

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500235

研究課題名(和文) マルチスペクトラルカメラのノイズ推定と分光反射率復元

研究課題名(英文) Estimation of noise in the multispectral camera and recovery of spectral reflectance

研究代表者

嶋野 法之 (SHIMANO, Noriyuki)

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号：10257975

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円、(間接経費) 1,080,000円

研究成果の概要(和文)：デジタルミュージアムは貴重な絵画を画像データベースとして蓄積し、画像をディスプレイ上にリアルに再現することを試みるものである。作品の印象は昼光や燭光など照明光の分光分布やその強度などの照明環境で大幅に変化する。このように多様な照明環境で人間が見た時の色彩を視覚系の色順応を考慮し画像再現する研究が極めて活発に行われている。

本報告書では日本画、油彩画および水彩画の3種類の絵画の分光反射率を絵画を描くのに用いた色材の先験情報を用いずに画像データから正確に復元し、多様な照明環境の下で観察したときの美術作品の色彩を忠実にディスプレイ上に再現するための研究成果について述べる。

研究成果の概要(英文)：Digital museum is the digital archive of valuable paintings and is the realistic image reproductions of them on a display device. The color appearance and the impression of a painting differ markedly with the illuminations, i.e., they depend on their spectral power distributions such as a daylight or a candlelight and their illuminance levels. Extensive studies have been carried out to reproduce color images under various illuminations by taking into account the chromatic adaptation of human visual system.

In this report, it is described that spectral reflectances of three types of painting such as Japanese, oil color and water color paintings are accurately recovered by the use of image data without prior knowledge of color materials used to paint them and that the colors of a painting under various illuminations are reproduced faithfully on a display device through the use of the recovered spectral reflectances.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：マルチスペクトラルイメージング ノイズ 分光反射率 画像再現 逆問題

1. 研究開始当初の背景

デジタルミュージアムは国内外にある貴重な美術作品を仮想的にディスプレイ上にリアルに再現することを試みるものである。作品の印象は日光や燭光など照明光の分光分布やその強度などの照明環境で大幅に変化する。このように多様な照明環境で人間が見た時の印象を忠実にカラーアピレンスモデルを用い画像再現する研究が極めて活発に行われている。この研究は工学と感覚及び芸術が融合した新たな学問領域の創造のみならず、電子商取引や医療画像など新たな産業を育成するためにも極めて重要である。

このような画像再現を実現するために、被写体の分光反射率を画像データから画素ごとの微小面積について分光反射率を正確に復元し、多様な照明環境下における見えを見えモデルを用いディスプレイ上に正確にカラー画像再現することが必要である。撮影データから分光反射率を復元するための研究はこれまで極めて活発におこなわれてきた。

本稿では被写体の分光反射率に関する先験情報を用いずに正確に分光反射率を復元し、多様な照明環境の下で観察したときの美術作品の色彩を忠実にディスプレイ上に再現するための研究結果について述べる。

2. 研究の目的

画像データから被写体の分光反射率を復元する方法はいわゆる逆問題の解法に相当し、入力系のノイズの存在による解の不安定性をいかに抑え、より正確な推定を行うことが重要となる。美術作品がどのような画材を用いて描かれているかなどの先験情報を用いずに正確に被写体の分光反射率を復元し、上述した画像再現を行うためには以下に述べる4つの課題を達成しなければならない。

(1) 入力系のノイズを正確に推定すること。

(2) 美術作品がどのような画材を用いて描かれているかに関する先験情報なしに、正確に分光反射率を復元すること。

(3) 復元精度を評価するとき、美術作品は色票のように色が一樣でないために分光反射率を計測器で計測しても計測領域内で色が変化しているので美術作品の復元された分光反射率を正確に評価するための方法を確立すること。

(4) 復元された分光反射率をもとに、ディスプレイ上に美術作品の色彩を忠実に再現するために、室内照明下にあるディスプレイを測色的に正確に較正すること。

3. 研究の方法

本研究では7チャンネルのセンサーを有するマルチスペクトルカメラを用い美術作品を撮影し、1画素あたり7つのデータを用い分光反射率を復元している。各チャンネルの分光感度分布は被写体の分光反射率を正確に復元するように最適化されている。つまり、この感度の最適化は復元された分光反射

率と真の分光反射率の平均二乗誤差(Mean Square Error:MSE)を最小にするように設計されている。この求められた感度を正確に近似する干渉フィルタと400nm-700nmの可視波長領域を透過するバンドパスフィルタをモノクロ CCD カメラに装着し撮影に供した。最終的な7チャンネルの分光感度を図1に示す。

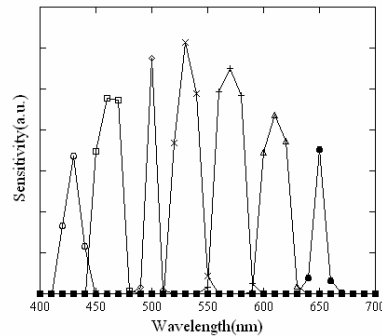


図1. 7バンドカメラの分光感度

撮影に日本画、油彩画および水彩画の3種類の絵画を用い、分光反射率を復元するときの学習サンプルとして、色票 GretagMacbeth ColorChecker を用いた。この色票を人工太陽照明灯 (Seric XC-100A) の照明下で撮影し、ノイズ分散を以下に述べる方法で推定し、ウィーナフィルタを各画素値に演算させることにより分光反射率を復元した。

4. 研究成果

(1) ノイズ分散推定

画像データから被写体の分光反射率を復元する方法はいわゆる逆問題の解法に相当し、入力系のノイズの存在による解の不安定性を抑え、より正確な推定を行うことが重要となる。分光反射率の復元方法には多様な方法が提案されているが最もよく用いられている方法としては、線形(Linear)モデル、重回帰分析法(Regression analysis)、Imai-Berns モデルおよびウィーナ(Wiener)推定の4つの方法がある。これらの方法の中でウィーナ推定はMSEを最小にする方法であるため復元精度が最も高く多用されているが、復元精度はウィーナフィルタの中のノイズに依存し、入力系のノイズの値を用いるとき推定誤差は最小となる。しかしながら、このノイズの値は不明であるから正確に推定する必要がある。

本研究では包括的なノイズ推定モデルを確立し、上記の4つの復元モデルを用いノイズを推定することに成功した。この新たな包括的なノイズ推定モデルでは推定されるノイズの値は線形モデルを除けばほぼ同一のノイズとなり正確に推定されていることが実証された。つまり、推定されるノイズはその用いる復元モデルによらず同じ値を示すことを明らかにし、この推定値をウィーナフ

フィルタに用いることにより MSE も最小になることも判明した。その結果を表 1 に示す。このノイズ分散値をウィーナフィルタに用い復元した時に得られた MSE の値を下段に示した。この結果から MSE の値が 10^{-4} オーダーではノイズ分散値は上段の値の範囲であれば十分であることが分かる。

表 1 新たな包括的な推定モデルを用い 4 つの復元モデルで推定されたノイズ分散と MSE

Method	Model used for estimates			
	Wiener	Linear	Regression	Imai-Berns
Noise Variance	8.39E-05	1.42E-04	8.39E-05	8.19E-05
MSE	1.33E-02	1.33E-02	1.33E-02	1.33E-02

(2) 適応的復元モデルを用いた復元

すでに提案している被写体の分光反射率の先験情報を用いない復元方法とは学習サンプルを撮影した画像データからノイズ分散 $\hat{\sigma}^2$ を推定し、分光反射率の自己相関行列 R_{ss} に学習サンプルの分光反射率を用いる方法である。この復元方法は他の復元モデルと比較すると正確であるが、被写体の分光反射率の自己相関行列を用いた場合と比較するとまだ復元精度は低い。この理由は学習サンプルとして用いている Macbeth ColorChecker の分光反射率が被写体のそれと異なるからである。この問題を解決するために開発した適応復元モデルを図 2 に示す。

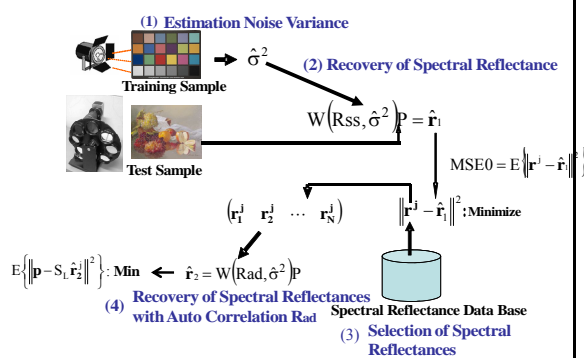


図 2 . 分光反射率の適応的復元モデル

この方法では最初に学習サンプルである色票 GretagMacbeth ColorChecker を用いてノイズ分散 $\hat{\sigma}^2$ を推定しその値と色票の分光反射率の自己相関行列 R_{ss} を用いて絵画の分光反射率を復元する。この復元された分光反射率に最も近い分光反射率を分光反射率データベース(SOCS)から選択し、選択された分光反射率を用い適応的自己相関行列 R_{ad} を作り、ウィーナフィルタ $W(R_{ad}, \hat{\sigma}^2)$ に用い再度撮影

データ p に演算させ分光反射率を復元した。その結果を表 2 に示す。

表の First Estimates は一度目の従来の復元方法を Second Estimates は適応的な復元結果を示している。この結果から、水彩画については適応的な復元方法は極めて有用であることがわかる。日本画については MSE がわずかに改善しているが油彩画についてはむしろ精度が低下していることが分かる。色票を用いた適応的な復元では復元精度が大幅に改善していることから、これはおそらく油絵には筆のタッチによる絵具の凹凸があり、ミクロにみると 3 次元的な構造を持ち、照明による絵具表面での照明光の鏡面反射成分が原因かもしれない。日本画についても色材の鉱物が微粒子として絵画中に存在しているので同様なことが生じているものと推察される。この鏡面反射光成分が 2 回の復元で増幅された可能性があるが、原因追及は今後の課題である。

Table 2. Comparison of the estimates by the proposal

Picture	First Estimates		Second Estimates	
	MSE	ΔE_{ab}^*	MSE	ΔE_{ab}
Water Colors	0.0134	1.54	0.0048	1.42
Japanese	0.0119	1.48	0.0102	2.64
Oil Colors	0.0058	1.49	0.0498	4.63

(3) 美術絵画の分光反射率復元精度の評価方法の確立

美術作品の復元精度の評価は色票と異なり絵画では色が分光反射率を計測する計測範囲内で変化しているためその評価方法には注意が必要である。図 3 は画素と分光反射率を計測する装置 (Minolta CM2022) の計測領域 S の関係を示している。 S は直径約 3mm である。美術作品で如何に色に色調が一樣な領域を選択したとしても色は計測領域 S の中で変化するし、復元精度を評価するためには多くの評価点を選択しなければならないが、一樣な色の領域という拘束を選択時に課すと評価サンプル数を増やすことができないなどの問題が生じる。したがって復元された分光反射率の復元精度の評価方法を確立することは極めて重要である。図で P_{ij} は i, j 座標の画素値を表している。この画素値を用いて復元された分光反射率を r_{ij} と表したとすると計測される分光反射率は計測範囲にある分光反射率の平均値となるから、計測範囲に含まれる画素数を n とすれば

$$r = \frac{1}{n} \sum_{i,j \in S} \hat{r}_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{i,j \in S} W p_{ij}$$

で表すことができる。

実験では日本画、油彩画および水彩画について評価点をそれぞれ 18 点選び、計測器で

分光反射率を計測した。各計測点近傍で計測領域に含まれる画素についての分光反射率の平均値を求めながら移動させ誤差が最小になる点を計測点とした。この各計測点で、Sの中に含まれる画素 P_{ij} から復元された分光反射率 r_{ij} の中で最も計測値に近い分光反射率を選択し平均値と比較し評価した。

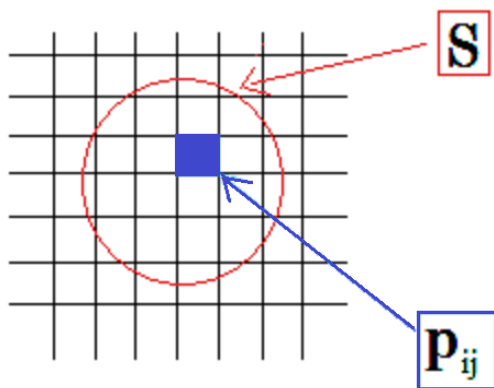


図3 . 計測範囲と画素の関係図

表3は3種類の絵画についてそれぞれ18標本点について1画素で評価した場合と上述した平均操作でMSEを計算し評価した結果を示した。この結果から平均操作された評価方法が正確であることが分かる。ただし、表2のMSEの値はこの評価方法を用いた結果を示している。

表3 . 分光反射率の評価結果

Picture	Mean		One Pixel	
	MSE	Eab*	MSE	Eab*
Water Colors	0.0134	1.54	0.0494	2.36
Japanese	0.0119	1.48	0.0148	1.46
Oil Colors	0.0058	1.49	0.0104	2.33

(4) ディスプレイの測色的較正

ディスプレイの較正とは意図した三刺激値の色を正確にディスプレイ上に再現するための画像データ変換をいう。これまでディスプレイの較正は暗室で正確に再現するための測色的較正の研究が多かった。暗室では再現された画像の光のみが視覚系に入射し色を知覚する過程を前提に行われていた。しかし暗室で観察することは極めてまれで室内照明下で観察するのが一般的である。この室内照明下におけるディスプレイ上で再現された画像を観察するとき再現画像からの光とディスプレイ表面で反射した照明光が同時に視覚系に入射する。この場合にはディスプレイ表面での反射光のR,G,B成分が再現画像の光から正確に差し引かれた値になるようにディスプレイの駆動データであるフレームデータを計算することで較正が正

しく行われる。

図4に蛍光灯のもとにあるCRTディスプレイ上にGretagMacbeth ColorCheckerを測色的に再現し、CIELAB空間での24色の色差で評価した結果を示す。図の横軸の数値はディスプレイ表面での鏡面反射率を示している。図より理解できるように、室内照明のもとにあるディスプレイで照明の反射を考慮しないとき色差は7弱であったものが反射を考慮しその値を0.045にすると約2まで減少することが分かる。他方、暗室での較正は暗室では極めて正確であるが、明室では色差が大きくなる。一般的に人間は色差3以下であれば色の違いが識別できないので室内照明下における色差の値は較正精度として十分と考えられる。

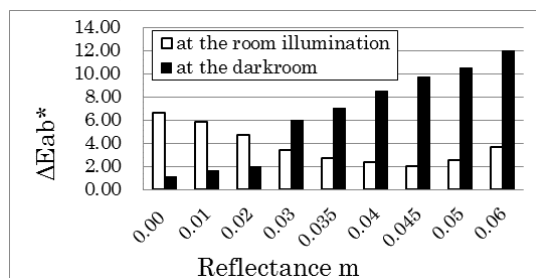


図4 . ディスプレイ表面での鏡面反射光を考慮した測色的較正結果

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

M. Hironaga, N. Shimano and T. Toriu, "Estimating the noise variance in an image acquisition system with multiple reconstruction matrixes", 査読あり ICIC Express Letters, vol.6, no.5, 1169-1174 (2012)

[学会発表](計6件)

K. Matsuo, R. Ikeda and N. Shimano, "Colorimetric calibration of a display device under a room illumination", Proceeding of AIC2013 -12th International AIC congress, pp.1457-1460 (2013), New Castle Upon Tyne.

N. Shimano and T. Nishino, "Recovering Spectral Reflectances of Artistic Paintings Through the Use of Image Data and Evaluating their Accuracies", Proc. IS&T, Archiving 2012, pp.116-119(2012), Copenhagen.

M. Hironaga, N. Shimano, "Evaluating the noise variance of an image acquisition system with various reconstruction matrixes", Proceedings of 6th European Conference on Colour inGraphics, Imaging, and Vision (2012) pp.247-252, Amsterdam.

N. Shimano and T. Nishino,

“Estimation of spectral reflectances of an art painting using a multispectral camera and evaluation of their accuracies”, AIC 2011 Midterm Meeting, Zurich, 735-738, (2011), Zurich.

〔図書〕(計1件)

嶋野他(分担執筆)、東京大学出版会、新編
色彩科学ハンドブック第3版 2011、1045

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

嶋野 法之 (SHIMANO Noriyuki)
近畿大学・理工学部・教授
研究者番号：10257975

(2) 連携研究者

広永 美喜也 (HIRONAGA Mikiya)
近畿大学・理工学部・助教
研究者番号：20257976