

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：23903

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500223

研究課題名(和文) 対応する色再現のための光源色推定と画像への順応度評価の研究

研究課題名(英文) A Study on the Illumination Chromaticity Estimation and the Chromatic Adaptation to Color Images for the Corresponding Color Reproduction

研究代表者

田島 譲二 (TAJIMA, JOHJI)

名古屋市立大学・システム自然科学研究科・教授

研究者番号：50381900

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円、(間接経費) 570,000円

研究成果の概要(和文)：異なる光源下での対応する色再現を目指し、二色性反射モデルを利用し、カラー画像から光源色を推定する研究を行なった。まず対象物体がプラスチック製品のようなものである場合、正確に二色性反射モデルに従うことを確認した。その場合、一定色の物体の色度分布は一直線上に分布し、異なる色の物体の色度分布は光源色度で交わるはずである。

それに基づき、デジタルカメラの特性の補正と光源色の推定を同時に行なう手法の開発を目指した。一眼レフカメラのrawモードの画像データと、それを手動セグメントした画像データを収集し、特性を双曲線関数で近似してその最適パラメータを探索し、光源色度推定性能を向上させることができた。

研究成果の概要(英文)： The estimation of the illumination chromaticity from a color image was studied. This study is based on the dichromatic reflection model. At first, it was verified that the reflection model holds well for plastics. On that condition, the chromaticity of a one-color object is distributed on a straight line, and the lines corresponding to the multiple objects with various colors cross each other at a single point, which shows the illumination chromaticity.

Based on the theory, the method, in which the calibration of the gamma-characteristic of a digital camera and the estimation of the illumination chromaticity are simultaneously achieved, was developed. The raw mode color images from single-lens reflex cameras and their manually segmented images are used for the experiment. The gamma-characteristics of each camera was approximated by hyperbolic functions. By optimizing the parameters for the functions, the accuracy for the illumination chromaticity estimation could be improved.

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：画像情報処理 カラー画像処理

1. 研究開始当初の背景

本研究は、カラー画像の“対応する色再現”の実現を目標としている。具体的には、2つの課題を含んでいた。

(1) 光源推定

デジタルカメラ等で撮影されたカラー画像から、その撮像された光源条件を推定する。

(2) 色再現

その物体を任意の光源条件下においたときの“色見え”を予測して、ディスプレイやプリンタ出力に、その情景に存在する物体が人の視覚に訴える本来の色彩を再現する。

そのための最大の問題は、すでに得られたカラー画像のみからその情景の光源色を推定することである。この問題は計算論的カラーコンスタンシー（色恒常性）と呼ばれ、さまざまなアプローチがとられてきたが、これまで決め手がない。

本研究では、これまで研究代表者らが開発してきた、二色性反射モデルを利用した手法を基礎としている[1]。この手法によれば、一定色の物体の表面色度は式(1)のように、色度図の直線上に分布する。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix} x_o \\ y_o \end{pmatrix} + \beta \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $(x_o, y_o)$ は拡散反射の色度、 $(x_w, y_w)$ は白色物体、即ち、光源の色度である。

この場合、複数の一定色の物体が存在すれば、光源色度は複数の直線の交点として求まるはずである。 $i$ 番目の色物体による直線を式(2)のように表わしたとき、直線  $i$  から点  $(x,y)$ への距離  $d_i$ は、式(3)で表わされる。

$$a_i x + b_i y + c_i = 0 \quad (2)$$

$$d_i = \frac{|a_i x + b_i y + c_i|}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}} \quad (3)$$

そのため、式(4)の  $F(x,y)$ を最小化する関数として最小二乗法を実行すれば、解析的に光源色度  $(x_w, y_w)$ を推定することが可能である。ここで、 $w_i$ はその直線の信頼性の重みであり、例えばその色領域の有効な画素数である。

$$F(x, y) = \sum_i w_i d_i^2 \quad (4)$$

しかし、一般的なデジタルカメラからの画像について、この手法を実験した結果、次のことが分かった。

- ・ 光源色度は一応近い値に求まるが、各色領域の色度分布は必ずしも直線状に分布せず（特に黄色領域）、理論通りに一点には集中しない。
- ・ 特に、昼光の場合に比べ、A光源のような電灯色では、推定された光源色度も精度が低下する。

本研究では、この原因を調べ、光源色度の推定精度を向上することを目指した。

2. 研究の目的

上記のように光源色度の推定精度が下がる原因としては、

- (1) 基礎としている二色性反射モデルが、対象物体について成り立っていない。
- (2) 入力装置であるカメラの測色性能が低い。

の二つの可能性が考えられる。

そのため、本研究では、まず二色性反射モデルが対象について成り立っているかどうかを確認し、成り立っている対象の画像について、カメラの特性を補正して推定精度を向上することを目的とした。

また、カメラの特性を補正するには、通常標準ターゲットを撮影して、正しい明るさに撮影されるようにカメラを較正するが、現在のデジタルカメラでは露出の調整は自動的にされるため、撮影時の露出を知らないと画像を補正することは困難である。

そのため、露出を知ることなしにカメラ特性を補正することが研究のもう一つの目的となった。

3. 研究の方法

(1) 二色性反射モデルの成立の確認

典型的な二色性反射物体と考えられるプラスチック製品の色を、陰影の異なった部分で測定した。D65及びAの疑似光源で照明し、分光放射輝度計 CS-2000（コニカ・ミノルタ製）で各色15点ずつXYZ三刺激値を測色し、それぞれの色度点に直線をあてはめて色度図上に表示した（図1）。

それによると、各色領域の色度は非常に正確に直線上に乗っており、またそれらの直線は非常に正確に1点で交差し、光源色度を推定できることが分かった。すなわち、このような物体では二色性反射モデルは正確に成り立っていることが確認できた。

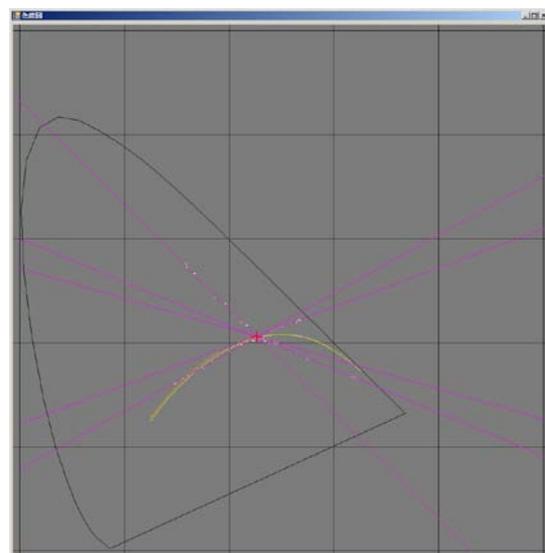


図1 CS-2000により測色した場合の、各色領域の色度分布と推定光源色度

## (2) Raw データ画像の準備

プラスチック製品の表面色が正確に二色性反射モデルに従っていることが分かったので、カメラで撮像されたカラー画像でそれが成り立たないのは、カメラの特性が測色的でないためであると考えられる。

デジタルカメラの出力は通常“好ましい色再現”としての色作りがなされていると言われる。本研究で求めている“測色的色再現”は、RGB のセンサがそれぞれの分光感度でセンスしたエネルギーにリニアに出力することが求められる。

そのため、センサの値をそのまま観測できる raw データ出力を持つ一眼レフタイプのカメラを用い、研究を進めることとした。実際に使ったカメラは表 1 の 3 種である。すべてのカメラで、Adobe RGB 出力、ホワイトバランスは晴天、感度は ISO1600、シャッターは“プログラムオート”を採用した。光源をブース内でコントロールし、D65 と A の二種類の疑似光源で画像を撮影した。

表 1 利用した 1 眼レフレベルのカメラ

	画素数	仕上がり
Nikon D70s	3008×2000	標準
Canon EOS60D	5184×3456	Style 忠実
Olympus Pen E-P1	4032×3024	Natural

図 2 に例として Nikon で撮った画像を示す。二色性反射モデルの成り立つプラスチック製のおもちゃと標準白色板が写っている。同図(a)は D65 光源下での、同図(b)は A 光源下での画像である。

評価のために、各一定色領域の部分を手動で抽出するプログラムを作成し、5 色のおもちゃのスプーンの部分と標準白色板の部分をセグメントした結果の例を図 3 に示す。標準白色板は‘白’の色度を正しく表わしていると考えられる。そのため、光源色度の推定結果は、この部分の色度と一致することが望ましい。

ここで得られる RGB 画像データは、raw データであるため、“好ましい色再現”のための他チャンネルのデータとの混合はないと仮定している。また、AdobeRGB は  $\gamma=2.2$  を仮定しているため、まず初めに式(5)に従って信号値を修正する。ここで、 $I$  及び  $I_{adobe}$  は、それぞれ値を 0~1 に正規化したエネルギーにリニアな値、及び、AdobeRGB の値、の R, G, B いずれかのコンポーネントを示す。

$$I = I_{adobe}^{2.2} \quad (5)$$

この条件で、セグメントされた各色領域の色度の分布を調べたのが、図 3 である。図 3 は A 光源に対するものであり、カメラは EOS である。



(a) D65 疑似光源下



(b) A 疑似光源下

図 2 Nikon による原画像

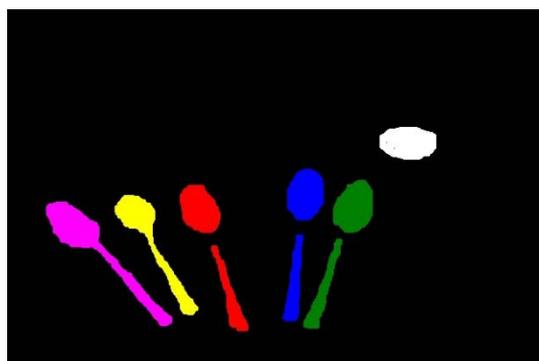


図 3 図 2(a)の画像に対するセグメント画像

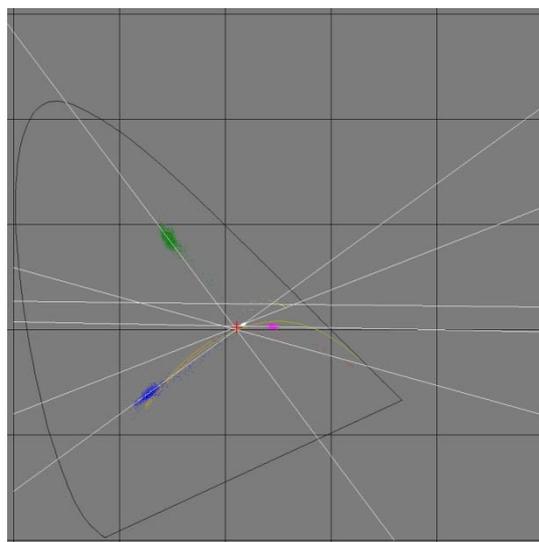


図 4 A 疑似光源下 EOS によるセグメント部の色度

セグメンテーションが手動であることもあり、文献[1]のものよりはかなり良い結果となっているが、やはり A 光源下では、特に黄色物体で色度分布が直線上になく、色度が正しく求まっていないことが分かる。また、白い点の分布は標準白色板の色度、即ち、光源色度を示しているの、直線の交点はここに一致すべきであるが、ずれが見られる。これも各色領域の色度分布の近似直線がずれているために起こっていることである。

しかし raw データでは、各成分の間の演算はなされていないはずであるので、これは R, G, B 各成分毎の入力-出力特性 ( $\gamma$  特性) がリニアでないことを示している。

### (3) $\gamma$ 特性の双曲線関数での近似

$\gamma$  特性は、入力より暗い部分が出力でより明るくなることはあり得ないので、単調増加関数になることは明らかである。しかし、具体的な関数の形は無数に存在しこれを求めるのは容易ではない。

カメラでは一般に、ディスプレイや印画紙上で好ましい画像が得られるように、階調補正としていわゆる S 字状の補正が行なわれることが多い。本研究では、このような補正がカメラ内部で行なわれていると仮定して、 $\gamma$  特性の自動補正を試みた。

$\gamma$  特性が正しければ、各色領域の色度は一直線上に分布し、複数の色領域を示す直線群は光源色度の点一点で交わる。よって R, G, B の  $\gamma$  特性を「直線群が一点で交わる」ように調整することで較正を行なう。この手法によれば、

- ・ 各  $\gamma$  特性の較正
- ・ 光源色度の推定

の二つの問題を一挙に解決することが可能となる。

S 字型の  $\gamma$  特性を近似するために、双曲線関数(6)を利用する。

$$y = \rho \tanh(\alpha x) = \rho \frac{e^{\alpha x} - e^{-\alpha x}}{e^{\alpha x} + e^{-\alpha x}} \quad (6)$$

この関数は  $x = y = 0$  において点対称な S 次カーブになる。これを元に戻す逆関数を求め、中心を  $(1/2, 1/2)$  とし、 $0 \leq x, y \leq 1$  の関数とすると、得られる関数は式(7)のようになる。

$$x' = \frac{1}{2} + \frac{1}{4\alpha} \log \frac{\frac{\rho-1}{2} + y'}{\frac{\rho+1}{2} - y'} \quad (7)$$

この関数は、 $(1/2, 1/2)$  に対して点対称であるが、実際にはハイライトとシャドウで、傾きが異なる場合も許す関数を作ると、

$$x' = \frac{1}{2} + \beta + \frac{1}{4\alpha} \log \frac{\rho-1+2y'-2\delta}{\rho+1-2y'+2\delta} \quad (8)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \cdot \frac{\log \frac{(\rho+2\delta+1)(\rho+2\delta-1)}{(\rho-2\delta-1)(\rho-2\delta+1)}}{\log \frac{(\rho-2\delta+1)(\rho+2\delta+1)}{(\rho+2\delta-1)(\rho-2\delta-1)}} \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{1}{2(1-2\beta)} \log \frac{\rho-2\delta+1}{\rho+2\delta-1} \quad (10)$$

となり、 $\rho$  と  $\delta$  の二つのパラメータによって、一つの  $\gamma$  特性が定まることになる。

### (4) $\gamma$ 特性の最適化

本研究では、 $\gamma$  特性の最適化を次のように行なった。

$\rho$  については、R, G, B それぞれについて 1.1~1.9 を 0.1 刻みで全部で 729 通り、 $\delta$  についても値がとり得る範囲を 10 等分し、両端を含まない、やはり 9 通りずつの 729 通りについて補正関数を作成し、総当たりで

- ① 原画像を補正し、
- ② 各色領域の画素の色度分布から第 1 主軸を近似直線として求め、
- ③ すべての近似直線に最も近い点を光源色度の推定値とし、
- ④ その近似自乗誤差を比較し、誤差が最小の  $\rho$  又は  $\delta$  を最適値とする。

の手順で最適化を行なった。

本来は  $729 \times 729 = 531,441$  通りについて、近似誤差が最小の  $\rho$  と  $\delta$  を求めればよいと思われるが、実行時間の関係から、今回は、まず  $\rho$  の最適化を行ない、その最適な  $\rho$  に対して  $\delta$  の最適化を行なうという手順で、 $\gamma$  特性の最適化を試みた。

## 4. 研究成果

前章に示したように、双曲線関数を利用して三種のカメラで撮像された画像の R, G, B の三つの成分について、二つのパラメータ  $\rho$  及び  $\delta$  を最適化した。それぞれについての最適化されたパラメータの値は表 2 のとおりである。最適化の効果を EOS の画像の例で示す。原画像では図 4 の色度図が、図 5(a)及び(b)のように変化した。

表 2  $\gamma$  特性の双曲線関数での最適化

カメラ	光源	$\rho_R$	$\rho_G$	$\rho_B$	$\delta_R$	$\delta_G$	$\delta_B$
Nikon D70s	D65	1.3	1.4	1.5	0.09	0.12	0.15
Nikon D70s	A	1.2	1.2	1.9	0.06	0.06	-0.27
Canon EOS	D65	1.2	1.3	1.5	0.02	0.03	0.05
Canon EOS	A	1.4	1.4	1.2	0.04	0.08	-0.08
OlympusPen	D65	1.2	1.3	1.5	0.04	0.06	0.1
OlympusPen	A	1.2	1.2	1.1	0.04	0.06	0.03

図 5(a)が最適な  $\rho$  のみでの補正結果、(b)が最適な  $\rho$  及び  $\delta$  での補正結果である。これを見ると、図 4 では黄色領域の色度分布がかなり曲線になっていたものが、 $\rho$  の補正によ

ってかなり直線に近くなったことが分かる。しかし、複数の直線の交点として求めた推定光源色度は標準白色板の色度とまだずれている。しかし同図(b)の結果によれば、 $\delta$ の補正をすることによってさらに改善され、ほぼ標準白色板の色度に一致していることが分かる。しかし、この場合も黄色領域の色度は完全に直線にはなっておらず、他の色領域の色度の直線が一点で交わっているにも拘わらず、すこし外れている。このように問題は残ってはいるが、本手法はかなり成果をあげていることが分かる。

今回利用したカメラでは、Nikon と EOS の一眼レフについては、このように本手法の効果を実証することができた。しかし、もう一つの Olympus のカメラには、残念ながら本手法は余り効果的でなかった。

A 光源下での Olympus 画像に対する結果を図 6 に示す。この場合も、原画像 (図 6(a)) では黄色領域の色度分布が曲線になってい

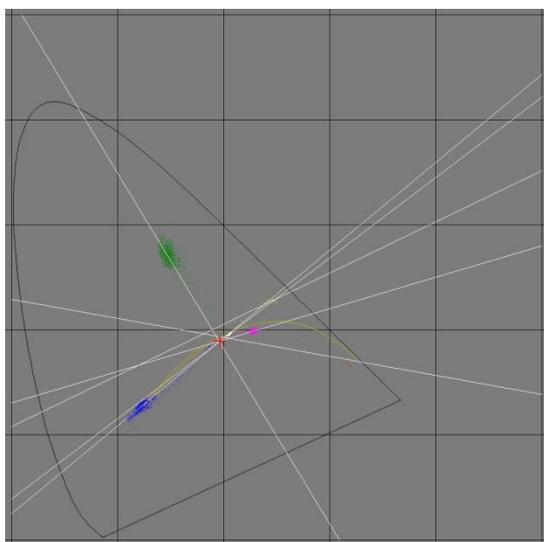


図 5(a) A 光源下での EOS 画像を最適な  $p$  値で補正

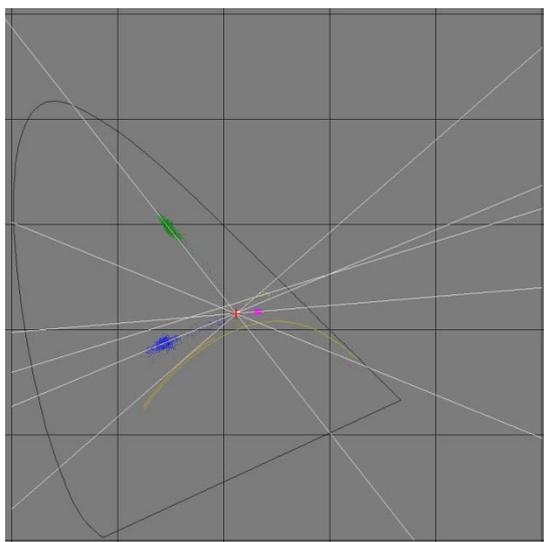


図 5(b) A 光源下での EOS 画像を最適な  $p$  値及び  $\delta$  値で補正

るが、補正により同図(b)(c)では、それは直線化されているように見える。しかし、その補正によって推定光源色度は標準白色板の色度と離れていくばかりでなく、標準白色板の色度が A 光源の色度から D65 の色度方向に近寄ってきてしまっている。これは、不適切な  $\gamma$  特性の補正によって、画像全体の階調が誤った方向に変換されていると考えられ、原画像が本研究で前提とした双曲線関数では補正できない特性を持っていたと考えざるを得ない。

推定された光源色度と標準白色板の平均色度のとの差、及び、CS-2000 で測定された標準白色板の色度との差を表 3 にまとめた。

以上のように、 $\gamma$  特性を最適化することによって、二種の一眼レフカメラでは良い色補正をすることができた。本研究の方向性は正しいと考えられる。しかし、ミラーレス一眼カメラの特性は双曲線関数による補正では改善できなかった。これが  $\gamma$  特性の補正で改善できないものではないのなら、今後はさらに一般的な特性関数を仮定して適用範囲の広い補正を実現する手法を開発する必要がある。

ただ、このカメラの各色成分の raw 画像が、本当に他の成分を含んでいないのかという疑問も残っている。

表 3 補正による推定光源色度の評価

カメラ	光源	推定光源色度		推定光源色度と標準白色色度との差	測定された光源色度との差
		x	y		
Nikon D70s	D65	0.2868	0.3152	0.0098	0.0196
Nikon D70s	A	0.4237	0.4481	0.0058	0.0498
Canon EOS	D65	0.2950	0.3055	0.0063	0.0183
Canon EOS	A	0.4239	0.4309	0.0034	0.0390
OlympusPen	D65	0.2935	0.3125	0.0027	0.0146
OlympusPen	A	0.3235	0.3358	0.0464	0.1546

(参考)

(CS-2000 で測定)

標準光源	x	y	疑似光源	x	y
D65	0.31	0.329	D65	0.3057	0.3204
A	0.45	0.407	A	0.4580	0.4120

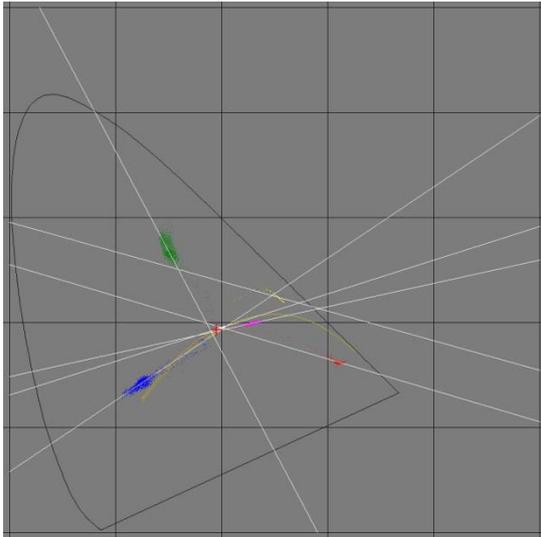


図 6(a) A 光源下の Olympus 画像（補正なし）

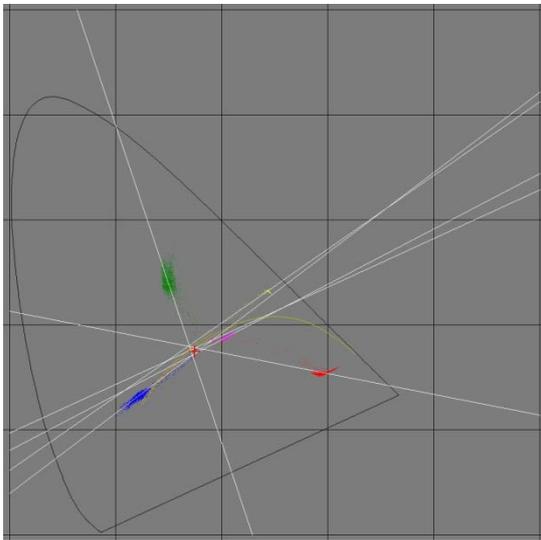


図 6(b) A 光源下の Olympus 画像を  
最適な $\rho$ 値で補正

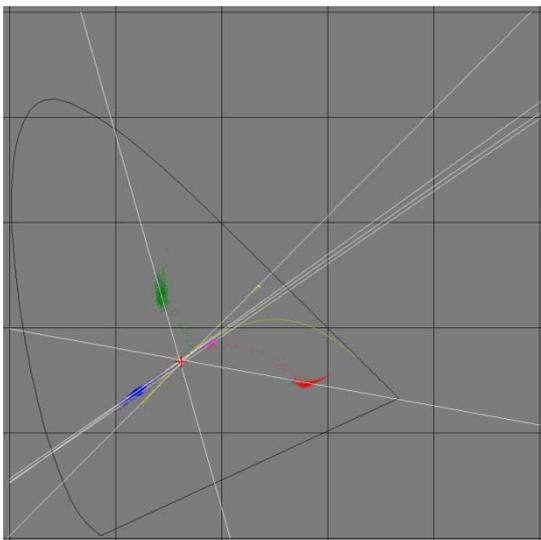


図 6(c) A 光源下の Olympus 画像を  
最適な $\rho$ 値及び $\delta$ 値で補正

[参考文献]

[1] Tajima J., Illumination Chromaticity Estimation Based on Dichromatic Reflection Model and Imperfect Segmentation, Lecture Notes in Computer Science (Springer), Vol. 5646, 2009

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 0 件)

[学会発表] (計 0 件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

田島 譲二 (TAJIMA JOHJI)

名古屋市立大学・大学院システム自然科学  
研究科・教授

研究者番号：50381900