

多重絞りカラー画像の解析†

浅田 尚 紀** 松山 隆 司** 望月 孝 俊**

複数のセンサや複数の撮影条件を用いて得られる多重情報は、対象シーンに関する情報の不足を補うだけでなく情報の質の向上に利用することが可能である。本論文は多重情報の冗長性を利用することによって情報の信頼性の評価が行えることに着目し、絞りを連続的に変化させて撮影した多重絞りカラー画像から信頼性の高い色度、明度情報を高精度に獲得する方法について述べたものである。まずカメラシステムにおける絞りと色ベクトル (R, G, B) の間に成立する関係、すなわち絞りの変化に対して明度は線形に変化し、色度は不変であることを明らかにした。次に有限なダイナミックレンジとノイズが色ベクトルに与える影響について考察し、信頼性の高い色度および明度情報を得るためには、線形性が高く明度が高い色ベクトルを選択する必要があることを示した。この原理に基づいて実験を行い、多重絞りカラー画像から求めた色度および明度情報は、単一絞りカラー画像から得られる情報と比べて安定で信頼性が高いことを実証した。さらに多重絞りカラー画像を利用することによって、照明光の色度が推定できること、およびエッジのボケ幅の変化から物体距離の推定が可能であることを示し、実験によってその可能性を確認した。最後に本手法を一般的な撮影状況や実用性の観点から考察を加え、問題点と今後の課題について述べた。

1. はじめに

画像理解やコンピュータビジョンの研究において、2次元画像から3次元世界の解釈や理解を高精度に行うためには、対象シーンから得られる情報の量と質を高めることが重要である。一般にセンサによって観測される情報はシーン全体の情報のごく一部であり、シーンの解析に必要な情報が十分得られないため、解釈の曖昧さや推論の困難さを生じることが多い。この情報不足を補い解析の信頼性を向上させるための枠組として、われわれは多角的情報の統合という解析・推論方式を提案し、情報の統合アルゴリズムの開発を進めている^{1),2)}。本論文はシーンの多角的観測によって得られた多重情報の持つ冗長性を利用することによって、情報の信頼性評価が可能であることに着目し、信頼性の高い色情報を獲得する方法について述べたものである。

一般に多重情報は情報の相補性と冗長性の二面性を持つと考えられる。シーンが持つ情報の全体集合 Ω に対して、ある条件下でセンサから得られた情報が表す Ω の部分集合を S_i とした時、多重情報は異なる条件または異なるセンサから得られた情報が表す部分集合の和集合 $\cup S_i$ として表現することができる。この和集合において部分集合の重なりのない部分が、互い

に情報の不足を補っていることを示している。

一方、部分集合の共通部分 $\cap S_i$ に着目すると、これはシーンの同一情報を重複して観測したことに相当し、多重情報の冗長性を表している。この重複した情報は情報不足を補うことには利用できないが、情報の信頼性評価に利用することが可能である。すなわちシーンの同じ情報を異なるセンサや異なる条件で観測した時、それらが表す内容は本質的に同一となるはずである。そこでその一致する度合いを調べることにより、得られた情報の信頼性を評価することが可能となる。

本論文で扱う多重絞りカラー画像は、絞り以外のカメラパラメータを固定して同一シーンを多重撮影したものであり、その冗長性は高い。しかし冗長性を利用することにより、カラー情報の信頼性を評価し、信頼性の高い色度と明度を高精度に求めることが可能となる。また本論文では、照明光の色度推定およびエッジのボケに着目した物体距離推定について述べ、最後に問題点および今後の課題について検討を加える。

2. 多重絞りカラー情報の性質

時不変なシーンを対象に、カメラの絞り以外のパラメータを固定し、絞りを連続的に変化させて撮影した複数枚のカラー画像を多重絞りカラー画像と呼ぶ。このような撮影条件を満足する多重絞りカラー画像は、各画像の同じ位置の画素が完全に対応しているので、絞りの変化に対して各画素から得られるカラー情報の組は、シーンの同一点のカラー情報を多重表現したも

† Color Image Analysis by Varying Camera Aperture by NAOKI ASADA, TAKASHI MATSUYAMA and TAKATOSHI MOCHIZUKI (Department of Information Technology, Faculty of Engineering, Okayama University).

** 岡山大学工学部情報工学科

のである。本章では画像としての2次元の広がりには考慮せず、多重絞りによって得られる一連のカラー情報の性質を明らかにする。ただし画像はフォーカスが完全に合って得られるものとして議論を進め、ボケを含む画像については第5章で考察する。

2.1 カメラモデル

光学的撮像装置（カメラシステム）にはさまざまな波長の光が入射し、それらの総和が電気信号として出力される。理想的なカメラシステムにおける絞りの役割を明らかにするために、レンズ、絞り、色フィルタ、光電変換器、A/D変換器を構成要素とするカメラモデルを考える。カメラのレンズへの入射光量（エネルギー） L 、色フィルタの透過特性 F 、光電変換の感度特性 S をそれぞれ光の波長 λ の関数として、 $L(\lambda)$ 、 $F(\lambda)$ 、 $S(\lambda)$ と表すと、光電変換の出力 V はスペクトル積分を用いて、

$$V = \int L(\lambda)F(\lambda)S(\lambda)d\lambda \tag{1}$$

と表現される。この出力を A/D 変換器で量子化することによりデジタル信号が得られる。したがって光電変換および A/D 変換が線形に行われる範囲内では、デジタル信号は入射光量に比例した値が得られる*

絞りの開閉はレンズの開口面積を変化させることに相当し、光電変換器に達する光量を調節することができる。カメラの絞り値はレンズの口径に対する開口径の比の逆数を表すので、絞り値 k における開口面積比は k^{-2} となる。絞り値 $k=1$ における入射光量を $L_0(\lambda)$ とすると、光電変換の対象になる有効光量 $L(\lambda)$ は任意の波長に対して、

$$L(\lambda) = k^{-2}L_0(\lambda) \tag{2}$$

と表される。

2.2 RGB 色空間

色フィルタとして、赤 (R)、緑 (G)、青 (B) の波長帯に透過特性を持つフィルタを使用することにより、カメラへの入射光はすべて RGB の3次元空間中の色ベクトルとして表現される。(1)式において、色フィルタの透過特性 $F(\lambda)$ をそれぞれ $F_R(\lambda)$ 、 $F_G(\lambda)$ 、 $F_B(\lambda)$ に置き換えることにより、出力として RGB の3成分が得られる。例えば絞り値 k と R 成分の関係は、

$$R = k^{-2} \int L_0(\lambda)F_R(\lambda)S(\lambda)d\lambda \tag{3}$$

* 通常のテレビカメラでは γ 補正が行われるので、入射光量に対して非線形の出力が得られる。しかし、本論文では後述するように $\gamma=1$ として、線形関係が保たれるようにしている。

と表される。したがって、RGB 各成分の出力はそれぞれ絞りの開口面積比 k^{-2} に対して線形関係が保たれている。

以下、本論文では RGB 表色系を使用し、任意の色ベクトル C は赤緑青の3成分を用いて (R, G, B) と表す。そして色ベクトルの明度 T と色度 (r, g, b) をそれぞれ次のように定義する。

$$T = R + G + B \tag{4}$$

$$r = \frac{R}{T}, \quad g = \frac{G}{T}, \quad b = \frac{B}{T} \tag{5}$$

ここで (R, G, B) の各成分は絞りの開口面積比に比例するから、絞りの開口面積比が k^{-2} の時の色ベクトルを $(k^{-2}R_0, k^{-2}G_0, k^{-2}B_0)$ と表す。ここで、 (R_0, G_0, B_0) は絞り値が $k=1$ の時の色ベクトルを表す。この時、絞り値 k における明度 T_k は、

$$T_k = k^{-2}(R_0 + G_0 + B_0) \tag{6}$$

となり、やはり絞りの開口面積比と線形な関係であることが分かる。一方、色度は $T_0 = R_0 + G_0 + B_0$ と置くと、

$$r_k = \frac{R_0}{T_0}, \quad g_k = \frac{G_0}{T_0}, \quad b_k = \frac{B_0}{T_0} \tag{7}$$

となり絞りに対して不変量であることが分かる。

実際のカメラシステムにおいて、光電変換および A/D 変換が線形に行われるのは、それらが持つ有限なダイナミックレンジの範囲内であり、その上限を上回る入力および下限を下回る入力に対しては、線形な変換は保証されない。RGB のバランス調節が十分に行われたカメラシステムでは、RGB それぞれのダイナミックレンジの上限と下限は等しくなるので、色ベクトルの存在する空間は図1に示す立方体の中に制限されることになる。

ある絞りにおいて得られた色ベクトルが、この RGB 立方体の内部に存在するものとする。絞りを開

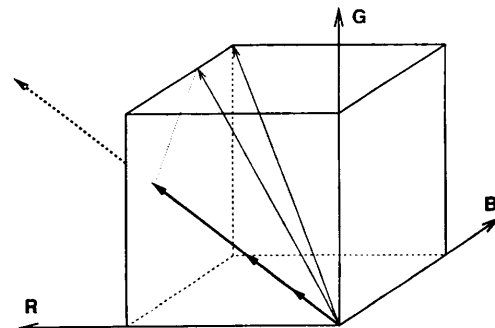


図1 制限された RGB 色空間と色ベクトル
Fig. 1 Color vectors in cubic RGB color space.

いて入射光量が増加した時、線形な関係が保たれている範囲内では色ベクトルの方向、すなわち色度に変化は生じない。さらに絞りを開いて入射光量を増加し、RGBの少なくとも一つがダイナミックレンジの上限に達した時、色ベクトルは図1の立方体の上限の壁、そして辺に沿って移動し、最終的にはRGBの上限である頂点(白色)に到達することになる。このようにRGBのいずれか一つでもダイナミックレンジの上限に達した色ベクトルは、もはやシーンの正しい情報を表現しているとは考えられず、その明度と色度の信頼性は低い。ダイナミックレンジの下限についても同様の扱いが必要である。

2.3 ノイズの影響

カメラモデルにおけるノイズの性質を、入射光量と相関がなく加法的であるとする。ノイズの影響を受けた色ベクトル \mathbf{C} (R, G, B) は、ノイズのない理想的な色ベクトル \mathbf{C}_I (R_I, G_I, B_I) と RGB の各信号に対するノイズの色ベクトル \mathbf{C}_N (R_N, G_N, B_N) の和 $\mathbf{C} = \mathbf{C}_I + \mathbf{C}_N$ として表される。

この時、ノイズの影響を受けた明度 T は、

$$T = T_I + R_N + G_N + B_N \quad (8)$$

と表される。ただし、 $T_I = R_I + G_I + B_I$ である。ここで信号成分は T_I 、ノイズ成分は $R_N + G_N + B_N$ だから信号対ノイズ比 (S/N) は、

$$S/N = \frac{T_I}{R_N + G_N + B_N} \quad (9)$$

と表される。ノイズが入射光量に関係なくほぼ一定であるとする、明度 T_I が大きくなるほど S/N が良くなるのが分かる。したがって、RGB がいずれもダイナミックレンジの限界に達しない範囲で、できるだけ絞りの開口面積を大きくすることでノイズの影響を少なくすることができる。

またノイズが色度に与える影響は、色ベクトルの方向の変化として考えることができる。ノイズを含む色ベクトル \mathbf{C} と理想的な色ベクトル \mathbf{C}_I のなす角を θ とすると、

$$\cos \theta = \frac{\mathbf{C} \cdot \mathbf{C}_I}{|\mathbf{C}| |\mathbf{C}_I|} = \frac{|\mathbf{C}_I|^2 + \mathbf{C}_I \cdot \mathbf{C}_N}{|\mathbf{C}_I + \mathbf{C}_N| |\mathbf{C}_I|} \quad (10)$$

と表される。ここでノイズは入射光量に関係なくほぼ一定であると考えているので、絞りの開口面積を十分大きくし $|\mathbf{C}_I| \gg |\mathbf{C}_N|$ となるようにすると、(10)式の右辺は1に近づき、したがって \mathbf{C} と \mathbf{C}_I のなす角 θ は0に近づく。すなわちダイナミックレンジの範囲内で絞りの開口面積をできるだけ大きくすることによ

ってノイズの影響を受けた色ベクトルの色度は、ノイズの影響のない真の色ベクトルの色度に近づけることが可能である。

2.4 色ベクトルの信頼性評価

これまでの議論から色ベクトルの信頼性の評価には、絞りの変化に対するRGB各成分の線形性および色度の不変性を利用することが可能であることが分かる。

絞りを全開時 k_1 から順次閉じて k_n まで n 段階変化させて得た色ベクトル \mathbf{C}_i を (R_i, G_i, B_i) と表す。ただし、 $i=1, \dots, n$ である。この時、色ベクトルの線形性は異なる絞り k_i と k_j における色ベクトル \mathbf{C}_i と \mathbf{C}_j を用いて、

$$\mathbf{C}_i = \frac{k_i^{-2}}{k_j^{-2}} \mathbf{C}_j \quad (11)$$

と表すことができる。ただし、 $i=1, \dots, n-1, j=i, \dots, n$ とする。この色ベクトルのRGB各成分の比

$$R_{ij} = \frac{R_i}{R_j}, \quad G_{ij} = \frac{G_i}{G_j}, \quad B_{ij} = \frac{B_i}{B_j} \quad (12)$$

は、ダイナミックレンジの範囲内ではいずれも絞りの開口面積比 k_i^{-2}/k_j^{-2} を表すので、互いに等しくなければならない。また分子の方が絞り開口面積が大きいため、その比の値は1より大きくななければならない。そこで、絞りの変化に対する色ベクトルの線形性の評価値として、

$$E_{ij} = (R_{ij} - G_{ij})^2 + (G_{ij} - B_{ij})^2 + (B_{ij} - R_{ij})^2 \quad (13)$$

を用いる^{*}。この評価値 E_{ij} は、色ベクトルのRGB各成分の比の値 R_{ij}, G_{ij}, B_{ij} がすべて等しい時に最小値0となる。したがって、評価値 E_{ij} が0に近いほど色ベクトルが線形に変化していると判断できる。ただしRGB各成分の比の少なくとも一つの値が1以下の場合には、評価値 E_{ij} を求めるまでもなくその色ベクトルはダイナミックレンジの上限または下限に達していると判断する必要がある。

一方、ノイズの影響を少なくするためにはできるだけ絞りの開口面積が大きくなり、すなわち明度が高い色ベクトルを選択する必要がある。以上、色ベクトルの信頼性評価のアルゴリズムをまとめると次のようになる。

* 色ベクトル \mathbf{C}_i と \mathbf{C}_j のなす角 θ に着目すると、

$$\cos \theta = \frac{\mathbf{C}_i \cdot \mathbf{C}_j}{|\mathbf{C}_i| |\mathbf{C}_j|}$$

を線形性の評価値(色度の一致度)とすることができる。しかし $\theta=0$ 付近では $\cos \theta$ がほとんど変化しないため、色ベクトルの微妙な変化を評価する目的には適していない。

1. 絞りの開口面積の大きい色ベクトルから順に調べる.
2. (12)式を用いて色ベクトル C_i と C_{i+1} の RGB 各成分の比を求める.
3. RGB 各成分の比の少なくとも一つが1以下の場合は, 色ベクトル C_i がダイナミックレンジの上限に達していると判断して除外する.
4. 残った色ベクトルの中で明度が最大の色ベクトルを C_m とする.
5. 色ベクトル C_m, C_{m+1}, C_{m+2} から線形性評価値 $E_{m, m+1}, E_{m+1, m+2}, E_{m, m+2}$ を求め, 最小となる色ベクトルの組を線形色ベクトル対とする.

この線形色ベクトル対はノイズの影響が最も少なく, しかも絞りの変化に対する線形性が最も高い色ベクトルの組である.

3. 信頼性の高い色度情報と明度情報の獲得

3.1 多重絞りカラー画像データ

RGB 3 板式 CCD テレビカメラ (SONY DXC-325) を用いてシーンを撮影し, 画像処理装置 (nexus 600) の A/D 変換器により RGB 各成分を 8 ビットに量子化した. 1 枚の画像は 512×480 画素で構成されている. 入射光量に比例した出力が得られるようにカメラの γ 値を 1 に設定した*. 実験は室内で行い, 照明光源として OHP (ELMO HP-3500) を使用した**.

5 色の帯状色用紙を上からオレンジ, 緑, 薄い紫, 薄い青, 茶の順に並べた対象物を作成し, 同色領域の左右で明暗差が生じるように照明を設定した. そしてカメラは, 照明光に対して対象物の明領域表面で鏡面反射の位置関係になるように配置した. カメラの焦点距離を 30 mm, フォーカスを 1.6 m に固定し, 絞り値を 1.4, 2, 2.8, 4, 5.6, 8, 11, 16 の 8 段階変更し, RGB 3 枚を 1 組として 8 組のカラー画像を得た. 絞り値 2.8, 5.6, 11 の画像を図 2 に示す.

3.2 線形色ベクトルの選択

多重絞りカラー画像の (150, 450) に位置する画素 (明領域の茶) における絞りに対する色ベクトルの RGB 各成分の変化を図 3 に示す. また, 連続する絞り間での色ベクトルの RGB 各成分の比の変化と線形性評価値の変化を図 4 に示す.

絞り値 1.4 から 2.8 まで R 成分がダイナミックレンジの上限で飽和し, 絞り値 1.4/2, 2/2.8 における R 成分の比が $R_{12} = R_{23} = 1$ となっている. したがって色ベクトル C_1, C_2 を, ダイナミックレンジの上限で飽和した色ベクトルとして除外する. 次に色ベクトル C_3, C_4, C_5 を用いて, 絞り値 2/2.8, 2.8/4, 2/4 における線形性評価値 E_{34}, E_{45}, E_{35} を求める. この場合は E_{45} が最も評価値が小さくなるので, 色ベクトル C_4, C_5 を線形色ベクトル対と判断する. 線形性評価値は, 絞り値 5.6 以降も小さく色ベクトルの線形性が高いことを示しているが, 絞り値 11, 16 間でやや増加している. これは色ベクトルの明度が低下したことにより相対的にノイズの影響が増大し, 線形性が低下したものと考えられる.

3.3 色度画像

多重絞り画像の各画素について線形色ベクトル対を求め, その平均色度をその画素における色度とする. こうして得られた色度画像 (多重絞り色度画像) を図

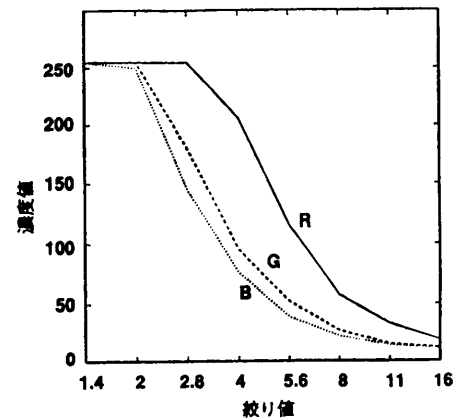


図 3 絞りに対する RGB 値の変化
Fig. 3 RGB values of a color vector with different iris sizes.

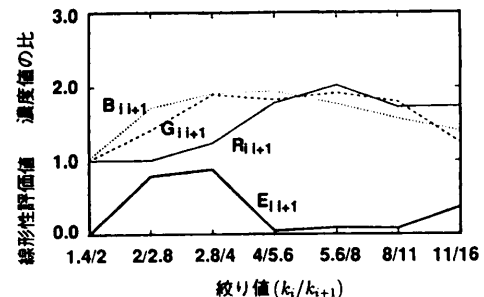


図 4 連続する絞り間の RGB 値の比と線形性評価値の変化
Fig. 4 Ratios and linearity of RGB values in Fig. 3 along successive iris sizes.

* このほかに, カメラに内蔵されている輪郭強調機能を使用しないように設定し, 出力 RGB 信号の位相を調節することで 3 板 CCD の位置ずれを補正した.

** OHP 光を用いてカメラの RGB バランスを調整したので, OHP 光が白色光として観測されることになる.

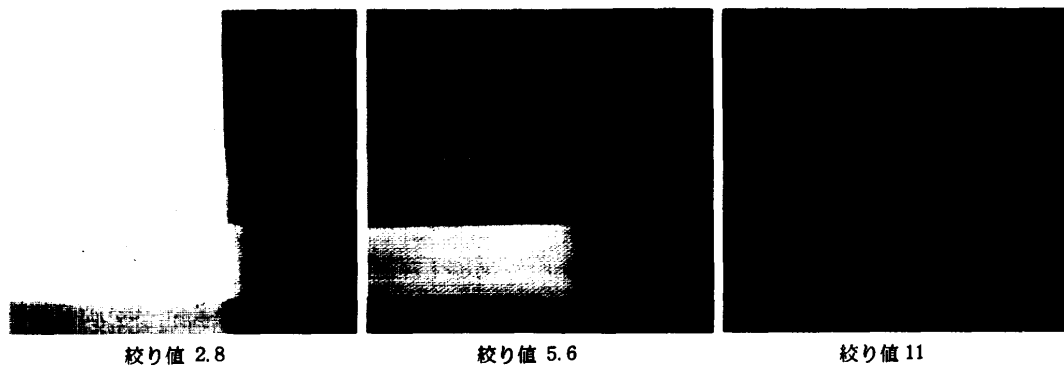


図 2 単一絞りカラー画像
Fig. 2 Color images with different iris sizes.

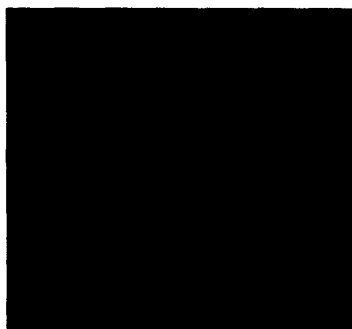


図 5 多重絞り色度画像
Fig. 5 Chromaticity image obtained from a set of color images with different iris sizes.

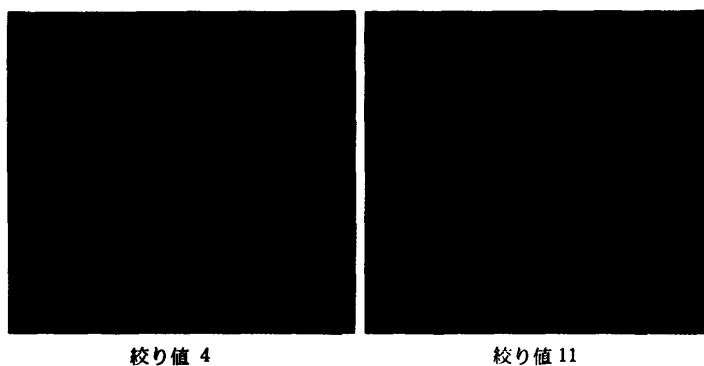


図 11 ボケを含む単一絞り色度画像
Fig. 11 Chromaticity images of defocused objects with different iris sizes.

5 に示す*。

3.3.1 色度情報の安定性評価

色度情報の安定性を評価するために各色領域における色度の分散を求め、多重絞り色度画像と単一絞り色度画像の比較を行った。5色の明領域、暗領域それぞれに対して、大きさ130×40の矩形領域を設定し、求めた色度分散の明領域、暗領域それぞれの平均値を比較した結果を図6に示す**。ただし色度の分散は、各色領域における色度ベクトルの角度差の分散として求めた。

明領域、暗領域のいずれにおいても多重絞り色度画像の分散は、単一絞り色度画像より小さな値が得られている。これは線形性の高い色ベクトルを選択することにより安定性の高い色度情報が得られることを示している。また単一絞り色度画像において分散が最小となる絞り値が、明領域では5.6、暗領域では2.8と異なっている。これは明度の異なる領域の色度を安定に求めるためには単一絞りでは限界があり、多重絞りカラー画像を利用する必要があることを示している。単一絞り色度画像では絞り値が大きくなる（明度が低くなる）ほど分散が大きくなっているが、これは2.3節で述べたようにノイズの影響によって色度が不安定になるからである。なお暗領域の単一絞り色度画像の分散が、絞り値1.4と2において絞り値2.8より大きくなっているのは、暗領域の対象物表面に凹凸があり、照明光の表面反射によって部分的に色ベクトルが飽和

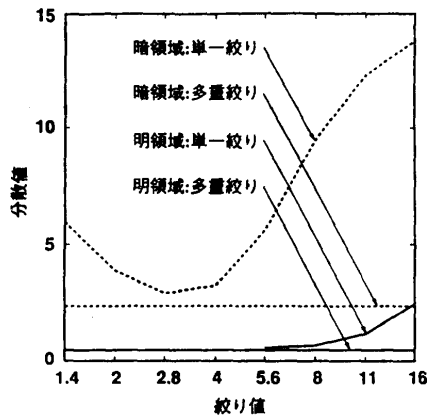


図6 色度の分散

Fig. 6 Comparison of variance of chromaticity between Fig. 2 and Fig. 5.

* 色度画像は明度を均一にしているため、図2とは色が異なるような印象を受ける。

** 単一絞り色度画像の明領域では、絞り値1.4から4まで色ベクトルがダイナミックレンジの上限で飽和し、誤った色度を得られているので図から除外した。

し誤った色度を得られているためである(図2参照)。

3.3.2 色度情報の信頼性評価

色度情報の信頼性を評価するために、色度エッジの検出能を用いた。色度の差はRGB空間での色度ベクトルのなす角とし、ある画素とその8近傍の画素との色度ベクトルのなす角の最大値を求め、それを色度エッジ強度とした。多重絞り色度画像と単一絞り色度画像から求めた色度エッジの検出精度を比較するためROC曲線(Receiver Operating Characteristic curves)を使用した。

多重絞り色度画像と絞り値4, 5.6, 8, 11, 16における単一絞り色度画像から求めた色度エッジ検出のROC曲線を図7に示す。横軸はエッジではない画素を誤ってエッジとして検出した比率FPF(False Positive Fraction)、縦軸はエッジの画素を正しくエッジとして検出した比率TPF(True Positive Fraction)を表す。このROC曲線は、それぞれの色度画像のエッジ画像を、あるしきい値で2値化した時のFPFとTPFを求め、しきい値をパラメータとして変化した時の点(FPF, TPF)が描く軌跡を表している*。したがって曲線が左上に寄るほどエッジの検出精度が高いこと、すなわち色度情報の信頼性の高いことを示している。

多重絞り色度画像はいずれの単一絞り色度画像と比較してもROC曲線が左上に描かれ、色度エッジの検

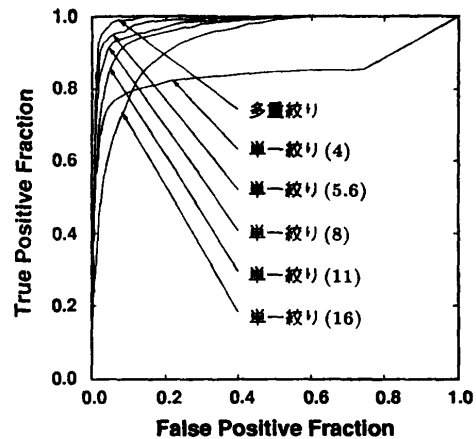


図7 色度エッジ検出のROC曲線

Fig. 7 ROC curves of chromaticity edge detection.

* エッジではない画素を正しくエッジではないとした比率をTNF(True Negative Fraction)、エッジの画素を誤ってエッジでないとした比率FNFを(False Negative Fraction)とすると、 $TPF + FNF = 1$, $FPF + TNF = 1$

の関係があるので、(TNF, FNF), (TNF, TPF), (FPF, FNF)を用いても同様のROC曲線を描くことができる。

出能が高いことを示している。絞り値 4 の ROC 曲線の TPF が十分上昇しないのは、明領域で色ベクトルが飽和した部分の色度が一定となり、その部分の色度エッジが全く検出されないためである*。一方、絞り値 8 以上の ROC 曲線がやや低下しているのは、ノイズの影響で色度エッジの誤検出が増加したためと考えられる。

3.4 明度画像

多重絞りカラー画像において線形性が高いと判断された色ベクトルは、色度情報はもちろん明度情報についても信頼性が高い。したがって各画素において求められた線形色ベクトル対を利用することにより、カメラのダイナミックレンジの制限を越えた明度画像を作成することが可能となる。

まず異なる絞り間の明度変化率を定義する。ある画素の線形色ベクトル対が、絞り値 k_i, k_j で求められたとする。ただし $k_i < k_j$ とする。この時の絞り値 k_i, k_j 間の明度変化率 T_{ij} を、それぞれの色ベクトルの明度 T_i と T_j を用いて

$$T_{ij} = \frac{T_i}{T_j} \quad (14)$$

とする。これを絞り値 k_i, k_j 間で線形であると判断された色ベクトルすべてについて求め、その平均を絞り値 k_i, k_j 間の平均明度変化率 \bar{T}_{ij} とする。この平均明度変化率 \bar{T}_{ij} を用いることにより、絞り値 k_i ではダイナミックレンジの上限を越えて誤った色ベクトルを持つ画素の真の明度 T_i^* を、絞り値 k_j における線形色ベクトルの明度 T_j から、

$$T_i^* = \bar{T}_{ij} \times T_j \quad (15)$$

として推定することができる。この明度推定を、絞りを開いた画像において誤った明度情報を持つすべての画素に対して行い、明度画像（多重絞り明度画像）を作成する。

このようにして求めた多重絞り明度画像は、絞りを開いた画像においてダイナミックレンジの上限を越えたために失われた明度情報を、絞りを閉じた画像の明度情報によって補ったものである。しかも絞りを開いた画像を基準にして多重絞り明度画像を作成しているので、ダイナミックレンジの範囲内の明度差情報を完全に保存したものとなっている。したがって全体としてカメラシステムのダイナミックレンジを最も有効に利用し、しかも物理的なダイナミックレンジの制限を

越えた明度情報が得られたことになる。

3.4.1 明度情報の信頼性評価

明度情報の信頼性を評価するために、明度エッジの検出能を用いた。Sobel オペレータにより、多重絞り明度画像と単一絞り明度画像の明度エッジを求め、その検出精度を ROC 曲線を描いて比較した。

多重絞り明度画像と絞り値 4, 5.6, 8, 11, 16 における単一絞り明度画像から求めた明度エッジ検出の ROC 曲線を図 8 に示す。横軸、縦軸および曲線の描き方は色度の場合と同様である。色度エッジの検出能の ROC 曲線とほぼ同じ傾向を示し、多重絞り色度画像の ROC 曲線が最も左上に描かれ、明度エッジの検出能が高いことを示している。絞り値 4 の ROC 曲線の TPF が十分上昇しないのは、色度の場合と同様に色ベクトルが飽和した部分の明度が一定となり、明度エッジが全く検出されないためである*。また絞り値 8 以上の ROC 曲線が低下しているのは、ノイズの影響で明度エッジの誤検出が増加したためと考えられる。

4. 照明光の色度推定

多重絞り色度画像（図 5）において対象物上の同色領域からは、照明の明暗に関係なく同じ色度が得られなければならない。しかし同色領域の明領域と暗領域では、わずかに異なる色度が得られている。この微妙な色度の違いは、明領域と暗領域の照明光強度が異なることに起因するものと考えられる。

照明光が物体からの反射光におよぼす影響を定式

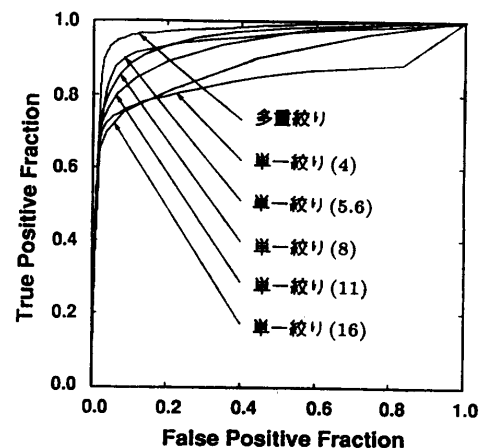


図 8 明度エッジ検出の ROC 曲線

Fig. 8 ROC curves of brightness edge detection.

* 絞り値 1.4, 2, 2.8 の単一絞り色度画像では、色ベクトルが飽和する範囲が広がるので ROC 曲線はさらに低く描かれる。

* 絞り 1.4, 2, 2.8 値の単一絞り明度画像では、色ベクトルが飽和する範囲が広がるので ROC 曲線はさらに低く描かれる。

化した反射モデルとして, Dichromatic Reflection Model が提案されている³⁾. これは観測される物体からの反射光が, 光の波長に依存せず照明光と物体色の線形結合で表現されると考えたものである. すなわち λ を波長として, 物体からの反射光 $L(\lambda)$ は, 照明光が物体の表面で直接反射した表面反射光 $L_s(\lambda)$ と, 物体の中で反射し物体色の性質を表す物体内反射光 $L_b(\lambda)$ を用いて,

$$L(\lambda) = m_s L_s(\lambda) + m_b L_b(\lambda) \quad (16)$$

と表される. ここで m_s と m_b は, 照明光方向と反射光方向そして物体表面法線方向の幾何学的関係で決まる強度係数である. 物体からの反射光 $L(\lambda)$, 表面反射光 $L_s(\lambda)$, そして物体内反射光 $L_b(\lambda)$ は, (3)式を用いてそれぞれ RGB 色空間内の色ベクトルとして表現できる. すなわち反射光色ベクトル C は, 表面反射光色ベクトル C_s と物体内反射光色ベクトル C_b が張る平面上に存在することになる. この関係は RGB 色空間内の平面 $R+G+B=1$ が表す色度三角形上では, C_s の色度と C_b の色度を結んだ線分上に C の色度が存在することを表している.

実験に使用した画像データは, 3.1 節で述べたように明領域で照明光が最も強く表面反射するように対象物の角度を設定している. したがって明領域の表面反射強度係数 m_s は, 暗領域のそれよりも大きくなると考えられる. この表面反射強度係数の大きさの違いは, 観測される光の色度を変化させることになる. すなわち明領域の色度は暗領域の色度に比べて, 照明光の色度寄りに観測される. この関係は色度三角形上では, 暗領域の色度と明領域の色度を結ぶ直線上に照明光の色度が存在することを示している. ところで異なる色領域でも同じ照明光で表面反射が生じている限り, 表面反射色ベクトルの色度は同じになるので, この直線は 1 点で交わり, その点が照明光の色度を表すことになる.

多重絞り色度画像の各色領域の明領域と暗領域の色度を用いて直線の交点を求めた結果を図 9 に示す. 明領域と暗領域の色度差が大きいので, 延長した直線の交点に誤差が生じているが, 各直線はほぼ三角形中央の点に向かって伸びている. この中央点 (重心) は白色を表し, 照明光を白色としてカメラの RGB バランスを調節したと合致する. なお照明光とは異なる色度の光源を用いてカメラの RGB バランスを調節した場合, 照明光の色度は三角形の中央点 (白色) からずれた位置に交点が見られることを確認してい

る.

5. エッジのボケを用いた物体距離推定

前章までの議論では得られた多重絞りカラー画像は, 対象物にフォーカスが完全に合っているものとして解析を行った. しかしフォーカスの合っていない対象物を撮影すると画像上にボケを生じ, そのボケの程度はカメラの絞りによって変化することが知られている. この効果は被写体深度と呼ばれ, 絞り値を大きく, すなわちレンズの開口面積を小さくするほどボケが少なくなる性質がある.

Pentland⁴⁾ や Subbarao⁵⁾ は絞り値と画像上のボケの関係を利用して, カメラから対象物までの距離を求めることが可能であることを示している. これらの研究では点ひろがり関数を仮定してボケを解析しているが, 本論文ではボケの性質を幾何光学的に明らかにし, 絞りに対するボケ幅の変化から距離が推定できることを示す. またこの関係を多重絞りカラー画像に適用し, 色度エッジのボケ (色度の変化) から対象物の相対的な距離が求められることを実験的に示す.

5.1 絞り値とボケ幅の関係

図 10 において, レンズの焦点距離を f , レンズか

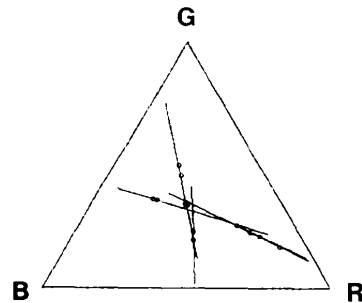


図 9 照明光の色度推定
Fig. 9 Estimation of chromaticity of light.

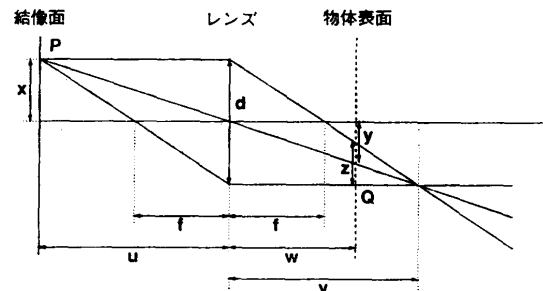


図 10 画像にボケを生じる幾何光学的カメラモデル
Fig. 10 Camera model based on geometrical optics with defocused object.

ら物体までの距離を v , その物体にフォーカスを合わせた時のレンズから結像面までの距離を u とすると、レンズの公式から、 $f^{-1} = u^{-1} + v^{-1}$ が成立する。焦点距離 f とレンズから結像面までの距離 u が一定の時、レンズからの距離 w ($< v$) にある物体は結像面上でボケを生じる。このボケた結像面上の1点Pは、レンズおよび絞りの形状を円形と考えると、物体上の円形領域Qからの光の総和で表される。点Pの光軸からの変位を x とし、物体上の円形領域の中心点の光軸からの変位を y , 円形領域の直径を z とした時、次の関係が成立する。

$$y = \frac{w}{u}x, \quad z = d \left(1 - \frac{w(u-f)}{uf} \right) \quad (17)$$

ただし、 d はレンズの直径を表す。

ここで結像面と平行な物体平面上に光軸と直交する理想的な直線エッジを考える。結像面におけるエッジのボケは、物体上の円形領域Qがエッジを横切り、エッジの両側からの光が混合して結像することによって生じる。したがって物体上のエッジの両側の色領域が色ベクトル C_1, C_2 で表される時、結像面上においてボケたエッジ上の任意の色ベクトル C_e は、 C_1 と C_2 の線形結合で表される。

$$C_e = q_1 C_1 + q_2 C_2 \quad (18)$$

ここで色ベクトルの係数 q_1 と q_2 は、物体上の円形領域Qがエッジによって C_1 側と C_2 側に分割された時の2領域の面積比で与えられる。そして結像面におけるエッジのボケ幅 δ は円形領域Qがエッジを横切る範囲で与えられ、(17)式から、

$$\delta = d \left(\frac{u}{w} - \frac{u-f}{f} \right) \quad (19)$$

となる。

ここでフォーカスを無限大に合わせると、 $v \rightarrow \infty$, したがって $u \rightarrow f$ だから、

$$\delta = \frac{df}{w} \quad (20)$$

となり、ボケ幅 δ はレンズの直径 d に比例し、レンズから物体までの距離 w に反比例する。ここで絞り値 k はレンズの直径 d に対する開口径の比の逆数で表されるので、絞り値 $k=1$ の時のレンズ径を d_0 とすると、 $d = d_0 k^{-1}$ と表される。したがって(20)式は、

$$\delta = \frac{d_0 f}{w} k^{-1} \quad (21)$$

となり、ボケ幅 δ は絞り値の逆数 k^{-1} に比例することになる。すなわち絞り値の逆数に対するボケ幅の変化

は、原点を通る直線で表せ、その直線の傾き $d_0 f / w$ の逆数はカメラから対象物までの距離 w に比例する。

5.2 色度エッジのボケ幅変化を用いた相対的距離の推定

以上の考察からボケたエッジ上の色ベクトルの変化を調べ、ボケ幅を求めることによって、カメラから対象物までの距離を推定できることが分かる。ところで(18)式から、ボケたエッジ上の色ベクトル C_e の明度と色度は、絞りの変化によるボケ幅の変化にともない C_1 と C_2 が表す明度と色度の間で変化する。ところが明度は絞りの変化にともなうボケ幅の変化のほかに、入射光量の増減によっても変化する。そこで本論文では入射光量の変化に対して本来不変である色度が、色度エッジ付近では絞りによって変化することを用いてボケ幅を求めた。

4色の帯状色画用紙を上から黄、薄い紫、薄い青、赤の順に平面上に並べた対象物 O_1 をカメラから約 2.8 m の距離に、4色の帯状色画用紙を上から薄い紫、赤、緑、黄の順に平面上に並べた対象物 O_2 をカメラから約 2.0 m の距離に置き、画面内で対象物 O_1 が左半分に、対象物 O_2 が右半分に収まるように撮影した。カメラの焦点距離を 70 mm, フォーカスを ∞ に固定し、絞り値を 2.0 から 16 まで半目盛ずつ 13 段階変更して 13 組のカラー画像を得た。絞り値が 4 と 11 の画像から作成した単一絞り色度画像を図 11 に示す。

対象物上の色度エッジは O_1, O_2 とともに、絞り値が大きくなるに従ってボケが減少している。このボケた色度エッジ付近における色度変化は、各色領域の安定色度からの色度差角として求めた。ここで安定色度としては、多重絞りカラー画像から作成した多重絞り色度画像の色度エッジから十分離れた領域の色度を用いた。色度エッジに直交する方向の直線に沿った色度変化を調べ、エッジの片側の領域の安定色度から反対側の安定色度に変化するまでの画素数を求め、エッジのボケ幅とした。各絞り値に対するボケ幅を求めた結果を図 12 に示す。ただし横軸は絞り値の逆数を、縦軸はボケ幅の画素数を表している。○はカメラからの距離が遠い対象物 O_1 上の色度エッジのボケ幅の変化を、×は距離が近い対象物 O_2 上の色度エッジのボケ幅の変化を表し、図中の2本の直線は、それぞれのデータから求めた原点を通る回帰直線を表す。2本の回帰直線の傾きの逆数は 3.0, 2.2 となり、カメラから対象物までの距離の比は 15:11 と求められる。こ

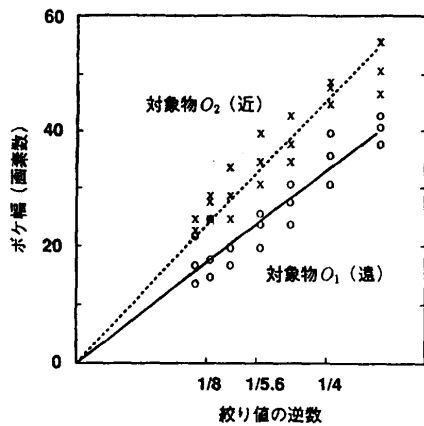


図 12 絞りに対する色度エッジのボケ幅の変化
Fig. 12 Width of blurred chromaticity edges
with different iris sizes.

これはそれぞれの対象物までの実際の距離の比 7:5 に非常に近い値である。

6. ま と め

本論文では、多重絞りカラー画像における情報の冗長性を利用することによって、絞りの変化に対する色ベクトルの線形性を評価し、信頼性の高い色度と明度情報が得られることを明らかにした。以下では、一般的な撮影状況や実用性の観点から本論文の内容を吟味する。

第2章では、フォーカスが完全に合った画像が得られるものとして色ベクトルの線形性評価を考え、第3章でその有効性を検証した。この評価方法は、ボケが含まれていても色ベクトルが一様な領域については適用でき、信頼性の高い色度、明度情報を得ることが可能である。しかしフォーカスが合っていない場合は、色ベクトルの異なる領域のエッジ付近では第5章で述べたように、絞りの変化にともなうボケ幅の変化によって色度も明度も変化し、線形性の評価値は低下する。また絞りを閉じるほどボケ幅が減少するので、明度が低くなるほど色度に関しては安定する。これは明度が高いほどノイズに対して安定な情報が得られることと相反する関係になる。しかしこのことは逆に、色ベクトルが飽和していないにもかかわらず絞りの変化に対して色ベクトルの変化の線形性が低い場合、その付近にボケを含んだエッジの存在が推測できることになる。

第4章では、照明光の表面反射の強度差によって生じた同色領域の色度差から照明光の色度が推定できることを示した。この色度推定の精度を高めるためには

微妙な色度差を正確に求める必要があり、そのためには安定で信頼性の高い色度が得られる多重絞りカラー画像の利用が必要不可欠である。本手法を適用するためには、物体色や物体表面の性質が同一である領域間で色度を比較する必要であるが、例えば対象物上で照明光の表面反射に強度差が生じるような画像では、このような条件を満たす領域が存在し、照明光の色度を推定することが可能である。

第5章では、絞りと色度エッジのボケ幅の関係をを用いることによって、対象物の相対的距離を推定することが可能であることを述べた。ただしボケ幅を安定に求めるためには、エッジの両側が色度一定の領域で構成されていることが望ましい。したがってこのような理想的なステップエッジが存在すると見なせる場合には本手法を適用することが可能である。また(21)式を用いるとカメラパラメータがすべて既知であればカメラから対象物までの絶対距離が求められるが、本手法で距離を高精度に求めることは困難であると考えられる。むしろ位置関係の概略を知るための情報、または他の距離計測法の補助的な情報として用いるべきである。

本論文で提案した解析手法は、絞りの変化が重要で絞りの値そのものは必要ないこと、そして絞りの変化に対する色ベクトルの線形性評価を各画素独立に行えることなど既存のカメラシステムを用いて簡単に実行できる実用性の高い手法である。本論文では静止した対象を前提として議論を進めたが、さらに応用範囲を広げるためには、動きのあるシーンに対しても適用できるような高速絞り制御機構の開発やハードウェアによる処理の高速化などが必要と考えられる。センサレベル、すなわちカメラシステム内で処理を高速に実行することが可能となれば、自然環境下における移動ロボットなどの高信頼性視覚センサとしても利用することが期待できる。

参 考 文 献

- 1) 松山隆司: 画像理解のための多角的情報の統合, 第19回画像工学コンファレンス, pp. 97-102 (1988).
- 2) 松山隆司: 多角的視覚情報の統合, 電子情報通信学会誌, Vol. 74, No. 4, pp. 349-353 (1991).
- 3) Klinker, G. J., Shafer, S. A. and Kanade, T.: The Measurement of Highlights in Color Images, *Int. J. Comput. Vision*, Vol. 2, No. 1, pp. 7-32 (1988).
- 4) Pentland, A. P.: A New Sense for Depth of

Field, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 9, No. 4, pp. 523-531 (1987).

- 5) Subbarao, M. and Gurumoorthy, N.: Depth Recovery from Blurred Edges, *Proc. IEEE on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 498-503 (1988).

(平成3年4月19日受付)

(平成3年7月8日採録)



浅田 尚紀 (正会員)

1957年生。1979年京都大学工学部電気工学科卒業。1981年同大学院修士課程修了。1984年同大学院博士課程修了。同年福井医科大学助手。1987年京都大学工学部オートメーション研究施設助手。1990年岡山大学工学部情報工学科助教授。現在に至る。1989年7月から1年間シカゴ大学カートロスマン研究所客員研究員。工学博士。コンピュータビジョン、画像理解、医療診断支援の研究に従事。電子情報通信学会、日本ME学会、医用画像工学会各会員。



松山 隆司 (正会員)

昭和51年京都大学大学院修士課程修了。京都大学工学部助手、東北大学工学部助教授を経て、平成元年より岡山大学工学部教授。京都大学工学博士。昭和57~59年米国メリーランド大学客員研究員。画像理解、人工知能、並列処理の研究に従事。本学会創立20周年記念論文賞、平成2年人工知能学会論文賞受賞。著書「SIGMA: A Knowledge Based Aerial Image Understanding System」など。



望月 孝俊

1967年生。1991年岡山大学工学部情報工学科卒業。同年ミノルタカメラ(株)入社。電子情報通信学会会員。