西 原 弘 晃 $^{\dagger 1}$ 矢 田 紀 子 $^{\dagger 1}$ 長 尾 智 晴 $^{\dagger 1}$

本論文では,複数の平面によって構成された物体を仮定し,照明効果による色度遷 移についてのモデルを用いて,照明効果の影響による疑似輪郭線の発生を抑制した画 像の領域分割手法を提案する.1つの表面に対応する画素群の色空間中での分布を光 源との位置関係や Shadow, Shade など照明効果の影響によるものと見なし,隣接す る領域が同一の表面に対応しているのか,それぞれが異なる表面に対応しているのか 判定を行う.また,被写体表面を平面と想定できる環境を設定し,輪郭線の特性に基 づいた領域の隣接関係についての判定を行うことで,隣接関係を持つ領域群から適切 な統合先の選択を行う.照明効果から生じた疑似輪郭線によって過分割された領域を 色度遷移と輪郭線の特性の情報をもとに適切に統合することで,物体表面色に基づい た画像領域分割を実現する.

Image Segmentation Using Color Transition Model and Plane Approximation

Hiroaki Nishihara,^{†1} Noriko Yata^{†1} and Tomoharu Nagao^{†1}

In this paper, we propose a method to segment a color image into regions corresponding to each surface of objects. In the method, a color image is divided into lots of small regions with the clustering results in color spaces. And, using color transition model and previous knowledge about the constraint on the shape of object, all regions in the adjacency are determined whether or not they can be integrated. Integrating of regions based on the result of determination, the whole image is divided into the regions that correspond to surfaces of object.

†1 横浜国立大学大学院環境情報学府

Graduate School of Environment and Information Sciences, Yokohama National University

1. まえがき

ディジタルカメラなどの機器によって撮影された画像は,機器のパラメータや撮影の対象 となった物体の表面特性,撮影時における構図に加えて,撮影時の照明条件から大きな影響 を受けている.物体追跡や空間認識,人物認証などの画像を用いたアプリケーションを設計 する場合に,画像を撮影した環境における照明効果が画像処理の障害になる場合が多く,照 明効果に対応可能なシステムの構築は画像処理の重要な課題としてあげられている.

画像の領域分割手法はこれまでに様々なものが提案され¹⁾⁻⁴⁾, さかんに研究が行われている.画像の領域分割でも照明効果が処理の障害となっており,照明効果を含んだ画像に対する手法の研究が行われている⁵⁾.Wesolkowski らによる研究では,Shade とハイライトの照明効果に対してロバストな画像領域分割手法が提案されている⁶⁾.また,Macaire らによって色空間上における画素群の連結度に基づいた画像領域分割手法が提案されている⁷⁾.

また,画像中に含まれる照明効果の影響を扱う色恒常性についての研究も近年さかんに 行われている⁸⁾⁻¹¹⁾.Finlaysonらは画像中の画素において色恒常性を実現する研究を行っ た¹²⁾.そして,彼らとDrew,Luのグループは画素における色恒常性に基づいて照明光に 対してロバストな特徴量による画像を作成する方法を考案し,画像からの陰影除去を行って いる¹³⁾.また,川上らは光源に黒体輻射の仮定を用いて数値解析的に色恒常性問題を解く 方法についての研究を行い^{14),15)},センサ感度などの特性が既知であり,適切なパラメータ の設定を行うことができる場合に,光源特性の制約に基づいて色恒常性問題を解く方法につ いて提案した.

そこで筆者らは,照明の影響によって疑似輪郭線が発生する画像の領域分割において,光 源特性の仮定に基づいて照明効果による色度の遷移を考慮した手法を提案する.光源の分光 エネルギーの変化による色空間中の特徴量の変化をモデル化し,このモデルを画像の領域 分割手法へ応用する.多くの状況で撮影条件が未知の画像を対象とする領域分割において, 照明効果による色空間中での画素の遷移を想定し扱うことは有用であり重要である.このこ とから,提案手法では,ある一意のセンサ特性を仮想のカメラパラメータとして設定したモ デルを用いて色度の遷移を考慮することで,特性が未知なディジタルカメラで撮影された画 像に対して用いることのできる照明効果の影響を抑制した画像の領域分割を実現する.

本論文では, 色度の遷移を考慮した色空間における画素群の距離の算出を行い, 表面特性 に対応した領域分割の実現を目的としている.対象物体の表面を平面と近似できる環境を想 定し, 色度の遷移を考慮することによって照明効果の影響による疑似輪郭線の発生を抑制す る画像領域分割の手法を提案する.RGB 階調値に含まれる色情報と事前に与えられた表面 形状についての手がかりに基づいて,物体認識や空間認識において有用な物体表面への領域 分割を実現することを目的とする.提案手法では,仮想カメラを想定し照明効果による色度 の遷移を考慮することによって,クラスタリングにおける距離関数の重み付けと領域を構 成する画素群の統合判定を行う.また,対象物体の表面を平面と近似できる環境を想定し, 領域の輪郭線の特性を,照明効果の影響によって生じる疑似輪郭線と,対象物体の各表面を 分ける境界や対象物体とそれ以外を分ける境界で生じる輪郭線とを判別する手がかりとし て用いる.

本論文では,2章で画素における色恒常性の概要を示し,3章では提案手法で用いる色度 遷移モデルの設定について述べ,色度遷移モデルと平面近似を用いた画像領域分割の方法に ついて述べる.4章で提案手法の有効性を示す実験について述べ,5章では実験の結果と考 察を述べる.

2. 画素における色恒常性

提案手法の先行研究として, Finlayson らによる画素における色恒常の研究¹²⁾ について 述べる.

画像は画素とよばれる値の組が二次元配列に記録されたものであり,ディジタルカメラで 画像を撮影する場合,各画素の値として記録される RGB 階調値は撮像素子の応答からそれ ぞれ決定される.対象物体の表面における反射を拡散反射とするとき,RGB 階調値 p は次 の式によって表される.

$$p_k = \tau \int_{\lambda} E(\lambda) S(\lambda) F_k(\lambda) d\lambda, \quad k = \{ \mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B} \}.$$
(1)

ここで, λ は波長であり, $E(\lambda)$ は照明光の分光強度特性, $S(\lambda)$ は対象物体表面の分光反射特性, $F(\lambda)$ は撮像素子の分光感度特性である.また, τ は撮影装置によるゲインを示す係数である.考慮する波長帯は可視光の範囲とし,おおよそ 360 nm から 830 nm の波長帯について考える.撮像素子の分光感度特性はナローバンドであると見なしてデルタ関数に近似できると仮定している.

$$F_k(\lambda) = \delta \left(\lambda - \lambda_k\right), \quad k = \{\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B}\}.$$
(2)

この近似によって,撮像素子の応答を特定の波長 λ_k における応答と見なすことができ,式(1)は次のようになる.

$$p_k = \tau E(\lambda_k) S(\lambda_k), \quad k = \{\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B}\}.$$
(3)

以上のことから, 各階調値は光源の特性
$$E(\lambda_k)$$
 と表面特性 $S(\lambda_k)$ の積として扱うことが できる.

ここで,照明条件と照明光の特性についていくつかの仮定を導入する.まず,カラー画像 データを取得した対象空間内に局在していたあらゆる照明条件において,その照明光の特性 が相関色温度を変数とする関数に置き換えられるものとする.また,ある相関色温度を示す 照明光の分光強度特性は相関色温度の等しい黒体輻射の分光強度特性に置き換えられるも のと仮定する.

黒体輻射の放射エネルギー $E(\lambda)$ は, プランクの式から次のように与えられる.

$$E(\lambda) = C_1 \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{C_2}{T\lambda}\right) - 1 \right]^{-1}.$$
(4)

ここで C₁, C₂ は定数である.また, *T* は相関色温度であり,単位は K である.川上らは光源制約を用いた色恒常性問題を式 (4)から数値解析的に解く方法について述べている^{14),15)}. ここでは,Finlayson らによる研究¹²⁾ に従い,考慮する波長 λ は可視光帯である 360 nm から 830 nm の範囲であり,相関色温度 *T* は 10,000 K 以下であることから $\exp(C_2/T\lambda) \gg 1$ となり,このとき式 (4) は次のように近似することができる.

$$E(\lambda) \simeq C_1 \lambda^{-5} \exp\left(\frac{-C_2}{T\lambda}\right).$$
 (5)

つづいて,波長 λ_1 , λ_2 における分光強度特性 $E(\lambda)$ の比を考える.

$$\frac{E(\lambda_1)}{E(\lambda_2)} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5 \exp\left\{\frac{-C_2}{T}\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)\right\}.$$
(6)

式(6)の両辺について自然対数をとった結果を次に示す.

$$\ln \frac{E(\lambda_1)}{E(\lambda_2)} = \ln \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5 - \frac{C_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right).$$
(7)

式 (7) を用いて $\lambda_{\rm R}$, $\lambda_{\rm G}$, $\lambda_{\rm B}$ の関係を式に表すと次のようになる.

$$\begin{bmatrix} \ln \frac{E(\lambda_{\rm R})}{E(\lambda_{\rm G})} \\ \ln \frac{E(\lambda_{\rm B})}{E(\lambda_{\rm G})} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln \left(\frac{\lambda_{\rm G}}{\lambda_{\rm R}}\right)^5 \\ \ln \left(\frac{\lambda_{\rm G}}{\lambda_{\rm B}}\right)^5 \end{bmatrix} - \frac{C_2}{T} \begin{bmatrix} \frac{1}{\lambda_{\rm R}} - \frac{1}{\lambda_{\rm G}} \\ \frac{1}{\lambda_{\rm B}} - \frac{1}{\lambda_{\rm G}} \end{bmatrix}.$$
(8)

式(8)は,照明光特性の変化を相関色温度Tの変化で表すことが可能なとき,各波長におけるエネルギー比が直線上にプロットされることを示している.式(3),式(8)から次の式が示される.

$$\begin{bmatrix} \ln \frac{p_{\rm R}}{p_{\rm G}} \\ \ln \frac{p_{\rm B}}{p_{\rm G}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln \frac{S(\lambda_{\rm R})}{S(\lambda_{\rm G})} \left(\frac{\lambda_{\rm G}}{\lambda_{\rm R}}\right)^5 \\ \ln \frac{S(\lambda_{\rm B})}{S(\lambda_{\rm G})} \left(\frac{\lambda_{\rm G}}{\lambda_{\rm B}}\right)^5 \end{bmatrix} - \frac{C_2}{T} \begin{bmatrix} \frac{1}{\lambda_{\rm R}} - \frac{1}{\lambda_{\rm G}} \\ \frac{1}{\lambda_{\rm B}} - \frac{1}{\lambda_{\rm G}} \end{bmatrix}.$$
(9)

この式の左辺は, RGB 階調値の各チャネルの比について自然対数をとったものとなって いる.これを特徴量空間として考えると,同一の表面特性を持つ画素群が,照明光特性の変 化を相関色温度 T の逆数を変数とした関数で示される1つの直線上にプロットされる.

3. 提案手法

3.1 概 要

本研究では,2章で述べた先行研究の知見に着想を得た色度遷移モデルと対象物体の表面 が平面に近似できるという前提条件を用いて,照明効果による過分割を抑制し,対象物体の 各表面を領域として分割することを目的とした画像の領域分割手法を提案する.

本研究では,撮影条件が未知の画像を対象とすることから,撮像素子の分光感度特性をデ ルタ関数に近似したときの応答波長を撮影に用いた機器のセンサ感度特性に応じて設定す ることができない.そこで,ある一意のセンサ特性を仮定しパラメータとして設定し,撮 影条件が未知の画像に対して仮想カメラを想定することによって色度の遷移を扱う.ここで は,先行研究^{12),14)}で示されたセンサ特性を参考にし,デルタ関数に近似したときの応答波 長をパラメータとして用いることで色度遷移モデルの設定を行う.提案手法では,この色度 遷移モデルの設定を用いて,与えられた2つの階調値の差異が照明効果によるものか否か を示す指数を算出し,領域分割における距離の重み付けと領域の統合判定を行う.

提案手法では,次に示す3つの手順を用いる.

- (1) 画素群のクラスタリング結果に基づいた画像の領域分割
- (2) 各領域の隣接関係と境界線の特性の算出

(3) 色度遷移モデルを用いた判定と平面近似を用いた統合判定

まず, 色度遷移モデルを用いた画素群のクラスタリング結果を用いて画像の領域分割を行 い,以降の処理の対象となる領域群を作成する.領域群の各領域について画像平面での隣接 関係を調べ,隣接する2領域間で共有する境界線の特性を算出する.つづいて,注目する領 域に隣接する複数の領域のなかから, 色度遷移モデルと平面近似による事前知識を用いて, 注目領域に統合する領域を選定する.領域群のすべての領域における統合候補を選定した後 に実際の統合処理を行い,領域群の更新を行う.そして,処理が収束するまで,領域群の更 新と統合候補の選定を繰り返し行う.

3.2 色度遷移モデルの設定

色度遷移モデルを用いて,2つの階調値が同一の表面特性に基づくものかどうかを判定す る指標を算出する.提案手法では,色度遷移モデルを画素群のクラスタリングにおける距離 関数の重み付けと領域群の統合判定との2つの処理に対して用いる.

まず, sRGB 色空間で記録された RGB 階調値 p_{src} から,次の式に従ってガンマ補正を行った p を算出する.

$$p_{n\,k} = \frac{p_{src\,k}}{p_{src\,max}}, \qquad k = \{\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B}\},\tag{10}$$

$$p_{k} = \begin{cases} \frac{p_{n\,k}}{12.92} & p_{n\,k} < 0.04045 \\ \left(\frac{p_{n\,k} + 0.055}{1.055}\right)^{\gamma} & \textbf{cn以外} \end{cases}, \qquad k = \{\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B}\}.$$
(11)

ここで, $p_{src\ max}$ は記録された bit 長における最大階調値である.また, $\gamma = 2.4$ とする. ガンマ補正を行った 2 つの階調値 p_1 , p_2 が与えられるとき,式 (9) の左辺にあるベクト ルをそれぞれの階調値から算出し, その差 B を求める.

$$\boldsymbol{B}(\boldsymbol{p}_1, \boldsymbol{p}_2) = \begin{bmatrix} \ln \frac{p_{1R}}{p_{1G}} \\ \ln \frac{p_{1B}}{p_{1G}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \ln \frac{p_{2R}}{p_{2G}} \\ \ln \frac{p_{2B}}{p_{2G}} \end{bmatrix}.$$
 (12)

また,式(9)の右辺第2項にあるベクトルを d とする.

$$\boldsymbol{d} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\lambda_{\mathrm{R}}} - \frac{1}{\lambda_{\mathrm{G}}} \\ \frac{1}{\lambda_{\mathrm{B}}} - \frac{1}{\lambda_{\mathrm{G}}} \end{bmatrix}.$$
 (13)

提案手法では,色度の遷移を考慮する際に仮想的なカメラを想定し,ある一意のセンサ 特性を仮定したパラメータとして $\lambda_{\rm R}$, $\lambda_{\rm G}$, $\lambda_{\rm B}$ を設定する.そして, $B \ge d$ の類似度とし て,これら2つのベクトルがなす角の余弦の絶対値 Jを算出する.

$$J(\boldsymbol{p}_1, \boldsymbol{p}_2) = \frac{|\boldsymbol{B}(\boldsymbol{p}_1, \boldsymbol{p}_2) \cdot \boldsymbol{d}|}{|\boldsymbol{B}(\boldsymbol{p}_1, \boldsymbol{p}_2)||\boldsymbol{d}|}.$$
(14)

この J の値を用いて, クラスタリングにおける距離関計算の重み付けと領域の統合判定 を行う.

3.3 画素群のクラスタリングによる領域分割

提案手法では,まず,色度遷移モデルによって重み付けした画素群のクラスタリング結果 をもとに,統合判定処理の対象となる領域群を作成する.この処理で得られた領域群をその

後のプロセスによる統合処理の初期状態として用いる.

画素群のクラスタリングは ISODATA 法⁴⁾ に基づいた手法を用いる. $p \ge CIELAB$ 色 空間における L*a*b* 階調値 $x \ge 0$ 変換を次のように示す.

$$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{X}(\boldsymbol{p}), \quad \boldsymbol{p} = \boldsymbol{P}(\boldsymbol{x}). \tag{15}$$

クラスタリングに用いる距離関数 D は CIELAB 色差 ΔE* をもとに色度遷移モデルに よって重み付けを行ったものを用いる.その式を次に示す.

$$D(x_1, x_2) = A(x_1, x_2) \Delta E^*(x_1, x_2),$$
(16)

$$A(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{x}_2) = 1 - \alpha J(\boldsymbol{P}(\boldsymbol{x}_1), \boldsymbol{P}(\boldsymbol{x}_2)), \qquad (17)$$

$$\Delta E^*(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{x}_2) = \sqrt{\sum_k (x_{1k} - x_{2k})^2}, \quad k = \{ L^*, a^*, b^* \}.$$
(18)

式 (17) で表される A が色度遷移モデルを用いた重み付けを行う関数である. α は重み付けのパラメータであり,ここでは $\alpha = 0.4$ とする.

つづいて, クラスタリングの手順について述べる.まず, パラメータとして与えた初期クラ スタ数 N_{S init} と同数のセントロイド cをランダムに用意する.画像の全画素を $\min_i D(x, c_i)$ となる i 番目のクラスタ S_i に割り当て, クラスタに属する画素数に関するしきい値 θ_N を 用いて,属する画素数 N_i が $N_i < \theta_N$ を満たすクラスタについて削除する.削除したクラ スタに属していた画素群を現存するクラスタに割り当てた後,各クラスタ S_i のセントロイ ド c_i を次の式に従って更新する.

$$c_{ik} = \frac{1}{N_i} \sum_{\boldsymbol{x} \in S_i} x_k, \qquad k = \{ \mathbf{L}^*, \mathbf{a}^*, \mathbf{b}^* \}.$$
(19)

また,クラスタ S_i での平均距離 \overline{D}_i ,画像の全画素についての平均距離 D_{avg} を次に示す式を用いて算出する.

$$\overline{D}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{\boldsymbol{x} \in S_i} D(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{c}_i),$$
(20)

$$D_{\text{avg}} = \frac{1}{N_{\text{all}}} \sum_{i=1}^{N_S} N_i \overline{D}_i.$$
(21)

 N_{all} は画像の全画素数であり、 N_S はクラスタ数である.

ここで,クラスタの分割を行うか判定する.この処理が繰返し回数の最後にあたる場合, クラスタの分割を行わない.N_Sが初期クラスタ数 N_{S init} の 1/2 以下の場合,クラスタの 分割処理へ進む.この処理が偶数回目の繰返しである場合, N_S が初期クラスタ数 $N_{S \text{ init}}$ の2倍以上の場合にはクラスタの分割は行わない.クラスタの分割処理を行う場合には,各クラスタ S_i について,属する画素群の標準偏差 σ_i を次の式に従って算出する.

$$\sigma_{ik} = \sqrt{\frac{1}{N_i} \sum_{\boldsymbol{x} \in S_i} \left\{ A(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{c}_i)(x_k - c_{ik}) \right\}^2}, \qquad k = \{ L^*, a^*, b^* \}.$$
(22)

クラスタ内の分散に関するしきい値 θ_S に対して $\max_k \sigma_{ik} > \theta_S$ であり, $\overline{D}_i > D_{avg}$ か つ $N_i > 2(\theta_N + 1)$ を満たすクラスタ S_i が存在した場合,または, $\max_k \sigma_{ik} > \theta_S$ かつ N_S が初期クラスタ数の 1/2 の場合,次に示す式に従って 2 つのセントロイド c_i^+ , c_i^- を決定 する.

ここで β は $0 < \beta < 1$ の係数であり, $\beta = 1/2$ とした.

つづいて, クラスタの統合を行うか判定する. クラスタの統合は, クラスタ S_i , S_j のセントロイド c_i , c_j 間の距離 $D(c_i, c_j)$ を算出し, クラスタ間の距離に関するしきい値 θ_D との関係が $D(c_i, c_j) < \theta_D$ を満たす組合せについて $D(c_i, c_j)$ が小さい順に行うものとする. あるクラスタの統合以前に他のクラスタとの統合が行われていた場合には, その統合は行わない.

以上の処理を行い,最後の繰返しであれば終了する.そうでない場合には,クラスタへの 画素群の割当て以降の処理を繰り返す.

このクラスタリング結果に基づいて画像の領域分割を行う.まず,画像中の全画素につい て属するクラスタごとにラベル付けを行い,同じラベルを付加され,画像平面上における4 近傍で互いに隣接する画素群を1つの領域として決定する.画像中の全画素について属す る領域を決定することで,画像を領域へと分割する.この領域分割の結果を,統合処理の初 期状態として用いる.

3.4 領域の隣接関係と境界線特性の算出

領域群の統合処理を行うにあたって,領域間での境界線の情報を利用する.そのために, 画像の領域分割を行った結果として得られた領域群について,画像平面上における領域の 隣接関係を算出する.また,隣接する領域との境界線の特性を算出する.提案手法では,対 象物体の表面形状が平面で構成されるという事前知識に基づいて,対象物体の輪郭に対応



Fig. 1 Contour pixels and adjoinig pixels.

する境界線と対象物体の各面の輪郭にあたる境界線が直線に近い特性を示すものと考える. また,照明効果の影響によって生じた,疑似輪郭線にあたる領域の境界線は湾曲するものと 考える.これらの条件を用いて,領域群の隣接関係とその境界線における特性から統合する 領域の選択を行う.

ここでは、領域群の隣接関係と、境界線特性の算出について述べる.まず、画像平面上に おける領域の隣接関係の算出について述べる.ある領域を注目領域として設定した場合の、 注目領域とその輪郭線画素群、および隣接画素群について図1に示す.隣接する他領域と 4近傍で接する注目領域内の画素群を輪郭線画素群とする.また、輪郭線画素群と4近傍で 接し、かつ、隣接する他領域に属する画素群を隣接画素群とする.このとき、注目領域は隣 接画素群の各画素が属している各領域との間で隣接関係にあるとし、注目領域と隣接関係に ある領域群を隣接領域群とする.

つづいて,境界線特性の算出について述べる.注目領域と各隣接領域との境界において, 直線に近似できると判定する部分とそれ以外の部分を算出する.ある注目領域の輪郭線画素 群が画像平面上に構成する列において,ある注目画素の座標とその列の前後にある輪郭線画 素の座標から,その注目画素の座標における直線性を表す指数 L を算出する.輪郭線画素 群の列上の点 q にある注目画素の座標ベクトル a_q とその前後にn 点ずれた境界線画素の座 標ベクトル a_{q-n} と a_{q+n} の関係について n = 3 の場合の例を図 2 に示す. L_q は次の式に よって算出する.

$$\boldsymbol{v}_{q\pm n} = \boldsymbol{a}_{q\pm n} - \boldsymbol{a}_q,\tag{24}$$



Fig. 2 Attention pixel on contour pixels.

$$L_{q} = \frac{1}{N_{M}} \sum_{n \in M} \frac{v_{q+n} \cdot v_{q-n}}{|v_{q+n}| |v_{q-n}|}.$$
(25)

M は有限個の自然数のセットとし、N_M は M に属する自然数の個数とする.ここでは M = $\{3, 5, 9, 13\}$, N_M = 4 と設定する.輪郭線画素群に含まれる全画素について *L* を算出 し,輪郭線の直線性に関するしきい値 θ_L との関係が $L < \theta_L$ となる輪郭線画素の座標に対応する部分を直線に近似できる部分とする.ここでは $\theta_L = -0.95$ とする.

3.5 領域の統合判定と統合処理

提案手法では, 色度遷移モデルと境界線特性を用いて領域群の各領域について隣接領域との統合をすべきか否かの判定を行い, その結果に基づいた統合処理を行う.

まず,注目領域が統合処理の対象になるかを判定する.注目領域の輪郭線画素群の画素数 $N_{\rm C}$,その中で $L < \theta_{\rm L}$ を満たす画素を $N_{\rm CL}$ とする.輪郭線特性に関するしきい値を $\theta_{\rm C}$ として, $N_{\rm CL}/N_{\rm C} > \theta_{\rm C}$ となる注目領域については,画像平面上で直線に近似できる境界線を持つ領域を構成していると見なし,統合処理の対象としない.

次に,隣接領域群における統合判定の優先順位を決定する.ある注目領域について, $L \ge \theta_L$ となる輪郭線画素と4近傍で接する隣接画素を抽出し,属する領域ごとにその画素数を数えあげる.この数が多い隣接領域ほど,注目領域と隣接領域群との境界線で直線と見なすことのできない部分をより多く共有しているとし,この数が多い順に統合判定を行う.

つづいて,注目領域と統合判定の対象となる隣接領域に対して統合判定を行う.注目領域に属する全画素群の平均階調値を算出し,基準 RGB 階調値 p_{srcb} とする.また,判定対象の隣接領域に属する全画素群の平均階調値を算出し,判定 RGB 階調値 p_{srcj} とする.ある領域に含まれる全画素群の階調値の集合 U について,原画像の RGB 階調値 p_{src} から平均階調値 p_{avg} を算出するときには次の式を用いる.

$$p_{\text{avg }k} = \frac{1}{N_U} \sum_{p_{src} \in U} p_{src \ k}, \qquad k = \{\text{R}, \text{G}, \text{B}\}.$$
(26)

ここで, N_U はUに含まれる階調値の個数である.

注目領域と隣接領域からそれぞれ算出した p_{srcb} , p_{srcj} から式 (10), (11) を用いてガンマ補正を行った p_b , p_j を算出し,式(15), (16) を用いて統合判定を行う. 色度遷移モデルに関するしきい値 θ_{ctm} との関係が $D(x_j, x_b) < \theta_{ctm}$ となる隣接領域について統合先と判定し,それ以外の隣接領域は統合先ではないと判定する. $D(x_j, x_b) \ge \theta_{ctm}$ となる場合には,統合判定順序における次の隣接領域を判定対象にして統合判定を行い,統合先と判定される隣接領域を見つけるか,全隣接領域の統合判定を行うまで繰り返す.

統合処理について述べる.全領域に対して統合判定を行った時点で,各領域には0または 1つの統合先が指定されている.ここで, $N_{\rm CL}/N_{\rm C} > \theta_{\rm C}$ となる領域を統合先としている領 域についてはその統合先の指定を解除し,統合先を持たない領域とする.つづいて,統合 先が指定された領域と接続先領域との関係を接続関係として,画像中の全領域間における 接続関係を算出する.そして,この関係によって接続された複数の領域を次時点における1 つの領域として統合を行い,領域分割結果の更新を行う.

統合判定と統合処理による更新は,領域分割結果の変化が収束するまで繰り返し行う.

4. 提案手法による画像の領域分割と比較実験

4.1 実験の設定

提案手法の有効性を確かめるために実験として,ディジタルカメラによって撮影した画像に対して,提案手法を用いた領域分割を行った.今回の実験で用いた画像は Ricoh GR Digital 3 で撮影を行った.また,光源の特性を黒体輻射と近似して考えることのできる曇天の屋外と,複数の照明がある屋内を撮影環境として選択した.曇天の屋外では拡散光を照明としたことで,特定の表面においてだけ鏡面反射が大きくなることを避けている.また,複数の照明がある屋内は,オフィスなどの照明環境を想定した.曇天の屋外と複数の照明が存在する屋内は,ともに画像の領域分割を行う際に問題となる湾曲した疑似輪郭線が生じる照明環境であることから,撮影環境として選択した.sRGB 色空間各 8 bit で記録された画像サイズ縦 2,736 pixel,横 2,736 pixel の画像をバイキュービック法で縦 640 pixel,横 640 pixel に縮小したものを用いた.記録された bit 長における最大階調値は psrc max = 255 とした.

また,提案手法の有効性を示すために CIELAB 色空間を特徴量とした領域分割の結果と,

表 1 ISODATA 法におけるパラメータ Table 1 Parameters of ISODATA.

Parameter	Value
The initial number of clusters: $N_{S \text{ init}}$	60
The threshold of number of pixels: θ_N	100
The threshold about variance of cluster: $\theta_{\rm S}$	2.5×10^{-5}
The threshold about distance of clusters: $\theta_{\rm D}$	3.4
The limit of loop count	20

色度遷移モデルによる距離関数の重み付けと統合処理を行った提案手法の結果と比較した. また,統合プロセスについても,CIELAB 色空間を特徴量として用いた結果と色度遷移モデルを用いた結果について比較を行った.このとき,CIELAB 色空間における距離関数は,式(17)に示すAに代えて定数 $A_0 = 1.0$ を用いて算出した.また,ISODATA 法クラスタリングのパラメータは,提案手法と比較手法ともに予備実験の結果をもとに決定した共通のものを用いた.今回の実験で用いたパラメータを表1に示す.また,セントロイドの初期値をランダムに決定する際に,色空間全体を選択の対象とするのではなく,画像を構成する画素群を対象としてランダムに選択した画素の階調値を用いた.統合の際に用いる色度遷移モデルに関するしきい値 θ_{ctm} は, $\theta_{ctm} = 9.0$ を用いた.

4.2 色度遷移モデルのカメラパラメータ設定

J の値を算出する際に用いるカメラパラメータ $\lambda_{\rm R}$, $\lambda_{\rm G}$, $\lambda_{\rm B}$ の設定について述べる. J は式 (14) で表されるとおり, B と d の 2 つのベクトルから算出される. $\left[\ln(p_{\rm R}/p_{\rm G}), \ln(p_{\rm B}/p_{\rm G})\right]^t$ の2次元ベクトル空間における d の角度 θ_d は,照明効果による色度遷移の方向に対応しており,設定したカメラパラメータの値によって決定される.提案手法では, $\lambda_{\rm R}$, $\lambda_{\rm G}$, $\lambda_{\rm B}$ は,先行研究^{12),14)}で示されたセンサ特性を参考に, $\lambda_{\rm R} = 620$ nm, $\lambda_{\rm G} = 532$ nm, $\lambda_{\rm B} = 450$ nm を仮想的なカメラのパラメータとして設定する.提案手法の設定から算出した θ_d を θ_{d0} とすると, $\theta_{d0} = -37.9 \deg$ となる.

特性が未知のカメラによって撮影された画像を入力とするとき,そこで用いられた特性が 未知のカメラに対して最適なパラメータ $\lambda_{unk R}$, $\lambda_{unk G}$, $\lambda_{unk B}$ と提案手法で設定したパ ラメータ λ_{R} , λ_{G} , λ_{B} との間には差が生じていると考えられ,それぞれのパラメータから 決定される $\theta_{unk d}$ と θ_{d0} についても差が生じているものと考えられる.提案手法において, これらの差がどの程度の範囲に収まる場合に有効であるかを確認するため,これらの差と の値との関係について解析を行う.ここでは, $\lambda_{unk R}$, $\lambda_{unk G}$, $\lambda_{unk B}$ も λ_{R} , λ_{G} , λ_{B} と 同様に可視光波長帯から Red, Green, Blue に近似的に対応付けされた波長帯に基づいて



Fig. 3 Distributions of the $\theta_{unk \ d}$ by changes of camera parameters.

表 2 $\Delta \lambda$ の範囲と max $\Delta \theta_d$ Table 2 The range of $\Delta \lambda$ and max $\Delta \theta_d$.

The range of $\Delta\lambda [\text{nm}]$	The range of $\theta_{unk \ d} \ [deg]$	$\max \Delta \theta_d [\text{deg}]$
5.00	[-39, -33]	5
10.0	[-42, -31]	7
15.0	[-46, -30]	8
20.0	[-49, -29]	11
25.0	[-52, -28]	14

決定されるものとし,その差が一定の範囲内の場合について考えるものとする.

 $\lambda_{\rm R}$, $\lambda_{\rm G}$, $\lambda_{\rm B}$ を基準として, 生じる差 $\Delta\lambda$ の範囲を 5.00 nm, 10.0 nm, 15.0 nm, 20.0 nm, 25.0 nm と設定し, 各設定においてその範囲内を 100 等分した全組合せである 1,000,000 通 リのパラメータから $\theta_{unk\,d}$ を算出して 1 deg ごとに数えあげることで, $\theta_{unk\,d}$ の分布を算出した.その結果を図 3 に示す.また,設定した $\Delta\lambda$ の範囲と,そのときの $\theta_{unk\,d}$ の分布 の範囲, $\theta_{d\,0}$ が属する -38 deg との差の最大値 max $\Delta\theta_d$ の関係を表 2 に示す.表 2 から, $\Delta\lambda$ の範囲を大きくするに従って, $\theta_{unk\,d}$ の分布の範囲が大きくなり, max $\Delta\theta_d$ の値も大 きくなっていることが分かる.

これらの結果を用いて, *J* の値におけるカメラパラメータの差の影響について考える. *J* は *B* と *d* の 2 つのベクトルから算出されるが, *d* の角度の変化 $\Delta \theta_d$ によって生じうる *J* の変化量の大きさ ΔJ の最大値 max ΔJ は,次に示す式によって概算される.

$$\max \Delta J = \cos\left(90 - \frac{\Delta\theta_d}{2}\right) - \cos\left(90 + \frac{\Delta\theta_d}{2}\right) \tag{27}$$

これは, Bとdのなす角度が垂直付近で変化する場合において ΔJ が最大となることによ



Fig. 4 Changes of θ_d by changes of camera parameters.

る.式 (27) に表 2 の max $\Delta \theta_d$ を用いて, $\Delta \lambda$ の範囲に対して想定される max ΔJ を算出す る. $\Delta \lambda$ の範囲が 5.00 nm の場合には max $\Delta J = 0.0872$ となる. $\Delta \lambda$ の範囲が 10.0 nm の場 合には max $\Delta J = 0.122$ となる.また, $\Delta \lambda$ の範囲が 15.0 nm の場合には max $\Delta J = 0.140$ となる. $\Delta \lambda$ の範囲が 20.0 nm の場合には max $\Delta J = 0.191$ となる.また, $\Delta \lambda$ の範囲が 25.0 nm の場合には max $\Delta J = 0.244$ となる. このように, $\Delta \lambda$ の範囲が大きくなるにつれ て,想定される max ΔJ も大きくなることから, $\Delta \lambda$ の範囲を変化させたときの提案手法の 有効性が示される条件から,許容される ΔJ について求めることができる.

つづいて,カメラパラメータ $\lambda_{\rm R}$, $\lambda_{\rm G}$, $\lambda_{\rm B}$ に対する θ_d を図4に示す.図4では, θ_d の 等高線を $-65 \deg$ から $-25 \deg$ までの範囲について5 deg 刻みで示している.ここに示さ れた等高線をみると,同程度の θ_d の値を示す帯状の部分が, $\lambda_{\rm G}$ を大きくするに従って $\lambda_{\rm R}$ と $\lambda_{\rm B}$ についても大きな波長帯へと変化していることが分かる.図4を用いることで,提案 手法の有効性が示される θ_d の範囲から,許容される各カメラパラメータの範囲について確 かめることができる.

 $\lambda_{\rm R}$, $\lambda_{\rm G}$, $\lambda_{\rm B}$ と $\lambda_{unk \,\rm R}$, $\lambda_{unk \,\rm G}$, $\lambda_{unk \,\rm B}$ との差に対する提案手法の有効性が示される範囲を確認するために, θ_d の値を段階的に変化させた提案手法による画像の領域分割を実行し, その結果について比較を行う. このとき設定した θ_d と θ_{d0} の差から提案手法の有効性が示される範囲で許容される $\Delta \theta_d$ の値を確認し,表2,図4 と照らし合わせて提案手法の有効性が示される $\Delta \lambda$ と ΔJ の範囲を求める.

5. 実験の結果と考察

5.1 提案手法による領域分割結果についての考察

提案手法による画像の領域分割結果の一例を図 5 に示す.原画像と,提案手法による画像の領域分割を行った結果である.図 5 の (a), (c) は曇天の屋外で撮影された原画像であ り, (e) は複数の照明がある屋内で撮影された原画像である.図 5 の (b), (d), (f) は提案 手法の結果であり,対象物体ごとの領域分割が実現されている.図 5 の (b) の各ブロック はそれぞれの面が領域に分割されている.図 5 の (d), (f) の緑,黄,青ブロックについて は,画像中に表れている3 面のうち側面に対応する2 面が統合された結果となっている.

つづいて,提案手法の統合処理における領域群の初期状態と最終的に算出された結果の一例を図 6 に示す.図 6 の (a),(d) は曇天の屋外で撮影された原画像であり,(g) は複数の 照明がある屋内で撮影された原画像である.統合処理の初期状態は色度遷移モデルによる重 み付けを組み込んだクラスタリングの結果を用いて作成している.図 6 の (b),(e),(h) に おける領域の輪郭線は,物体の境界線に加えて,物体の各表面についての境界線の一部と疑 似輪郭線で構成されている.そして,図 6 の (c),(f),(i) では,物体の境界線と物体の各 表面についての境界線の一部だけで,領域の輪郭線が構成されている.

また,提案手法では照明環境によらず同一のパラメータを設定しているが,曇天の屋外で 撮影することで照明を黒体輻射と近似でき,さらに鏡面反射が大きくなることを避けた原画 像に対する結果である図5の(b),(d)と図6の(c),(f)だけではなく,複数の照明がある 屋内を照明環境とした原画像に対する結果である図5の(f)と図6の(i)においても,色度 の遷移と境界線の特性を考慮することで,対象物体ごとの領域分割が実現されている.この ことから,同一の色度遷移モデルの設定で照明環境が異なる画像に対しても良好な領域分割 結果を得られることが分かり,提案手法が有効であると考えられる.

5.2 提案手法と比較手法の結果についての考察

図 7 の (a) を原画像として, CIELAB 色空間を特徴量空間とした ISODATA 法クラス タリングを行い, その結果に基づいた領域分割を行うことで図 7 の (b) を作成した.また, 図 7 の (a) を原画像として, 色度遷移モデルと用いて特徴量空間の重み付けした ISODATA 法クラスタリングを行い, その結果に基づいた領域分割を行うことで,図 7 の (c) を作成 した.

図 7 の (b) と (c) を比較すると, (b) は (c) に比べて各表面が多くの領域に分割されている.この違いは, 色度遷移モデルによって特徴量の距離に対して重み付けが行われた結果と



(a) Original image 1. Shot in cloudy daylight.



(c) Original image 2. Shot in cloudy daylight.





(b) The result of the proposed method about (a) image.



(d) The result of the proposed method about (c) image.



(e) Original image 3. Shot in indoor.

(f) The result of the proposed method about (e) image.

図 5 提案手法の結果画像の例 Fig.5 Segmentation results of proposed method.

して生じている.図7の(c)では,同一の表面特性と見なすことのできる2つの特徴量か ら算出される距離を短縮することで,明度について相対的に幅広い分布を持ったクラスタ群 が構成されたと考えられる.



(a) Original image 4. Shot in cloudy daylight.

(d) Original image 5.

Shot in cloudy daylight.



(b) The initial state of the integration process



(e) The initial state of the integration process about (d) image.



(c) The result of the proposal

method about (a) image.

(f) The result of the proposal method about (d) image.



(g) Original image 6. Shot in indoor.



(h) The initial state of the integration process about (g) image.



(i) The result of the proposal method about (g) image.

図 6 統合処理の初期状態と提案手法による結果

Fig. 6 Images of the initial state on integration process and the results of the proposal method.



(a) Original image 7. Shot in cloudy daylight.



(d) The result based on (b) image and using ΔE^* on CIELAB color space.



(b) The segmentation result with ISODATA on CIELAB color space.





(f) The result of the proposed method, based on (c) image and using the color transition model.

(e) The result based on (b)

image and using the color transition model.

図 7 提案手法と比較手法による結果画像

Fig. 7 Segmentation results of the proposal method and the comparative method.

つづいて,図7の(b)を初期状態として2種類の統合プロセスを行った.図7の(d)は, CIELAB 色空間の色差 ΔE^* を用いた統合プロセスの結果である.また,図7の(e)は,色 度遷移モデルを用いた統合プロセスの結果である.この違いも,色度遷移モデルによって特 徴量の距離に対して重み付けが行われた結果として生じている.色度遷移モデルによる距離 の重み付けを行ったことで,図7の(e)の結果では相対的に幅広い明度差を持つ領域の統合 が進んだと考えられる.

提案手法の結果である図7の(f)が良好な分割結果を示す一方で,図7の(e)の画像右 にある赤ブロックの領域に隣接して,床面の一部が未統合のままになっている.図7の(e) と (f) については初期状態が異なるため単純な比較はできないが, クラスタリング結果の違



(a) Original image 8. Shot in cloudy daylight.



(c) $\theta_d = \theta_{d,0} + 15.0 \, \text{deg}$ (d) $\theta_d = \theta_{d,0} + 10.0 \, \text{deg}$





(f) $\theta_d = \theta_{d,0} - 5.0 \deg$





(h) $\theta_d = \theta_{d\,0} - 15.0 \, \text{deg}$

(e) $\theta_d = \theta_{d,0} + 5.0 \, \text{deg}$

(b) $\theta_d = \theta_{d,0}$

(g) $\theta_d = \theta_{d\,0} - 10.0 \, \text{deg}$

図 8 カメラパラメータによる結果画像の変化

Fig. 8 Changes of the segmentation results by changes of camera parameters.

いに基づいた図7の(b)と(c)の各領域の形状と特徴量の違いが,この差が生じた原因の1 つであると考えられる.

このように、比較手法による画像の領域分割では疑似輪郭線が発生する状況においても、 提案手法では、照明効果による色度の遷移を考慮したモデルを用いることによって、疑似輪

郭線を抑制した良好な画像の領域分割を実現することができている.

5.3 設定したカメラパラメータについての考察

 $\lambda_{\rm R} = 620\,{
m nm}$, $\lambda_{\rm G} = 532\,{
m nm}$, $\lambda_{\rm B} = 450\,{
m nm}$ から算出した $heta_{d\,0} = -37.9\,{
m deg}$ を基準に, $\theta_d = \theta_{d\,0} \pm 5.0 \deg$, $\theta_d = \theta_{d\,0} \pm 10.0 \deg$, $\theta_d = \theta_{d\,0} \pm 15.0 \deg$ を満たす $\lambda_{
m R}$, $\lambda_{
m G}$, $\lambda_{
m B}$ の 組を用いて提案手法の結果画像を作成した.その結果の一例を図8に示す.

 $\theta_d = \theta_{d,0}$ による結果である図 8 の (b) と比較して, $\theta_d = \theta_{d,0} \pm 5.0 \deg$ の結果である (e) $\mathcal{E}(f)$, $\theta_d = \theta_{d,0} \pm 10.0 \deg$ の結果である (d) $\mathcal{E}(g)$ では, 各表面の切り分けが良好に行わ れており,領域分割の結果に大きな違いを確認できない.しかし, $\theta_d = \theta_{d0} + 15.0 \deg$ の 結果を示す図 8 の (c) では, 下方緑ブロックの側面と床面の一部が誤統合されており, 疑 (似輪郭線を残していることが確認できる.また, $\theta_d = \theta_{d0} - 15.0 \deg$ の結果を示す図 8 の (h) では, 青ブロックの右側に位置する床面において未統合のまま疑似輪郭線を残している 領域が確認できる.

図8に示した例と同様に,実験を行った全画像において, $\theta_d = \theta_{d0} \ge \theta_d = \theta_{d0} \pm 5.0 \deg$, $\theta_d = \theta_{d,0} \pm 10.0 \deg$ では領域分割の結果に大きな違いを確認できなかった.この結果と表 2 を照らし合わせて $\max \Delta \theta_d$ が 10.0 deg 以内になる $\Delta \lambda$ の範囲を調べると,提案手法による 領域分割の結果に影響を及ぼさない $\Delta\lambda$ の範囲は $15.0\,\mathrm{nm}$ 以内と考えることができる.ま た,図4において考えると, $\theta_d = \theta_{d0} \pm 10.0 \deg$ の範囲に加えて,各カメラパラメータ について $\Delta\lambda$ の範囲が 15.0 nm を満たす $\lambda_{unk R} = \lambda_{R} \pm \Delta\lambda/2$, $\lambda_{unk G} = \lambda_{G} \pm \Delta\lambda/2$, $\lambda_{unk B} = \lambda_{\rm B} \pm \Delta \lambda/2$ において提案手法が有効であると考えられる.また, $\Delta \lambda$ の範囲が 15.0 nm の場合, max $\Delta J = 0.140$ であった.このことから,提案手法は $\Delta J < 0.140$ を満 たすパラメータのカメラで撮影された入力画像に対して有効であると考えることができる.

6. む す び

本論文では,対象物体の表面形状について平面と近似できる環境において,輪郭線形状の 情報と色度遷移のモデルを用いることで、画像を対象物体とその各表面からなる領域群へと 分割する手法について提案した、撮影条件が未知である画像に対して、仮想カメラを想定し たパラメータに基づいた色度遷移モデルの設定を行い、クラスタリングの距離計算におけ る重み付けと、同一表面特性を持つ領域の統合判定に用いた、実験では、カラー画像の領 域分割において,入力画像を撮影したカメラのパラメータと想定したパラメータの差が特 定の値以内に収まるという条件の下で,照明効果の影響による疑似輪郭線の発生を抑制し た良好な領域分割結果が得られることを示した.また,照明環境が異なる画像に対しても, 同一の色度遷移モデルの設定から良好な領域分割結果が得られることを示した.従来の領 域分割手法では疑似輪郭線が発生する画像に対しても,提案手法では色度遷移モデルによ るクラスタリングの距離計算における重み付けと領域の統合判定がそれぞれ有効に機能し, 照明効果の影響による過分割を抑制した画像の領域分割が実現できることを示した.

今後の予定として,拡散反射における色度遷移モデルについて,センサ感度にブロードな 特性を持つ関数を用いてモデルの改良を行いたいと考えている.今回設定を行った色度遷移 モデルにおけるセンサ感度とその中心波長のパラメータについて,複数のカメラを用いた実 験を行い,有効性の範囲を確認したい.ディジタルカメラ内部での非線形変換や画像サイズ 変換に対する有効性の検証も行いたいと考えている.また,今回の鏡面反射をおさえた環境 での実験と複数照明がある環境での実験については,より厳密に鏡面反射や相互反射などを 考慮した環境を準備し,現モデルの検証とアルゴリズムの評価と行い,実験環境とモデル環 境との誤差についての解析を行いたいと考えている.

つづいて,領域の形状や輪郭線が角を構成する特徴点などの情報から,対象物体の各面を より正確に領域分割を行う手法について検討したい.また,対象物体の各面の形状から3次 元形状の推定を行う手法についても検討したいと考えている.仮想カメラを想定した色度遷 移モデルの設定を用いての,キャストシャドウの影響が強い画像などに対してロバストな領 域分割手法についても検討したいと考えている.

参考文献

- Celenk, M.: A color clustering technique for image segmentation, Computer Vision, Graphics and Image Processing, Vol.52, pp.145–170 (1990).
- Coleman, G.B. and Andrews, H.C.: Image segmentation by clustering, *Proc. IEEE*, Vol.67, No.5, pp.773–785 (1979).
- 3) 堀田裕弘,宮原 誠,小谷 孔:均等色空間に基づくカラー画像の領域分割,電子情 報通信学会論文誌, Vol.J74-D-II, No.10, pp.1370-1378 (1991).
- 4) 高橋圭子,安部圭一: ISODATA 法を用いたカラー画像の領域分割,電子情報通信学 会論文誌, Vol.J82-D-II, No.4, pp.751-762 (1999).
- 5) 浜本隆之,半谷精一郎,宮内一洋:照明の影響を受けたカラー画像の領域分割,電子 情報通信学会論文誌, Vol.J79-D-II, No.3, pp.351–357 (1996).
- 6) Wesolkowski, S., Tominaga, S. and Dony, R.D.: Shading and highlight invariant color image segmentation using the MPC algorithm, *SPIE Color Imaging: Device-Independent Color, Color Hardcopy and Graphic Arts VI*, San Jose, CA, USA, Vol.4300, pp.229–240 (2000).
- 7) Macaire, L., Vandenbroucke, N. and Postaire, J.-G.: Color image segmentation

by analysis of subset connectedness and color homogeneity properties, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol.102, pp.105–116 (2006).

- Jiang, C. and Ward, M.: Shadow identification, Proc. CVPR '92, Champaign, IL, USA, pp.606–612 (1992).
- 9) Shor, Y. and Lischinski, D.: The Shadow Meets the Mask: Pyramid-Based Shadow Removal, *Computer Graphics Forum*, Vol.27, No.2, pp.577–586 (2008).
- Levine, M.D. and Bhattacharyya, J.: Removing shadows, *Pattern Recognition Letters*, Vol.26, No.3, pp.251–265 (2005).
- Levine, M.D. and Bhattacharyya, J.: Detecting and removing specularities in facial images, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol.100, No.3, pp.330–356 (2005).
- 12) Finlayson, G.D. and Hordley, S.D.: Color constancy at a pixel, *Journal of the Optical Society of America A*, Vol.18, No.2, pp.253–264 (2001).
- 13) Finlayson, G.D., Hordley, S.D., Lu, C. and Drew, M.S.: On the Removal of Shadows from Images, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.28, pp.59–68 (2006).
- 14) 川上 玲,高松 淳,池内克史:黒体放射の光源制約を用いた色恒常性,画像の認識・ 理解シンポジウム(MIRU2006)論文集ダイジェスト,仙台,pp.309-314 (2006).
- 15) Kawakami, R., Takamatsu, J. and Ikeuchi, K.: Color constancy from blackbody illumination, *Journal of the Optical Society of America A*, Vol.24, No.7, pp.1886– 1893 (2007).

(平成 22 年 6 月 17 日受付)
(平成 22 年 8 月 19 日再受付)
(平成 22 年 9 月 7 日採録)



西原 弘晃

昭和 55 年生.2006 年横浜国立大学大学院環境情報学府博士課程前期修 了.横浜国立大学大学院環境情報学府博士課程後期に在籍中.画像処理, コンピュータビジョン等に関する研究に従事.



矢田 紀子(正会員)

昭和 56 年生.2008 年横浜国立大学大学院環境情報学府博士課程後期修 了.同年同大学大学院環境情報研究院特任教員(研究教員),現在に至る. 視覚情報処理,コンピュータビジョン等に関する研究に従事.博士(工学).



長尾 智晴(正会員)

昭和 34 年生.1985 年東京工業大学大学院博士後期課程中退.同年同大 学工学部附属像情報工学研究院施設助手.1995 年同大学工学部附属像情 報工学研究院施設助教授.2001 年横浜国立大学大学院環境情報研究院教 授,現在に至る.画像処理,進化計算法,神経回路網,マルチエージェン ト,進化経済学等に関する研究に従事.工学博士.