カラー撮像可能な近赤外撮像装置の研究

～比視感度補正信号処理方式の開発～

Near Infrared Cameras to Capture Full Color Images

-A Study of Color Reproduction Methods Without an Infrared Cut Filter for Digital Color Cameras-

正会員 豊田 善隆[†], 正会員 久野 徹也[†], 正会員 石田 晃三[†], 正会員 杉浦 博明[†]
Yoshitaka Toyoda[†], Tetsuya Kuno[†], Kozo Ishida[†] and Hiroaki Sugiura[†]

Abstract We propose a color reproduction method without an infrared cut filter (IRCF) for digital color cameras. The infrared cut filter in a camera eliminates infrared rays over 700 nm in order to adjust the spectrum sensitivity of the image sensor to the color-matching functions of the human eye. Without an IRCF, the spectrum sensitivity of the image sensor fails to satisfy the Luther condition. To achieve good color reproduction without an IRCF, we employed two techniques: (1) a color correction matrix with nonlinear terms and (2) changes to the matrix coefficient according to the color temperature of illumination. Results demonstrate that our techniques enable a better color reproduction than conventional methods without an IRCF.

キーワード：近赤外，赤外カットフィルタ，演色性，条件等色，色補正マトリクス

1. ま え が き

撮像装置は，人間が目で見える被写体を撮像するいわゆる「写真」と称される可視域の撮像装置と，物理的に人間の目で見ることができない不可視域での撮像装置とがある。前者はデジタルスチルカメラに挙げられるように，人間が見た印象に近づけるべく，より「美しく」「きれいに」撮像を行う技術が研究されており，後者は高感度を必要とするセキュリティや樹木のリモートセンシング，人間の静脈などを検知するバイオメトリクスに利用する技術が研究されている¹⁾。

汎用のカラー撮像装置では，撮像素子の分光感度特性を人間の目の等色感度に近似するため，波長約700nm以上の赤外光を除去する比視感度補正フィルタ (IRCF: Infrared Cut Filter) が設けられている。

一方，監視カメラなどでは，IRCFを外して近赤外光を受光させることで，感度の高い撮像を行う方法が提案されている²⁾。IRCFを装着しないとき，撮像素子の分光感度特性は等色感度から大きく逸脱するため，正確な色再現性を得ることは困難である。そこで，通常はIRCFを設けてカラー画像を撮像し，感度を上げるときはIRCFを外して感度の高

表1 撮像装置の性能と適用例
Advantages and applications of each camera.

	性能		利用	
	色再現性	感度	写真	暗視・バイオメトリクス・リモートセンシング
汎用カラーカメラ	○	△	○	×
近赤外カメラ	×	○	×	○
本方式を適用したカメラ	○	○	○	○

い白黒画像の撮像を行っていた。しかし，この場合，IRCFを着脱する機構が必要となり，撮像装置の小型化，低コスト化に不利であった。

本論文では，IRCFを装着せず，信号処理により比視感度補正を行う信号処理方式を提案する。信号処理のみで良好な色再現性が実現できれば，IRCFを必要とせずにカラー画像が撮像でき，かつ，近赤外光を用いた高感度な撮像の両立が可能となり，1台のカメラで多様なアプリケーションに対応可能となることが期待される (表1)。

IRCFを装着しない分光感度特性から得られた色信号を補正し，良好な色再現性を得るため，従来のマトリクスによる色補正方法を拡張した，次の二つの手法を導入する³⁾。

- (1) 高次に展開した非線形な色補正マトリクスを用いる
- (2) 照明条件に応じてマトリクス係数を可変とする

これらの手法を用いて，マクベスのカラーチェッカ⁴⁾および新たに設けた特殊カラーパッチ⁵⁾に対して，どこまで良好な色再現性を実現することができるかを画像シミュレーションにより検証した。本論文では，提案方式による色

2008年8月，映像情報メディア学会年次大会，
2008年12月，映像情報メディア学会冬季大会で発表。
2009年3月31日受付，2009年9月16日再受付，2009年11月6日採録
[†]三菱電機株式会社 先端技術総合研究所

(〒617-8550 京都府長岡京市馬場園所1, TEL 075-958-3246)

[†]Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation
(1 Zusho Baba Nagaokakyo City Kyoto, 617-8550, Japan)

再現性とSNR劣化度の検証結果を報告する。対象とする撮像装置は、もっとも汎用のデジタルカメラとして用いられているRGB原色単板撮像素子、下地のフォトダイオードは汎用のCCDセンサを用いた撮像装置とする。

2. 比視感度補正方式

2.1 等色関数への近似

測色的色再現のための画像入力系の分光感度は、等色関数の1次結合になっている必要がある(ルータ条件)⁶⁾。撮像素子の分光感度特性はさまざまな設計制約から必ずしも等色関数に一致できるわけではない。図1(a)にCIE1931等色関数を示す。また、図1(b)には一般的な撮像素子の分光感度特性を示す。図1(b)点線で示す分光感度特性はSiなどで形成されているフォトダイオードの分光感度特性と、カラーフィルタおよびIRCFの分光透過率が掛け合わせられた特性である。図1(a)および図1(b)からわかるように、両者の分光感度特性は必ずしも一致しているわけではない。特にR感度の負の特性は撮像素子単体では実現できない。

従来から、撮像素子の分光感度特性を等色関数に近似する方法として、Epstein近似にあげられる分光特性そのものの半値を狭める方法と、信号処理による補正とが用いられてきた⁷⁾。カラーフィルタそのものの特性は設計制約によるトレードオフであるため、信号処理による補正が主に用いられている。信号処理による補正には、ルックアップテーブル(LUT: Look Up Table)方式と、線形マトリクスによる方式がある。プリンタなどではLUTによる色変換が用いられているが、実装容量が大きくなるため民生用の撮像装置では用いられない。

マトリクスによる補正は、例えば、画像のRGB信号を次式(1)の3行3列のマトリクスにより1次変換するものである。

$$\begin{pmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{pmatrix}^T = (3 \times 3 \text{ Matrix}) \cdot \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}^T \quad (1)$$

ここで、 (R, G, B) は入力画像のRGB信号、 (R', G', B') は出力画像のRGB信号、 $(3 \times 3 \text{ Matrix})$ は3行3列のマトリクスである。三つのチャネルの入力 (R, G, B) を式(1)に示すマトリクス演算により加減することで、結果としてR感度の負の特性等を考慮した等色関数の出力を近似的に得るものである。この方式の利点として、回路規模が小さく、ルータ条件を満たしていれば測色的色再現が可能であるため、民生用の撮像装置での利用にも適している。マトリクスによる補正では原色フィルタでNeugebauerの品質係数⁸⁾ $q=0.93$ 、補色フィルタで $q=0.94$ を実現できている報告もある⁹⁾。

しかしながら、IRCFを装着しない分光感度特性は、特に700nm以上の近赤外領域で著しく等色関数と異なる特性となる(図1(b)実線)。そのため、従来の3行3列の補正では十分な補正の効果を得ることは困難であると想定する。

2.2 非線形マトリクスによる色補正

700nm以上のR, G, Bの分光感度特性が補正できるよう、各色信号を高次の項へ展開し、次式に示す3行9列の非線形

(a) RGB等色関数

(b) 撮像素子の分光感度特性

図1 等色関数と撮像素子の分光感度特性

Color matching function and spectrum sensitivity of an image sensor; (a) CIE1931 color matching function, and (b) spectrum sensitivity of an image sensor.

マトリクスによる補正方法を提案する。

$$\begin{pmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{pmatrix}^T = (3 \times 9 \text{ Matrix}) \cdot \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \\ R^m \\ G^m \\ B^m \\ R^n \\ G^n \\ B^n \end{pmatrix}^T \quad (2)$$

ここで、 (R, G, B) は入力画像のRGB信号、 (R', G', B') は出力画像のRGB信号、 $(3 \times 9 \text{ Matrix})$ は3行9列のマトリクス、 m, n は高次の非線形項の特性を決める次数である。先に述べたように、近赤外領域を含む分光感度特性は目標色の等色関数とは著しく異なるため、1次の線形変換では色補正が困難である。そこで、1次の線形変換に加え、非線形の補償の項を追加することで、色補正後のRGB信号において条件等色の成立を狙う。条件等色についての詳細は2.3項にて述べる。ここで、非線形の補償の項として累乗項を設けているのは、700nm以上の分光感度特性が色再現性に与える影響を抑圧するためである。また、R, G, Bを互いに掛け合わせたクロス項も考えられるが、800-1000nmにてほぼ同じ分光感度特性をしており、クロス項を加えたことによる改善効果はほとんど見られなかったため本論文での記述は割愛する。

$(3 \times 9 \text{ Matrix})$ のマトリクス係数は、センサ出力からのRGB信号を目標色に近似する最適なマトリクス係数を最小2乗法により求める。いま、N個の色サンプルについて、目標色の三刺激値を (X_i, Y_i, Z_i) ($i=1, 2, \dots, N$)、補正の対象となるセンサ出力のR, G, B値を (R_i, G_i, B_i) ($i=1, 2, \dots, N$)とすると、目標色との平均2乗誤差が最小となる補正を与える3行9列のマトリクスAは、次式(3)～(5)により求める

ことができる。

$$A = \left((S^T S)^{-1} S^T T \right)^T \quad (3)$$

$$T = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_N & Y_N & Z_N \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$S = \begin{bmatrix} R_1 & G_1 & B_1 & R_1^m & G_1^m & B_1^m & R_1^n & G_1^n & B_1^n \\ R_2 & G_2 & B_2 & R_2^m & G_2^m & B_2^m & R_2^n & G_2^n & B_2^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_N & G_N & B_N & R_N^m & G_N^m & B_N^m & R_N^n & G_N^n & B_N^n \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで、マトリクスAは式(2)の(3×9Matrix)と同義であり、Sは補正の対象となるセンサ出力のRGB信号とそれらを累乗した信号の計9chの信号を配列したマトリクス、Tは目標色の三刺激値を配列したマトリクスである。

なお、今回の検討では、色サンプルとしてマクベスのカラーチェッカの24色を用い(N=24)、目標色はsRGB¹⁰⁾とした。また、次数m, nについてはm=0.3, n=2.0の値を用いた。この値は、4.3項にて述べる次数の検討の結果に基づいて、経験則的に選択した値である。

2.3 条件等色への対応

2.1節、2.2節で述べたマトリクスによる色補正が可能なのは、条件等色対(メタマー)であるからである。条件等色とは分光分布の異なる二つの色刺激が、特定の観測条件(観測者、視角、照明光の分光分布などを示す)で等しい色に見えることである¹¹⁾。従来のカラー撮像装置の分光感度特性と目標色の等色関数は一致していないため、照明条件が

異なるとその色再現性も異なる。民生用カラー撮像装置では、その色差は許容レベルとして認められていたが、IRCFを装着しない撮像素子の分光感度特性では、照明条件による色再現性の変化が無視できなくなる。したがって、式(2)を次式(6)とし、上記の問題を解決する。

$$(R', G', B')^T = WB(K) \cdot (3 \times 9 \text{Matrix}(K)) \cdot (R, G, B, R^m, G^m, B^m, R^n, G^n, B^n)^T \quad (6)$$

ここで、Kは照明の色温度、WB(K)は色温度Kによって可変のホワイトバランス係数、(3×9Matrix(K))は色温度Kによって可変の3行9列のマトリクス係数である。太陽光では、時間や気象条件によってその色温度が変化するが、基本的に黒体放射の色温度とほぼ相関がある。そこで、黒体放射のそれぞれの色温度においてマトリクス係数を最適化し、照明の色温度に応じたマトリクス係数を設けた。

3. 画像シミュレーションによる評価

3.1 信号処理モデル

画像シミュレーションにより、提案手法により得られる色再現性を検証した。想定する信号処理のブロック図を図2に示す。

従来の一般的なカメラ信号処理では、IRCFを設け、センサ出力に対してDC再生、WB(ホワイトバランス)補正、画素補間処理を行った後、3行3列の線形マトリクスによる色補正を行い等色関数の出力に近似する。その後、必要に応じて、ガンマ補正、YUV変換、エンハンスやNR(ノイズリダクション)等の画質改善処理を施し、最終的な出力とする(図2(a))。

(a) 従来

(b) RGBマトリクスの場合

(c) UVマトリクスの場合

図2 信号処理のブロック図

Block diagram of signal processing; (a) conventional, (b) RGB matrix, and (c) UV matrix.

提案方式では、従来方式からIRCFを外し、近赤外光の影響を受けたセンサ出力に対して処理を行う。DC再生、WB補正、画素補間処理を行った後に、3行9列の非線形マトリクス処理を設けることで、近赤外光の影響による色誤差を補正する(図2 (b))。

なお、従来のカメラ信号処理では3行3列のRGBマトリクスの代わりに、色補正として、回路規模的に有利な2行2列のUVマトリクスを用いることも多い¹²⁾。そのため、式(2)と同様に、UVによる補正を次式(7)に示す補正式にて検討した(図2 (c))。

$$(U', V')^T = (2 \times 6 \text{ Matrix}) (U, V, U^m, V^m, U^n, V^n)^T \quad (7)$$

ここで、 (U, V) は入力画像のUV信号、 (U', V') は出力画像のUV信号、 $(2 \times 6 \text{ Matrix})$ は2行6列のマトリクス、 m, n は高次の非線形項の特性を決める次数である。

3.2 処理フロー

今回は、3.1節で述べた信号処理モデルを簡易化し、DC再生、画素補間処理については考えないものとし、図3に示す画像処理フローにしたがって計算した。

まず、分光特性の積算部において、撮像系のR, G, Bの分光感度特性 (IRCFなし)、被写体の分光反射率、および照明光の分光特性の積を全波長域について積分することにより、センサの出力値 (R, G, B) を求める。照明光は、黒体放射のスペクトル (3000K~6500K) を用いた。次に、WB補正部において、マクベスカラーチェッカのグレー系の色が無彩色

となるようにR信号、B信号に対してゲインを乗算する。次に、A/D変換処理部において、RGB各色の信号を10ビットの整数データに変換する。次に、RGBマトリクス部において、RGBマトリクスによる色補正を行う。RGB空間での色補正では、3行3列の線形マトリクスによる色補正、3行9列の非線形マトリクスによる色補正の2通りについて実験した。次に、ガンマ補正部において、 $\gamma=1/2.2$ のガンマ補正を行うとともに10ビットデータを8ビットデータに変換する。RGB空間での色補正を行う場合には、以上のガンマ補正部までのフローで得られた結果を出力とする。

一方、マトリクス処理は、YUV変換を行ったあとのUV信号に対して行うこともできる。この場合は、図3に示したフローにおけるRGBマトリクス部を省略し、ガンマ補正、YUV変換を経た後、UVマトリクス部においてUVマトリクスによる色補正を行う。UV空間での色補正では、2行2列の線形マトリクスによる色補正、2行6列の非線形マトリクスによる色補正の2通りについて実験した。補正後のYUV信号をRGB変換した結果を出力とする。

色再現性の評価は、マクベスのカラーチェッカの24色と、新たに設けた特殊カラーパッチ5色のそれぞれについて、最終出力のRGB値から $L^*a^*b^*$ 値を求め、sRGB等色関数から求められる目標色との色差 ΔE^*ab を計算することにより行った。特殊カラーパッチは、自生する木葉および化繊の衣類の被写体サンプルから抽出したものであり、本論文ではこれらを例外色と定義して特別に評価した。例外色の分光反射率を図4に示す。これら例外色は、近赤外領域 (700nm以上) で分光反射率が急激に高くなるという特徴を有するため、本方式の苦手被写体であると想定する。

3.3 SNRの検証

マトリクス演算による色補正では、SNR (Signal-to-Noise Ratio) は劣化の方向へ進む。すなわち補正の度合いが大きくなれば大きくなるほどSNRは劣化すると考えられる。

本論文では、センサ出力 (A/D変換処理部により10ビット整数に変換された後のRGB値) に対して予めノイズを付加し、マトリクス演算後の画像出力 (ここではRGB 8ビット出力時) からSNRの劣化をシミュレーションにより確認した。信号 S に対し、トータルノイズ N_t が加算された $S+N_t$ がセンサから出力される。ノイズは暗電流ノイズ N_d 、固定パターンノイズ N_p 、ショットノイズ N_s を考慮し、次式のモデルで算出した。

$$N_t = \sqrt{N_d^2 + N_p^2 + N_s^2} \quad (8a)$$

ここで、

$$N_d = m_d \cdot g + n_d \quad (8b)$$

$$N_p = m_p \cdot s + n_p \cdot g \quad (8c)$$

$$N_s = m_s \cdot \sqrt{s \cdot g} \quad (8d)$$

s : 信号レベル, g : アナログ利得,

m_d, m_p, m_s, n_d, n_p : CCDの固定値

図3 画像処理フロー
Flowchart of signal processing.

(a) 自生する木葉

(b) 化繊の衣類

図4 例外色の分光反射率特性

Spectrum reflectance of exceptional colors: (a) natural leaves, and (b) wears.

である。これらのパラメータは、田丸らの報告¹³⁾に基づいて決定した。これらの条件にしたがって、色差検証を行うマクベスのカラーチェッカおよび例外色の全29色それぞれについてSNR劣化度を検証する。

4. 結果

4.1 色再現性

提案方式による色補正処理の結果を図5, 図6に示す。マクベスのカラーチェッカ24色と例外色5色のカラーパッチを図示しており、図5は照明の色温度が5000Kのときの結果を、図6は照明の色温度が3000Kのときの結果をそれぞれ示している。(a)はsRGB等色関数により得られた目標色、(b)はIRCFを装着しない分光感度特性から得られた色補正なしの場合の色再現を示している。近赤外光の影響により色が大きく変化していることがわかる。(c)はRGB 3×3線形マトリクス、(d)はRGB 3×9非線形マトリクス ($m=0.3$, $n=2.0$), (e)はUV 2×2線形マトリクス、(f)はUV 2×6非線形マトリクス ($m=0.3$, $n=2.0$) の各補正条件での色再現を示している。マトリクスによる補正を入れることで目標色に近づき、色再現性が向上したことがわかる。

色再現性を定量的に評価するため、各補正条件において、カラーパッチごとに目標色との色差 ΔE^*ab を計算した。図7はカラーパッチごとの色差を示す。図7(a)は色温度5000KでのRGBマトリクスの結果、図7(b)は色温度3000KでのRGBマトリクスの結果、図7(c)は色温度5000KでのUVマトリクスの結果、図7(d)は色温度3000KでのUVマトリクスの結果である。補正なし、線形マトリクス、非線形

(a) RGBマトリクス (5000K)

(b) RGBマトリクス (3000K)

(c) UVマトリクス (5000K)

(d) UVマトリクス (3000K)

図7 カラーパッチごとの色差

Color difference of color patches; (a) RGB matrix (5000K), (b) RGB matrix (3000K), (c) UV matrix (5000K), and (d) UV matrix (3000K).

マトリクスの各補正条件での色差と、比較のために、IRCFを用いてかつ線形マトリクスによる補正を行う従来の構成による色差をプロットしている。RGBマトリクスによる補正では、IRCFを用いた構成で実現できる色差のレベルには達していないものの、ほとんどのカラーパッチで、

表2 色温度ごとの平均色差
Average color differences.

色温度条件(K)		3000	4000	5000	6000	6500
(1) IRCFなし+色補正なし	1-24	34.0	26.6	22.5	20.4	19.7
	25-29	57.1	43.4	35.3	31.5	30.5
(2) IRCFなし+RGBによる色補正	1-24	17.2	8.5	6.3	5.9	5.9
3×3線形マトリクス	25-29	36.9	24.8	19.7	19.1	19.1
(3) IRCFなし+RGBによる色補正	1-24	14.2	6.9	5.4	5.6	5.4
3×9非線形マトリクス	25-29	28.0	20.7	16.6	15.1	15.0
(4) IRCFなし+UVによる色補正	1-24	27.2	15.6	10.9	9.4	9.1
2×2線形マトリクス	25-29	53.6	31.9	26.2	24.9	24.8
(5) IRCFなし+UVによる色補正	1-24	24.2	12.0	9.3	8.6	8.3
2×6非線形マトリクス	25-29	43.2	29.4	25.4	23.4	23.7
(6) IRCFあり+RGBによる色補正	1-24	4.6	2.3	2.0	2.1	2.1
3×3線形マトリクス	25-29	11.2	6.1	5.2	4.7	4.7
(7) IRCFあり+UVによる色補正	1-24	6.6	5.7	5.1	4.5	4.6
2×2線形マトリクス	25-29	11.2	8.4	7.5	7.5	7.4

3×3線形マトリクス, 3×9非線形マトリクスの順に色差が改善していることがわかる. 一方, UVマトリクスによる補正では, 同一色温度のRGBマトリクスの結果と比べると色差の改善度は低かった. しかし, RGBマトリクスの場合と同様, 2×2線形マトリクスよりも2×6非線形マトリクスの方が補正の効果が高かった.

カラーパッチごとに見ると, マトリクス演算により色再現性が大きく改善する色と, そうでない色があることがわかる. とくに, 例外色は全体的に, マクベスのカラーチェッカではGreen系の色などで, あまり色差の改善が見られなかった. また, 無彩色 (Natural) のように, 補正後の方が補正前に比べて色差が大きくなった色もあった.

各色温度条件における平均色差の結果を表2にまとめる. マクベスのカラーチェッカの24色 (1-24) と, 例外色の5色 (25-29) のカテゴリー毎に平均値を算出した. 概して, RGB 3×9非線形, RGB 3×3線形, UV 2×6非線形, UV 2×2線形の順に補正効果が高いことがわかる. また, マクベスのカラーチェッカに比べて例外色の色差が大きく, かつ, 照明の色温度が低いほど色差が大きくなることがわかる.

4.2 SNR

3章で述べたノイズを付加した入力画像に対し, 各補正条件にて処理を行った場合の画像出力において, カラーパッチごとにSNR (Signal-to-Noise Ratio) を算出した. SNRは, 各カラーパッチの領域のR, G, B信号レベルの平均値 $\bar{r}$, $\bar{g}$, $\bar{b}$ と標準偏差 σ_r , σ_g , σ_b から, 次式 (9) により算出した.

$$\begin{aligned}
 SNR &= 1/3 \cdot (SNR_r + SNR_g + SNR_b) \\
 &= 1/3 \cdot \left\{ 20 \cdot \log \left(\frac{\bar{r}}{\sigma_r} \right) + 20 \cdot \log \left(\frac{\bar{g}}{\sigma_g} \right) + 20 \cdot \log \left(\frac{\bar{b}}{\sigma_b} \right) \right\} \quad (9)
 \end{aligned}$$

カラーパッチごとのSNRの算出結果を図8に示す. マトリクス演算によってSNRは劣化する傾向であったが, 劣化の程度はカラーパッチによってばらつきがあった.

各補正条件, 各色温度条件におけるSNRの結果を表3にまとめる. 表3中の数値は, 全29色のSNRの平均値と最低値である. SNR平均値の比較により, 色温度3000Kにおい

図8 カラーパッチごとのSNR

Signal to noise ratio of color patches; (a) RGB matrix (5000K), (b) RGB matrix (3000K), (c) UV matrix (5000K), and (d) UV matrix (3000K).

て, 補正なしの場合に比べて, 3×3線形マトリクスで2.5dB, 3×9非線形マトリクスで1.6dBのSNR劣化が確認された. また, 色温度5000Kにおいて, 補正なしの場合に比べて, 3×3線形マトリクスで2.5dB, 3×9非線形マトリクスで2.8dBのSNR劣化が確認された. 以上の結果から,

表3 色温度ごとのSNR
Average of signal to noise ratio.

色温度条件(K)		3000	4000	5000	6000	6500
(1) IRCFなし+色補正なし	平均	38.3	37.6	37.1	36.8	36.7
	最低	26.6	26.6	26.6	26.8	26.9
(2) IRCFなし+RGBによる色補正 3×3線形マトリクス	平均	35.8	35.1	34.6	34.7	34.8
	最低	26.8	24.0	23.7	26.3	26.6
(3) IRCFなし+RGBによる色補正 3×9非線形マトリクス	平均	36.7	34.8	34.3	33.5	33.7
	最低	26.3	24.9	26.4	24.6	27.2
(4) IRCFなし+UVによる色補正 2×2線形マトリクス	平均	37.7	37.0	36.1	36.2	36.0
	最低	26.5	26.3	26.5	26.6	26.7
(5) IRCFなし+UVによる色補正 2×6非線形マトリクス	平均	36.8	36.1	36.1	35.9	35.9
	最低	22.7	25.6	26.1	26.2	26.8
(6) IRCFあり+RGBによる色補正 3×3線形マトリクス	平均	34.4	33.6	33.4	33.4	33.5
	最低	26.3	15.3	23.2	25.1	24.9
(7) IRCFあり+UVによる色補正 2×2線形マトリクス	平均	34.1	34.1	34.2	34.3	34.2
	最低	26.5	25.9	26.0	25.6	25.5

RGB 3×9非線形マトリクスによる色補正により、SNRは平均で約2〜3dB劣化する。線形マトリクスに比べて非線形マトリクスが特に劣化するような傾向は見られなかった。一方、UVマトリクスによる補正では、RGBマトリクスに比べてSNRの劣化が小さい結果となった。

4.3 次数の検討

4.1節、4.2節では、式(2)における次数のパラメータ(m , n)として、 $m=0.3$, $n=2.0$ の固定値を用いた結果を示した。本項ではパラメータ(m , n)の最適化について述べる。最適なパラメータ(m , n)を求めるため、これら二つの値を変化させて色再現性およびSNRを評価した。図9は、縦軸をパラメータ m 、横軸をパラメータ n とし、各座標に対応するパラメータの組(m , n)の下で得られる色差およびSNR(全29色の平均値)をグレースケールで示したものである。なお、ここではRGB 3×9非線形マトリクスによる補正の結果のみを示す。

パラメータ(m , n)の値を変えることにより、色差の値の分布は色温度5000Kの条件で約7〜8、色温度3000Kの条件で約16〜20の間で変化した。色温度5000Kおよび3000Kの結果に共通して、 $m<1$, $n>1$ のとき(図中、右上の長方形の領域)では、安定して色差が小さくなる傾向が見られた。とくに3000Kでは、 $m<1$, $n>2$ のとき、色差が小さくなった。また、(m , n)の両者が近い値であるとき(図中、対角線付近)、色差が大きくなる組合せが散発的に見られた。

一方、SNRの値の分布は、色温度5000Kの条件で約31〜35、色温度3000Kの条件で約32〜37の間で変化した。色温度5000Kでは、 $m<1$, $n>1$ のとき、 n が大きくなるほどSNRが劣化する傾向が見られた。色温度3000Kでは、 $m<1$, $n>1$ のときにSNRが良好であった。

これらより、色差、SNRの両面から、 $m<1$, $n>2$ の値が適していることがわかる。4.1節で用いた $m=0.3$, $n=2.0$ の値は最適値として一義的に導出した値ではないが、安定して色差が小さく、SNRの劣化が極力少ない領域から経験則的に選択した値である。

5. 考 察

照明の色温度に応じてマトリクス係数を可変とした3×9

(a) 色差(5000K)

(b) 色差(3000K)

(c) SNR(5000K)

(d) SNR(3000K)

図9 次数の検討

Examination of the order of nonlinear terms:(a)color difference(5000K), (b) color difference (3000K), (c) SNR (5000K), and (d) SNR (3000K).

非線形マトリクスによる色補正で、昼光に対応する5000Kの条件にて、平均色差5.4の色再現性を実現できた(マクベ

スのカラーチェッカ24色の平均)。従来の3×3線形マトリクスに対して、平均色差にして0.9の改善である。一方、3000Kの条件では、平均色差14.2の色再現性であった。照明の色温度が低いほど、照明光に近赤外の波長成分が多く含まれるため、色差が大きくなると考えられる。しかし、従来の3×3線形マトリクスに対して平均色差にして3.0の改善が得られ、非線形マトリクスによる色補正の効果が示された。

また、近赤外領域で分光反射率が急激に高くなる木葉や化繊衣類の被写体サンプルを用いて色再現性を確かめた。これら例外色に対しては、3×9非線形マトリクスによる色補正で、5000Kの条件にて平均色差16.6、3000Kの条件にて平均色差28.0であった。例外色では、十分な色再現性が得られたとはいえない。

平均色差の改善が顕著に見られなかった理由として、色ごとに見たときに、色差が改善する色と改善しない色があったことがあげられる。マクベスのカラーチェッカの無彩色(Natural)やGreen系の色、および例外色では、補正後でも大きな色差となった。ある色を補正するためにマトリクス係数を最適化すると他の色に関しては誤差が増える、誤差の拡散が生じていると考えられる。色ごとに補正方法を区別すれば、トータルとしての色再現性の改善が見込めると考える。また、平均色差だけでなく、主観的に大きな印象を与えるグレートラッキング、記憶色(草木、肌色、空色)などには補正に重み付けを与える必要があると考える。

さらに、マトリクス演算に伴うSNR劣化度について検証した。3×9非線形マトリクスによる色補正では、平均で約2~3dBのSNRの劣化が確認されたが、線形マトリクスよりも特に劣化しているわけではなく、色補正の効果が高いことがそのままSNR劣化の要因となっている。とくに、R、G、Bの成分ごとに見ると極端にSNRが劣化し、ノイズが顕著に増幅される色が見られた。これは、あるカラーパッチにおいてR、G、Bのいずれかの元信号レベルが低い場合、色補正にてその成分に高ゲインがかかるために生じているものと考えられる。最小2乗法によるマトリクス係数の導出過程で色補正による影響を受けやすい元信号レベルが低いカラーパッチに対しては、マトリクス係数の大きさに制限を設ければ、SNRの改善が見込めると考える。

なお、本評価において照明は異なる色温度に対する黒体輻射としたが、蛍光灯などの黒体輻射の色温度に対する軌跡から外れる照明での相関色温度は考慮していない。通常、蛍光灯に代表される人工光は赤外光を含まないため色補正の必要がない。

6. む す び

本論文では、汎用のカラー撮像装置において赤外線カットフィルタ(IRCF)を用いずにカラー撮像が可能な信号処理方式について提案した。高次に展開した非線形マトリクスを用いた色補正により、従来の線形マトリクスによる色

補正と比べて、色再現性が向上できることを示した。しかしながら、近赤外光の影響を強く受ける条件、すなわち、照明光の色温度が低い条件や、近赤外領域で高い分光反射率を有する被写体での色再現性は、いまだ充分とはいえない。今後は、さらなる色再現性の改善、とくに近赤外領域で高い分光反射率を有する被写体での色再現性の改善が必要である。

【文 献】

- 1) 尾関ほか：“ITにおけるセキュリティ第二章監視セキュリティシステム”，FED review, 3, 2, 28 (2003)
- 2) 特開2001-36807公報
- 3) 豊田ほか：“カラー撮像可能な近赤外撮像装置の研究－比視感度補正信号処理方式の開発－”，2008年映像学会年次大，11-3 (2008)
- 4) C.S McCamy, et.al: "A Color Rendition Chart", Journal of Applied Photographic Engineering, 2, 3, pp.95-99 (1976)
- 5) 豊田ほか：“カラー撮像可能な近赤外撮像装置の研究－近赤外領域に高い分光反射率を有する被写体での色再現性の検討－”，2008年映像学会冬季大，1-4 (2008)
- 6) 田島：“カラー画像入力装置の新しい色再現係数”，Technical report of IEICE, PREMU96-77, pp.71-78 (1996)
- 7) “色彩化学ハンドブック【第2版】第23章 色再現性の理論”，日本色彩学会編 (1998)
- 8) H.E.J. Neugebauer: "Quality Factor for Filters Whose Spectral Transmittances are Different from Color Mixture Curves, and its Application to Color Photography", J. Opt. Soc. Am. 46, 10, pp.821-824 (1956)
- 9) 洪：“カメラ演色評価数の提案”，カラーフォーラムJAPAN'98, 6-1, pp.69-72 (1998)
- 10) IEC 61966-2-1: "Multimedia Systems and Equipment -Colour Measurement and Management, Part 2-1: Colour Management-Default RGB Colour Space - sRGB" (1999)
- 11) R.W.G. Hint: "Measuring Colour Third edition", Fountain press England (1998)
- 12) 西尾：“CCDカメラの色彩”，カラーフォーラムJAPAN'99, 10-1, pp.143-147 (1999)
- 13) 田丸ほか：“デジタルカメラに必要な有効画素数とその画質”，日写誌, 66, 5, pp.447-451 (2003)

豊田 善隆 2005年、大阪大学基礎工学部システム科学科卒業。2007年、同大学院生命機能研究科生命機能専攻修士号取得。同年、三菱電機(株)入社。現在、同社先端技術総合研究所に所属。画像入力技術、映像信号処理技術の研究に従事。正会員。

久野 徹也 1989年、福井大学工学部電気学科卒業。同年、三菱電機(株)入社。現在、同社先端技術総合研究所に所属。画像入力技術、映像信号処理技術、色再現工学に従事。工学博士。正会員。

石田 晃三 1989年、福井大学工学部電気学科卒業。1991年、同大学院電気工学専攻修士課程修了。同年、三菱電機(株)入社。画像入力技術、映像信号処理技術の研究に従事。正会員。

杉浦 博明 1982年、名古屋大学工学部電子工学科卒業。同年、三菱電機(株)入社。現在、同社先端技術総合研究所に所属。画像出力技術、映像信号処理技術、カラーマネジメント技術の研究に従事。工学博士。正会員。

図5 色補正結果 (色温度5000K)

Results of image simulation (correlative color temperature 3000K); (a) target color, (b) without color correction, (c) RGB 3×3 linear matrix, (d) RGB 3×9 non-linear matrix, (e) UV 2×2 linear matrix, and (f) UV 2×6 non-linear matrix.

図6 色補正結果 (色温度3000K)

Results of image simulation (correlative color temperature 5000K); (a) target color, (b) without color correction, (c) RGB 3×3 linear matrix, (d) RGB 3×9 non-linear matrix, (e) UV 2×2 linear matrix, and (f) UV 2×6 non-linear matrix.