

図9 白色校正板フラットフレームの輝度等高線

像値をそれぞれ (R_{w0}, G_{w0}, B_{w0}) , (R_{b0}, G_{b0}, B_{b0}) とし、補正する点における白基準面、黒基準面のデータを (R_w, G_w, B_w) , (R_b, G_b, B_b) とする。各地点における撮像環境により、その地点における基準値の値は変動するが、白基準・黒基準と撮像値との相対関係はどの地点でも維持されていると考えることができる。たとえば赤成分 (R) に着目し、 $(R - R_b)$ と $(R_w - R)$ の比がどこでも一定であると仮定すると、補正値 R_0 は

$$R_0 = R_{b0} + \frac{R_{w0} - R_{b0}}{R_w - R_b} (R - R_b) \quad \dots\dots\text{式 2}$$

と推定することができる。同様にして緑成分 (G) 、青成分 (B) についても、画面内の全ての地点において、参照点と同じ環境下での撮像値を推定することができる。

補正の効果を見るために、有色タイルから合成したフラットフレームの補正前の輝度ヒストグラムを図10に、補正後のヒストグラムを図11(a)に示す。これにより画面内における均一化が図られていることが解かる。



図10 周辺部補正前画像の輝度ヒストグラム



(a) 1次周辺部補正 (b) 6次周辺部補正

図11 周辺部補正後の輝度ヒストグラム

3.3.4 n次補正

現実的には、撮像素子の非線形性等が存在するため、単純な一次補正だけでは誤差が大きくなる場合が多い。そこで数枚の基準画像を用い補正を行うことを考える。1次補正と同じように、補正を行う点 (x, y) における撮像値を (R, G, B) 、参照点 (x_0, y_0) の環境における推定値を (R_0, G_0, B_0) とすると、変換係数 C_R, C_G, C_B を用いて、たとえば赤成分については $R_0 = C_R \cdot R$ と書くことができる。この C_R 値を白基準面、黒基準面を含む数枚の基準面画像について実測すると、撮像場所により異なる図12の様な関係が得られる。

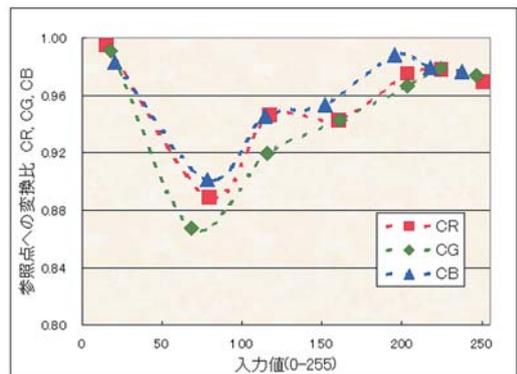


図12 参照点への変換係数例

本研究では $n + 1$ 枚の基準画像を用い、撮像値 (R, G, B) に対する変換係数 (C_R, C_G, C_B) を Lagrange n 次補間式より推定した。図10の画像に対し、6次の周辺部補正を行った画像の輝度ヒストグラムを図11(b)に示す。1次補正に比べて、撮像条件の均一性が向上していることがわかる。

3.4 非線形性補正

3.4.1 非線形性補正の必要性

ビデオカメラ内部では、受像機のブラウン管にある発光特性の非線形性を補正するための γ 補正処理が行われている。ブラウン管の発光特性は入力電圧を E とすると $E^\wedge (2.2)$ となるため、カメラの出力値は、被写体の明るさ x に対し $x^\wedge (1/2.2)$ に変換されている ($^\wedge$ はべき乗をあらわす)。また、ハイライト表現の改善や階調圧縮のための knee 処理が行われる場合もある。CIE-XYZ 表色系では物体の輝度と出力値が比例しているため、

表色値を得るためにはこれらの非線形性を取り除く必要がある。本研究では、テーブル参照方式により、この非線形性補正を行った。



図14 使用したカラーチャート

3.4.2 テーブル参照方式

テーブル参照 (LUT: Look Up Table) 方式では、あらかじめ測色計等により表色値が分かっているサンプルを撮像し、その撮像値との関係を表 (Table) にしておき、実際の入力値に対し、この表を参照 (Look Up) することで補正を行う。本研究では、サンプルとして (1) RGB 値が同じ割合で入っていること (グレー系列)、(2) 幅広い輝度を持っていることから Kodak 製グレースケールを使用した。また、グレースケールの各サンプルを色差計で計測後、NTSC 表色系に変換した RGB 値と、同サンプルを撮像素子型センサで撮像し、周辺部補正を行った画像の RGB 値との関係を図 13 に示す。これより、RGB はそれぞれ独立に非線形補正を行う必要があることが分かる。

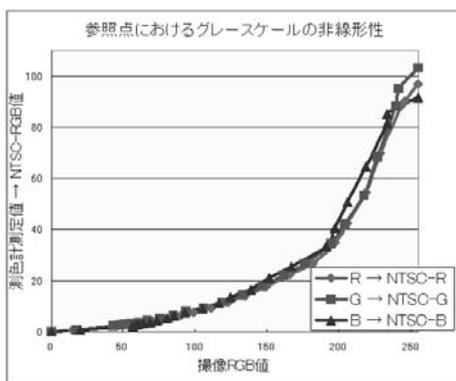


図 13 カラースケールの撮像値 (周辺部補正後) と測色計測定値 (NTSC-RGB 変換)

この図 13 に基づき、非線形補正処理を行った。各カラースケールのサンプル間は一次近似により補間を行った。また、撮像センサにより得られる値には非線形性の他にバイアス値も入っているため、ダークフレームの画像を用い、この出力値を 0 とする補正も行った。

3.5 色空間補正

非線形補正を行い、撮像対象の輝度と画素値が比例した画像に対し、CIE 表色系への変換を行った。人間の眼の感度特性である等色関数 $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$ と、測色計の感度特性 $R(\lambda)$, $G(\lambda)$, $B(\lambda)$ が一次結合の形で表されるならば、その測色計で完全に色を測る事ができる (ルータ条件を満たす)。現実のカメラでは、色分解光学系の透過特性はこの形になっていない場合が多く、また使用する光源も CIE で定める標準光源とは特性が異なるため、撮像素子型センサで得られた画素値を、そのまま CIE 表色値へ変換することはできない。本研究では、カラーサンプルを用い、画素値から表色値への変換マトリックスの推定を行った。

推定に用いるサンプルとして、実際に測色を行うものに近い分光反射率を持っているものを選ぶことで、変換精度の向

上が期待できる。本研究では、デジタル画像の色調整用に広く使われているグレッグマクベス社製のカラーチャートを用いた (前ページ図 14)。本チャートは、実際の人の肌や空、草の葉などと分光特性がほぼ一致しており、また色が極めて安定しているため、一般的な対象に対する色変換用カラーサンプルとしては妥当であると考えられる。

本研究では、撮像素子型センサ出力の RGB 色空間から、放送用機器の色空間である NTSC-RGB 空間に変換し、その後 CIE-XYZ への変換を行っている。NTSC-RGB と CIE-XYZ はルータ条件を満足しているため、カラーチャートの各サンプルを色差計で計測し、適当な 3×3 の変換行列を掛けることにより NTSC-RGB 値を得ることができる。撮像素子型センサの色空間から NTSC-RGB 空間への変換式はルータ条件を満足していないため、二次の項まで考慮して

$$\begin{bmatrix} NTSC-R \\ NTSC-G \\ NTSC-B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \cdots a_{19} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \cdots a_{29} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \cdots a_{39} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_i^2 \\ G_i^2 \\ B_i^2 \\ R_i G_i \\ G_i B_i \\ B_i R_i \\ R_i \\ G_i \\ B_i \end{bmatrix}$$

式 3 二次の色空間変換式

とおいた (R_i , G_i , B_i は撮像型センサの出力に周辺部補正、非線形補正を適用した値)⁴⁾。この変換式をカラーチャートの 24 色すべてに対して生成し、それより色空間変換行列 ($a_{11} \sim a_{39}$) を線形二乗法により推定した。

3.6 校正手法の有効性

以上、開発した三つの補正 (周辺部補正、非線形補正、色空間補正) を用いた校正を行うことで、撮像素子型センサを用いて、「どの地点」においても「色の絶対値計測」が可能となる。本校正手法の有効性を検証するため、(1) 推定に用いたカラーチャート 24 サンプル、(2) ミノルタ製カラータイル (カラーチャートとは異なる分光特性をもつ) 13 サンプルに対し、測色計の出力値と撮像素子型センサの出力値を比較した (表 2)。なお、誤差の評価は CIE-L*a*b* 均等色空間における両センサの出力値の色差 ΔE_{ab}^* を、画面全体で平均した値で行った。色計測のひとつの目安となる $\Delta E_{ab}^* < 10.0$ が達成できている。

表 2 各サンプルに対する測定値の誤差

	カラーチャート	ミノルタ製カラータイル
補正前	29.728	14.213
補正後	3.262	9.228

4. 校正結果と実製品への適用

4.1 ディスプレイ用カラーアナライザとの比較

絶対値計測、高速測定の一つを兼ね備えたセンサとして、カラーディスプレイ用のホワイトバランス計測器（カラーアナライザ）が一部の企業で製品選別に使われている。この計測器では光源色に対するCIE表色値が得られ、毎分20回程度の測定が可能であるため、工場のライン上に設置することで（ラインの流れ方向への「線上」の測定ではあるが）、複雑色特徴をある程度検出することが可能である。実際に製品選別に使われているカラーアナライザと、本研究で開発した撮像素子型センサによる、同一の製品（レンガ）の計測値の比較（計測エリアにおける ΔE_{ab}^* の平均値）を表3に示す。ほぼカラーアナライザと同等の結果が得られていることが分かる。

表3 カラーアナライザとの測定値誤差の比較

	レンガA(黒)	レンガB(黒)	レンガC(赤)	レンガD(ベージュ)	レンガE(ベージュ)	平均
補正前	19.82	17.68	21.36	32.15	22.09	22.62
補正後	6.18	6.11	6.95	9.07	5.57	6.78

4.2 実製品への適用

実製品への適用例として、ベニア板の木目抽出処理を行った。製品を撮像素子型センサで撮像し、得られた画像（補正なし）に二値化処理を行った結果が図15である。二値化処理により製品の特徴抽出を行う場合、補正を行わない場合には、周辺部における輝度の落ち込みが大きく、木目抽出ができていないことが分かる。同画像に対し、本研究で開発した校正手法を適用後、二値化処理を行ったのが図16である。画面全体で一様な撮像条件となっているため、木目成分のみが抽出できていることが分かる。

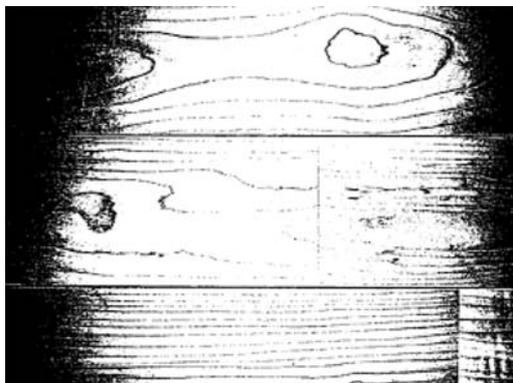


図15 補正適用前の木目抽出

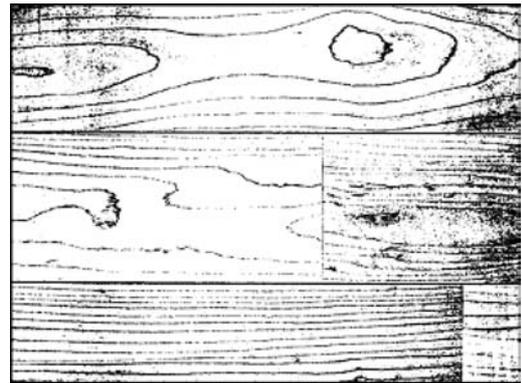


図16 補正適用後の木目抽出

このように、本研究で開発した校正技術を適用することで、色評価用の特殊な光源や、色評価用の特殊なフィルタを備えたカメラ、また撮像画面全体における完全な均一照明条件が得られなくても、製品の複雑色特徴を得ることができるといえる。

5. まとめ

本研究では、周辺部補正、非線形性補正、色空間補正の三つの補正技術を用いたCIE表色値への校正手法を開発した。これにより、カメラの内部処理や照明環境などの影響を受けることなく、画面全域に渡って色を精度良く判別することが可能となり、局所的な色の違いや微妙な色の差の模様など、これまで人の眼に頼っていた製品の「複雑色特徴」を自動判別する可能性が開けたといえる。図17に開発した複雑色判別技術を示す。

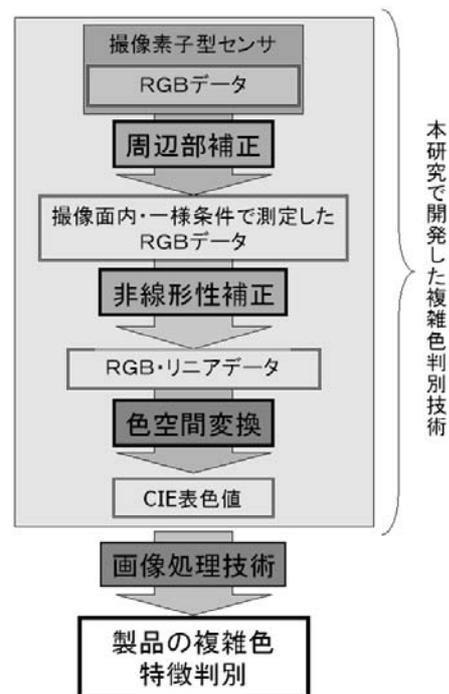


図17 本研究で開発した複雑色判別技術

製造ライン等への設置にあたっては、対象となる製品に適した撮像環境の構築や、得られた画像からの特徴抽出手法の開発などが必要となる。今後は食品や木材、窯業など適用分野を広げ、実際の製品選別に用いることのできるシステム開発を行う予定である。また、開発した校正手法は、照明の種類やカメラの機種などによらず汎用的に適用できるものであり、各種撮像素子を用いたシステムへの応用を検討する。

文 献

- 1) 大田登 “色彩工学 第2版” 電機大出版局, 2001
- 2) 日本色彩学会 編 “新編 色彩科学ハンドブック” 東京大学出版社, 1989
- 3) 和久井孝太郎 監修, 浮ヶ谷文雄 他著 “テレビジョンカメラの設計技術” コロナ社, 1999
- 4) 大田登 “色再現工学の基礎” コロナ社, 1997