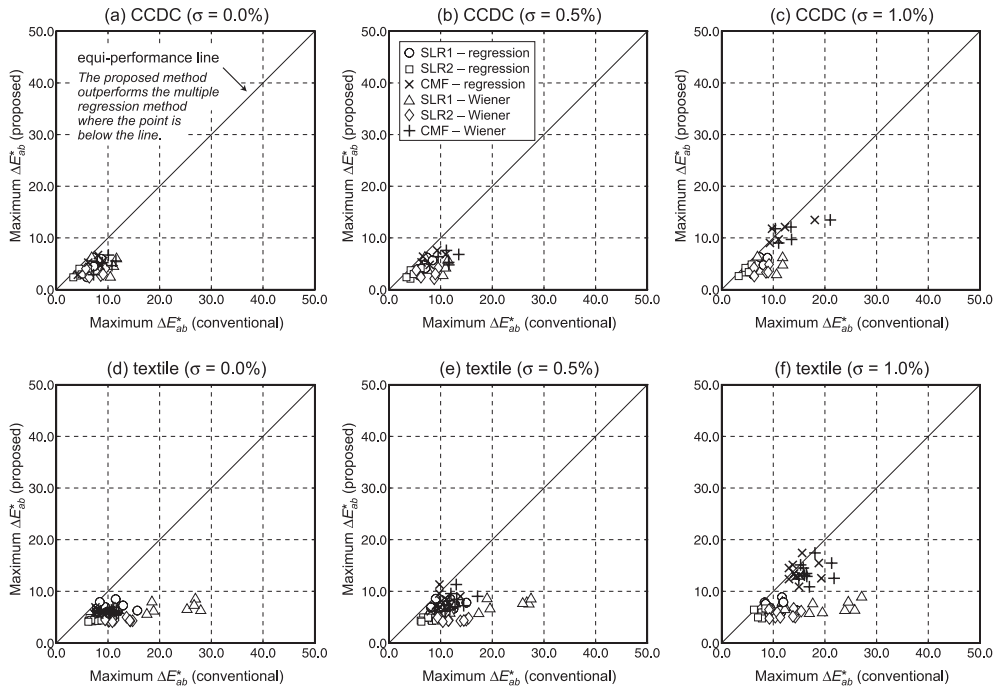


図 7 精度比較結果 4. 評価基準：最大色差，撮影照明光：ストロボランプ，観察照明光：タングステンランプ

Fig. 7 Performance comparison result 4. Criterion: maximum color difference, taking illuminant: strobe lamp, viewing illuminant: tungsten lamp

ンプを, 観察照明光には標準照明光 D_{65} を用いた. また, カメラの分光感度データは, 図 3 に示す市販の一眼レフデジタルカメラの分光感度実測値 SLR2 とした. 使用した油絵の具分光反射率データについては, 図 8 に示す標準照明光 D_{65} 下での測色値より, 大きな色の偏りがないことを確認した.

測色値予測手法としては, 第 2 章の評価で他の手法より精度の低い結果が多数を占めた Wiener 推定法を除外し, 提案手法と重回帰分析法を用いた.

評価は, 図 9 に示す手順により行った. まず, 全 622 サンプルの分光反射率データを無作為にモデル構築用デー

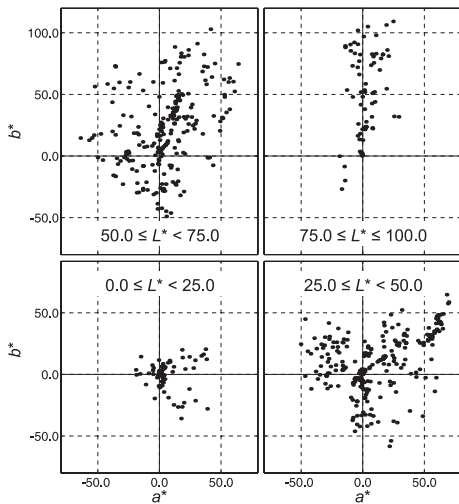


図 8 油絵画分光反射率データの測色値
Fig. 8 Colorimetric values of reflectance spectra of oil painting samples

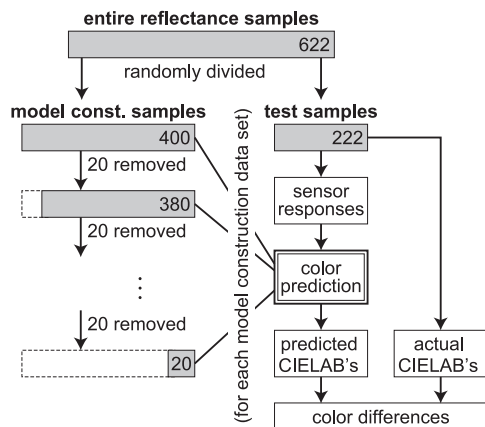


図 9 母集団データへの依存性評価の流れ
Fig. 9 Evaluation procedure of the performance dependency on population data

タ 400 サンプルと評価用データ 222 サンプルに分割した. 評価用データ 222 サンプルについては, 撮影照明光の分光エネルギーデータ, およびカメラの分光感度データを用い, センサ応答を導出した. モデル構築用データを用い, 提案手法, 重回帰分析法のそれぞれについて評価用データのセンサ応答に対する被写体測色値の予測値を導出し, 実際の測色値との色差を算出した. 次に, モデル構築用データから 20 サンプルを無作為に除外し, 残る 380 サンプルを新たなモデル構築用データとして同様の処理を行った. 以下, モデル構築用データのサンプル数を 20 ずつ減らし, サンプル数が最後の 20 になるまで評価を繰り返した. 更に, 母集団データの選択への依存性を検証するため, 全 622 サンプルの分光反射率データを再度無作為にモデル構築用データ 400 サンプルと評価用データ 222 サンプルに分割し, 前記の一連の処理を行った.

3.2 結果

図 10 に, シミュレーション結果を示す. 重回帰分析法の結果に関しては, 以下の特徴が確認できる. まず, 第 1 回の試行では, 母集団データ数によらず, 平均色差はほぼ一定の値を示している. また, 母集団データ数 80 以上で, 最大色差が安定する傾向にある. 一方, 第 2 回の試行では, 平均色差は母集団データ数によらずほぼ一定となっているが, 最大色差には非常に不安定な変動が現れている. 第 2 回の試行では, 母集団データ数 80 以

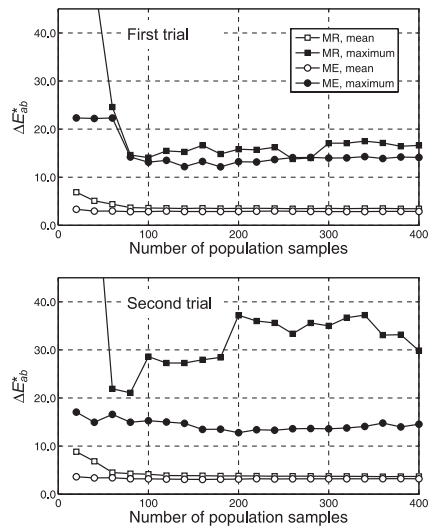


図 10 母集団データへの依存性評価結果. MR: 重回帰分析法, ME: メタマ推定法 (提案手法)

Fig. 10 Result of evaluation of performance dependency on population data. MR: multiple regression method, ME: metamer estimation method (proposed method)

論文：メタマ推定に基づく RGB 画像からの被写体の測色値予測（第二報：評価）

上で常に同じ評価用サンプルの色差が最大となっており、この試行で選択した母集団データは、少なくともこのサンプルの測色値予測には適合していないと考えることができる。また、第 2 回の試行の結果から、母集団データ数の増加が必ずしも精度の向上に結び付かない場合があることもわかる。

重回帰分析法の測色値予測精度と母集団データとの相関が不安定であるのに対して、提案手法では、非常に安定した傾向が見られる。母集団データ数 80 以上において、提案手法では平均色差、最大色差ともに大幅な変動は見られない。また、2 回の試行において母集団データ、評価用データが異なっている影響をほぼ受けず、いずれの試行においても同程度の精度が得られていることが確認できる。両手法の母集団データへの依存性に関する相違は、精度評価シミュレーションの結果を示す図 5 において、textile をターゲットとした d, e, f にも顕著に現れていることがわかる。

手法間の精度比較では、いずれの試行においても、母集団データ数によらず、提案手法では重回帰分析法と同程度か、より高い精度が得られた。特に第 2 回の試行では、両者の精度に大きな差が見られる。これにより、第 2 章で述べたシミュレーションとは異なるターゲットに対しても提案手法の優位性が確認され、提案手法が汎用的に使用可能であることを支持する結果となった。

4. 結 語

デジタルカメラによる撮影で得られるセンサ応答から、任意照明光下における被写体の測色値を予測する手法として提案した提案手法の予測精度、および母集団データへの依存性を検証した。

コンピュータシミュレーションでは、被写体測色値予測精度を色差 ΔE_{ab}^* で評価し、代表的な従来技術である重回帰分析法や Wiener 推定法に対する優位性を確認した。また、デジタルカメラを用いた撮影実験により、提案手法は実際の画像に対しても有効であることが示された。

提案手法など、色予測モデル構築に母集団となる複数の分光反射率データを用いる手法では、予測精度は母集団データに依存する。母集団の選択の仕方、および母集団サンプル数に精度に及ぼす影響をコンピュータシミュレーションにより検証した結果、提案手法では重回帰分析法よりも安定した予測精度が得られることが示された。

提案手法において十分な精度を得るためには、被写体と類似した統計的特徴を持つ分光反射率によって母集団データを構成する必要がある。そのため、材質や色剤の異なる物体が混在する被写体に対しては、提案手法は必ずしも適しているとはいえない。一方、絵画の画像アー

カイブなど、特定の分類に属する被写体を撮影し、かつ、画像の再現の際に被写体の正確な測色値が求められる分野では、提案手法は有効な技術となる。画像アーカイブなどを対象として、実際の物体とその画像を用いて提案手法の実用性を検証することを今後の課題とする。

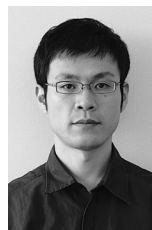
謝 辞 本研究の一部は、Rochester Institute of Technology の Munsell Color Science Laboratory にて行った。また、国立新美術館研究員の室屋泰三氏からは、手法の母集団への依存性についての示唆を頂いた。

参 考 文 献

- 1) L.T. Maloney: "Evaluation of linear models of surface spectral reflectance with small numbers of parameters", J. Opt. Soc. Am. A, Vol.3, pp.1673-1683 (1986).
- 2) J.P.S. Parkkinen, J. Hallikainen, and T. Jaaskelainen: "Characteristic spectra of Munsell colors", J. Opt. Soc. Am. A, Vol.6, pp.318-322 (1989).
- 3) M.J. Vrhel, R. Gershon, and L.S. Iwan: "Measurement and analysis of object reflectance spectra", Col. Res. Appl., Vol.19, pp.4-9 (1994).
- 4) 長谷川隆行, 飯野浩一, 津村徳道, 中口俊哉, 三宅洋一: "メタマ推定に基づく RGB 画像からの被写体の測色値予測 (第一報: 理論)", 画像電学論, Vol.38, No.4, pp.365-374 (2009).
- 5) T. Johnson: "Methods for characterizing colour scanners and digital cameras", Display, Vol.16, pp.183-191 (1996).
- 6) G. Hong, M.R. Luo, and P.A. Rhodes: "A study of digital camera colorimetric characterization based on polynomial modeling", Col. Res. Appl., Vol.26, pp.76-84 (2001).
- 7) 津村徳道, 羽石秀昭, 三宅洋一: "重回帰分析によるマルチバンド画像からの分光反射率の推定", 光学, Vol.27, pp.384-391 (1998).
- 8) ISO, Graphic technology — standard object colour spectra database for colour reproduction evaluation (SOCS), Tech. rep., International Standard Organization (2003).
- 9) N. Ohta: "Practical transformations of CIE color-matching functions", Col. Res. Appl., Vol.7, pp.53-56 (1982).
- 10) P.L. Vora and H.J. Trussell: "Measure of goodness of a set of color-scanning filters", J. Opt. Soc. Am. A, Vol.10, pp.1499-1508 (1993).

(2009 年 1 月 30 日受付)

(2009 年 4 月 17 日再受付)



はせがわ たかふみ
長谷川 隆 行

1998 年, 千葉大学大学院博士前期課程修了。現在, 凸版印刷(株)情報技術研究所所属, 千葉大学融合科学研究科博士後期課程在学中。2002-2004 年, 米国ロチェスター工科大学 MCSL 客員研究員。色科学工学関連の研究開発に従事。



飯 野 浩 一

1987 年, 千葉大学大学院修士課程修了。現在, 凸版印刷 (株) 情報技術研究所部長。1994-1997 年, 米国ロチェスタ工科大学 MCSL 客員研究員。2007 年より東京大学客員准教授。色彩工学関連の研究開発に従事。1999 年 IS&T Journal Award, 2002 年および 2006 年, 日本印刷学会論文賞受賞。博士 (工学)。



津 村 徳 道

1995 年, 大阪大学大学院博士後期課程修了。博士 (工学)。現在, 千葉大学大学院融合科学研究科准教授。医用画像工学, 計測画像工学, 色再現工学, 質感再現工学の研究に従事。IS&T, OSA, 日本光学会, 日本写真学会, 日本医用画像光学会, 電子情報通信学会など各会員。



中 口 俊 哉

2003 年, 上智大学大学院電気電子工学専攻博士後期課程修了。博士 (工学)。同年, 千葉大学工学部情報画像工学科助手。現在, 千葉大学大学院融合科学研究科助教。2001-2003 年, 日本学術振興会特別研究員。2006-2007 年, デンマーク・オールボー病院 Center of Excellence in Visceral Biomechanics and Pain 研究所特別研究員。コンピュータ外科, 医用画像処理, 画質評価, 組合せ最適化に関する研究に従事。IEEE, 電子情報通信学会, IS&T, 日本写真学会, 日本医用画像工学会各会員。



三 宅 洋 一 (正会員)

1968 年, 千葉大院修了。京都工芸繊維大, スイス連邦工科大を経て 1982 年千葉大助教授, 1989 年教授, 2003 年よりフロンティアメディカル工学研究開発センター長, 2009 年 3 月千葉大停年退職, 4 月千葉大名誉教授, 特任教授。IS&T フェロー, 名誉会員。Electronic Imaging Honorary of the Year (SPIE and IS&T) など多数受賞。ロチェスター大客員教授, 日本写真学会会長, 日本鑑識科学技術学会 (現, 日本法科学技術学会) 理事長, IS&T 副会長など歴任。工博 (東工大)。著書: デジタルカラー画像の解析評価 (東大出版会, 2000), 編著: 分光画像処理入門 (東大出版会, 2006) など多数。