



Title	カラー画像の機能的入力方式に関する研究
Author(s)	森脇, 耕介
Citation	大阪大学, 1998, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3155646
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

カラー画像の
機能的入力方式に関する研究

平成10年12月

森 脇 耕 介

カラー画像の
機能的入力方式に関する研究

森 脇 耕 介

平成 10 年 12 月

序 文

人間が視覚において行っている認識機能を、計算機によって同等あるいはそれ以上の機能として実現することを目的とする研究、いわゆるコンピュータビジョンにおいては、既に基礎理論から応用技術まで膨大な成果の報告がなされ、さまざまな分野で多くが実用に供されている。しかし、視覚的情報の効果的な利用という、極基本的な観点に立ち返ると、未だ多くの課題が存在していることも確かである。

コンピュータビジョンで用いる画像データには、人間の視覚と同様、認識に用いられる一次的情報として明暗と色彩がある。目的とする認識内容にも依存するものの、データ量や処理時間の制約もあって、最近までは多くの場合明暗情報が主であり、色彩情報は必要に応じて用いられるという印象があった。しかし、近年の画像入力機器やコンピュータ、記憶装置などの目覚ましい進歩により、もはや画像はカラーであることが一般的になりつつあり、色彩情報を積極的に利用した画像認識の新たな研究も数多く報告されるようになってきている。

コンピュータビジョンにおける画像の認識処理過程は、センサによるデータ収集（入力）と、電子回路およびコンピュータに実装したデータ処理（認識）の、大きく2つに分けて考えることができる。コンピュータビジョン研究の興味は、大多数が後者の認識手法の開発に注がれてきた。そして前者、すなわち画像の入力に関しては、撮像装置および周辺の画像認識処理環境を制約する、重要な暗黙の了解が存在してきた。それはまず実際には必ずしも保証されない理想的な入力特性が期待されていることである。もう一つは、ほとんどRGB形式の画像データあるいは、それから誘導することで得られる画像データを扱うということである。

本論文では、色彩情報の効果的利用法を中心に、画像認識結果に高精度化を図る試みの中で、特に画像データの入力方法の工夫に関する研究について述べている。

まず、RGBカラー画像の入力に対する、画像データの処理過程の簡素化および処理結果に対する信頼性の向上を目的とした入力機能の改善に関して、大きく二つの入力手法を提案している。

第一は、カラーカメラに付加した多段階の露光時間制御機能を利用した色彩精度を重視したカラー画像の入力手法である。撮像素子から信号伝送系に至る画像データの歪み要因を補正する手法を示すとともに、色彩がその明度に依存して入力過程で受ける雑音の影響を明らかにし、画素毎に露光時間が異なる色彩情報の精度向上を図ったカラー画像入力方式として提案している。得られたカラー画像に対して領域分割処理を主体とするシーンの認識処理を行い、処理過程の簡素化と処理結果の信頼性の向上を検証している。このとき微妙な色彩の判別も可能であり、シーン中の物体の相互反射に関係する領域の検

出が可能であることも示している。

第二は複数画像の合成による広ダイナミックレンジカラー画像の入力手法である。対象物の材質判別を目的として、対象物表面の反射性状を2色性反射モデルに基づく光学モデルに基づいて検討した結果、RGBカラー画像の画素集合がRGB色空間中に展開する分布状態を解析することで、材質判別が可能であると考察した。そして、そのために必要な、通常より広ダイナミックレンジの画素値を有するRGBカラー画像を、カメラレンズの絞りを变化させて撮像した複数の画像から統合して再構成するという画像入力方法を提示している。

以上の研究で検討対象としたRGB形式のカラー画像に比較し、より豊富な色彩情報を持つと考えられる、分光分布そのもののサンプリング値を画素値とする離散分光画像の入力についても、最後に述べている。そしてその重要な応用として、コンピュータビジョンにおいてRGBカラー画像を用いる限り実現困難であった人間の視覚の色恒常性が、離散分光画像を用いることで可能になることを、多色物体の認識を通じて示している。

目次

第1章 総論	1
1.1 視覚とコンピュータビジョン	1
1.2 色彩の有用性	1
1.3 カラー画像認識	2
1.3.1 画像入力	2
1.3.2 色彩情報の誤差	2
1.3.3 誤差要因への画像入力法による対処	3
1.4 分光情報の利用	4
1.4.1 分光画像	4
1.4.2 分光画像による認識	4
1.4.3 色恒常性	5
1.5 本研究の意義と構成	5
第2章 効率的露光制御によるカラー画像入力方式	7
2.1 効率的露光制御カラー画像入力	9
2.1.1 入力方法の特徴	9
2.1.2 露光時間制御	9
2.1.3 画像データの表現	12
2.2 効率的露光制御カラー画像入力システム	12
2.2.1 装置構成	12
2.2.2 可変電子シャッター機能を利用した露光制御	13
2.2.3 対入射光量の線形補正	14
2.2.4 補正効果	17
2.3 効率的露光制御アルゴリズム	17
2.4 高速化の検討	19
2.5 実験1－効率的露光制御によるカラー画像入力実験	21
2.5.1 シーンの入力	21

2.5.2 色彩情報の精度	23
2.5.3 色彩による領域分割処理への適用	26
2.5.4 高速化と色彩精度の関係	27
2.6 実験 2 ー効率的露光制御カラー画像の分割手法	29
2.6.1 対象シーンと仮定	29
2.6.2 色彩に関するクラスタ分布	31
2.6.3 平滑化前処理 (Vector Median Filtering)	34
2.6.4 領域分割アルゴリズム	36
2.6.4.1 色度に関する考察	38
2.6.4.2 明度に関する考察	38
2.6.4.3 アルゴリズム	38
2.6.5 領域分割実験	43
2.7 まとめ	46
第 3 章 材質の判別のための広ダイナミックレンジカラー画像入力	49
3.1 2 色性反射モデル (Dichromatic Reflection Model)	50
3.2 材質感のカラー反射モデル	51
3.3 相互反射のモデル	54
3.4 広ダイナミックレンジ RGB カラー画像入力	57
3.5 実験装置	57
3.6 実験	57
3.6.1 処理対象画像入力	58
3.6.2 領域分割	60
3.6.3 材質感の判別・相互反射の検出	65
3.7 まとめ	65
第 4 章 離散分光画像の入力と照明不変な多色物体検出への応用	67
4.1 離散分光画像	68
4.1.1 画像入力モデル	68
4.1.2 離散分光画像の性質	70
4.2 多色物体検出への適用	72

4.2.1 正規化画素値ヒストグラム	72
4.2.2 Histogram Backprojection	73
4.2.3 Histogram Intersection	73
4.2.4 検出方針	75
4.2.5 検出アルゴリズム	75
4.3 実験	76
4.3.1 離散分光画像の撮像系	76
4.3.2 色不変性の検証	79
4.3.3 多色物体の検出	81
4.4 まとめ	85
 第5章 結 論	 87
 参考文献	 91

第1章 総論

人間は外界との接触の中で外界からの情報を得て行動や思考を決定している。外界との関わり合いにおいて存在を確認しているとも言ってもよい。外界からいわゆる五感を通じて取り入れる全情報の約87%は視覚から得られると言われる[Yamanaka 97]ほど、視覚のもつ認識機能は膨大かつ重要であって、それだけにその情報処理過程は複雑である。コンピュータビジョンは、この複雑な人間の視覚がもつ認識機能をコンピュータ上で実現しようという研究分野である。コンピュータビジョンの認識の対象は、人間が直接肉眼では見ることはできないような高高度、宇宙空間、顕微鏡下、高速変化現象など、およそ2次元的な光の分布情報などを包括し、また、物体の位置、寸法の2次元のさらには3次元的な数値計測、また紫外赤外などの不可視光に至るまで、もはや視覚機能の模倣を超えた領域にまでも拡張されているのが現状である。過去から現在に至るまで、撮像システム、センサシステム、データ処理システム、コンピュータ、そしてソフトウェアと、基礎から応用に至る膨大な研究の蓄積がなされてきている。しかしながら、視覚機能の複雑さによってか、多くの課題において未だに決定的とされる技術が出ていないとされている。

1.1 視覚とコンピュータビジョン

外界の情景は、波長分布を有する光のエネルギーとして、眼球の光学系を通過して網膜上に達し、電気的刺激の2次元の強度分布情報に変換される。異なる波長感度分布を持つ複数の異なる波長感度特性をもつ視細胞によって色彩や形状などの初期の信号が誘起され、脳に伝達されて本能や経験・記憶を参照して色彩や形状、そしてさらにその意味や概念といった高次の認識に至る。

これらの視覚における認識過程は、カメラによる画像データの入力と、その画像データに対するソフトウェアやハードウェアによる処理という、コンピュータビジョンにおける過程と表面上は対比することができる。前者に比べれば、後者の過程がより複雑で高次元の仕事をしている言えよう。現在までなされてきた膨大なコンピュータビジョンの研究においても、画像データの処理方法に関するものが非常に多い。

1.2 色彩の有用性

色彩情報をもつ画像、カラー画像を用いた画像認識は、最近非常に盛んになってきた研究対象である。これまでにコンピュータビジョンに色彩が積極的に利用されることが少なかった理由はいくつか考えら

れるが、画像認識の基礎的な用途には、エッジ抽出などを基本とした、対象物の形状や寸法の計測手段としての役割が求められ、色彩情報を用いるまでもなかったこと、また色彩情報の精度に関して信頼に足る計測値を得ることが難しいこと、コンピュータの処理性能や記憶装置の容量がデータ量の大きなカラー画像の処理には不十分であったこと、さらに色彩は心理的な感覚であり、対象物の位置や形状のように、数値として求め得る情報とは性質が若干異なる、などの理由が考えられる。

一方、官能検査のように、人間の視覚における微妙な色彩感覚を利用した技術は、自動化が望まれながらも、その実現が非常に困難な課題とされている。服飾、インテリアなど、色彩がその価値の決定に大きく影響する分野は多い。人間の嗜好も関係するので、客観的な評価方法が望まれ、工学への感性の導入として、コンピュータビジョンにおいても有望な課題となっている。関連する研究として、中石らは、カラー画像を用いた真珠の微妙な色分類について報告している[Nakaishi 87]。長田らは色彩の元の情報とも言うべき分光強度分布情報を利用した画像を用いて、同じく真珠の品質評価を報告している[Nagata 92]。

現在では、撮像機器の進歩やコンピュータの計算能力の増大など、コンピュータビジョンにおいて色彩を扱う環境は十分整っており、今後色彩を扱った画像の認識方法に関する研究はますます重要になるであろう。

1.3 カラー画像認識

1.3.1 画像入力

一般にコンピュータビジョンで用いられるカラー画像データは、RGB 3原色の強度を画素値に持つ。3原色成分は、ある色光の、視覚における3原色の等色関数の各刺激値に対応している。カラーカメラは、近似的に等色関数に等しい分光透過率を持つ色フィルタを撮像素子に組み付け、RGB各成分の強度を電気信号として出力する。カラー映像そのものの伝送や表示に関する信号の変換方式や規格が存在するが、本論文が扱う範疇には含めない。カメラの映像信号出力をアナログ／デジタル変換して、縦横方向およびRGB値の強度がデジタル値化されたものをカラー画像データとする。画素値は、通常の用途では各成分8ビットのデジタル値が当てられる。縦横のサイズは640×480前後で、ほとんどのコンピュータビジョンに関する報告ではこの形式の画像データが用いられる。撮像機器の規格の制限もあるが、画素値のビット数や縦横のサイズは、コンピュータビジョンにおいて、アルゴリズム開発とは独立に考えられる。このことは、画像入力より処理アルゴリズムの研究に偏重していることの一因であろう。

1.3.2 色彩情報の誤差

カラー画像データを用いた認識処理では、画像のRGB値計測条件に関して、暗黙の条件の設定がなさ

れていると言ってよい。色彩情報の正確さが要求される場合には、入射光強度とRGB各成分値の線形関係が成立し、明度の異なる無彩色に対してRGB値が等しい（ホワイトバランス）という条件が成立しなければならない。極端な明暗差、あるいは極端に鮮やかな色彩を含むシーンを画像として入力しようとする場合には、信号強度が撮像素子や電子回路のダイナミックレンジから外れることもある。またデジタル信号では、離散値特有の量子化誤差も発生する。

RGBカラー画像を用いた認識処理では、画像を多次元ベクトルデータである画素値の集合とみなし、RGB空間における画素集合の分布状態に着目することがよく行われる。代表例として2色性モデルの提案と、それを前提としたRGB空間中の画素集合分布のクラスタリングを用いた領域分割の報告[Klinker 88]があるが、上述のRGB計測値の誤差要因はモデルの適用の妥当性に影響することは十分考えられる。

1.3.3 誤差要因への画像入力法による対処

カラー画像による認識処理を行おうとする際に、認識の信頼性を追求するならば、結果に悪影響を及ぼすと考えられる前項の誤差要因をあらかじめ検討し回避する必要があるが、この問題点に積極的に取り組んだ研究例はほとんど見あたらない。

本論文の第3章でも述べる材質の認識に関する研究では、RGB空間中での画素集合の分布状態の解析を行うにあたり、低輝度から高輝度までの画素値を、一つのRGB空間中に同時に展開しなければならず、RGBカラーカメラによる通常の撮像では不可能な広ダイナミックレンジの画像データを入力する必要がある。そのために、画像入力法として、複数のレンズ絞り値で露光条件を変えて撮像した画像から、最も良好な条件を持つ画素値を選択し、1枚の画像として再構成する手法を利用した。これにより材質判別が可能であることを示した。

同様の入力法として、浅田らは、松山らの画像入力における多重情報の統合という考え[Matsuyama 91]に基づき、一つのシーンに対して異なるレンズの絞りで撮像した複数のRGBカラー画像から、色彩情報の評価を最良にする画素を選択統合する「多重画像の統合」を提案している[Asada 91]。レンズ絞り機構の機械的な制御により入力に時間を要すること、またレンズ絞りの変化が被写界深度の変化を伴うため、画像の統合に際し不整合が生じる怖れがあることなど、「多重絞り」によるRGBカラー画像入力法に関して、基本的な指針を述べている。

本論文の第2章で述べる「効率的露光制御によるカラー画像入力方式」は、特に色彩情報を精度よく入力することを目的に、露光条件の変化をCCD撮像素子に組み込まれた可変電子シャッター機能の多段階制御により実現している。レンズ絞り制御の場合には避けられない被写界深度の変化を伴わず、また制御可能な露光時間段階数が格段に多いために非常に色彩精度のよいカラー画像を得ることができる。なお、カラー画像には関連していないが、可変電子シャッター機能の制御に関連して、山田らは、広ダイナ

ミックスレンジのモノクロ画像の実時間入力システム[Yamada95]を報告している。

1.4 分光情報の利用

1.4.1 分光画像

RGBカラー画像は、その成分は3原色の強度情報をもつ。入射光の分光強度分布と、RGB 3種類の色フィルタそれぞれの分光透過率との波長積分値であるから、本来入射光が持っていた分光強度分布のプロファイルは失われる。言い換えれば、色彩に関するいくばくかの情報の損失は避けられない。

分光強度分布情報を利用した画像の代表的な利用例はリモートセンシングである。高高度の人工衛星から地表をさまざまな波長帯域で撮像した画像データを解析することにより、環境計測、資源探査のための情報などが得られる、重要な技術となっている。しかし、分光強度分布を画素値にもつ画像一分光画像一が、日常生活と同程度のスケールにおいて実用に供された例はほとんど見あらず、およそ次のような報告がなされているのみである。

眞鍋らは、分光輝度計の計測点を機械的に2次元走査することにより、画素が可視光域(380～760nm)で77点の分光値を持つスペクトル画像を入力し、RGBカラー画像では不可能な微妙な色彩の識別が可能であることを示した [Manabe 96]。同様に、中野らは、主に色彩の計測屋微妙な識別を目的として、10枚の帯域透過フィルタを時系列に自動交換して撮像する、マルチスペクトルカメラシステムを製作し、色彩の識別例を示している [Nakano 96]。

上の例とは異なる原理に基づいて分光画像を入力するフーリエ分光映像法がある。入射光を2分岐し、光路差を変化させながら計測した干渉強度分布を逆フーリエ変換することにより、もとの入射光の分光強度分布が得られる。面センサを受光素子として用いることによって、分光画像を入力することができる [Inoue 91],[Hirai 94]。

これらの画像入力法では、スポットの機械的2次元走査[Manabe 96]やフィルタの時系列的な交換 [Nakano 96]、干渉計の光路長の高精度制御などにより入力に長時間を要するほか、通常の撮像デバイス程度の空間分解能を得ることも現時点では難しい [Inoue 91],[Hirai 94]など、課題は多く残る。

1.4.2 分光画像による認識

分光画像は、RGBカラー画像に比べて波長の取捨選択の自由度が向上することから、主に微妙な色の差異を強調する用途が示されている。RGBの計測値には表れにくい微妙な分光反射率の相違を、波長域の制限や多次元画素値データの統計分析によって有意な差として強調している。また、このような信号上でのコントラストの強調により、従来の画像認識の基本的処理である、エッジ検出や領域分割が可能であることも示されている [Manabe 96]。

分光反射率は、対象物の表面の材質や表面の反射性状に密接に関連しているため、分光画像に対する領域分割などの基本的な画像処理手法を適用した場合でも、高次の認識結果を直接に表現した結果を得られる可能性がある。

1.4.3 色恒常性

色彩の知覚に際して、人間の視覚では照明条件によってその色刺激が変化してもその見え方に変化を感知させないような心理的生理的效果が働く。これを視覚の色恒常性(color constancy)という。コンピュータビジョンにおいては、照明光源の分光強度分布が変化したときに、色彩に関する画素の計測値が変化することに対応し、照明光の変化前後でも、それが同じ色であるとコンピュータが認識できるかどうか、という課題として扱われる。

RGBカラー画像を用いて、この機能を実現する試みは幾つか報告されており、大別して照明光源の分光強度分布および対象物表面の分光反射率を推定するものと、色彩の計測値に関して局所的空間において成立する条件を利用して色物体を認識するものがある。

前者に関連した研究では、大田らの、照明光源の変化の前後で、ある色彩を有する対象物が対応付けられていることを前提として、照明光源の分光強度分布と対象物の分光反射率をRGBカラー画像を用いて推定する方法[Ohta 93]と、富永の6バンドの帯域透過フィルタによる撮像装置を用いた研究[Tominaga 95]などが報告されている。後者では、そもそもRGBカラー画像では成立せず、後で述べる分光情報を用いたときのみ成立する性質を前提としているものの、照明光源の分光反射率が変化した場合に対応した物体認識の可能性を示唆している[Finlayson 95],[Funt 95],[Slater 96]。

1.5 本研究の意義と構成

本研究は、コンピュータビジョンを、画像の入力と画像データ処理による認識の過程として捉え、認識過程の負荷の軽減と認識結果の信頼度の向上を同時に意識した点に特徴を持つ。色彩情報を利用した画像認識の信頼性向上という観点から、特に画像入力法に関する工夫を主体とした研究成果を、得られた画像データの利用例と共にまとめたものである。視覚における色知覚の機能を応用システムとして実現する上でのアプローチを示しているものとする。

本論文は全5章の構成である。各章、以下の内容を述べている。

まず第2章で、RGBカラー画像と分光画像に関する「効率的露光制御」による画像入力方式の提案とその応用例を示している。一般的な撮像機器では、ある対象シーンに対し、同一の露光条件での撮像が行われる。極端な明暗が一つのシーン中に存在するような、画像上での情報が欠落の恐れがあるような場合に対応するため、画素毎に露光条件を効率的に変化させられる撮像機能をCCDカラーカメラの可変

電子シャッター機能のソフトウェア制御によって半自動画像入力システムとして実現した。実際の画像入力実験によって色彩に関して高精度な情報が得られること、そして、領域分割処理が通常のカラ画像に比較して、容易に行えることを示す。また、色彩が高精度であることを利用した、相互反射に起因する色彩偏移領域の抽出実験についても述べ、画像入力法の改良がシーンの認識結果の高精度化に効果的であることを示す。

第3章では、カラー画像において、物体表面の材質に依存した反射性状と、その画像領域の画素値のRGB空間中での分布形状特徴が、2色性反射モデル [Klinker 88] によって記述できることを利用した、対象物の材質の認識手法と、それを可能にするための広ダイナミックレンジカラー画像の入力について述べる。金属表面反射の高輝度信号も含む広いダイナミックレンジのシーンを撮像するために、レンズ絞りを变化させて撮像した複数のカラー画像の統合による方法と、得られる画像データを用いた対象物の材質の識別結果を示す。

第4章では、分光情報を利用した画像データの入力形態としての、「離散分光画像」の入力法とその物体認識への応用について述べている。前述したように、分光画像では画素あたりの次元が大きく、一つのシーンに対するデータ量は膨大なものとなる。分光強度分布のプロファイルの反映と、データ量の抑制の両立を図っている。RGBカラー画像の撮像では、RGB各分光感度分布が波長に対してある程度の幅を持っているため、入射光の分光強度分布と波長に関して積分してしまうことで分光強度分布のディテールが失われる。一方、分光強度分布は一般になめらかな分布を持つものと仮定するならば、必ずしも密な分光強度のデータは必要でないと考えられる。すなわち、分光強度分布をデルタ関数状の分光感度分布の複数のセンサによる、数点の波長における分光強度分布の計測値を用いれば、少なくともそれらの波長での分光分布プロファイルは保存することができる。これを連続的な分光強度分布を想起する分光画像とは区別する意味で、離散分光画像と呼ぶことにする。離散分光画像は、高感度CCDカメラに近似的にデルタ関数状と見なした非常に狭い透過波長帯域を有する干渉フィルタを複数枚時系列交換しすることで入力した。また同章では、離散分光画像の応用として、色恒常性の実現に関連する、照明不変な多色物体の認識実験についても述べている。照明光源の分光強度分布の推定が不要である点で、従来の研究に比べ、より自然な色恒常性の機能を実現している。

第5章で、本研究の成果と幾つかの将来的課題について総括する。

第2章 効率的露光制御によるカラー画像入力方式

色彩情報を利用するカラー画像処理に関する報告においては、原画像の色彩情報の正確さについて触れられることはほとんどない。画像データの処理手法については多くの研究がなされている一方で、撮像装置の入力特性、SN比、量子化ノイズ、信号伝送系の非線形性など、画像の質に影響する要因についてはあまり考慮されることはなく、表色系変換や処理アルゴリズムは入力情報が理想的条件下で得られたものであることが暗黙の前提となっている。

色彩情報の精度が処理結果に大きく影響すると思われるケースはいくつか考えられる。例えば、領域分割処理で、クラスタリングのための特徴空間にRGBあるいはその線形変換によるHSI, YIQ, また非線形変換による $L^*u^*v^*$, $L^*a^*b^*$ 等の色空間を利用するもの[Ohta 78],[Hotta 91],[Tominaga 90], さらに対象物の位置関係の認識のため物体表面での材質感や相互反射を認識する試み[Hashimoto 91],[Tominaga 92]などがある。これらの手法で信頼できる結果を得るためには、当然ながら「正しい」また「精度の良い」カラー画像が入力されていることが前提となる。

カラー画像は、一般にカラーカメラやイメージスキャナなどの撮像装置から得た、各画素がRGB 3チャンネルのベクトル値をもつ形式で与えられる。RGB値が「正しく」入力される保証がなければ、上述のいかなる線形・非線形の色変換や認識処理もその価値は低いものとなる。各画素のRGBベクトルは、大きさが明度情報を、方向すなわちRGBの比が色彩情報をそれぞれ表現する。本章では「正しい」入力を、撮像時の照明の強さや露光の変化があっても、RGBの比が変化せず、無彩色の対象物に対してはRGBの値が常に等しい入力、と定義する。このためにはRGB各チャンネル入力値の対入射光量特性が線形かつ等しくなければならない。

「正しい」入力に加え、「精度の良い」入力も必要である。一般に低光量での入力は撮像素子や信号伝送系での電氣的ノイズのためSN比が低下し、RGBベクトルの方向が不安定になる。また通常行われるRGB値の量子化が、RGBベクトルのとり得る状態数を疎にする。反対に過大な光量での入力は撮像素子および信号伝送系の飽和を招く。いずれも色彩情報の精度は低下する。「精度の良い」入力には、画像全体にわたって適正な光量での入力が必要と言える。

ノイズを多く含む画像から、例えば弛緩法などを用いて、確率的にもっともらしい処理結果を求める処理手法の開発も有意義ではあるが、計算コストは大きくなる一方で、得られた結果に対する保証は低い。処理対象の情報があらかじめ良質に入力されていれば、比較的低い計算コストで信頼性の高い結果を得られるのは明白である。

本章では、以上の考えに立って、「正しい」、「精度の良い」カラー画像を得るためのひとつの画像入力方式を提案する。特殊な入力装置の開発に飛躍するのではなく、可変電子シャッタ機能に、外部からの制御が可能になるように若干の改造を加えた標準的な CCD カメラを用いている。

多段階露光制御によって、各画素を対象の輝度に関わりなく飽和せずかつ十分な光量で入力する。得られるカラー画像は、各画素が適当な露光で入力されることにより、特に色度情報の効率的入力が行われる。多段階の露光時間制御によって得た、露光時間の異なる複数の時系列画像からの画素選択・蓄積アルゴリズム、さらに露光回数を減らし入力時間を短縮する指針について述べる。多様な色彩および影を含む高コントラストなシーンからの安定した色彩情報の入力が可能であることを、実際の画像入力実験によって確認している。そして色度情報に基づく領域分割処理を試み、効率的露光制御によるカラー画像入力方式が通常の入力画像に比べて画像全体にわたって良好な色彩が得られ、色彩識別などの精度向上に有用な方式であることを検証している。

カメラから画像メモリに至る信号伝送系の、入射光量対入力 RGB 値の線形化補正法[Moriwaki 91]も用いている。入力画像の各画素は、露光時間の制御によりそれぞれに適正な光量で入力し、SN 比や飽和の発生を回避している。線形化補正法と露光制御を伴う撮像に、CCD カラーカメラの可変電子シャッタ機能を用いている。カメラの改造により、可変電子シャッタ機能を生かした高速かつ 261 段階の多段階露光制御を可能にしている。時間的に露光条件を変化させながら、露光条件に関しての時系列画像から、画素値の評価が良好な画素を連続的に選択・蓄積しカラー画像を得る。

松山は、一つのシーンを複数の条件での情報に基づき解析するという多角的情報の統合[Matsuyama 91]を提案している。本論文の画像入力手法は、複数の露光条件による時系列のカラー画像を色彩情報を基準に統合する方法であるとみれば、入力システムとしてのその一つの具体化例であるとも言える。浅田ら[Asada 91]は、レンズ絞りを変えてあらかじめ入力しておいた複数枚の RGB カラー画像から、色彩情報の線形性の評価関数を最大にする画素を選択し、色度と明度の精度を向上させた合成画像を得ている。ただ、レンズ絞りの変化は被写界深度の変化を伴うため、独立した撮像条件の制御とはならないため、画像合成の際に、対象物の輪郭などに画像間で不整合が生じる。また、メカニカルなレンズ絞り機構は高速駆動が困難である。露光を制御できる段階数も 8 段階程度である。色彩情報の評価を連続する絞り値の画像間での相対的な線形性に基づいて行っており、対入射光量の絶対的な線形性ではなく、「正しい」入力ではない。可変電子シャッタ機能を利用すれば、露光変化に伴う被写界深度の変化のない、高速かつ多段階な露光制御が可能である。

以下、効率的露光制御によるカラー画像入力方式、電氣的ノイズや量子化の色彩情報への影響、試作した画像入力システム、信号伝送特性の補正法、入力アルゴリズム、高速化について述べ、最後に実験例を述べる。

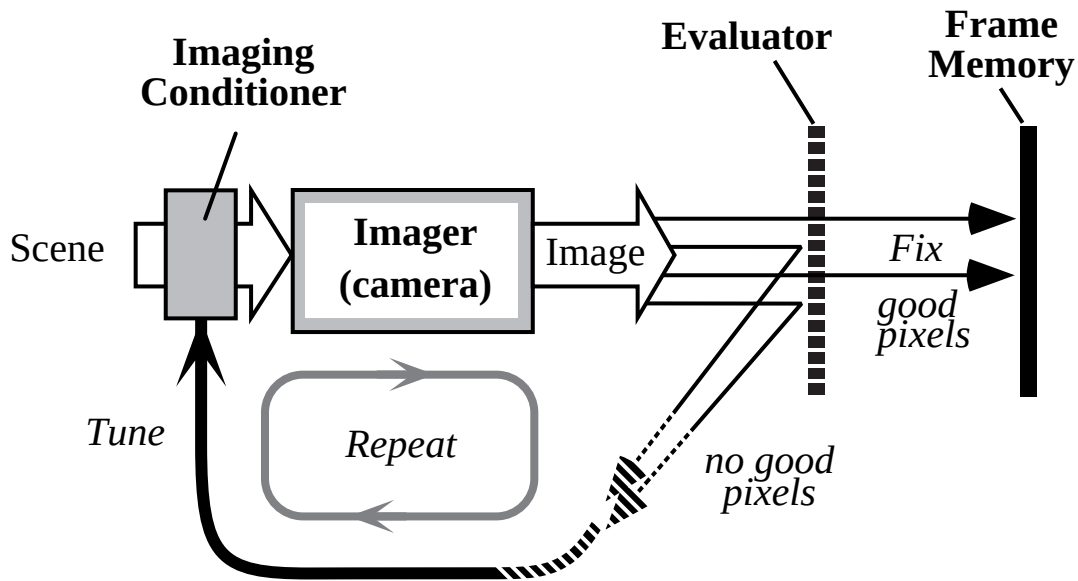


図2-1 時系列画像入力概念図

2.1 効率的露光制御カラー画像入力

2.1.1 入力方法の特徴

ここで述べるカラー画像の入力法では、同一シーンに対する撮像条件の異なる画像が時系列的に入力される。図2-1に概念図を示す。ある撮像条件での画像を、画像メモリに固定する前にあらかじめ定めた条件を満足するか否かを評価する。評価は画素単位で行う。評価条件を満足した画素は、画像メモリに固定される。満足しない画素は次の撮像条件下での画像における同様の評価を待つ。次の撮像条件は、現在の評価状況か、あらかじめ決めたスケジュールか、いずれかに従って決定する。この繰り返し終了後、画像メモリ上の画像を最終的な入力画像とする。以上の方式により、撮像条件を変えた複数画像をメモリ等にあらかじめ記憶しておく必要がなく、入力システムをコンパクトに構成することができる。

2.1.2 露光時間制御

色彩情報に影響する要因と対応方針を検討する。RGBカラー画像の画素値、RGBベクトルを用いて、その大きさである明度情報、方向である色彩情報として、それぞれ次式の定義による L および rg を用いることとする。

$$\begin{cases} L = R+G+B \\ r = R/L \\ g = G/L \end{cases} \quad (2.1)$$

はじめに述べたように、ここでは露光時間制御と色彩情報の入力に関しては、次の4点に留意する。

- (1) 撮像装置の対入射光量特性の非線形性.
- (2) 過剰露光での撮像装置の出力の飽和.
- (3) 過小露光での撮像装置の SN 比の低下.
- (4) 過小露光での RGB 値の量子化の影響.

(1) の信号伝送系の非線形に関しては、2.2.3 で述べる補正手法を用いて、入力システム固有の特性を補正できる。(2) は色彩情報が失われることであり、(3) は低光量において、CCD の暗電流や信号伝送系での電氣的ノイズが信号に対して相対的に大きくなるため、そして(4) は量子化のため RGB 空間中で RGB ベクトルの存在しうる位置が局在化するため、いずれも色彩情報の信頼性が低下することである。図 2-2 (a)~(c) に信号の飽和、SN 比の低下、量子化のそれぞれの場合の RGB ベクトルの変動の様子を示す。図中、計測される色ベクトルが $\mathbf{c}$ 、真の色ベクトルが $\mathbf{c}_A$ 、ノイズが $\mathbf{c}_N$ である。

電氣的ノイズは加算性ノイズと乗算性ノイズがあるが、低光量での SN 比の劣化は光量に依存しない加算性ノイズに起因すると考えられる。電氣的ノイズが RGB ベクトルに及ぼす影響については、文献 [Matsuyama 91] を引用する。ノイズが RGB ベクトルに及ぼす角度変位 θ を考える。観測される RGB ベクトル $\mathbf{c}$ は、真の RGB ベクトル $\mathbf{c}_A$ にノイズ $\mathbf{c}_N$ の和で、

$$\mathbf{c} = \mathbf{c}_A + \mathbf{c}_N \quad (2.2)$$

$\mathbf{c}$ と $\mathbf{c}_A$ のなす角 θ は

$$\cos \theta = \frac{\mathbf{c} \cdot \mathbf{c}_A}{|\mathbf{c}| |\mathbf{c}_A|} = \frac{|\mathbf{c}_A|^2 + \mathbf{c}_A \cdot \mathbf{c}_N}{|\mathbf{c}_A + \mathbf{c}_N| |\mathbf{c}_A|} \quad (2.3)$$

で与えられる。 $\mathbf{c}_N$ は $\mathbf{c}_A$ に依存しないので、入射光量が充分大きく、 $|\mathbf{c}_A| \gg |\mathbf{c}_N|$ であるほど θ が小さくなり、 $\mathbf{c}$ が安定することがわかる。

量子化の影響については、問題を単純化するため、ある明度 L の RGB ベクトルがとり得る rg 色度の状態数を考える。ある L について RGB 空間中の面、

$$R+G+B = L \quad (2.4)$$

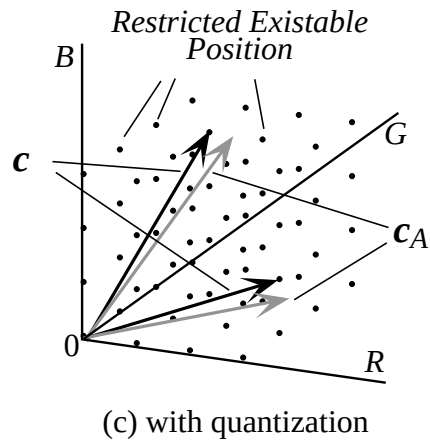
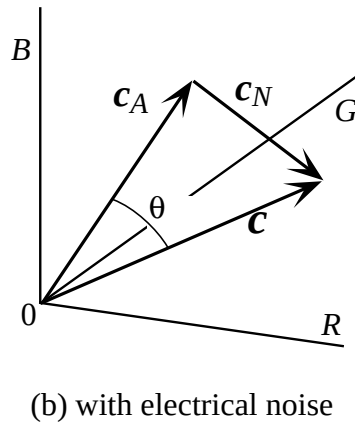
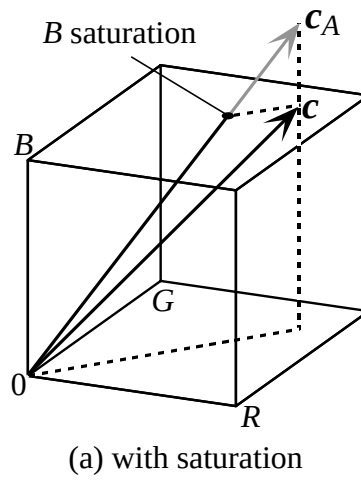


図2-2 RGB ベクトルの誤差要因

上で R, G, B, L が $0 \leq R, G, B \leq 255$, $0 \leq L \leq 765$ なる整数であるという条件を満たす点の数である. これを N とすると次式で表される.

$$N = \sum_{k=0}^L (k+1) = \frac{1}{2}(L+1)(L+2) \quad (2.5)$$

N は L の変域において単調増加である。つまり L が大きいほど N が大きく、細かな色彩を表現できる。

以上、色彩情報に対する電氣的ノイズと量子化の影響を検討すると、色彩情報を精度良く入力するには撮像装置に飽和を生じない限りの大きな入射光量で入力すればよいという結論が得られる。

2.1.3 画像データの表現

効率的露光制御によって得られるカラー画像は画素ごとに露光条件が異なる。したがって画素はRGBベクトル値に加えて露光時間の情報をもつ。サイズ $X \times Y$ のカラー画像 A は次のように表現できる。

$$\begin{aligned} A = \{ p(x,y) \mid p(x,y) = [c(x,y), t(x,y)] \} \\ c(x,y) = [R(x,y), G(x,y), B(x,y)] \\ (x = 0, 1, \dots, X-1, y = 0, 1, \dots, Y-1) \end{aligned} \quad (2.6)$$

$p(x,y)$ は画像上のある位置 (x,y) の画素であり、直接入力されるRGBベクトル値 $c(x,y)$ と、画素の入力時の露光時間 $t(x,y)$ を成分とするベクトルで表わされる。 $c(x,y)$ は式(2.1)での rg 値のみが意味をもつ。そこで $c(x,y)$ のみからなる画像 A_c を色度画像と呼ぶ。

$$A_c = \{ c(x,y) \} \quad (2.7)$$

A からは必要に応じて通常入力と同様の明度情報をもつ画像を復元することができる。これを明度復元画像 A_N として、

$$A_N = \left\{ p_N(x,y) \mid p_N(x,y) = \frac{K}{t(x,y)} c(x,y) \right\} \quad (2.8)$$

ここで K は任意のスケーリング定数で、明度復元画像の明るさを決める。

2.2 効率的露光制御カラー画像入力システム

2.2.1 装置構成

図2-3に本研究で試作した画像入力システムのブロック図を示す。CCDカメラは可変電子シャッター機能をもつ。画像メモリは、RGBの3プレーン、露光時間を格納する1プレーン、さらに画素の固定／

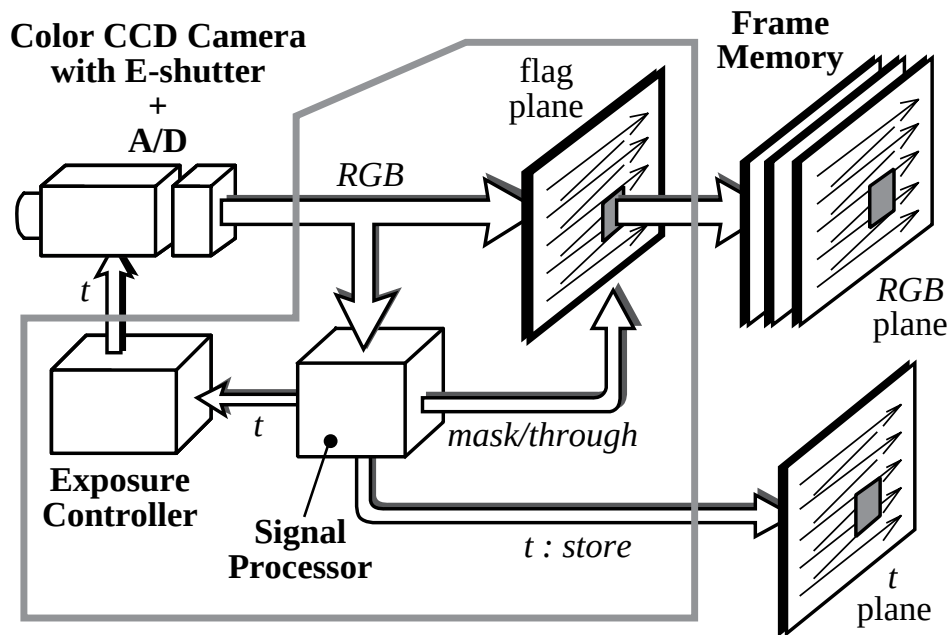


図2-3 効率的露光制御によるカラー画像入力システム構成図

未固定の状態を格納するフラグ・プレーンの3種のメモリを備える。Signal Processorは、RGB値の評価、フラグ・プレーンのフラグのON/OFF、フラグの参照によるRGB値と露光時間の画像メモリへの格納、CCDカメラの露光時間設定などを全て制御する。実験にあたっては図2-3中、グレーの線で囲んだ部分を、パーソナルコンピュータ上のソフトウェアシミュレーションで代替した。

2.2.2 可変電子シャッタ機能を利用した露光制御

可変電子シャッタ機能は、1フィールドの露光時間中にCCD撮像素子の受光要素上に蓄積される電荷を強制放電させるタイミングを制御することで、シャッタ速度、すなわち露光時間の制御[SONY 89a],[SONY 89b]を実現している。強制放電の時間は水平同期信号に同期して、1H（水平走査期間）単位で指定できる。NTSC方式での1フィールドの走査線数は262.5本で、262段階の露光時間制御が可能である。一般に市販の電子シャッタ機能付きと称するCCDカメラでは、本来このような露光時間制御機能を備えているのであるが、ほとんど全ての製品が8段階程度のあらかじめ固定されたシャッタ速度しか利用することができない仕様になっている。そこで本研究では、市販のCCDカメラ（SONY XC-711）を、1フレーム（垂直走査期間）について、次式の261段階の中から1状態の露光時間 t を設定できるように改造して使用した。

$$t = (m + 1.5)H \quad (m=0,1,\dots,260) \quad (2.9)$$

2.2.3 対入射光量の線形補正

画像メモリへ入力されるRGB値が入射光量に対して非線形性であると色彩情報に悪影響を及ぼすことはすでに触れた。撮像装置からA/D変換部、画像メモリに至るまでに、信号はカメラ本体での信号処理回路、ケーブル、A/D変換回路など、さまざまな非線形の要因を通過する。これら要因はシステムに依存するため、個々に調整することは非常に面倒な作業である。

可変電子シャッタ制御により入射光量と入力値の関係を多段階で把握しておくことで、入力系固有の特性を補正するための精細なルックアップテーブル(LUT)を作成できる。この場合、CCDでの光電変換特性を線形とみなし、電子シャッタでの露光時間の制御が入射光量の制御と等価と仮定する。

LUTは、図2-3の入力システムを用いて、次の2ステップの手順で作成することができる。以下、補正法を実験例とともに示す。

[Step1] 無彩色色票（修正マンセル色票 N8，日本色彩研究所製）を呈示し、式(2.9)の $m=0,1,2,\dots,260$ に対するRGB入力値の集合 W を採取する。無彩色色票は1種だけでよい。ここで、

$$W = \{ w_m \mid w_m = [R_m, G_m, B_m], m=0,1,\dots,260 \} \quad (2.10)$$

[Step2] 次式の対応関係のLUTをRGBそれぞれについて作成する。

$$w_m \Rightarrow K(m + 1.5) \quad (2.11)$$

ここで K は変換後の出力のスケールを決定する任意の定数である。

W の値は、フレームメモリへ入力される画像の中央部付近、 32×32 画素の小領域内で、32フレーム分のRGBそれぞれの時間的・空間的平均値を用いた。CCDの受光要素ごとの感度ムラはここでは考慮していない。[Step1]では無彩色色票を用いているので、LUTはRGBの線形特性への変換と同時にホワイトバランスも同時に行っていることになる。

採取するのは対露光時間のRGB出力である。厳密には対入射光量のRGB出力が必要である。すなわちここでは撮像素子の光電変換特性はほぼ線形とみなせることを前提としている。なお、照明にはハロゲンランプと光ファイバライトガイドによる円環照明を用いた。

図2-4に[Step1]で採取した W の m - w の関係と、その rg 色度を示す。ここでは補正効果を端的に確認するため、カメラに付属のガンマ特性補償の機能をそのまま使用し、非線形特性を強調している。また黒レベルの補正も行っていない。そのため rg が入射光強度に対して一定でないことがわかる。同図中、

$$L = \min_m [\max \{ R_m \}, \max \{ G_m \}, \max \{ B_m \}] \quad (2.12)$$

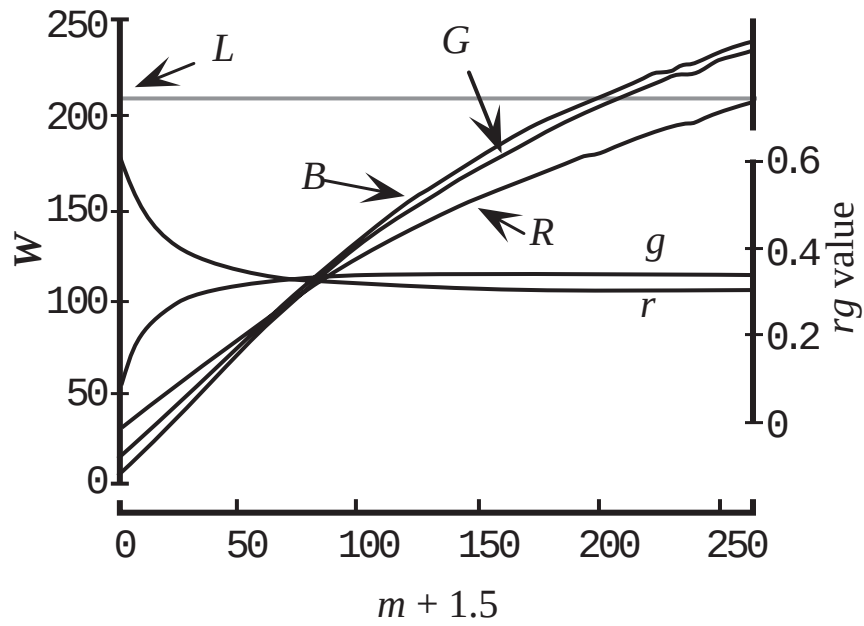
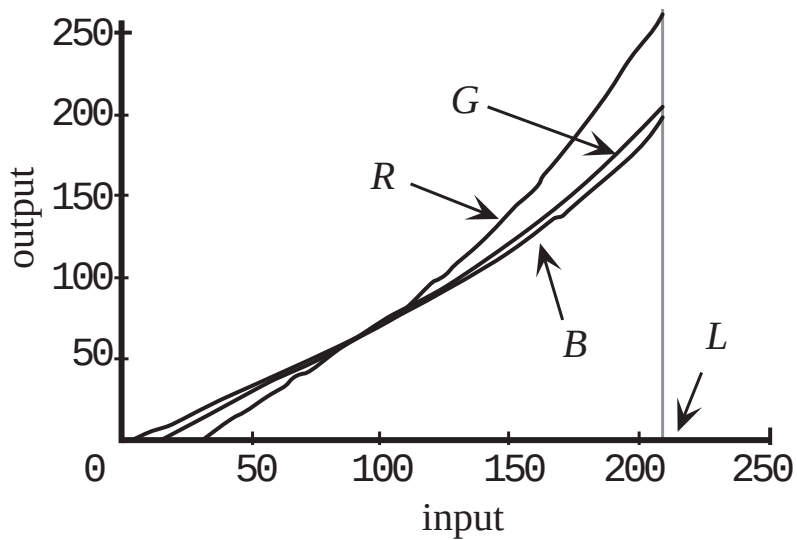
図2-4 採取した W と rg 値

図2-5 作成した LUT

で、LUT の入力範囲は、この L で制限される。図2-5に[Step2]で作成した LUT を示す。ここで $K=1$ とした。

この LUT は、一度作成しておけば、システム構成の変更などがない限り、継続して使用することができる。画像入力を行う度に作成して、システムの較正を厳密にすることもできる。

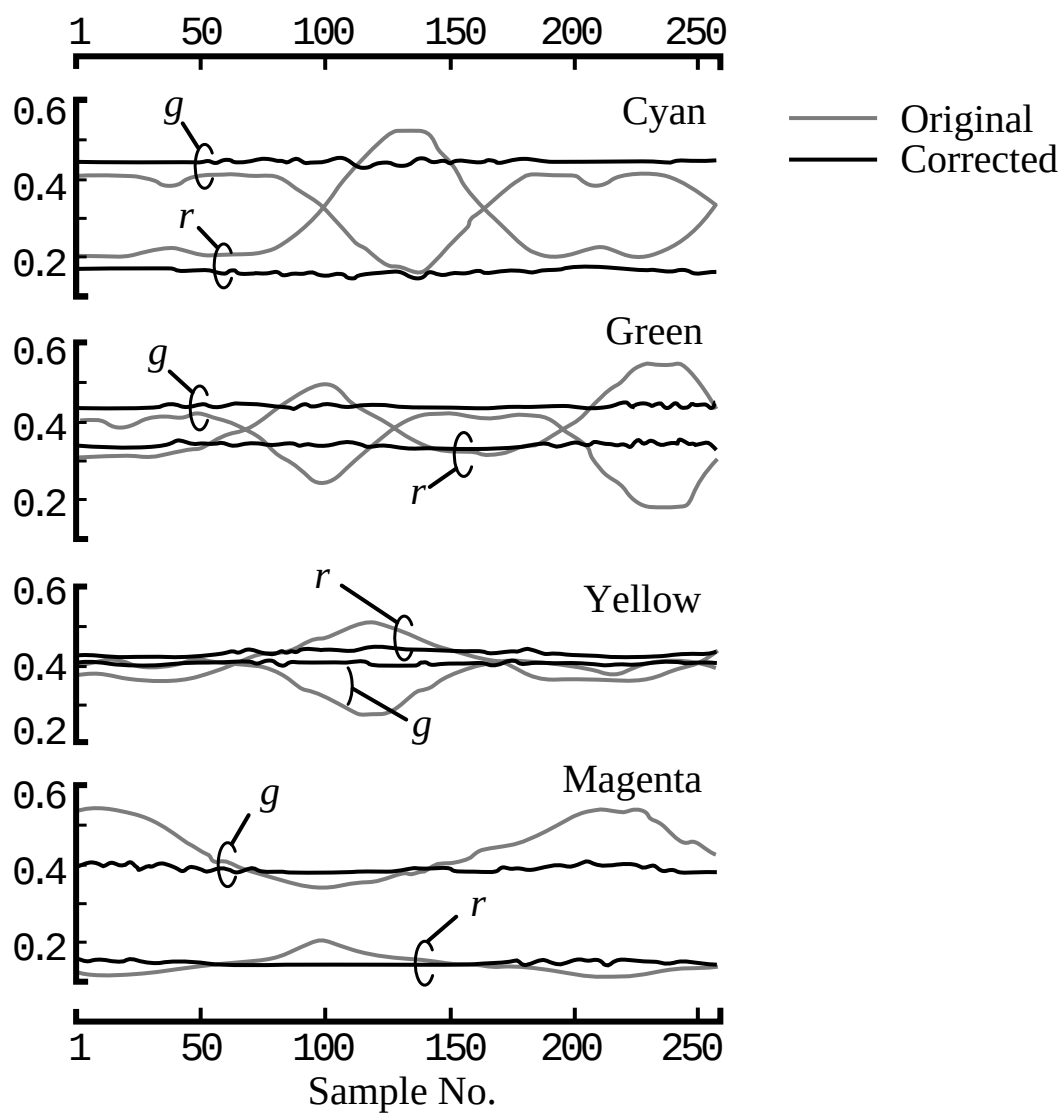


図 2-6 補正前後の rg 値

表 2-1 補正効果

	$\sigma \times 10^{-2}$	
	<i>r</i>	$\frac{\text{before}}{\text{after}}$ <i>g</i>
Cyan	$\frac{10.43}{0.69}$	$\frac{7.88}{0.71}$
Green	$\frac{7.74}{0.68}$	$\frac{7.79}{0.70}$
Yellow	$\frac{7.79}{0.80}$	$\frac{4.03}{0.80}$
Magenta	$\frac{6.81}{0.83}$	$\frac{2.25}{0.57}$

2.2.4 補正効果

色見本からの入射光強度をレンズ絞りで変化させて採取したRGB値に対して、LUTによる補正効果を見た。rg 値の補正効果を評価基準とした。色見本はマゼンタ、イエロー、グリーン、シアンの4種である。レンズ絞りを L を超えない範囲で手動で適当に変えながら、一定周期で画面中央部 32×32 画素の領域内のRGB平均値を、各色見本について256点採取した。LUTによる補正前後のrg色度を図2-6に示す横軸方向はデータ採取の時間経過で特に意味はない。補正前はRGB出力の入射光量に対する非線形性のためにrg値が大きく変動しているのに対し、補正後はほぼ一定であることがわかる。完全に一定にならない原因には、光電変換の非線形性などが考えられる。各色見本のrg値の標準偏差 σ を表2-1に示す。図2-6を裏付ける結果である。

2.3 効率的露光制御アルゴリズム

2.1.2で述べた、電氣的ノイズと量子化が色彩情報に与える影響に関する検討の結果は、各画素のRGB値が飽和しない限りの最大露光で入力することであった。

そこで、図2-3の入力システムの構成に沿って、最も単純な露光時間制御のアルゴリズムを設定した。最大露光状態から1フレームごとに徐々に露光を減少させ、順次得られる画像から評価条件を満足する画素を画像メモリに固定する。アルゴリズムを次に示す。

[Step1] 初期設定

$$m = 260, k=1$$

$$\text{flag}(x, y) = \text{NonFixed} \quad (x=0,1,\dots,X-1, y=0,1,\dots,Y-1)$$

[Step2] 画素値の評価

$$\text{for}(x, y) = (0, 0) \text{ to } (X-1, Y-1)$$

$$\text{if } \text{flag}(x, y) \neq \text{Fixed} \cap R(x, y) < R_{\text{sat}} \cap G(x, y) < G_{\text{sat}} \cap B(x, y) < B_{\text{sat}}$$

then

$$t(x, y) = (M + 1.5)H$$

$$c(x, y) = [R(x, y), G(x, y), B(x, y)]$$

$$p(x, y) = [c(x, y), t(x, y)]$$

$$\text{flag}(x, y) = \text{Fixed}$$

endif

$$\text{next}(x, y)$$

[Step3] 画素固定状況による終了検出

$$\text{if } \text{flag}(x, y) = \text{All Fixed} \text{ then STOP}$$

[Step4] 露光時間条件の再設定と終了検出

```

if  $m = 0$  then STOP
else
     $m = m - \Delta m_k$  ,  $k = k + 1$ 
    goto Step2
endif

```

上記アルゴリズム中、 $\text{flag}(x, y)$ は、図2-3中での flag-plane にあたる。 R_{sat} , G_{sat} , B_{sat} はそれぞれ RGB の飽和値を表す。 Δm_k は正の整数列で、 $\Delta m_k = 1(\text{Const.})$ とすれば最も単純な露光制御となり、入力システムで制御可能な露光時間条件を全て試行することになる。

ここで、本章で提案している式(2.9)による多段階で等間隔な露光時間制御と、一般的な露光制御における入力値の比較を行う。

一般の撮像機器において、レンズの絞りや可変電子シャッタ機能による露光制御では、入射光量 E を概ね次のような等比数列的な条件に設定できる。

$$E = E_0 \frac{1}{2^n} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (2.13)$$

上述の効率的露光制御のアルゴリズムに従い、対象シーン内のある点に対する画素値を、露光を徐々

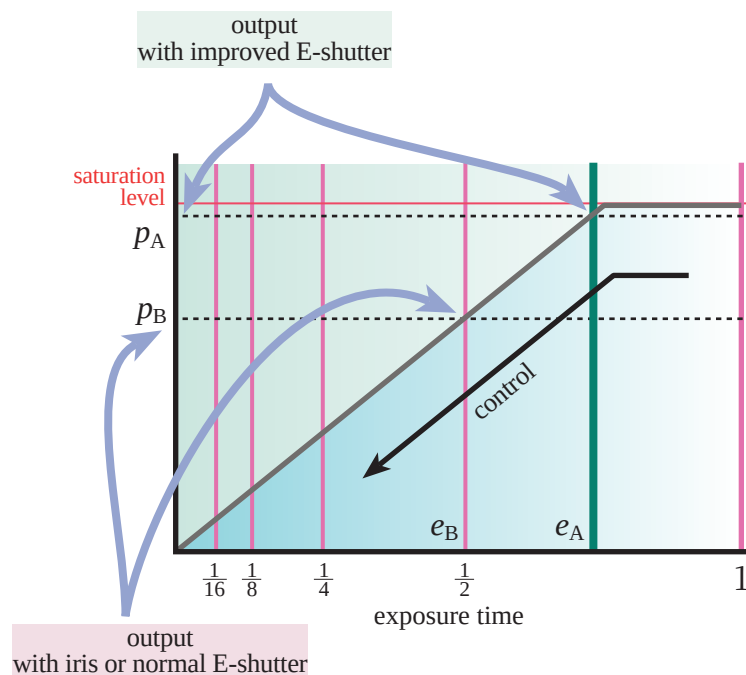


図2-7 多段階露光と通常露光における入力値の相違

に減少させて行くものとする．入力値がはじめ飽和値を示し，図2-7に示すように，ある時間 e_A で入力値 p_A が得られたものとする．同じ対象点について，式(2.13)に従い入力した場合，設定可能な露光時間に間隔が開いていることにより，露光時間 e_B で $p_B (\leq p_A)$ を入力ことになる可能性が大きい．このことは，2.1.2で述べた，カラー画像入力において色彩情報を精度良く入力するためには，出力に飽和を生じない限りの大きな露光で入力すればよいという考察結果に関して，通常の撮像機器に備えられた露光設定条件では本章の効率的露光制御による撮像には不十分であり，式(2.9)の多段階露光が可能な機構が必要であることを示すものである．

2.4 高速化の検討

試作した画像入力システムは，入力に比較的長時間を要する．可変電子シャッタ機能はフレームごとに一つの露光条件しか設定できないためである．前節の入力アルゴリズムで， $\Delta m_k = 1(\text{Const.})$ の場合，1組の効率的露光カラー画像を得るために最大261回のフレーム入力が必要である．評価条件である飽和値との比較が，ハードウェア化等により処理の実時間化が可能で，連続するフレームを利用できたとしても，入力に要する時間は約8.7秒（1/30秒×261）である．何らかの応用を考えるには，時間短縮の可能性を検討しておく必要がある．

単純に入力アルゴリズム中の Δm_k を1より大きくし，露光時間の変化幅を均等に大きくして露光回数を減らせば入力時間は短縮できる．ただし，このとき必然的に1露光時間条件において画像メモリに固定される画素の値の範囲は広がる．

前節の入力アルゴリズムでは，[Step3]での終了を考慮しないものとして，露光時間 t を，すなわち m を Δm_k ずつ減じて，次のように最大 N 回変化させる．

$$\begin{cases} t_1 = 261.5H \\ t_{k+1} = t_k - \Delta t_k \end{cases} \quad (k=1,2,\dots,N-1) \quad (2.14)$$

なお式(2.9)より $\Delta t_k = \Delta m_k H$ である．ちなみに $\Delta m_k = 1(\text{Const.})$ なら Δt_k は一定値で， $N=261$ である．ここで， $t_k \rightarrow t_{k+1}$ の時点で固定される画素群の任意のRGB成分値の幅 Δu_k を考えてみる．ある露光時間 t で，輝度 v の画素に対応する入力値 $u(t,v)$ は次式で表わされる．

$\xi = U \cdot (t/T) \cdot (v/V)$ として，

$$u(t,v) = \begin{cases} \xi & (\xi \leq U) \\ U & (\xi > U) \end{cases} \quad (2.15)$$

ここで T, V はそれぞれ露光時間，輝度分布の正規化定数である． U は任意のスケーリング定数で飽和

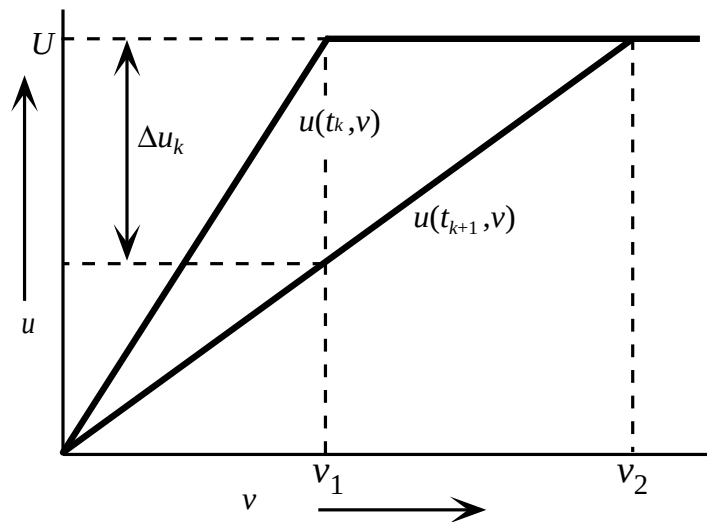


図 2-8 1 露光時間幅に対する入力値幅 Δu_k

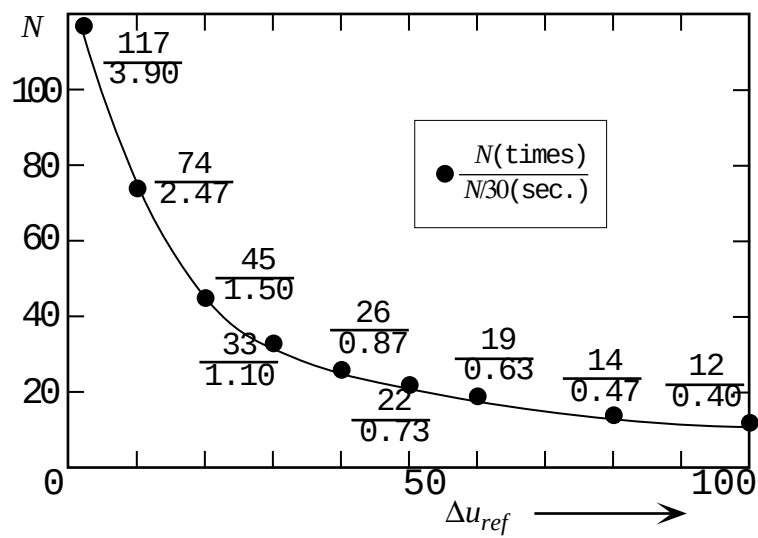


図 2-9 Δu_{ref} と最大露光回数 N および最小入力時間

値に相当する．いま図2－8に示すように $t_k \rightarrow t_{k+1}$ で $v_1 \leq v < v_2$ の輝度範囲の画素が画像メモリに固定されたとすれば式(2.15)および式(2.14)を用いて、

$$\Delta u_k = u(t_{k+1}, v_2) - u(t_{k+1}, v_1) = U \frac{\Delta t_k}{t_k} \quad (2.16)$$

式(2.16)によれば、 Δm_k を単純に大きくし Δt_k を均等に大きくするだけでは、 t_k が小さい範囲で Δu_k が極端に増大してしまう．本論文で提案している画像入力方式は、各画素を可能な限り大きな値で入力するという主旨である．そこで Δu_k を、 t_k が小さな範囲での増大を抑えるよう、 t_k に依存して変化させることを考える．具体的には、 Δu に関する任意の基準値 Δu_{ref} を設定し、

$$\Delta u_k = U \frac{\Delta t_k}{t_k} \leq \Delta u_{ref} \quad (2.17)$$

を満足する最大の Δt_k を逐次求め、式(2.14)に従って t_k を変化させる． Δu_{ref} に対する Δt_k の系列、さらに Δm_k の系列をあらかじめ計算しておき、前節の入力アルゴリズムの[Step4]で用いることができる．図2－9に Δu_{ref} と最大露光回数 N および最小入力時間($N \times 1/30$ 秒)の関係を示す． N と実際の入力画像の関わりについては2.5.4で述べる．

なお以上の検討では、画素のメモリへの固定が露光時間制御の全範囲において発生することを前提としており、そのためには最大(小)露光時に対象シーンの最小(大)輝度部分の画素が固定されるよう照明やレンズ絞りをあらかじめ調整しておくことが望ましい．

2.5 実験1－効率的露光制御によるカラー画像入力実験

ここまで、効率的露光によるカラー画像の入力システムやアルゴリズム、そして入力特性の補正法の簡単な実験と高速化に関しての考察について述べた．ここでは効率的露光画像の実際の入力と、その主眼である、色彩情報の精度に関する実験について述べる．また画像入力に一般に求められる入力的高速化についても実験例を示す．

2.5.1 シーンの入力

図2－10は、露光の変化に対する画像の変化の例を示したものである．画像サイズは 128×128 画素である．対象は側面と底面に色紙を貼った円筒で、やや俯瞰で見たシーンである．床面と後方の垂直面は同一の色紙である．図中に各色紙の色を示している．斜め前方からの照明により、床面と後方垂直面には影が生じ、一方円筒の正面は十分な照明光を受けている．色紙は、色彩の入力精度を検証するた

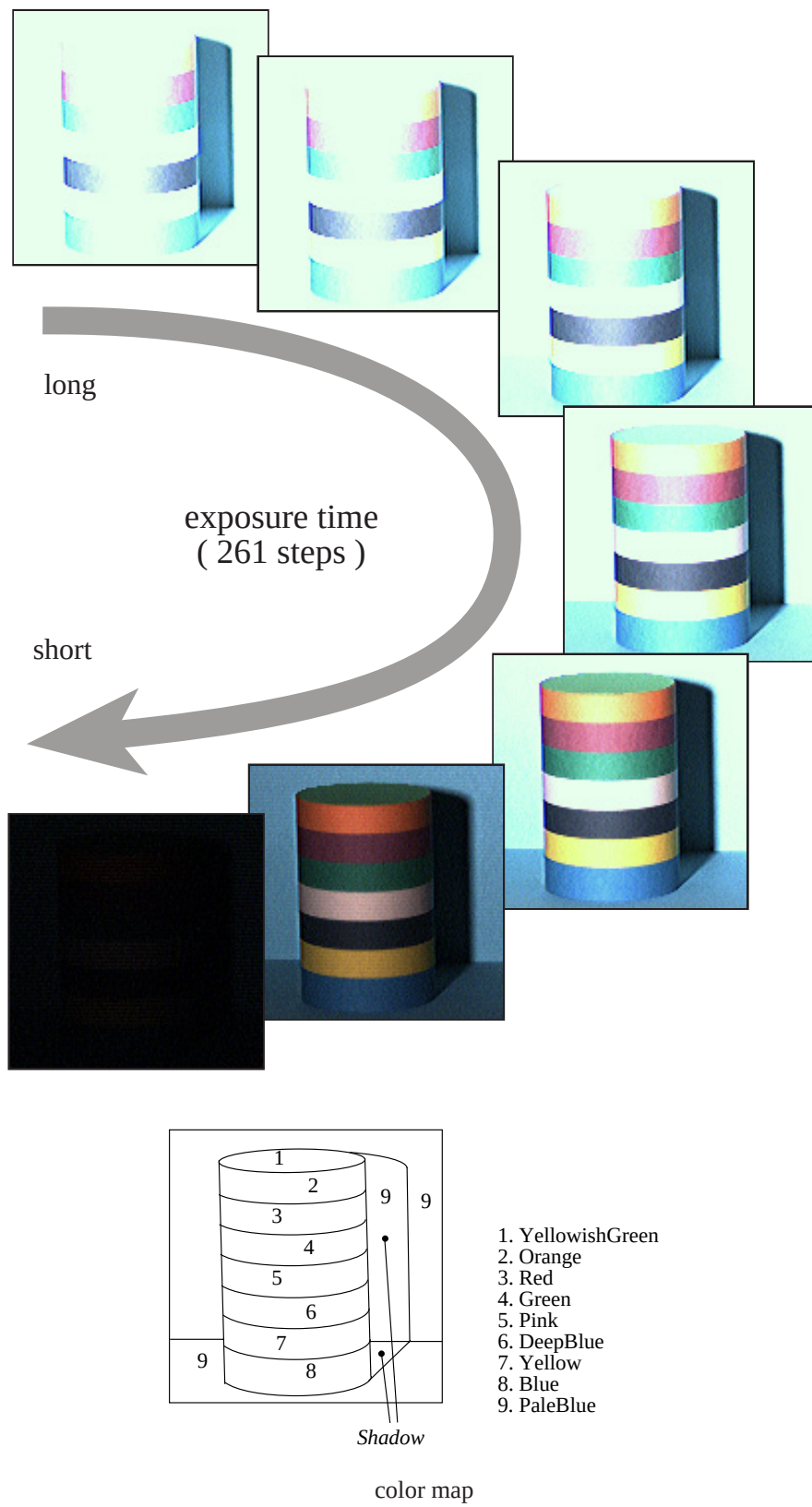


図 2 - 1 0 露光時間に対する画像列

め、拡散反射面として使用している。同図に示した画像を含め、式(2.9)と2.3の画像入力アルゴリズムに従って、261段階の露光を行う。ただし、既に述べたように、ここで構築した画像入力システムでは、これらの全画像をメモリ等に格納する必要はない。図2-11は、図2-10のシーン上のある3点に注目し、露光時間 t に対して計測される入力値の変化を示したものである。 t は大きな値から減少させてゆく。**I**はRGBいずれもがはじめ飽和し、 t の減少途中で最終入力値として固定される場合である。**II**はRGBの一部成分が最初から飽和値未満である場合で、2.3のアルゴリズムでは、 t が点線で示した時点で、画素が最終入力値として固定される。**III**はRGB 3成分とも、入力開始時点で最終入力値となる場合である。本方式は受動的入力であるため、**III**の場合のように最大露光時間でも入力値が低い値であることはあり得る。

図2-12は、本提案方式によって得られる画像データである。同図(a)は通常の画像である。同図(b)は、図2-3のRGB planeに格納され、式(2.7)で表現される色度画像である。また同図(c)は、同じく図2-3の t planeに格納される露光時間画像である。同図(d)は露光時間の逆数に相当する明度画像である。同図(e)は(b),(c)を用いて式(2.8)で得られる明度復元画像で、(a)の通常の画像とほとんど同じ状態を復元できていることを示している。

図2-13は、図2-12(c)の露光時間画像のヒストグラムで、本入力システムで制御可能な全ての露光時間が含まれていることを示している。これはすなわち、2.3の図2-7で示した、一般撮像機器の露光制御能力以上に細かな制御能力が機能する状況が存在することの実例である。

2.5.2 色彩情報の精度

図2-10～2-12と同じ対象物で、ほぼ同じ条件で撮像した通常のカラー画像（図2-14(a)）と、それを効率的露光制御で撮像した色度画像（図2-14(c)）を用いて、色彩が実際に精度良く入力されているかを検証した。いずれも画像サイズは 128×128 である。YellowとDeepBlueのように、明度に極端な差がある色領域が存在するシーンでは、通常の入力では高輝度の部分の飽和と、低輝度の部分のSN比の低下がトレードオフとならざるを得ない。色紙は拡散面に近いと言えるが、厳密には円筒の湾曲部の光の反射角が変化している部分で反射光の分光強度分布が変化し、色彩も変動しているとみられる。図2-14(a)では、円筒中央部に飽和がある一方、影の部分は極端に暗い。同図(c)は、 $\Delta m_k = 1(\text{Const.})$ の条件で入力した色度画像である。同図(b),(d)は、それぞれ(a),(c)の rg 色度についての精度をみるために、画像上 32×32 点における rg 色度のニードルダイアグラムである。(b)では影や低輝度の色彩領域では、色度が乱雑になっている。それに対して(d)では、本来が同じ色彩領域では色度が揃い、色彩が安定して入力されていることがよくわかる。特に背景部の影とそうでない部分との色度が、同じようなベクトルで、しかも安定して入力されていることは注目できる。各領域の境界部分の色

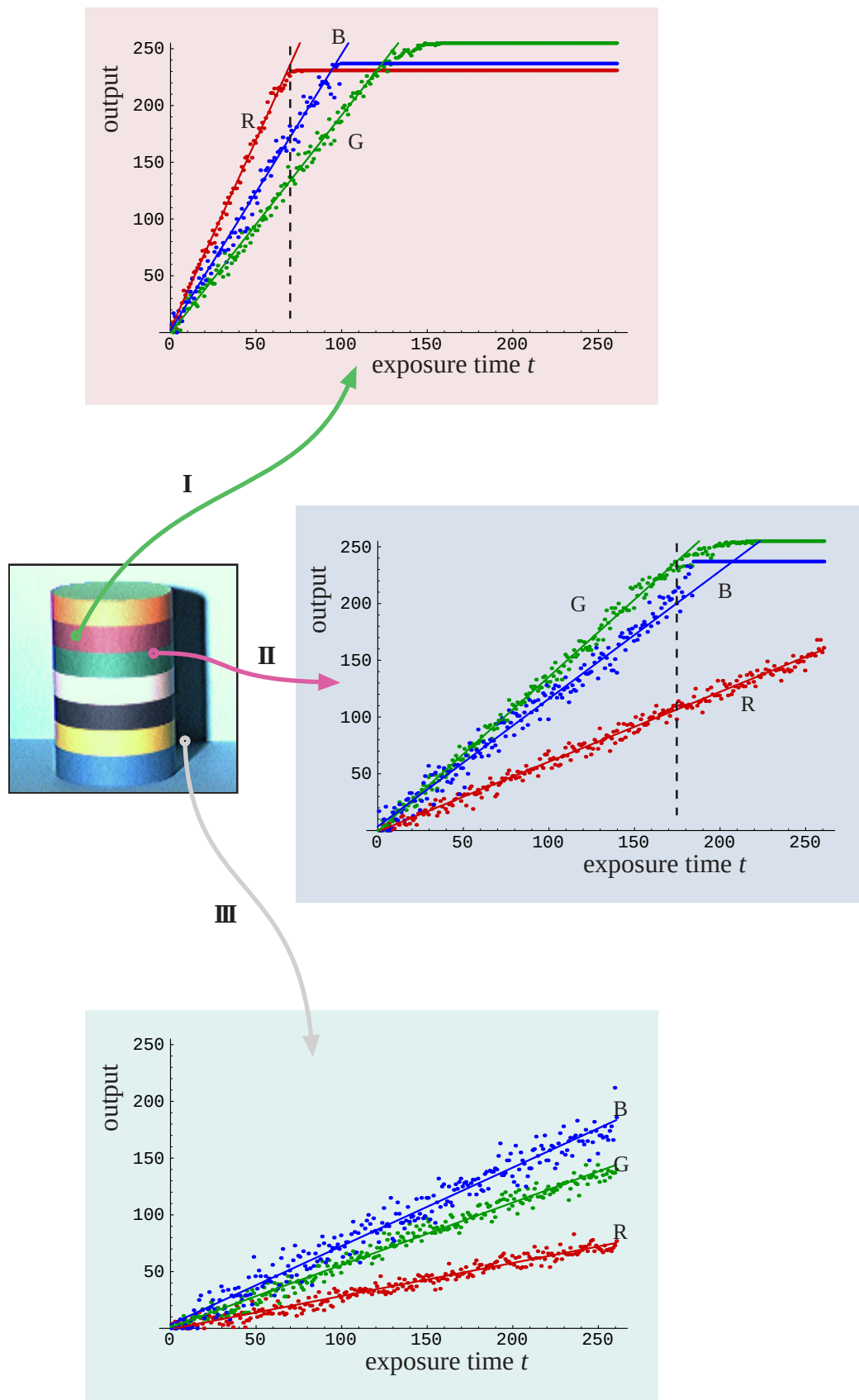
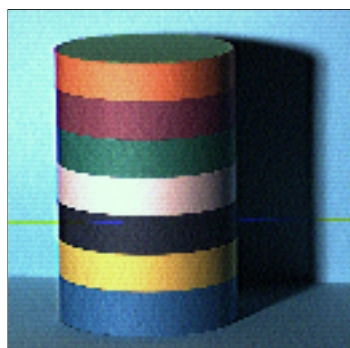
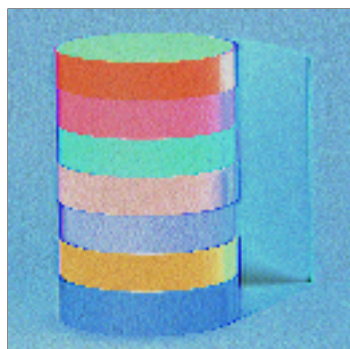


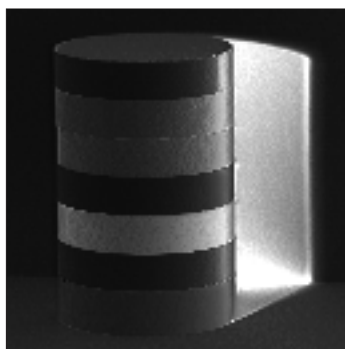
図2-1-1 露光時間に対する画像上の計測値変化



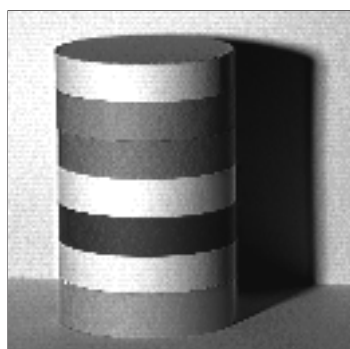
(a) normal



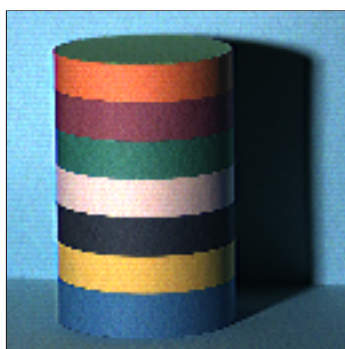
(b) chromaticity



(c) exposure time



(d) brightness



(e) reconstruction

図2-12 効率的露光制御カラー画像入力方式によって得られる画像

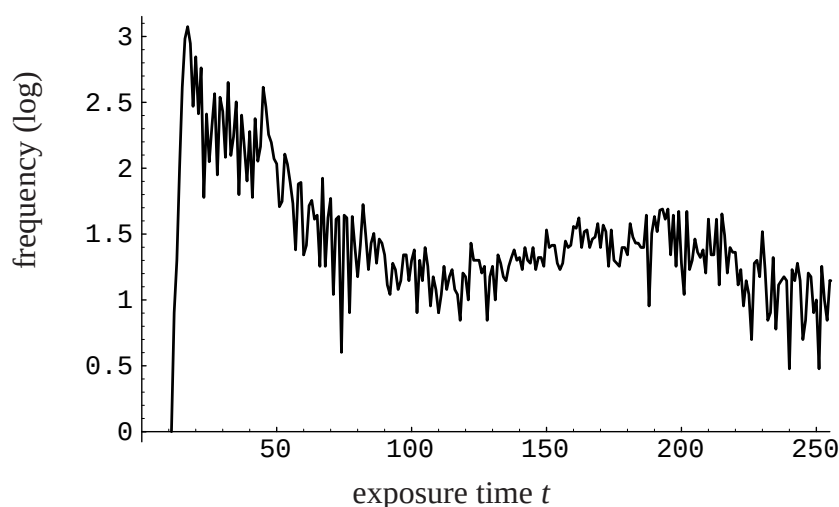


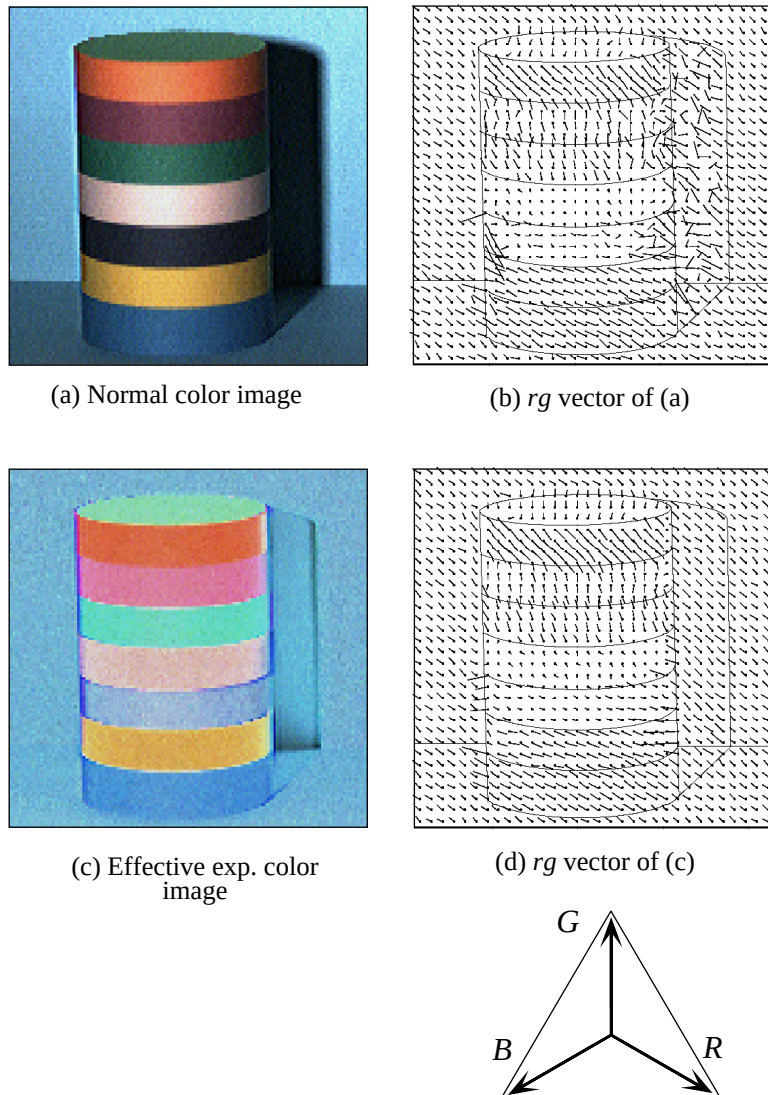
図 2-13 露光時間ヒストグラム例

度の乱れは、実験に用いたカメラが単板式 CCD カメラであるため、CCD 上のモザイク色フィルタの空間的な位置ズレに起因する偽色の発生によるものと考えられる。これは例えば 3 板式 CCD カメラを用いるなどすれば、より良好な結果が得られるものと考えられる。

2.5.3 色彩による領域分割処理への適用

2.5.2 で、色度画像を利用したシーンの簡単な領域分割処理の観点から、色彩情報の入力的良好に入力されていることを確認した。ここでは、得られた画像の色彩精度の、実際の認識処理に対する効果について、領域分割による簡単な検証を行った。図 2-14(a), (c) の画像の色度画像に対して rg 色度値による領域分割処理を試みた。

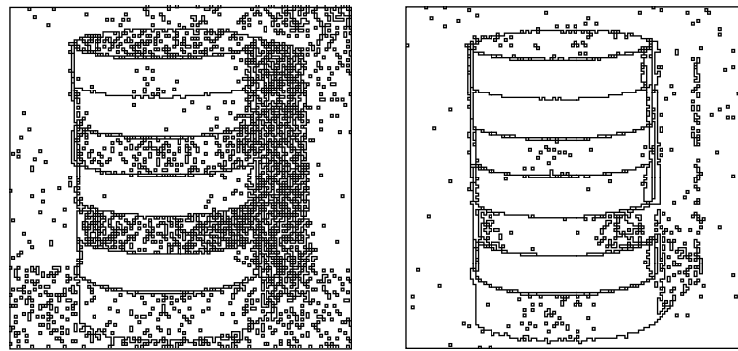
円筒や背景の色彩構成が既知であり、望ましい分割結果は明白である。分割には初歩的な方法を用いた。 rg 色度画像の、 rg 色度面上のヒストグラムを求め、各色彩領域に対応するとみられるピークを目安に、両画像に共通の色度面分割マップを人為的に作成した。分割マップに基づく各画像の分割結果を図 2-15(c) に示す。図 2-15(a), (b) はそれぞれ図 2-14(a), (c) の分割結果である。分割マップは共通である。(a) では (b) に比べて 1. YellowishGreen, 4. Green, 6. DeepBlue, 8. Blue, 9. PaleBlue の各領域で誤分割が顕著である。図には示していないが、色彩が近いためとみられる 1 と 4 の間での誤分割が顕著

図2-14 rg 色度による色彩情報の安定性評価

であった. 9の影の部分については低光量のためとみられる4,6,8を主とする他の全ての領域との間での誤分割が認められた. (b)ではこれら誤分割は少なく, 効率的露光制御入力により各色彩領域が十分な光量で入力されたことで色彩情報の不安定さが改善され, 色度だけの分割でも良好な結果が得られるようになったものと考えられる.

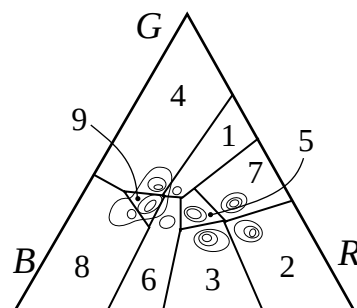
2.5.4 高速化と色彩精度の関係

2.4で述べた露光回数の減少による高速化が効率的露光制御によるカラー画像の色彩に及ぼす影響を, 前節の領域分割処理によつての検証を試みた. 図2-14の対象シーンについて, $\Delta m_k = 1(\text{Const.})$ および



(a) Segments of Fig.2-14 (a)

(b) Segments of Fig.2-14 (c)



(c) *rg* clustering map

図 2 - 1 5 *rg* 色度による領域分割

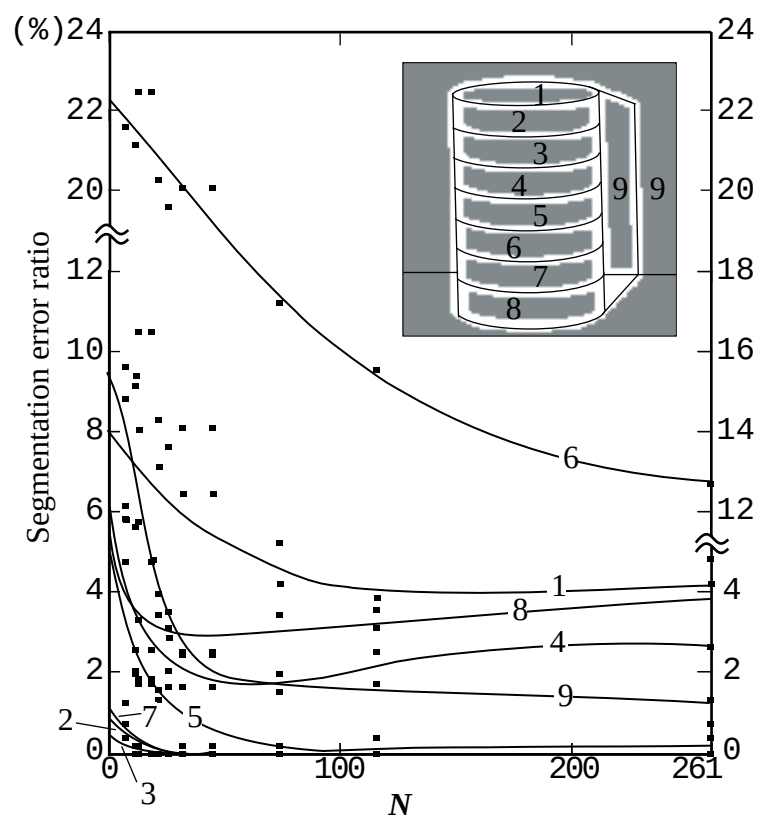


図 2 - 1 6 最大露光回数 N と誤分割率

図2-9に示した9通りの合わせて10通りの Δm_k の系列を用意し、それぞれで入力した効率的露光制御カラー画像の色度画像に前節の領域分割を施した。1～9の各色領域についての誤分割率、

$$(\text{領域の誤分割率}) = \frac{(\text{領域内の誤分割画素数})}{(\text{領域の画素数})}$$

の総和をその色度画像の誤分割率とした。偽色の影響を避けるため、各領域には境界部分を除いたウィンドウを設けた。図2-16に露光回数 N と誤分割率の関係を示す。図中、各領域のウィンドウをグレーで示す。まず全体的な傾向は N が大きいほど誤分割が減少している。6.DeepBlueはもともと明度の低い色であるため、誤分割が顕著である。それ以外の領域では、9.PaleBlueのような影を多く含む領域でも、 $N=45$ 程度以上で最小の定常値近くに低下している。すなわち図2-14のシーンについては、露光制御可能な全261段階のうち約1/6の露光条件だけを使用し、1画像を約1.5秒($=1/30 \times 45$)まで時間短縮して入力してもある程度安定した色彩情報が得られることが言える。もちろんこの N の許容最小値とも言える値は対象シーンによって異なると思われるべきである。

2.6 実験2－効率的露光制御カラー画像の分割手法

領域分割処理は画像によるシーン認識の基本的技法であり、既に数多くの手法が提案されてきている。カラー画像を利用した研究も多いが、分割結果の良否に影響するはずの色彩情報の精度に言及されることはほとんどなかった。2.5.3で検証実験としての簡単な領域分割処理結果を示したが、特に効率的露光制御カラー画像の色彩情報に関する特徴を生かした領域分割手法について述べることにする。以下、効率的露光制御カラー画像の特徴的なクラスタ分布と、色彩均一化の前処理としてのベクトルメディアンフィルタリング、そして色度と明度、個別のクラスタリング手法などについて、実験結果を示す。

2.6.1 対象シーンと仮定

図2-17に本節で用いたシーンの画像データを示す。サイズは 384×384 画素である。図2-17(a)は通常のRGB画像である。図2-17(b)は効率的露光制御カラー画像の色度画像で、露光制御により暗い部分も十分な光量で入力され、影に無関係に同一色彩領域が直観的に判別できる。図2-17(c)は明度画像である。各画素の露光時間 $t(x,y)$ は次式を満足する範囲の最大値として入力した。

$$\max\{R(x,y), G(x,y), B(x,y)\} < S \quad (2.18)$$

ここで S は、CCDが飽和したときに対応するRGB各入力値で、図2-17(b),(c)の画像では、 $S=220$

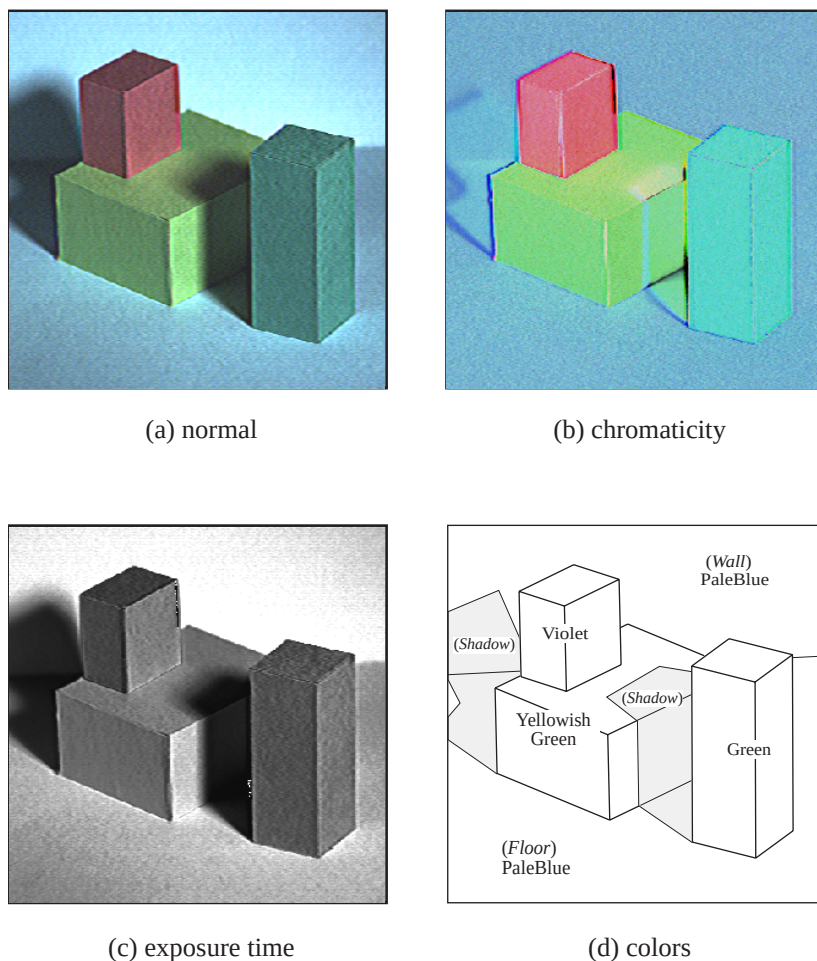


図 2-17 効率的露光制御カラー画像データ

であった。

図 2-17 (d) はシーン中の色ブロックの配置状況である。表面が、Yellow, Green, Yellowish Green の、それぞれ単一色で覆われた 3 つの直方体がある。背景（床と後方壁）は Pale Blue で、計 4 種の色彩がシーン中に存在する。直方体および背景の表面の材質は、いずれも色ケント紙でほぼ完全拡散面とみなす。

本論文では、分割の対象とするシーンに関して次の仮定を設定している。

〔仮定 1〕 全ての物体および背景の表面は、およそ完全拡散面であるとする。表面反射は内部反射に比べて十分小さい。しかし、面の法線方向に依存した両者の比率の変化は存在する。

[仮定2] シーン中の物体は平面のみから構成される多面体で、各物体および背景の表面色は単色で、他の物体や背景の表面色とは異なる。

[仮定3] 面の法線方向の変化や、相互反射に起因する色度の偏移の程度は、各物体間の色度差に比べ十分小さい。

[仮定4] 影の領域からは、環境光からの反射が存在する。環境光色は照明光源色と同じで、白色とみなす。

[仮定5] シーン中に存在する、背景を含む色物体の総数は既知である。

なお、図2-17のシーンは、以上の仮定を満足しているものとする。

2.6.2 色彩に関するクラスタ分布

ここでは、色度と明度を端的に表現できる、次式で定義する簡単な Lrg 色特徴量空間を用いる。

$$\begin{cases} L = \begin{cases} K \cdot (R+G+B)/t & (AE \text{ color image}) \\ (R+G+B)/3 & (normal \text{ color image}) \end{cases} \\ r = R/(R+G+B) \\ g = G/(R+G+B) \end{cases} \quad (2.19)$$

rg 色度面とそれに明度 L が直交する空間である。明度 L は、効率的露光制御カラー画像では色度と明度が分離した形で得られるため、通常データ形式とは誘導が異なる。

rg 色度は、明度に対して不変な量である。しかし従来のカラー画像データを用いた場合は、明度の低下とともに、 rg 色度の信頼度が低下する[Moriwaki 93]。本章の初めに述べたように、カラー画像の領域分割に関する研究例では、RGB、あるいはそれより誘導される表色系の、色特徴量空間中でのヒストグラムのクラスタリング処理がひとつの主流である。このときの、画像データに起因する、低輝度でのクラスタリングの問題点について次の定性的な考察ができる。

今、RGB 特徴量空間中で、図2-18のようなそれぞれ2つのクラスタ、2組を考える。2つのクラスタに対応する領域の明度が高い場合、図2-18中のⅠの組のように、クラスタは明瞭に区別できる。明度が低ければ、Ⅱの組のようにクラスタは接近する。電氣的ノイズや量子化による誤差が相対的に増大することにより、色度は不安定になるとともに、クラスタの大きさが小さくなるとは限らない。そのため、クラスタの重なりが大きくなり、分離が困難となる。

式(2.19)により RGB から Lrg への変換することは、単に低輝度領域を広げることであり、他の種々の表色系を用いても、分離の困難さを改善することは不可能である。

式(2.19)に基づく Lrg 空間でのクラスタの分布状態をさらに考察してみる。2.6.1の[仮定2]により、一つの物体領域、すなわち色彩がほぼ同じ領域の画素集合は、影を含む明度方向の分布を考慮すれば、 L

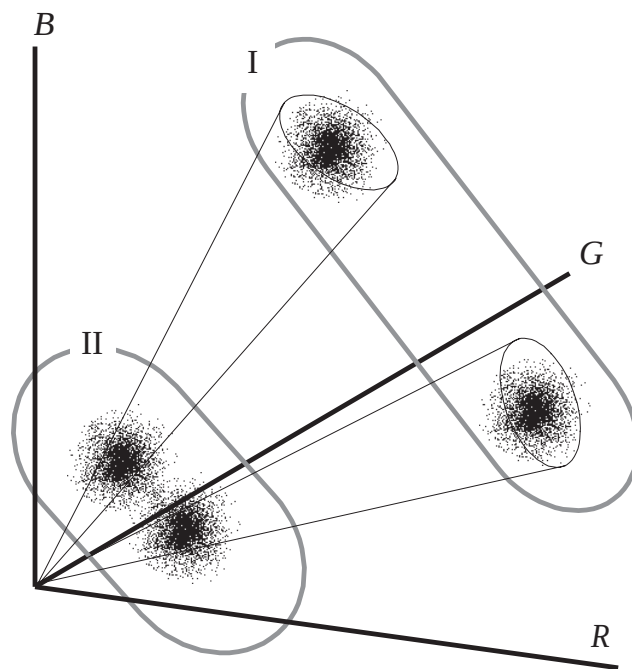


図 2-18 RGB 空間でのクラスタ分離

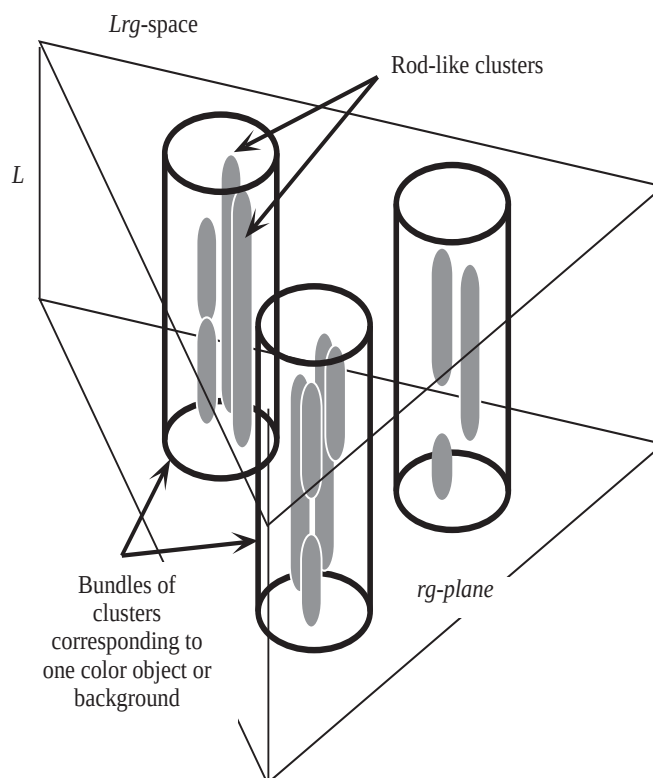
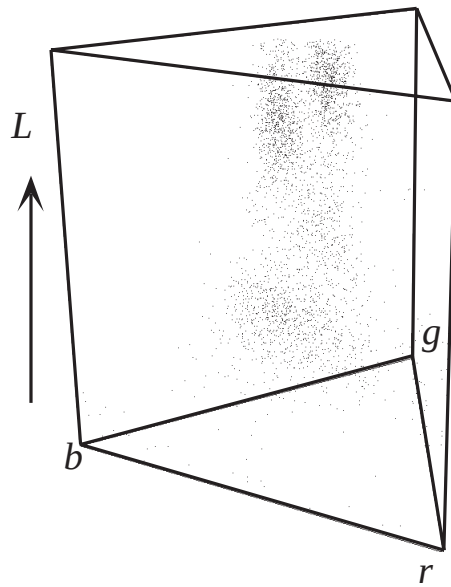
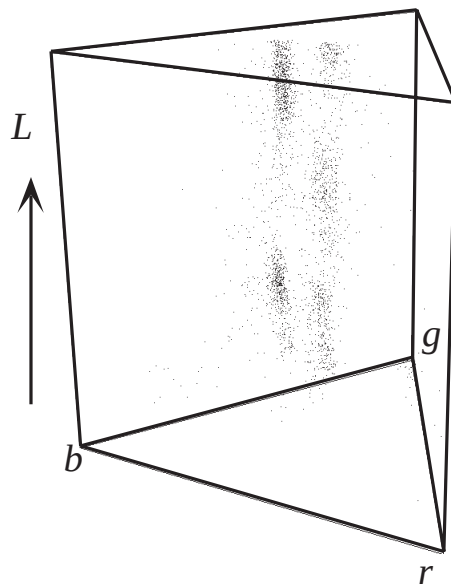


図 2-19 クラスタ分布モデル

(a) Lrg distribution of normal RGB color image(b) Lrg distribution of adaptive exposure color image図2-20 実データの Lrg 空間ヒストグラム

軸に平行に分布する棒状のクラスタを構成するであろう。さらに細かく見れば、一つの物体に相当する領域は、勾配の異なるいくつかの平面で構成され、2.6.1の[仮定1]より、各面の見かけの色彩は若干異なっている。相互反射による色の偏移もある。これら各小領域は、それ自体棒状のクラスタで、 rg について互いに偏移している。従って、一つの物体領域に対応する画素集合は、ある円筒状空間に、色度または明度方向に若干位置の異なる、複数の棒状クラスタが「束」になった状態を構成する。この「束」

が、シーン中の物体および背景の数だけ存在する．図 2-19 に、以上の考察によるクラスタの分布モデルを示す．

図 2-20 に、図 2-17 のシーンの *Lrg* ヒストグラムを示す．同図(a)の従来の RGB 画像のクラスタが、*L* の低域で散漫になり、境界があいまいになるのに比較して、同図(b)の効率的露光制御カラー画像のヒストグラムは、*L* 方向に伸びる幾つかの明瞭なクラスタが観察でき、図 2-19 のクラスタモデルに非常に近い状態であることがわかる．

2.6.3 平滑化前処理 (Vector Median Filtering)

2.6.2 の考察では、クラスタの分離の困難さが改善されていることを定性的に示した．ここでは、画像データに平滑化前処理を加えることでノイズ成分を低減し、分離処理をさらに容易にすることを考える．

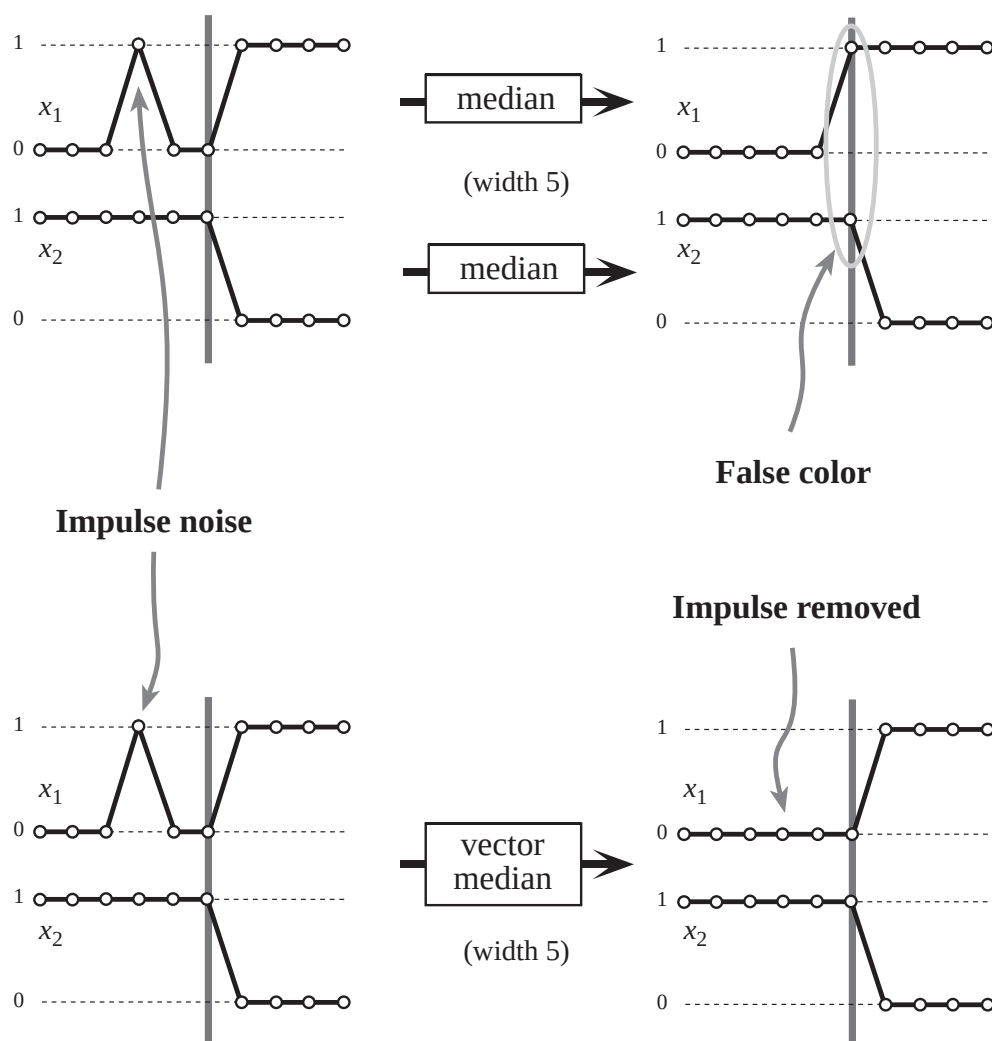


図 2-21 ベクトル時系列信号に対するメディアンフィルタリング

色彩の均一化により、カラー画像に関しては、色特徴量空間でのヒストグラムの分散が低減し、クラスターごとにより稠密になることが期待できる。平滑化には、エッジの保存とノイズ除去効果があるメディアンフィルタの利用を考えた。これは出力信号が入力信号の中から選択される非線形処理であり、処理後にあらたな画素値が発生することがないため、必然的にヒストグラムは稠密化されると予想した。

メディアン（中央値）フィルタリングは、画素がスカラ値をもつ濃淡画像に関しては、多数の報告がなされている。画素値がベクトル値であるカラー画像に対しては、各色成分画像ごとにこれら平滑化処理が行われるケースがあるが、非線形処理である場合には、注意を要する。Astolaらは、ベクトル成分ごとのメディアンフィルタリングは、望ましい結果を与えない場合があることを示し、ベクトル値列に対するメディアンフィルタ、ベクトルメディアンフィルタ(以降、VMF)を定式化し、時系列ベクトル信号への適用例を示している[Astla 90]。図2-21は、 (x_1, x_2) で表される2成分のベクトル値をもつ時系列信号に関する例である。原信号には $(0,1)$ と $(1,0)$ しか存在しない。ここに x_1 にインパルスノイズが生じたとする。同図上段に示すように、各成分別々に窓長5のメディアンフィルタ処理を施した場合、出力中に、原信号には存在しない信号 $(1,1)$ が発生する。同図下段のような、原信号の中央値を出力とするというメディアンフィルタの定義に沿った処理を、ベクトル信号についても考えなければならない。

ここでは、AstolaらによるVMFの定義を、次のように画像の局所領域処理として利用することとした。

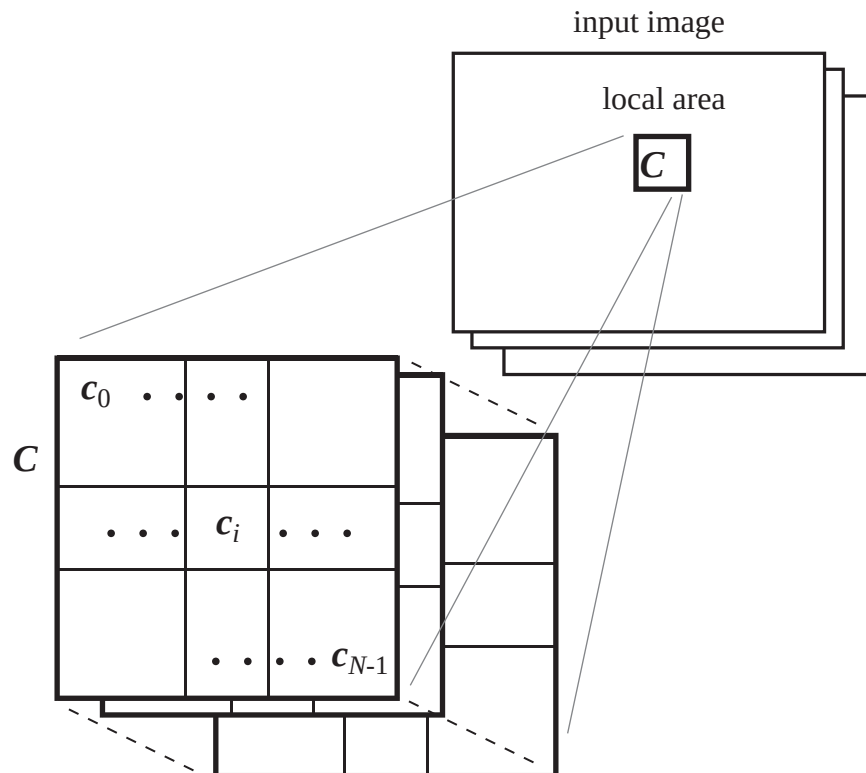


図2-22 局所領域中のベクトル値集合

図 2-22 のように画像上のある注目画素を中心とする局所領域中の N 個の画素値の集合を $C = \{c_1, c_2, \dots, c_N\}$, そのメディアン値を c_{VM} とする. C のメディアンを, 次の定義を満足する c_{VM} で与える.

$$\sum_{i=0}^{N-1} \|c_{VM} - c_i\| \leq \sum_{i=0}^{N-1} \|c_j - c_i\| \quad (j = 0, 1, \dots, N-1) \quad (2.20)$$

ここでノルム $\|x\|$ は, 次式の定義を用いた.

$$\|x\| \equiv \left[\sum_k x_k^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.21)$$

図 2-20 の, 棒状クラスタを稠密化するのために, rg 色度に関してのみ考慮することとした. このとき, C の rg 色度を正三角形の色三角形色度面上での距離で考えることとし, 次の変換による r', g' を r, g のかわりに使用した.

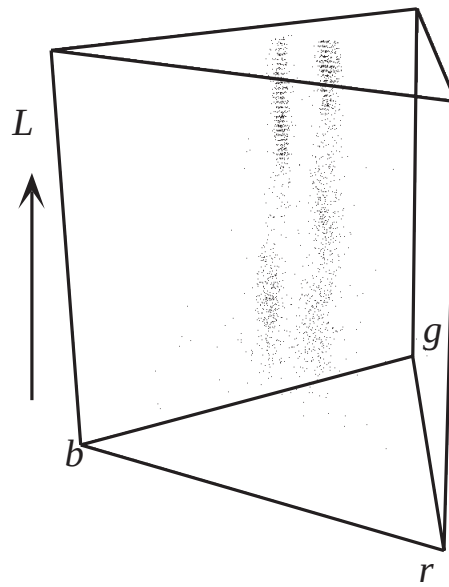
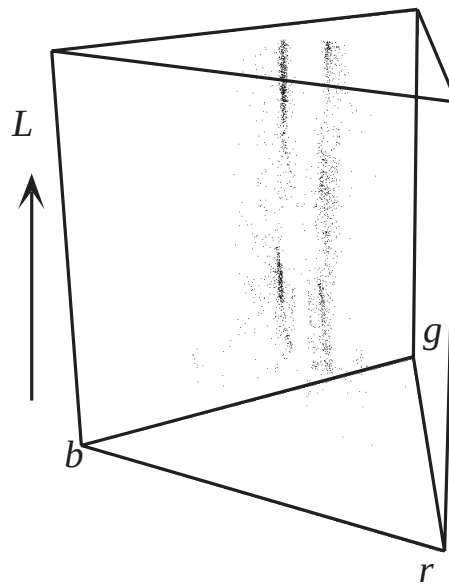
$$\begin{bmatrix} r' \\ g' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ g \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

以上の局所領域処理を効率的露光制御カラー画像上全画素に対し適用する. Astola らによれば, VMF は反復適用すると, 処理結果に変化が見られない状態, root signal に収束する. 図 2-17 の画像データに対して rg に関する VMF を適用したところ, (b) の効率的露光制御カラー画像データについては, 29 回の処理で収束した. 比較のため, (a) の通常カラー画像に対しても同様の VMF 処理を適用した. これは 28 回で収束した. 図 2-23 に処理画像の Lrg ヒストグラムを示す. 図 2-20 と比較して, (a) の通常画像, (b) の効率的露光制御カラー画像共にクラスタの稠密化の効果がみられるが, (a) が, L の低域でのクラスタ間の境界にあいまいさが残るのに対し, (b) では L の全域で棒状クラスタが細められる効果が明瞭に表れている.

なお, 色特徴量空間中でのヒストグラムのクラスタリングでは, 画素あるいは領域の位置情報は考慮しないが, 局所領域処理による平滑化を併用することで画像空間上での小近傍での均一化が図られ, 結果的に画素の位置情報が補完されることになる.

2.6.4 領域分割アルゴリズム

2.6.2 では, Lrg 空間中では, 2.6.1 の仮定を満たす画像のヒストグラムは棒状クラスタおよびその集合としてモデル化されることを考察し, 効率的露光制御カラー画像データはそのモデルによく従っている

(a) Lrg distribution of normal RGB color image (VMF)(b) Lrg distribution of adaptive exposure color image (VMF)図2-23 実データのVMF処理後の Lrg 空間ヒストグラム

ことを確認した。また2.6.4で、 rg に関するVMFによる平滑化により、円柱状クラスタを、より稠密化できることを示した。以上の検討を踏まえた分割アルゴリズムは、色度と明度、それぞれに関して独立に検討でき、 L 軸に平行な棒状クラスタの分離が基本になる。本論文では複雑な処理手法ではなく、効率的露光制御カラー画像を用いることで、むしろ単純な方法でも良好な結果が得られることを示すことを主旨としている。

2.6.4.1 色度に関する考察

VMFで集約化され、円柱状クラスタが十分細められたと想定すれば、 rg 色度の2次元ヒストグラム上では、クラス内分散が少なくかつクラス間の重なるの少ない、先鋭なピークをもつクラスタ群を形成する。各小クラスタは、画像上の小近傍で色度が均一な領域（小近傍色度均一領域）に対応する。そして物体領域は、いくつかの小近傍均一色度領域によって構成される。 rg 平面上では、2.6.1の[仮定1]～[仮定3]より小クラスタ間の距離は小さく、物体領域を構成する小クラスタ集合間の距離は十分大きい。従って、 rg 距離を参照した適切な融合過程から、物体領域とそれを構成している小領域、つまり色偏移領域を認識することができる。ある小近傍色度均一領域の、それが属する物体領域内での相対的偏移方向は、偏移の影響を与える相手領域のもつ色度の方向と考えられる。

2.6.4.2 明度に関する考察

ここでは影および面の法線方向の違いに起因する明度の異なる領域の抽出を目的としている。明度に関する分析は、従来の濃淡画像における明度の1次元ヒストグラムを用いる場合と同様である。ただここでは、2.6.4.1を参考に、既に色度によって物体領域ごとに分割された状態を参照できる。明度は対象の色彩に依存する。従って色度と独立な明度分析には、同一色度の領域ごとに個別に行うことが重要と考える。

2.6.1の[仮定2]に基づけば、多面体の各面がその照明光と観測点との位置関係に依存する明度の相違として表れ、影は極端な低明度として表れると考えられる。明度ヒストグラムには明瞭な多峰性が表れると予想される。そのようなクラスタの分離は多値化分割の問題に帰着する。

2.6.4.3 アルゴリズム

2.6.4.1, 2.6.4.2の考察から以下の分割アルゴリズムを提案する。

[Step1] 小近傍均一色度領域の検出

rg 2次元ヒストグラム上で、ピーク $\mathbf{h}_i = (r'_i, g'_i)$ を検出する。検出したピークを H 個として、 $i=0,1,\dots,H-1$. $\mathbf{h}_i$ をクラスタ中心とするクラスタを初期クラスタ d_i とする。 d_i は小近傍均一色度領域に相当する。

サイズ $X \times Y$ の画像の各画素 $\mathbf{p}_i$ ($i=1,\dots,X \times Y$) を、次の基準を満足する d_k に属させる。

$$\|\mathbf{p}_i - \mathbf{h}_k\| = \min_j (\|\mathbf{p}_i - \mathbf{h}_j\|) \quad (2.23)$$

d_i に属する画素数を σ_i とする。

[Step2] 小近傍均一色度領域の融合過程

ある2つのクラスタ d_i, d_j を, 階層的クラスタリングの手法で, rg に関して融合する.

$\mathbf{h}_i, \mathbf{h}_j$ 間の距離 ρ_{ij} ($i \neq j$) を求める.

$$\rho_{ij} = \|\mathbf{h}_i - \mathbf{h}_j\| \quad (2.23)$$

$$\rho_{mn} = \min_{i,j}^N(\rho_{ij}) \quad (2.24)$$

を満足する $i = m, j = n$ に対する d_m, d_n を融合して d_k とする. このとき, $\mathbf{h}_m = (r'_m, g'_m), \mathbf{h}_n = (r'_n, g'_n), \sigma_m > \sigma_n$ として,

$$\mathbf{h}_k = \mathbf{h}_m + \mathbf{h}_n \quad (2.25)$$

$$\sigma_k = \sigma_m + \sigma_n \quad (2.26)$$

とし, d_n は d_m に吸収される.

このとき, σ_m, σ_n に関してしきい値 σ_{th} を設定し, 次の評価を行う.

$\sigma_m \geq \sigma_{th} \cap \sigma_n \geq \sigma_{th}$ の場合:

d_n を有意な領域に対応するクラスタとして, $\mathbf{h}_n$ を融合履歴として記録する.

$\sigma_m < \sigma_{th} \cup \sigma_n < \sigma_{th}$ の場合:

ノイズに相当するクラスタが吸収されたとみなし, 融合履歴には何も記録しない.

履歴においては融合の順序は必要ではなく, 融合の関係のみ着目する. 残りのクラスタ数が2個以上なら [Step2] を繰り返す.

式(2.24)と 2.6.1 の [仮定3] より, ある同一色度に属するクラスタは, それらが全て融合するまで, 他の色度領域に属するクラスタと融合することはない.

[Step3] 物体領域および色彩偏移領域の検出

[Step2] で記録された融合履歴に関して, ρ に対してしきい値 ρ_{th} を設定し, 次の評価を行う.

$\rho < \rho_{th}$ の場合, 同一色度領域内での融合とみなし, 吸収された側のクラスタを色彩偏移領域のものとみなす.

$\rho \geq \rho_{th}$ の場合, 異なる色度領域の融合とみなす.

図2-24に, [Step2], [Step3] の融合過程を示す. 同図中, □印は同一色度領域すなわち物体領域であり, その物体領域を代表するベクトルということができる. ●印は, 色彩偏移領域に相当する.

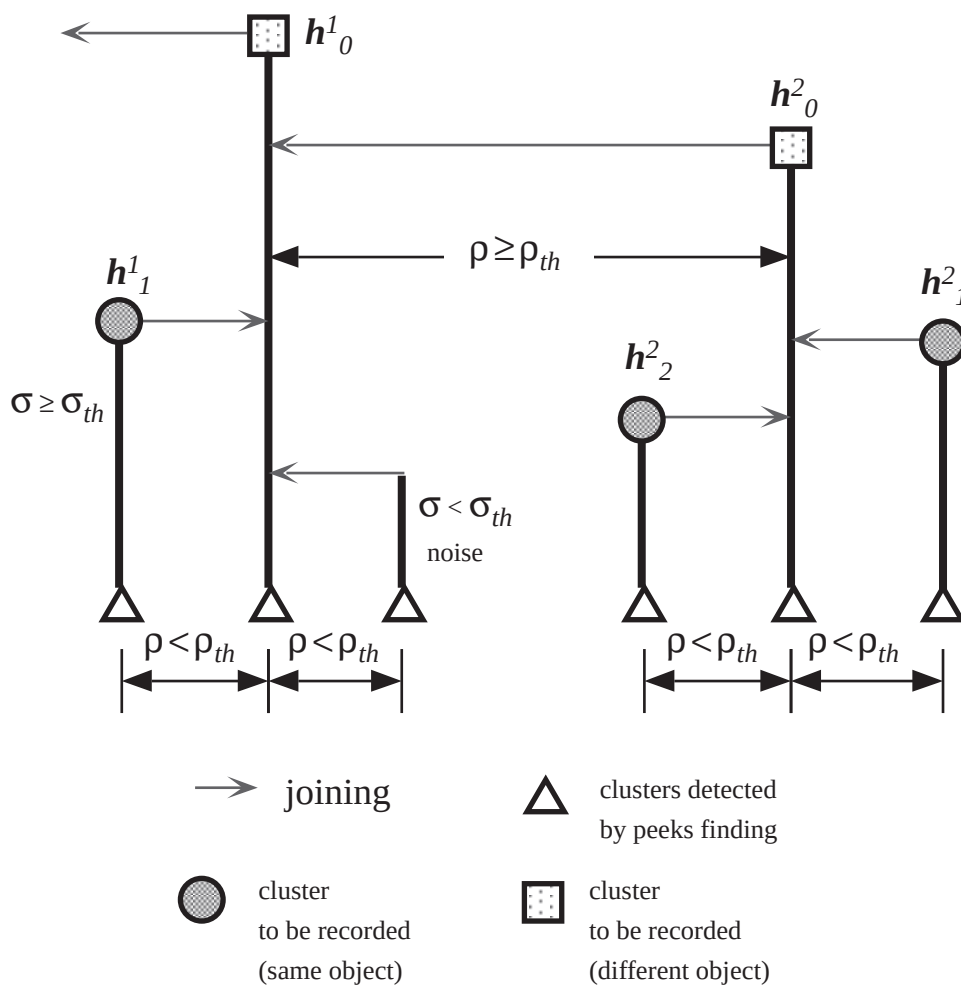


図 2-24 rg 色度クラスタの融合

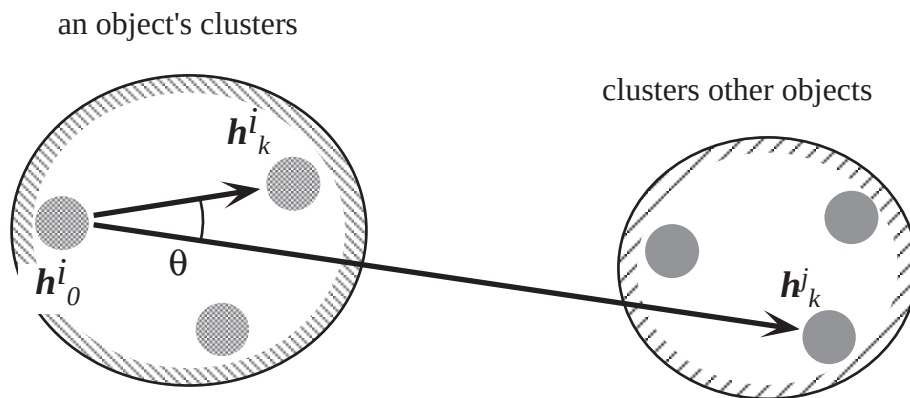


図 2-25 色度偏移領域の推定

[Step4] 色彩偏移方向の検出

[Step2] で融合履歴に記録されたクラスタ中心を改めて $\mathbf{h}_v^u$ とする．添字 u は [Step3] で分類された各々異なる同一色度領域を表し， $u=0, \dots, U-1$ である．添字 v は各領域内での番号とし，図2-24中に示すように，□印に相当するものを $v=0$ ，他を適当な順序で $v=1, 2, \dots$ と付ける．

図2-25に示すような，ある $\mathbf{h}_v^u$ に注目し， $\mathbf{h}_v^u - \mathbf{h}_0^u$ と， $\mathbf{h}_v^{u'} - \mathbf{h}_0^u$ のなす角を θ とする．

$$\theta = \cos^{-1} \frac{(\mathbf{h}_v^u - \mathbf{h}_0^u) \cdot (\mathbf{h}_v^{u'} - \mathbf{h}_0^u)}{\|\mathbf{h}_v^u - \mathbf{h}_0^u\| \|\mathbf{h}_v^{u'} - \mathbf{h}_0^u\|} \quad (2.27)$$

$\mathbf{h}_0^u$ は一つの物体領域を代表する色度ベクトルと考えてよい．その領域中における， $\mathbf{h}_v^u$ に代表される部分領域が，他のいずれかの物体領域の色度方向へ偏移しているかどうかを調べる．ここでは，しきい値 θ_{th} を設定し， $\theta \leq \theta_{th}$ を満足する $\mathbf{h}_v^{u'}$ が存在するならば， $\mathbf{h}_v^u$ を $\mathbf{h}_v^{u'}$ の存在する物体領域の色度へ偏移しているものとする． $\theta \leq \theta_{th}$ を満足する $\mathbf{h}_v^{u'}$ が複数の場合は，最も小さい θ が存在する物体領域の色度を選択するものとする．

なお，3個以上の異なる物体領域が， rg 色度面上で，ほぼ一直線上にあるような場合は，このアルゴリズムでは考慮しないものとする．

[Step5] 明度分析

[Step3] で検出した物体領域をそれぞれマスクとする．各マスク内の画素集合について明度 L ヒストグラムを分析する．ヒストグラムの谷の位置を求め，クラスタに分離する．

3.4.2で考察したように，1次元明度ヒストグラムの多値化分割の問題である．図2-26のように分割された各クラスタに意味付ける．ここでは特に具体的手法は提案しない．

[Step2] のクラスタ融合にあたって，一般には，多数の画素値を参照して初期のクラスタの重心を求める必要があるが，以上のアルゴリズムでは， rg 平面でのピーク検出がそれに相当しているため，計算

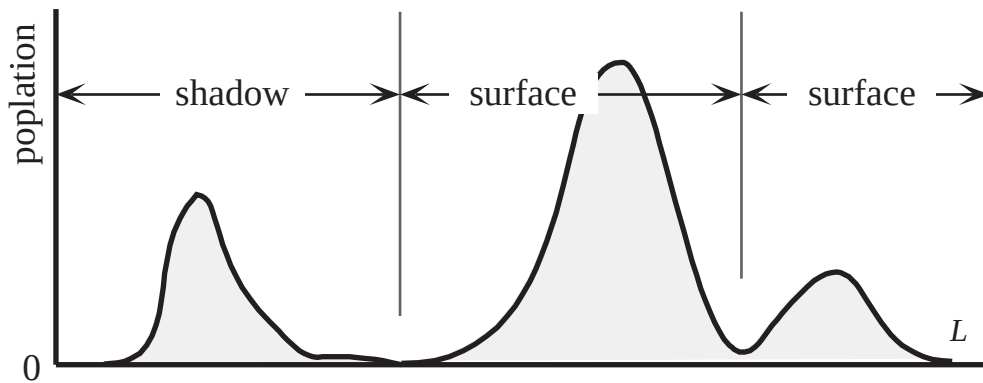


図2-26 明度ヒストグラムの意味付け

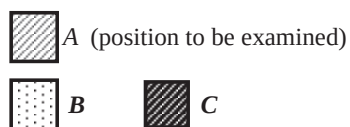
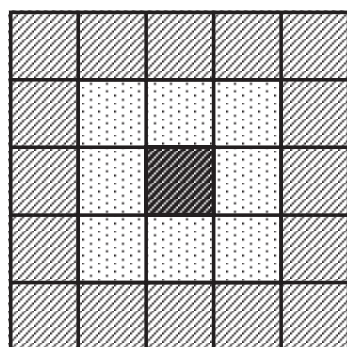


図 2-27 ピーク検出フィルタ

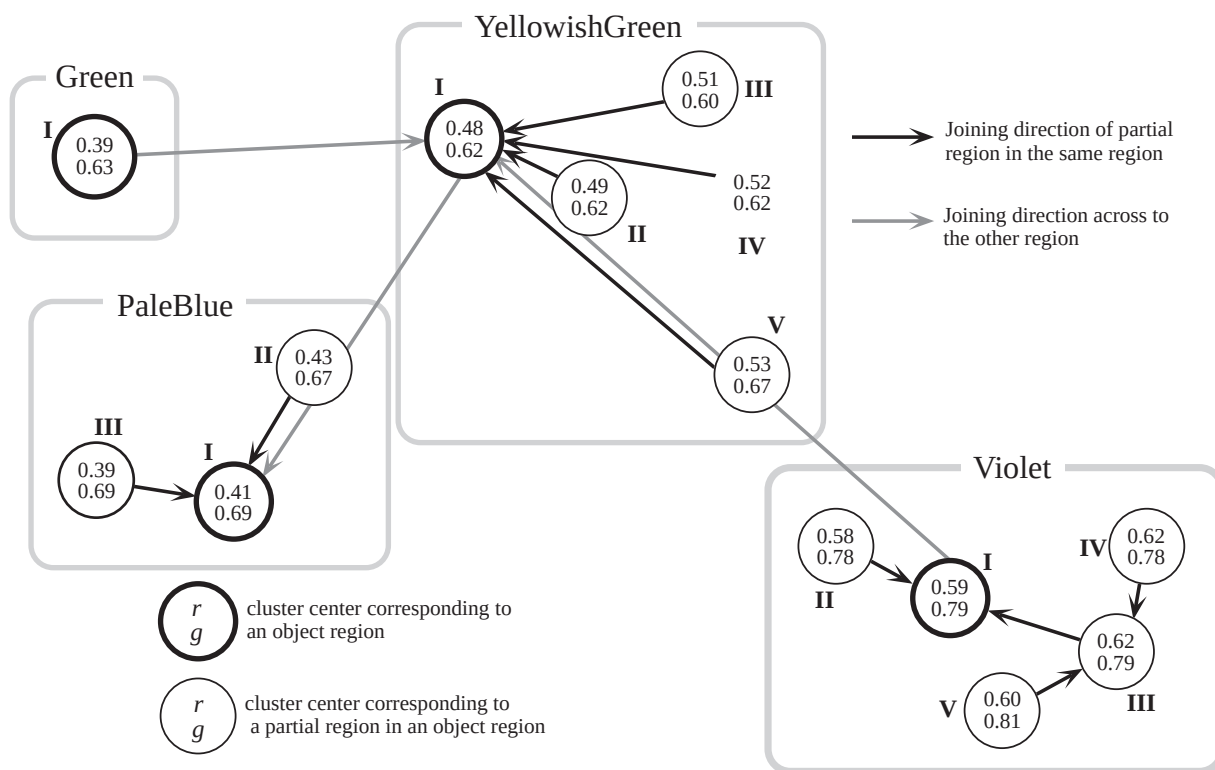


図 2-28 クラスタ中心の rg 色度に関する融合関係

量の低減が見込まれる。

2.6.5 領域分割実験

図2-17の画像データを用いて分割実験を行った。シーン中の色度領域数 $U=4$ である。

512×512にデジタル化した rg 色度の色三角形上の rg ヒストグラムに対し、図2-27に示す5×5のフィルタを走査し、次の条件を満足する場合にピークとした。

$$(A > 0) \cap (A > \max B) \cap (\min B > \max C) \quad (2.28)$$

ここで A は注目する rg ベクトル値、 B 、 C はそれぞれ図の示す位置の rg ベクトル値の集合である。図2-17(b)の効率的露光制御カラー画像データについては、442個のピークが検出できた。2.6.4.3のアルゴリズム [Step1] ~ [Step3] を実行し、記録されたクラスタ中心の rg 平面上でのおよその相対的位置関係とそれらの融合関係を図2-28に示す。融合時の条件は、 $\sigma_{th}=600$, $\rho_{th}=40$ である。また、図

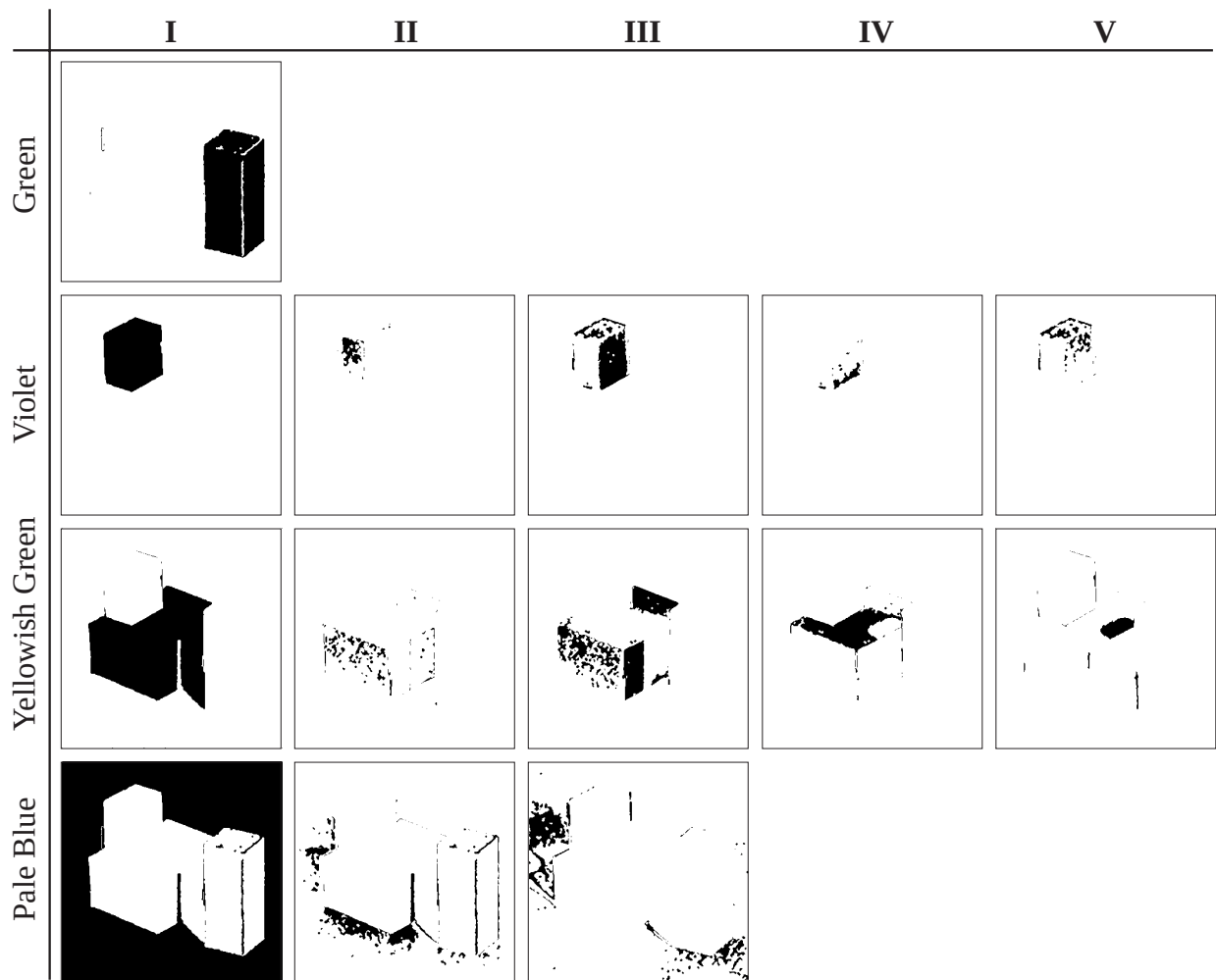


図2-29 クラスタに対応する領域

2-28の各クラスタ中心に対応する領域を図2-29に示す。図2-28中の、各物体領域のⅠ～Ⅴに対応している。

まず図2-29, Ⅰ列の各物体領域の抽出結果には注目できる。2.5.4でも簡単な領域分割実験を示したが、本来、影などノイズの多い領域を含むシーンにもかかわらず、孤立点除去や再融合などの後処理の必要がない程度に、良好な結果が得られている。図2-17(a)の通常の画像に対して同様の処理を行ったが、影の領域の明瞭な分割は不可能であった。

図2-29, Ⅰ列で、Pale Blue領域上の影に相当する部分に、Yellowish Green領域への誤分割が見られる。これは、2.6.1の、影領域の入射光・反射光が白色とみなすという〔假定4〕が完全には満足されていないことが考えられる。直接の照明光が少なくなるために、相対的に相互反射などの、入射光と反射光が大きくなり、異なる色彩領域として認識されたものと考えられる。この問題点は、部分領域にも表れており、今後の検討課題としたい。

図2-29中、Ⅱ列以降は部分領域で、他の領域に吸収されるまで、画像上にある程度の大きさを占めていた、意味のある領域である。Green領域には、特に有意な部分領域の検出はなかった。Pale Blue領域には他の領域と接する位置に部分領域が検出できている。

図2-28のクラスタ中心相互の、 rg 平面上での位置関係を式(2.27)により求めたものを表2-2に示す。 $\theta_{th} = 10 \text{ deg.}$ を満たす値を表中、太線で囲んだ。これによれば、図2-28において、Violet-Ⅱの部分領域が、背景のPale Blueの影響を、Yellowish Green-ⅤはVioletの影響を、そしてPale Blue-ⅡはYellowish Greenの影響を、それぞれ受けて色彩が偏移していることになる。Yellowish Green-Ⅴは影の部分で、直接照明光が非常に少ないため、相対的にViolet領域からの2次反射を受けていると考えられる。Pale Blue-Ⅱは、隣接したYellowish Green領域からの2次反射を受けていると考えられる。

他の部分領域についても、定性的な考察も可能であるが、検出アルゴリズムでは以上3点の色偏移領域を検出することができた。

4つの各物体領域内の明度ヒストグラムを図2-30に示す。明瞭な多峰性を示している。図中に、視認により定めたヒストグラムの谷点を、しきい値として示した。図2-31に分割結果を示す。低明度側のクラスタから順に黒、暗灰、明灰の領域と対応しており、白は対象外領域である。図2-29と併せて考察する。Green, Violetは、面の方向の違いを分割できており、とくに図2-29よりVioletは、面の方向が色度の偏移にも関係している。Yellowish Green, Pale Blueでは、最低明度のクラスタが影に相当している。それぞれ面の方向、床、壁の手がかりを与える結果が得られている。

ここでは影の有無の判断については論じない。ただ、影は直接照明光を遮られた領域であるから、いかなる反射角の大きな領域も影より暗くなることはない。従って影があることがあらかじめ分かっている

表2-2 クラスタ中心相互の rg 平面上での位置関係

		(deg.)															
		Green	Violet					Yellowish Green					Pale Blue				
		I	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III		
Violet	II	14.6						34.6	36.6	44.1	46.3	38.7	4.8	14.3	3.4		
	III	150.3						130.3	128.3	120.8	118.7	126.2	160.1	150.6	161.6		
	IV	127.2						107.2	105.2	97.8	95.6	103.1	137.0	127.5	138.5		
	V	159.8						179.8	178.2	170.7	168.5	176.1	150.1	159.5	148.6		
Yellowish Green	II	142.6	31.3	33.8	25.9	23.6	31.3						105.4	108.4	113.9		
	III	159.9	88.8	91.3	83.4	81.1	88.8						163.0	166.0	171.4		
	IV	166.7	55.3	57.8	49.9	47.6	55.4						129.5	132.5	138.0		
	V	118.8	7.4	9.9	2.0	0.3	7.5						81.6	84.6	90.1		
Pale Blue	II	55.1	82.5	82.9	80.2	77.3	84.9	6.5	13.1	10.6	21.0	44.1					
	III	59.2	163.3	162.9	165.6	168.5	160.9	120.8	127.3	124.8	135.2	158.3					

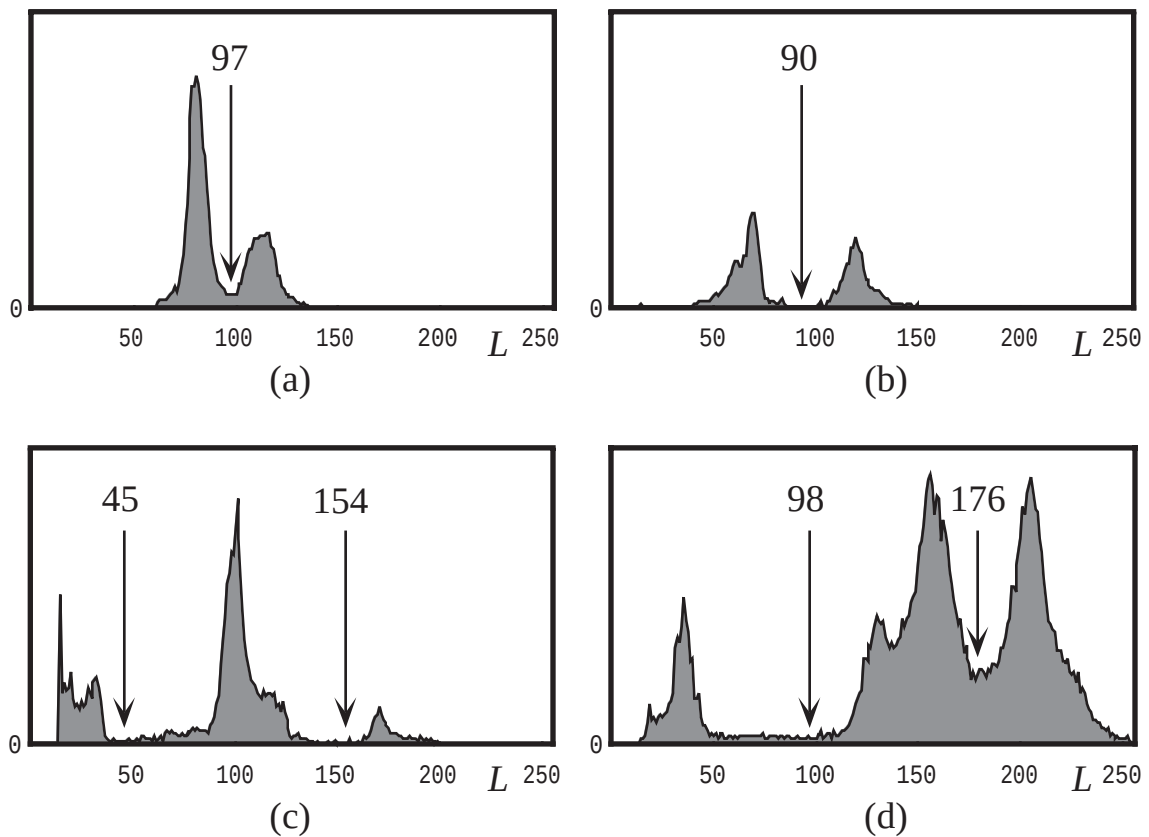


図2-30 各物体領域内の明度ヒストグラムとしきい値

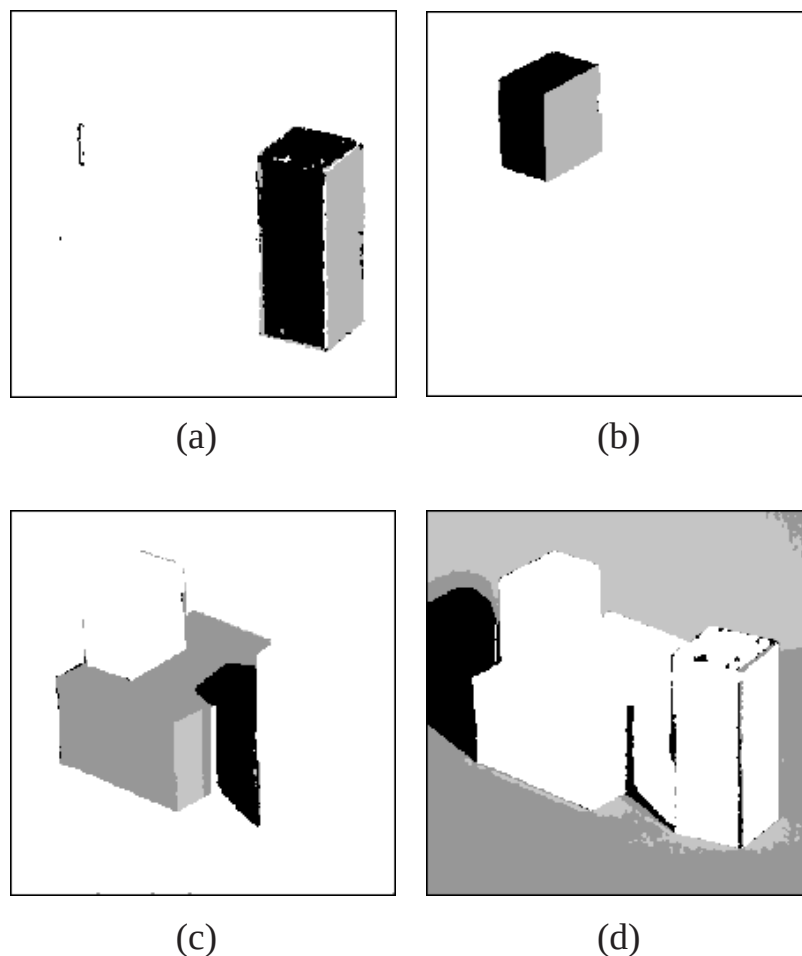


図 2-31 分割結果

る場合であれば，最も低明度のクラスタを影とみなして差し支えないであろう．

2.7 まとめ

良質な色彩情報もつ効率的露光制御カラー画像の入力方式について述べた．露光条件を変化させながら時系列に得られる複数の画像から 1 枚の画像を合成する．提案手法の基本要素は次の 4 点である．

- (1) 可変電子シャッター機能により，261 段階の露光時間をフレームごとに制御可能にした CCD カメラを用いて多段階で等間隔に露光制御する．
- (2) カメラから画像メモリに至る信号伝送系の対入射光量特性を線形補正する．
- (3) 露光時間の異なる時系列の画像を用いる．ただし，それらすべての画像を記憶する必要はない．
- (4) 各画素を十分な光量で入力することにより，良好な色彩精度が得られる．

提案方式により，大きな輝度差を含むシーンで，色彩情報を安定して取得することができた．

続いて、効率的露光制御カラー画像を利用した画像認識手法として、シーンの分割実験を行った。まず rg 色度による簡単な領域分割実験により、通常の入力に比べて良好な分割結果が得られ、色彩の識別に有効な画像入力方式であることを示した。さらに詳細なシーンの分割法についても検討した。効率的露光制御カラー画像が、明度と色度よりなる Lrg 色特徴空間で稠密な棒状の特徴的なクラスタを構成することを実際のデータにより示した。ここで、 rg 色度に関するベクトルメディアンフィルタを提案し、棒状クラスタをより稠密化できることを示した。これにより影など、明度変化に無関係なシーンの分割は、 rg 色度の2次元ヒストグラム上での、重なりが少ない先鋭なクラスタ群の分離の問題に帰着でき、 rg 2次元ヒストグラムのピークの検出とそれらをクラスタ中心とした小領域の階層的融合のみの比較的単純な考え方で、後処理も不要な程度 of 良好な分割が可能であることを示した。また、階層的融合の過程を用いて、相互反射や面の方向に起因した色度の偏移領域の検出も可能であることを示した。これまでは不安定な結果しか得られず、処理対象外とされることが多かった影など低明度部分でも、色度について安定した分割が可能であった。明度に関しては、色度により分離した領域ごとに明度分析することが合理的であるとの考えに立ち、明度ヒストグラムを参照した分割を行い、面の方向や影に相当する領域を分離できた。

色度と明度それぞれに基づく分割は、シーン中の物体の姿勢や位置関係に関する3次元解釈に手がかりを与えるものであるが、具体的な利用方法については、今後の検討課題である。シーンに対して多くの仮定が設定されていること、さまざまなパラメータのしきい値の効率的決定方法など、残された課題も少なからず存在する。

提案した画像入力方式は、時系列の複数画像を用いるため、1シーンに対する最終の入力画像を得るために時間を要する。そこで、一露光条件に対応する輝度範囲がなるべく均等になるようにという条件で、露光時間の間隔を間引く高速化の指針を検討した。入力時間短縮の程度は対象シーンの輝度分布に依存すると考えられるが、試みたシーンでは入力時間を1/6程度に短縮できることがわかった。この高速化の指針により、対象によっては産業用途への利用も不可能ではないと考える。

以上、効率的露光制御カラー画像入力方式は、色物体の識別やシーンの認識など色彩情報を積極的に利用する用途に関して、より正確な結果を容易に得るために有用な画像入力方法であることを示した。

なお、提案方式は、色度画像に加えて露光時間画像が得られる画像入力方式であることを述べた。このことは、効率的露光制御によるカラー画像が、ダイナミックレンジを通常の撮像では不可能な範囲まで拡大した画像データとしても利用できることを意味している。第3章は、そのような広ダイナミックレンジの画像入力法を、レンズ絞りを利用した露光制御で実現しようとした初期の試みに関する内容となっている。そして本章の画像入力法の要点は、可変電子シャッター機能を利用した露光制御の実現であって、手段に共通性があることから、画像データの融通も考えられることを特に記しておく。

第3章 材質の判別のための 広ダイナミックレンジカラー画像入力

コンピュータビジョンにおける物体認識では、その処理過程は、視覚情報を入力と、画像中の特徴を抽出し、抽出された特徴とモデルとを比較照合する過程から成る。これまでの物体認識では、主に物体の位置・形状・姿勢といった幾何学的特徴・モデルに注目した研究が行われてきた。しかし、形状だけでは判断にあいまいさが残る場合や、柔物体のように幾何学的モデルの構築が困難な場合も存在する。そこで、幾何学的特徴と他の特徴を併用することが考えられる。物体表面の材質間（反射特性）の利用は、その一つの可能性として挙げることができる。

物体の光の反射特性を手掛かりに、素材を判別する方法としては、その物体表面の分光反射率に基づくものが最も基本的なアプローチであろう。しかし、その場合には少なくとも全可視光域に関する分光強度分布を個々の画素について計測する必要がある。コンピュータビジョンの手法としては、画像入力機構やデータ量から考えて煩雑に過ぎる。そこで、RGBカラー画像から材質に関する情報を得る方法を考える。

本章では、こうした材質感認識の基礎的研究として、RGBカラー画像における光沢（ハイライト）に着目した材質感判別・相互反射検出を目的としている。そしてそのためには通常のカラー画像入力では、必要とする広ダイナミックレンジのカラー画像が得られないことを踏まえて、同一シーンに対してレンズ絞りを変えて撮像した複数の画像を統合する、広ダイナミックレンジカラー画像入力手法を提案している。

RGBカラー画像を用いた物体からの光の反射に関する研究に関しては、Shaferらの提案によるプラスチックペンキのような不均質非導体を対象とした、ハイライトを含めた物体表面での反射過程モデル、2色性反射モデル（Dichromatic reflection model）がある。このモデルによると不均質非導体の観測色強度は、内部反射成分と界面反射成分から構成される。Shaferらは、このモデルを用いて、光沢を含むシーンを対象に、光沢成分の除去[Klinker 87]や、領域分割[Klinker 88],[Klinker 90]の研究に発展させている。また、Lee, Breneman, Schulete[Lee 86]や富永[Tominaga 89]は、このモデルの妥当性を分光強度分布データを用いて示している。

その近似性、簡潔性から、光沢を含むシーンの解析に適していると思われる2色性反射モデルを用いて、金属物体などのさまざまな材質と関連づけた反射モデルと、それを考慮した主因子解析により材質感認識を行うことが可能である。更に、従来扱われることのなかった相互反射に対して、この反射モデルを基にモデル構築を行い、主に金属物体および光沢のない非金属物体表面に生じる相互反射を抽出す

ることが可能である。しかし、そのような認識対象とするシーンには、表面が拡散反射性から鏡面反射性まで、撮像時に極端な輝度差を呈する対象物が混在すると考えなければならない。すなわち、通常の撮像手段を用いた場合、撮像デバイスにおいて、高輝度部分に対する出力電気信号の飽和、あるいは低輝度部分に対する信号のSN比の低下が予想される。本章では、この対策のためにダイナミックレンジを拡大したカラー画像の入力方法に関する撮像方法の工夫として、レンズ絞りを変えて撮像した複数のRGBカラー画像を統合する画像入力法を用いて、上述の材質認識処理を可能とした。

3.1 2色性反射モデル (Dichromatic Reflection Model)

一般にプラスチックなどの不均質非電導性物体の表面は、図3-1に示したような不均質な構造で近似できると言われている。すなわち物体は、媒質(medium)とその中に埋め込まれている色素粒子(colorant)の二つの要素で構成されるものとする。ここでShaferは、物体の反射光は二つの物理的に異なった経路を通過すると考えた。すなわち、入射光の一部は物体表面と空気層との境界面(interface)で直ちに反射し、残りの入射光は物体内に浸透し、媒質・色素粒子による散乱吸収が繰り返された後に外部に至る。本章では、前者の反射を内部反射(body reflection)と呼ぶこととする。

界面反射は、視覚的には光沢（ハイライト）として認識される。界面反射は鏡面反射の法則にほぼ従い、入射角と反射角が一致する視覚の狭い範囲でのみ観測される。また、媒質や色素粒子との吸収・散乱が生じる前に界面で反射されるため、その分光強度分布は光源のそれと同一であるとみなせる。すなわち、界面反射の色は光源の色と一致する。

一方内部反射は、光が外部に至るまでに吸収される割合が波長によって異なるため、光源の色とは異なった色として観測される。この分光吸収率はその物体固有の色を決定する。厳密には、分光吸収率は、光源－物体－観測者の位置関係によって変化するが、Shaferは常に一定であると仮定した。また、内部

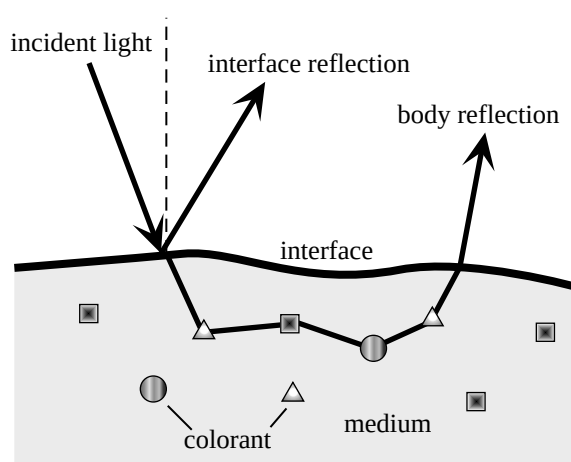


図3-1 不均質物体における光の反射過程

反射は完全拡散反射とみなせるので、その光強度は照明距離と入射角によって決まり、反射角に依存しないものとする。

こうして、Shafer は不均質非電導性物体表面の反射光 $L(\lambda, i, e, g)$ を式(3.1)に示すように界面反射色 $C_i(\lambda)$ と内部反射色 $C_b(\lambda)$ の線形結合で表現した。

$$L(\lambda, i, e, g) = m_i(i, e, g) \cdot C_i(\lambda) + m_b(i, e, g) \cdot C_b(\lambda) \quad (3.1)$$

これが、Shafer の 2 色性反射モデル(Dichromatic reflection model)である。ここで、 λ は光の波長、 i は入射角、 e は反射角、 g は位相角を表し、 m_i と m_b はそれぞれ界面反射成分、内部反射成分の重みを表している。更に、式(3.1)を RGB カラー画像に対応させるために、RGB ベクトルで表現すると、座標 (x, y) の画素の色ベクトル $C(x, y)$ は、次のように表現される。

$$\begin{aligned} C(x, y) &= m_i(x, y) \cdot C_i + m_b(x, y) \cdot C_b \\ C(x, y) &= [R, G, B]^T \\ C_i &= [R_i, G_i, B_i]^T, C_b = [R_b, G_b, B_b]^T \end{aligned} \quad (3.2)$$

本研究で用いる反射モデルは、この 2 色性反射モデルを基にしたもので、金属物体を含む有色不透明物体に対応している。

3.2 材質感のカラー反射モデル

日常生活において通常目にする材質は、視覚的に、透明—不透明、光沢あり—光沢なし、金属的—非金属的などの特徴で分類することができる。本研究では、このうちの有色の金属と不透明非金属物体を処理対象とする。更に、不透明非金属物体を光沢があるものとないものに分けることで、「金属物体」、「光沢のない非金属物体」、「光沢のある非金属物体」の三つのタイプに分類し、各タイプの特徴とそれぞれの反射モデルについて述べる。

(1) 金属的材質感(Metallic type)

非金属物体の反射過程は界面反射と内部反射の両方より構成される。これに対し、金属物体の表面は均質な構造で近似できると考えられ、反射過程は界面反射だけを考える。但し、非金属物体における界面反射とは異なり、光の波長によって反射率が変化し、反射光の色は光源の色とは異なる。また、通常この分光反射率は撮影条件や表面の加工処理によって微妙に変化するが、ここでは一定であると仮定する。

そこで画像における座標 (x,y) の観測色ベクトル $C(x,y)$ は、界面反射色ベクトル C_i と重み $m_i(x,y)$ によって次のように表現される。

$$\begin{aligned} C(x,y) &= m_i(x,y) \cdot C_i \\ C(x,y) &= [R, G, B]^T, C_i = [R_i, G_i, B_i]^T \end{aligned} \quad (3.3)$$

この式は入力信号をRGB色空間に展開すると、1本の線分上に分布することを表している。(図3-2)。また、そのRGB空間での分布形状は非金属物体に比べて高輝度の領域にまで及ぶ。これは一般に金属の反射率は高く、また反射光は正反射方向に集中するためである。

(2) 光沢のない非金属的材質感(Matte non-metallic type)

光沢のない非金属物体の反射光は完全拡散反射のみからなり、その観測色ベクトル C は内部反射成分 C_b だけで表現できる。そこで、観測色ベクトル $C(x,y)$ は次のように表現される。

$$\begin{aligned} C(x,y) &= m_b(x,y) \cdot C_b \\ C(x,y) &= [R, G, B]^T, C_b = [R_b, G_b, B_b]^T \end{aligned} \quad (3.4)$$

これは、入力信号をRGB色立方体内に展開すると、金属物体の場合と同様に1本の線分上に分布することを表している(図3-3)。しかし、その分布は、金属物体に比べて反射率が低く、完全拡散反射のため視線方向には全反射光のうち、ごく一部が反射するに過ぎないためである。

(3) 光沢のある非金属的材質感(Glossy non-metallic type)

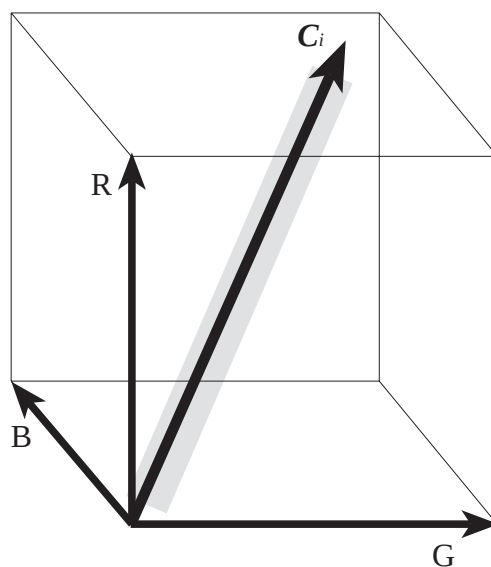


図3-2 金属物体の分布モデル

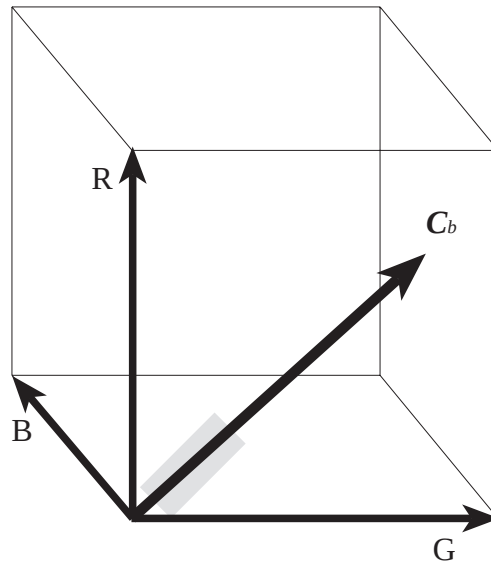


図3-3 光沢のない非金属物体の分布モデル

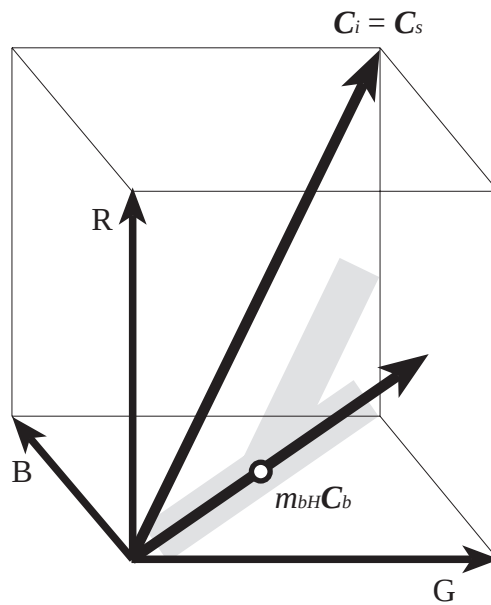


図3-4 光沢のある非金属物体の分布モデル

光沢のある非金属物体の観測色ベクトル C は、界面反射成分 C_i と内部反射成分 C_b からなる．そこで座標 (x,y) の観測色ベクトル $C(x,y)$ は次のように表現される．

$$\begin{aligned}
 C(x,y) &= m_i(x,y) \cdot C_i + m_b(x,y) \cdot C_b \\
 C(x,y) &= [R, G, B]^T \\
 C_i &= [R_i, G_i, B_i]^T, C_b = [R_b, G_b, B_b]^T
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

ここで、 C_i は照明色 C_s に一致している。この式は、 $C(x,y)$ がRGB色空間で二つのベクトル C_i 、 C_b に挟まれた平面上の分布することを示している。このときの画像と色空間の対応は次のようになる。画像中で、界面反射成分の影響を受けるのは正反射関係が成立する領域（ハイライト領域）周辺だけである。そのため、他の部分の色空間での分布は、光沢のない非金属物体の場合と同じく、原点から C_b の方向に延びる線分上に分布する。一方、ハイライト領域の周辺部に注意を向けると、内部反射成分 L_b はほとんど変化せず、ほぼ一定値 $m_{bh} \cdot C_b$ をとるとみなせる。このため、色空間内では $m_{bh} \cdot C_b$ を通り C_i の方向に延びる線分上に分布する。すなわち領域全体としては図3－4に示すような分布を示す。

3.3 相互反射のモデル

ここまでは、光源からの直接光による照明効果のみを考えてきた。しかし実際のシーンでは、物体上のある注目領域からの反射光は、直接照明光だけでなく、他の物体、あるいは同一物体上の異なる面上から反射した光が、再び注目領域において反射する場合も生じる。この現象を相互反射(interreflection)と言う。この現象は、金属物体では頻繁に生じる。画像生成アルゴリズムとしては従来、相互反射現象（映り込み）を扱う各種手法が確立、普及している一方、画像解析アルゴリズムとしては、まだ、相互反射現象に対応した一般的な画像処理手法が存在しないのが現状であり、通常はノイズとして無視されていた。ここでは、画像中で頻繁に現れる二つの物体間で生じる相互反射を簡単なモデルで表現するとともに、その抽出法について述べる。

今、物体Aと物体Bが存在し、物体Bの反射光が物体A上の領域Cを照射し相互反射が生じた場合を考える。このとき、物体A、物体Bの反射光 C_A 、 C_B を物体固有の色成分 C_u と照明光の色成分 C_s に分離して表現すると次のようになる。

$$\begin{aligned}
 C_A(x,y,\lambda) &= K_{uA}(x,y) \cdot C_{uA}(\lambda) + K_{sA}(x,y) \cdot C_s(\lambda) \\
 C_B(x,y,\lambda) &= K_{uB}(x,y) \cdot C_{uB}(\lambda) + K_{sB}(x,y) \cdot C_s(\lambda)
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

ここで、 K_{uA} 、 K_{sA} 、 K_{uB} 、 K_{sB} は座標 (x,y) の画素における各成分の重みを表す。また固有色成分 C_u は材質が金属的な場合は界面反射成分が、非金属的な場合には内部反射成分が対応し、照明色成分 C_s は光沢のある非金属の場合の界面反射成分が対応している。ここで、領域Cの (x,y) に照射する物体Bの反射光 C'_B 、物体Bからの照射光に対する物体Aの反射率 R_A は次のように表される。

$$\begin{aligned} C'_B(x,y,\lambda) &= K_{uB}(x,y) \cdot C_{uB}(\lambda) + K'_{sB}(x,y) \cdot C_s(\lambda) \\ R_A(x,y,\lambda) &= C'_A(x,y,\lambda)/C_s(\lambda) = K'_{uA}(x,y) \cdot C_{uA}(\lambda)/C_s(\lambda) + K'_{sA}(x,y) \end{aligned} \quad (3.7)$$

そこで、領域Cの反射色 C_c は

$$\begin{aligned} C_c(x,y,\lambda) &= (\text{直接光による反射成分}) + (\text{物体Bからの相互反射成分}) \\ &= C_A(x,y,\lambda) + R_A(x,y,\lambda) \cdot C'_B(x,y,\lambda) \\ &= k_1(x,y) \cdot C_{uA}(\lambda) + k_2(x,y) \cdot C_{uA}(\lambda) \cdot C_{uB}(\lambda)/C_s(\lambda) + k_3(x,y) \cdot C_{uB}(\lambda) + k_4(x,y) \cdot C_s(\lambda) \\ k_1(x,y) &= K_{uA}(x,y) + K'_{uA}(x,y) \cdot K'_{sB}(x,y) \\ k_2(x,y) &= K'_{uA}(x,y) \cdot K'_{uB}(x,y) \\ k_3(x,y) &= K'_{sA}(x,y) \cdot K'_{uB}(x,y) \\ k_4(x,y) &= K_{sA}(x,y) + K'_{sA}(x,y) \cdot K'_{sB}(x,y) \end{aligned} \quad (3.8)$$

ここで、係数 k_4 は物体Aが光沢のある非金属物体でかつ光源-領域C-視点で正反射関係が成立する、あるいは光源-物体B-領域C-視点で合せ鏡の条件が成立するときのみ値をもつ。一般に相互反射においては、 k_4 は零とみなすことができ、相互反射領域の反射色は次のように表現される。

$$\begin{aligned} C_c(x,y,\lambda) &= (\text{物体Aの固有色成分}) + (\text{物体A, Bの固有色の干渉成分}) + (\text{物体Bの固有色成分}) \\ &= K_1(x,y) \cdot C_{uA}(\lambda) + K_2(x,y) \cdot C_{uA}(\lambda) \cdot C_{uB}(\lambda)/C_s(\lambda) + k_3(x,y) \cdot C_{uB}(\lambda) \end{aligned} \quad (3.9)$$

今、画像入力系全体の分光感度特性を $\mathbf{F}(\lambda) = [f_R(\lambda), f_G(\lambda), f_B(\lambda)]^T$ とすると、相互反射領域の観測色ベクトルは、

$$\mathbf{C}(x,y) = K_1(x,y) \cdot \mathbf{C}_{uA} + K_2(x,y) \cdot \int \{ \mathbf{F}(\lambda) \cdot C_{uA}(\lambda) \cdot C_{uB}(\lambda)/C_s(\lambda) \} d\lambda + K_3(x,y) \cdot \mathbf{C}_{uB} \quad (3.10)$$

と表される。ここで、物体Aが金属物体あるいは光沢のない非金属物体である場合と、物体Aが光沢のある非金属物体である場合を考えてみる。

(1) 金属物体、あるいは光沢のない非金属物体の相互反射

物体Aが金属物体あるいは光沢のない非金属物体の場合、式(3.10)の係数 K_3 が零となり、その観測色ベクトル $\mathbf{C}$ は次のように表現される。

$$\mathbf{C}(x,y) = K_1(x,y) \cdot \mathbf{C}_{uA} + K_2(x,y) \cdot \int \{ \mathbf{F}(\lambda) \cdot C_{uA}(\lambda) \cdot C_{uB}(\lambda)/C_s(\lambda) \} d\lambda \quad (3.11)$$

この式は、RGB色空間で二つのベクトル $\mathbf{C}_{uA}$, $\int \{ \mathbf{F}(\lambda) \cdot C_{uA}(\lambda) \cdot C_{uB}(\lambda)/C_s(\lambda) \} d\lambda$ に挟まれた平面上に分布することを示している。(図3-5)。平面上に分布する点は光沢のある非金属物体と同じであるが、相互

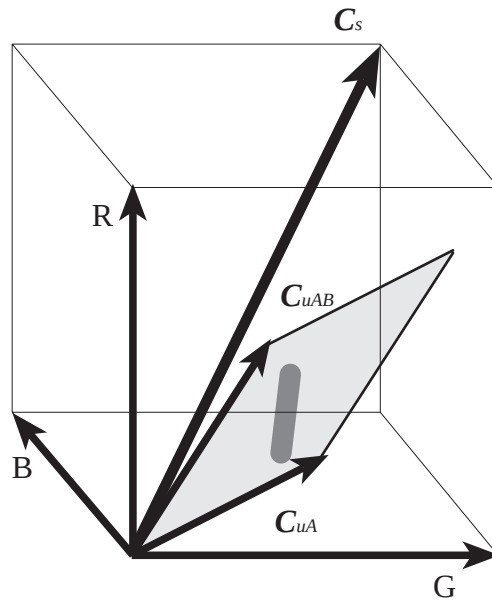


図3-5 相互反射の分布モデル

反射の場合，その平面は一般に光源色ベクトルを含まない．

更に，二つの物体の固有色ベクトルの彩度が極端に強くなければ，式(3.11)を次のように近似することができる．

$$\begin{aligned} C(x,y) &= K_1(x,y) \cdot C_{uA} + K_2(x,y) \cdot C_{uAB} \\ C_{uAB} &= [R_{uA} \cdot R_{uB}, G_{uA} \cdot G_{uB}, B_{uA} \cdot B_{uB}]^T \\ C_{uA} &= [R_{uA}, G_{uA}, B_{uA}]^T, \quad C_{uB} = [R_{uB}, G_{uB}, B_{uB}]^T \end{aligned} \quad (3.12)$$

そこで，あらかじめ相互反射に関連がある候補物体の固有色ベクトルを求めておけば，その固有ベクトルの組み合わせと分布平面の相互位置関係から，相互反射を表面に生じている物体と，映り込んでいる物体とを特定することが可能である．

(2) 光沢のある非金属物体表面の相互反射

物体 A が光沢のある非金属物体の場合，その観測色ベクトルは式(3.10)に表現されるように，三つのベクトル C_{uA} ， $\int \{F(\lambda) \cdot C_{uA}(\lambda) \cdot C_{uB}(\lambda) / C_s(\lambda)\} d\lambda$ ， C_{uB} の線形結合で表現される．このときは，係数 K_1 ， K_2 ， K_3 が非零のため，RGB 色空間における分布形状は 3 次元的広がりをもち，一般的には，相互反射として抽出することは困難である．

3.4 広ダイナミックレンジ RGB カラー画像入力

一般に、シーンをRGBカラー画像として入力する場合、本論文の第2章でも述べたように、明るい部分における信号飽和や暗い部分における信号値の信頼性低下といった問題が生じる。この問題は、本章で扱うような、対象シーンが輝度の相違が著しい金属物体や光沢のある物体を同時に含む場合に顕著になる。この現象がこれまで金属非金属物体の混在するシーンに対するコンピュータビジョン分野の研究が盛んでなかった一因とも言える。特に本章では、金属非金属の混在するシーンを1枚の画像に捉え、画像中の画素集合がRGB空間中で形成する分布状態を解析する必要があるが、極度にコントラストの大きなシーンに対して通常の撮像でこれを行うのは不可能と言ってよい。このようなシーンの撮像に対応するために、本研究では、一つのシーンに対して、複数のレンズ絞り設定を行い、それぞれの露光条件で撮像した複数の画像を合成することで、擬似的にダイナミックレンジを拡大したカラー画像の入力法を用いた。

本章では、一つのシーンに対して入力画像の明るさが4倍程度ずつ明るくなるように絞りを調整した5枚の8ビット画像を撮り込み、十分な明度があり飽和していない画素を選んで16ビット画像を合成した。各画像間の明るさの比は画像間の画素ごとの信号強度比の平均から求めている。また同時に、絞り解放時の画像も撮影しており、異なるシーンの画像との明度比較も可能である。

3.5 実験装置

実験装置の構成を図3-6に示す。

カラー画像入力装置として3管式カラービデオカメラ（ビクター製、BY-110S）を用いた。光源としては単一のタングステンランプ（色温度3200°K）を用い、光軸とカメラ軸とほぼ一致するように配置した。カメラからのRGBおよび同期信号はカラー画像処理装置（ADS製、カラーPIP4000）によって縦512画素×横512画素、深さ8ビット256階調のRGB3枚の画像ファイルに変換される。以後の処理計算はDN-4000（HP製、APOLLO-DOMAINシリーズ）上で行った。

3.6 実験

ここでは、カラー画像情報からシーン中の物体の材質の判別および相互反射の検出を行う実験について説明する。処理の流れを図3-7に示す。対象および実験環境に関する条件を以下に示す。

- ・光源には白色光源を用い、ハイライトが観察できる光源-物体-カメラの相互位置関係が成立するように配置する。
- ・対象物体は有色不透明物体に限り、個々の物体表面は一様な単一色であり模様がでない。
- ・撮影は暗室環境で行う。

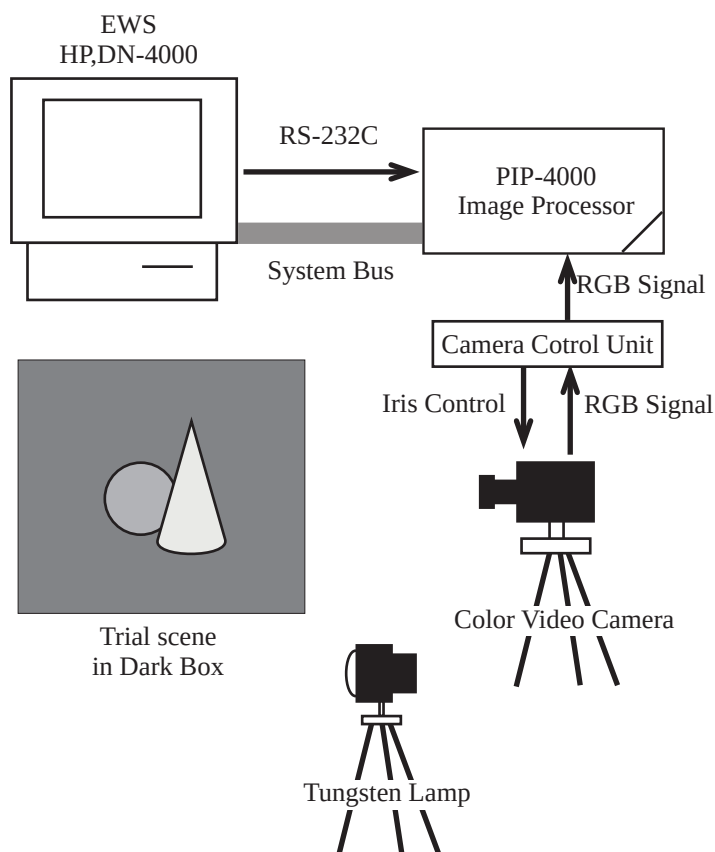


図 3-6 計測装置の構成

今回、処理の対象としたシーンを図 3-8 に示す．黒い布の床面上に黄色でざらついた表面仕上げを施した真鍮製の椀状物体（A：金属物体）を置いている．その周囲に表面のなめらかな青いプラスチック球（B：光沢のある非金属），光沢のある赤色紙製の円すい（C：光沢のある非金属），光沢のある緑色紙製の円すい（D：光沢のある非金属），赤フェルト製の円すい（E：光沢のない非金属）を配置している．また，物体 A 上には，他の物体の映り込みが見られる．

3.6.1 処理対象画像入力

3.4で述べた広ダイナミックレンジカラー画像の入力法を用いて得た対象シーンの 8 ビット入力画像と 16 ビット合成画像の例をそれぞれ，図 3-9，図 3-10 に示す．図 9 において， I_0 はレンズ絞りを解放にして撮像した画像である．また， $I_1 \sim I_5$ は絞りの開口度を順次減少させて撮像した画像である．各画像上で対応する位置関係の画素値の比較により， $I_1 \sim I_5$ の， I_0 に対する画素値の比 $G_1 \sim G_5$ を求め， $I_1 \sim I_5$ 画像から，飽和せずかつ最大明度の画素を選択し， $G_1 \sim G_5$ を乗じた値を 16 ビット値で出力画素値とした．この処理を全画素について行い，合成した出力画像が図 3-10 である．同図(a)は明度の対数値を表示している．同図(b)はどの画像から画素が選択されたかを示したものである．

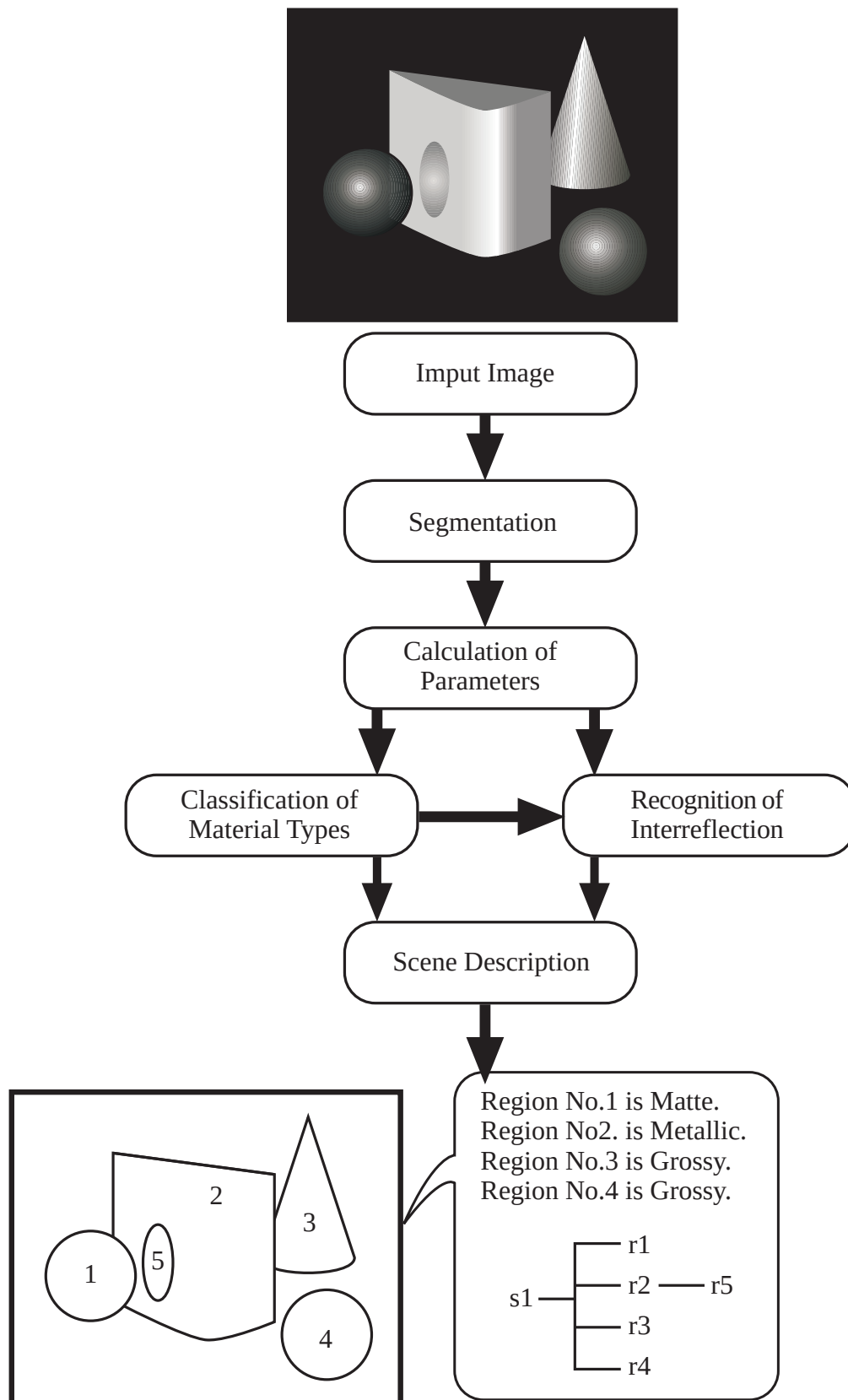
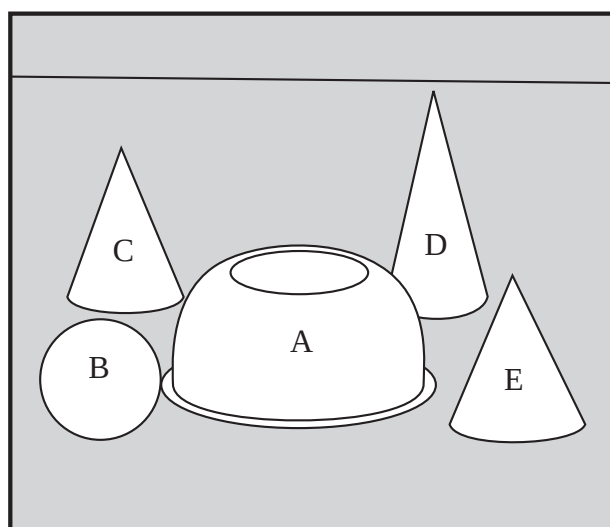


図3-7 材質判別・相互反射検出処理の流れ



A: brass bowl
B: blue plastic ball
C: red paper cone
D: green paper cone
E: red felt cone

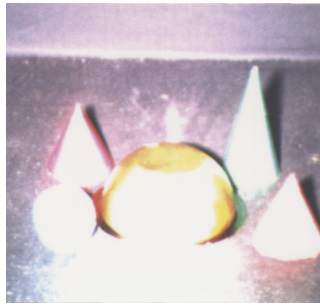
図 3-8 対象シーンの構成

3.6.2 領域分割

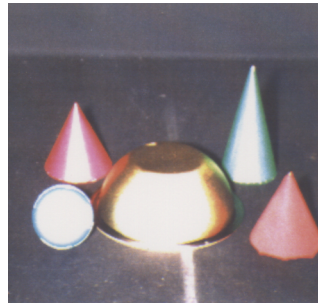
入力した画像から、個々の物体に対応する領域の抽出と同時に、相互反射領域を物体上の特異な領域として分離抽出する実験を行った。

まず、前処理として分割処理を安定化するために、縦 512 画素×横 512 画素の入力画像から、縦 2 画素×横 2 画素の平均を代表値とする縦 256 画素×横 256 画素に変換した。更に、画素値の非常に低い部分は背景とみなして排除した。

領域分割では、性質の似ている隣接画素を併合していく方法と、全体から均質な領域を切り分けていく方法とがある。本章では対象となる原画像が画素単位で合成されているため、前者の手法では初期併合が安定に行われず、適切な領域分割を行うことが困難であった。そこで、後者の手法で領域分割を行った。また、領域の均質性を調べるための特徴量として色相に注目した。これは、単一物体表面および相互反射領域内の RGB 入力信号は色相に関して準単峰性を示す傾向があるためである。そして、画像上の連続領域に対して色相に関するヒストグラムを作成し、ヒストグラム上で分割谷点が見つからなくなるまで分割を繰り返すアルゴリズムで領域分割を行うことができる。図 3-1 2(a)に示す番号 0～9 の各領域が分割結果として得られた。



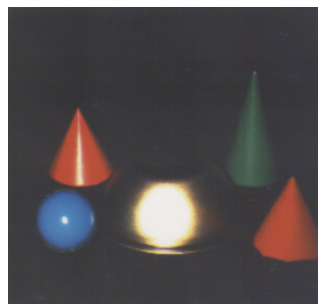
I_0



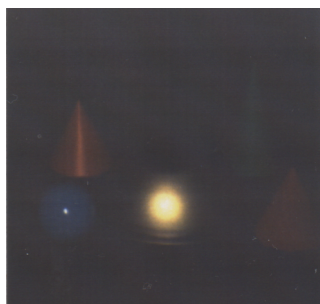
I_1



I_2



I_3

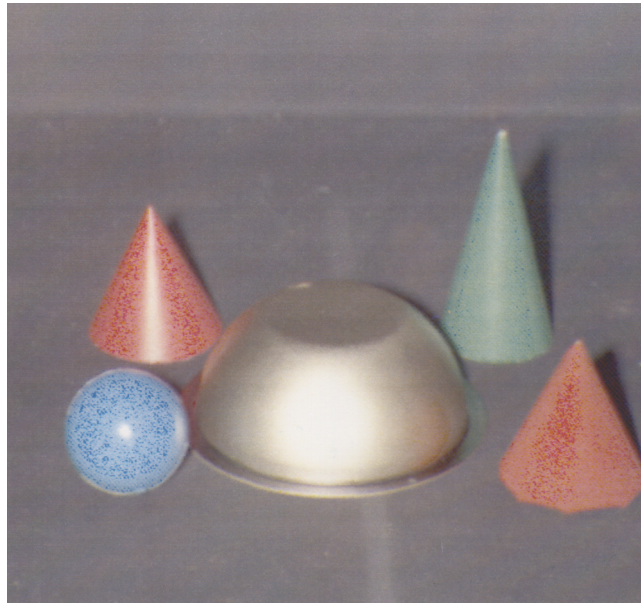


I_4

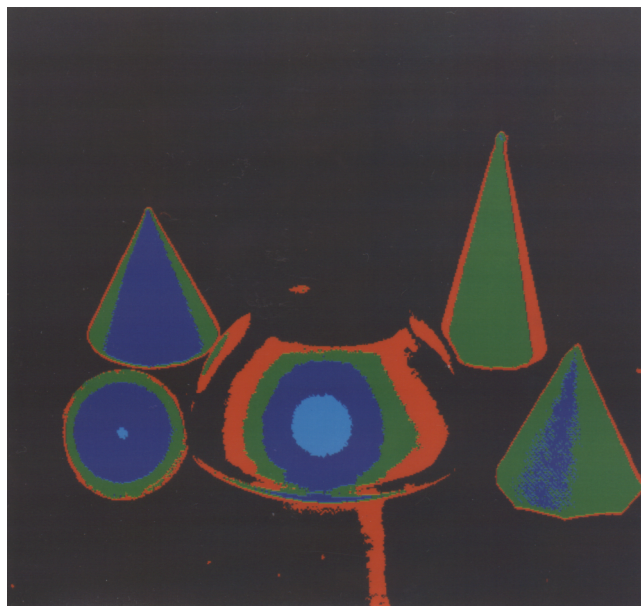


I_5

図3-9 レンズ絞りの異なる入力画像

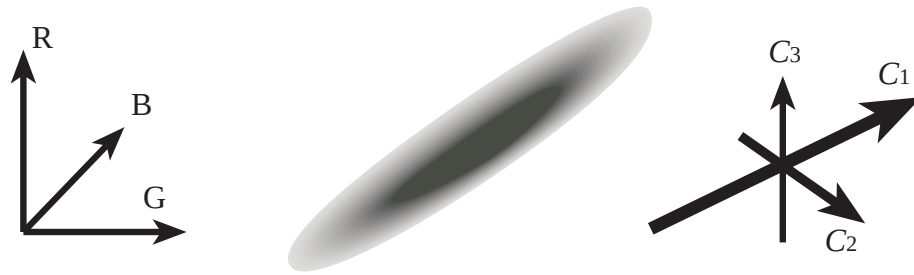


(a) 合成画像

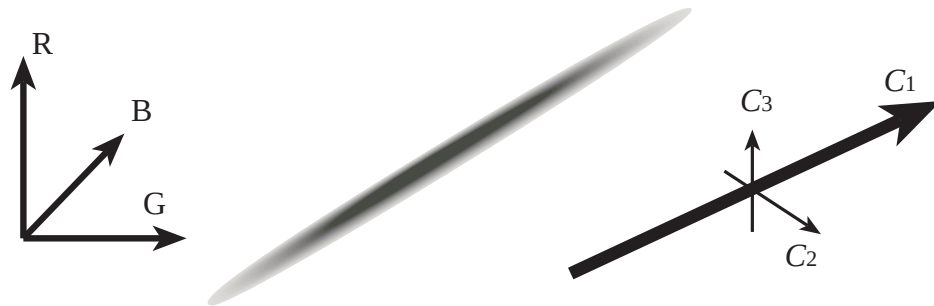


(b) 画像選択フラグ

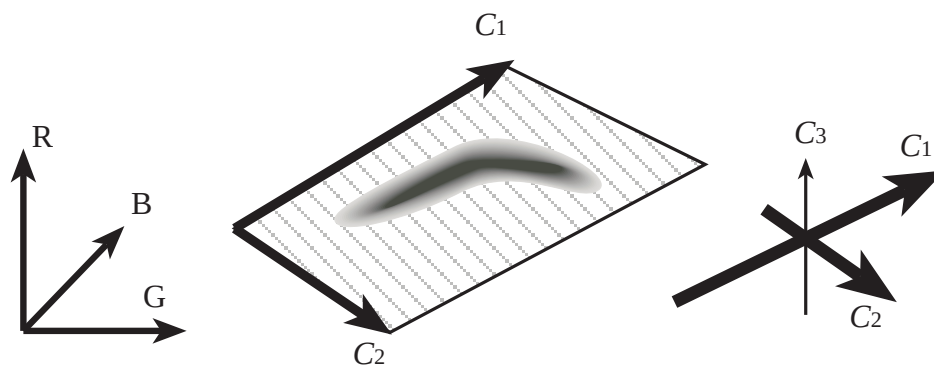
図 3-10 絞りの異なるカラー画像の合成



(a) general distribution form and its principal components.

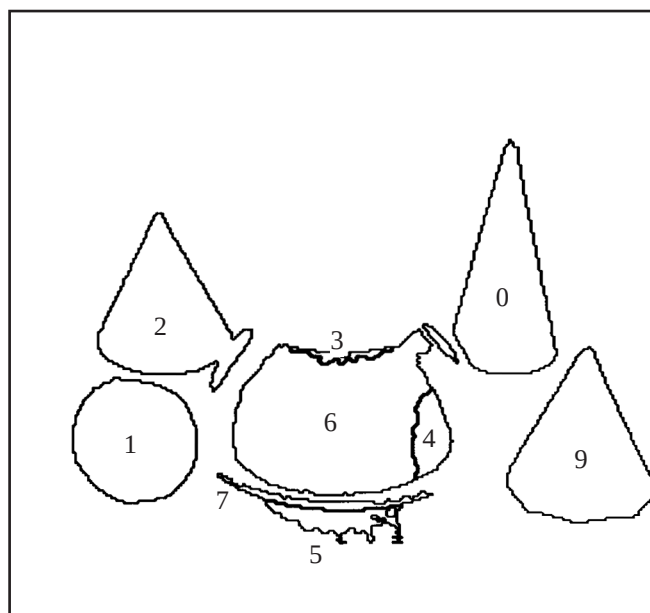


(b) linear distribution form (metallic or matte nonmetallic).



(c) planer distribution (glory nonmetallic).

図 3 - 1 1 主因子解析と分布形状の関係



(a) Region number.

```

===Reflectance Type===
REGION[ 0] is Non-metallic and Glossy type.
REGION[ 1] is Non-metallic and Glossy type.
REGION[ 2] is Unknown.
REGION[ 3] is Unknown.
  REGION[ 3] is part of REGION[ 6].(25.4%)
REGION[ 4] is Inter-reflection.
  Inter-reflection is on REGION[ 6].(91.8%).
  Inter-reflection part is on REGION[ 9].(91.8%)
REGION[ 5] is Unknown.
REGION[ 6] is Metallic.
REGION[ 7] is Inter-reflection.
  Inter-reflection is on REGION[ 6].(45.1%)
  Inter-reflection part is on REGION[ 6].(45.1%)
REGION[ 8] is Unknown.
  REGION[ 8] may be a part of REGION[ 0].(2.9%)
REGION[ 9] is Non-metallic and Matte type.
    
```

(b) Result of recognition.

```

===DATA TREE===
Scene      Object      Region
[S.0] --- [0.0](R.0) --- [R,0](100.0)
                        |--- [R,8]( 2.9)
                        -- [0.1](R.1) --- [R,1](100.0)
                        -- [0.2](R.2) --- [R,2](100.0)
                        -- [0.3](R.5) --- [R,5](100.0)
                        -- [0.4](R.6) --- [R,3]( 25.4)
                        |--- [R,4]( 91.8) -->[R,9](91.8)
                        |--- [R,6](100.0)
                        |--- [R,7]( 45.1) -->[R,6](45.1)
                        -- [0.5](R.9) --- [R,9](100.0)
    
```

(c) Scene discription.

図3-12 判別結果

3.6.3 材質感の判別・相互反射の検出

3.1および3.2で説明したモデルを用いることで、RGB色空間における分布形状より以下に示すように材質感・相互反射の判別が行える。

- ・直線状で明るい領域まで達している場合
→「金属的材質感」
- ・直線状で暗い領域にとどまっている場合
→「光沢のない非金属的材質感」
- ・平面的でその平面が照明色ベクトルを含む場合
→「光沢のある非金属的材質感」
- ・平面的でその平面が照明色ベクトルを含まない場合
→「相互反射領域」

本章では、RGB色空間における分布形状を主成分解析を用いて判別する。

図3-11(a)に示すように、RGB色空間の分布に対して主成分解析を行うと、分布の長軸方向に第1主軸が対応し、その分布の偏り度合いを寄与率として求めることができる。そして、第1主軸に垂直な偏り成分に関する長軸方向に第2主軸が、残りの偏り成分に第3主軸が対応している。ここで、その分布形状が直線状であった場合、図3-11(b)のように、第1主軸の寄与率が他の軸の寄与率よりも著しく大きくなる。また、平面状分布の場合、図3-11(c)のように、第3主軸の寄与率は非常に小さいが、第2主軸の寄与率が比較的大きな値をとることで、検定できる。また、その平面も、分布の重心を通り、第1主軸と第2主軸を含む平面として特定できる。

こうして、求めた各領域の分布形状と、最大明度値から、材質感・相互反射の判別を行う。また、相互反射領域と判断された領域に関しては、画像上における近傍領域の固有色ベクトルと比較することで、相互反射関係も求める。

認識結果を図3-12に示す。材質感判別・相互反射検出はほぼ成功しており、本章で提案した判別法・検出法の有効性を示している。相互反射関係の特定に関してもほぼ正確な結果が得られたが、これはカラー情報と併用した画像上での接続関係による効果大きい。

3.7 まとめ

本章ではRGBカラー画像を用いた材質感の認識手法と、その際に必要となる広ダイナミックレンジの画像入力方法について述べた。

まず、不透明物体の材質感について、光沢に着目することで、金属物体、光沢のない非金属物体光沢のある非金属物体に分類し、それぞれの材質感に対するRGB画素集合がRGB色空間において形成する

分布モデルを提案した。次に、相互反射，特に金属物体および光沢のない非金属物体上で生じる相互反射の反射色強度をモデル化した。そして，金属物体あるいは光沢のない非金属物体表面に生じる相互反射に関しては具体的な解析法を提案した。

これらの認識処理を可能とするために，一つのシーンに対して，カメラの絞りを調整して撮り込んだ複数の画像をもとに，画像値の飽和や強度不足をできるだけ抑制した，広ダイナミックレンジのカラー画像を入力する方法を示した。そして，この手法を使って，金属・非金属の混在するシーンに対して上記の認識処理を適用し，良好な結果を得た。

第4章 離散分光画像の入力と 照明不変な多色物体検出への応用

本章では、色彩情報を手がかりに、照明不変、即ち照明光の分光強度分布の変化に無関係にシーン中に目的とする物体を検出し、同時に照明光の分光強度分布の変化率の推定が可能であることを示す。色彩情報は形状情報と並んで物体を特徴づける重要な情報であり、コンピュータビジョンにおける利用価値は高い。色彩情報を利用する場合に問題となるのは、一般的な撮像装置では照明光の分光強度分布に依存して観測値が変化することである。従来の色彩に関する研究では、照明光の変化が考慮されることは少なかった。しかし、屋外などの自然環境下をはじめ、工場などの人工照明環境下でも、例えば室間の移動を伴う移動体のナビゲーションを目的としたビジョンシステムのように、照明光源の変化に対応した照明不変な画像認識手法が必要となる状況は多く存在すると考えられる。

色彩情報を利用した物体検出に関しては、実時間追跡が可能な機器も既に市販されている他、最近では複雑な色彩分布を持つ対象物でもシーン中にその位置の検出が可能であることが、Swain らによって単純かつ効率的なアルゴリズムとともに示された[Swain 91]。但しそれらは照明光の変化による色彩の計測値の変化には対応していない。

照明不変に関しては、人間の視覚における色恒常性からのアプローチがある。この心理的知覚機能により、人間は照明光の変化によらない色彩の判別が可能であることが知られている。大田ら[Ohta 93]、富永[Tominaga 95]、Finlayson ら[Finlayson 95]は、照明光の分光強度分布と物体の分光反射率を復元する手法を提案している。いずれも異なる照明下で入力された画像上で、対象物があらかじめ対応付けされている、あるいは計測値と、対象物の形状や表面の反射性状とが関連付けられているという前提があり、照明の変化への対応と物体検出の両方をともに解決する手段ではない。

RGB カラー画像を用いて、画像空間近傍画素間の RGB 各成分の比が照明光の変化に対して一定であるとの前提のもとに、Swain らの方法を応用した照明不変な物体検出手法も提案されている[Funt 95]、[Slater 96]。しかし、一般の RGB カラーカメラのような、分光感度分布が broad で入射光の波長に関する積分値を出力する撮像装置を用いる場合、照明不変は成立しない。しかし、もし画素値が積分値ではなく、波長に関するサンプリング値であるならば照明不変が成立する。

入射光のサンプリング値を画素値に持つ画像の入力例には、眞鍋らが材質判別に利用したスペクトル画像[Manabe 96]がある。スポット計測のための分光輝度計を機械的に2次元走査している。画素当たり波長に関して密な分光強度分布が得られるものの、1シーンの撮像に長時間を要し、画像の空間分解能を向上させるのが難しい。筆者は、色彩の分光反射率を特徴付けるには、必ずしも密な分光強度分布

の計測は必要なく、数点の波長におけるサンプリング値でも可能であり、むしろ異なる色彩からの反射光が数点の波長における光強度が全く一致することの方がまれであると考えられる。それにより画像のデータ量や処理時間を抑制することができる。

そこで本章では、数チャンネルのデルタ関数状の分光感度分布のみを持ち、通常の画像認識で用いられる程度の空間解像度を持つ撮像装置を考える。これによって得られる疎な分光強度分布の計測値を画素値に持つ画像を離散分光画像と呼ぶこととし、以下この形式の画像を用いて、照明光の分光強度分布や物体の分光反射率の復元過程を経なくても、目標とする物物体の検出が可能であることを示す。なお本章で言う照明光の変化とは、分光強度分布の異なる波長における強度値相互の比の変化を指すものとし、明暗のみの変化は含まない。

以下、4.1では離散分光画像の照明不変に関する基本的性質を述べる。4.2では画素値のヒストグラムを利用した物体検出アルゴリズムについて述べる。4.3では干渉フィルタと高感度CCDカメラを用いて構成した、5チャンネルの近似的なデルタ関数状の分光感度分布をもつ撮像系、これを用いた照明不変性の検証実験と色物体の抽出実験の結果について述べる。

4.1 離散分光画像

4.1.1 画像入力モデル

撮像素子を含む受光センサの出力 ρ は、図4-1に示すように光の波長 λ に関する照明光の分光強度分布 $I(\lambda)$ 、マツトな物体表面の分光反射率 $R(\lambda)$ 、センサの分光感度分布 $S_j(\lambda)$ を用いて次式で表される。

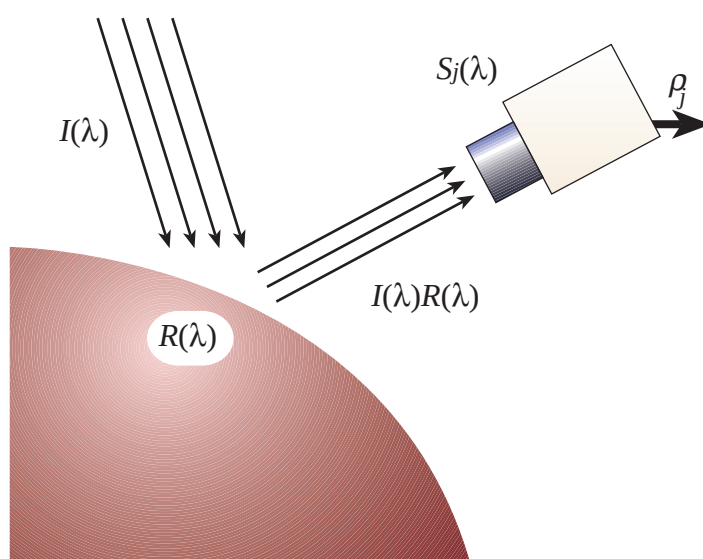


図4-1 物体からの反射光と受光センサ出力

$$\rho = \int S(\lambda)I(\lambda)R(\lambda)d\lambda \quad (4.1)$$

カラーカメラのように、1画素あたり式(4.1)の計測値が N チャンネルある場合、各チャンネルの分光感度分布をそれぞれ $S_j(\lambda)$ ($j = 0, 1, \dots, N-1$)として画素値 c は、

$$c = [\rho_0 \ \rho_1 \ \dots \ \rho_{N-1}]^T \quad (4.2)$$

但し、

$$\rho_j = \int S_j(\lambda)I(\lambda)R(\lambda)d\lambda \quad (4.3)$$

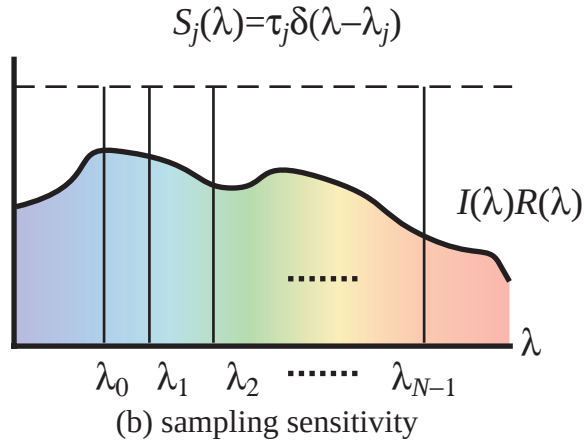
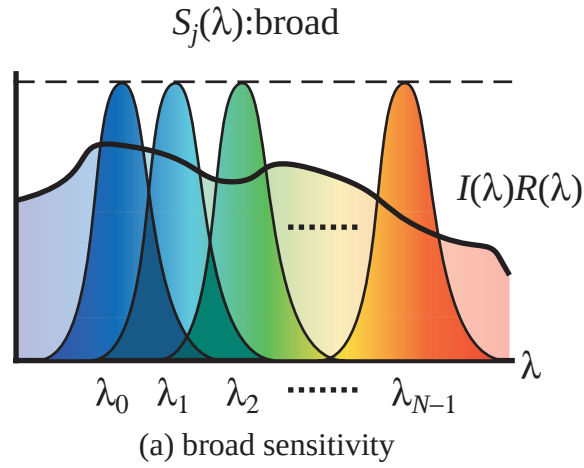


図4-2 センサの感度分布

通常は $S_j(\lambda)$, $I(\lambda)$ の両方とも正確なプロファイルは与えられない．そして通常のカラーカメラでは $S_j(\lambda)$ は波長に関して図 4－2 (a)のような broad な分布であるため， c から $R(\lambda)$ を一意に推定することは一般に不可能である．

4.1.2 離散分光画像の性質

ここで，画素値が波長 λ_j ($j=0,1,\dots,N-1$)における入射光のサンプリング値，即ち撮像系の各チャンネルの分光感度分布が，図 4－2 (b)および次式のようなデルタ関数状である場合を考える．

$$S_j(\lambda) = \tau_j \delta(\lambda - \lambda_j) \quad (4.4)$$

τ_j は各チャンネルの感度に相当する定数で， $\tau_j > 0$ である．このとき式(4.3)は，

$$\rho_j = \tau_j I(\lambda_j) R(\lambda_j) \quad (4.5)$$

離散分光画像には，式(4.5)を用いて以下の性質が容易に考察できる．いま，図 4－3 のように，波長

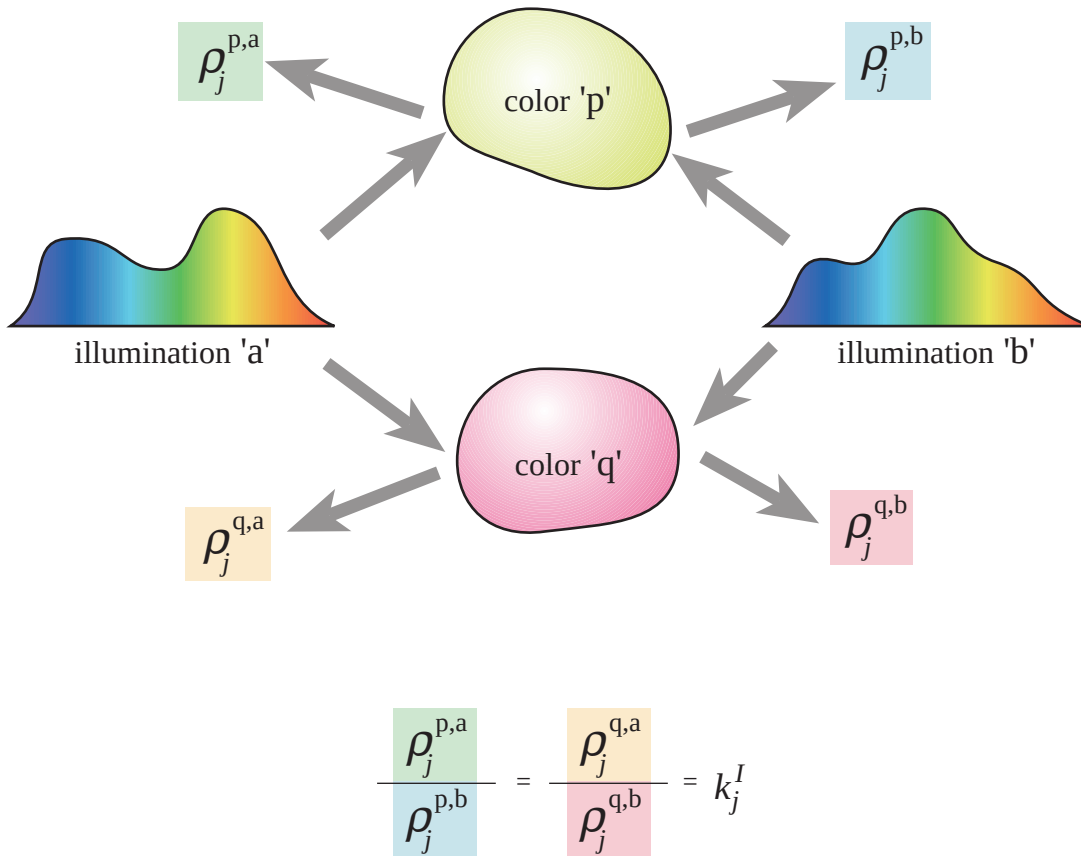


図 4－3 照明光の分光強度分布と色彩観測値における関係

λ_j におけるある2つの異なる色彩 p, q それぞれの分光反射率

$$\mathbf{R}^\eta = [R^\eta(\lambda_0) \ R^\eta(\lambda_1) \ \dots \ R^\eta(\lambda_{N-1})]^T \quad (\eta=p,q) \quad (4.6)$$

と、2種類の照明光 a, b の分光強度分布

$$\mathbf{I}^\mu = [I^\mu(\lambda_0) \ I^\mu(\lambda_1) \ \dots \ I^\mu(\lambda_{N-1})]^T \quad (\mu=a,b) \quad (4.7)$$

を考えると、色彩 p, q に対する a, b 2種の照明下での離散分光画像の画素値の第 j 成分は、式(4.5)にならって、

$$\rho_j^{\eta,\mu} = \tau_j I_j^\mu(\lambda_j) R_j^\eta(\lambda_j) \quad (\eta=p,q, \mu=a,b) \quad (4.8)$$

この成分比には次の関係が成り立つ.

$$\frac{\rho_j^{p,a}}{\rho_j^{p,b}} = \frac{\rho_j^{q,a}}{\rho_j^{q,b}} = \frac{I^a(\lambda_j)}{I^b(\lambda_j)} \equiv k_j^I \quad (4.9)$$

$$\frac{\rho_j^{p,a}}{\rho_j^{q,a}} = \frac{\rho_j^{p,b}}{\rho_j^{q,b}} = \frac{R^p(\lambda_j)}{R^q(\lambda_j)} \equiv k_j^R \quad (4.10)$$

なお式(4.9), (4.10)が常に成立するためには照明光とシーン中の色彩に関して、 $I(\lambda_j) > 0, R(\lambda_j) > 0$ である必要があり、従って $k_j^I > 0, k_j^R > 0$ である.

式(4.9)は、 k_j^I が照明光の分光強度分布の変化率を表し、シーン中のいずれの色彩にも同等に作用することを意味する. 一方、式(4.10)はシーン中の異なる色彩に対する計測値の成分比は、照明光の変化に無関係に k_j^R (一定)であることを表している. Funt ら[Funt 95]や Slater ら[Slater 96]は式(4.10)の関係を利用したが、撮像素子の受光要素の感度ムラや、ある程度差異のある色彩間の境界にのみ意味があり、局所的な色彩の変化が少ないシーンに対しては適用が難しいという問題がある.

本章では式(4.9)の関係を色物体検出に利用する. 照明の分光変化率 k_j^I の推定値も結果として同時に得られる. これは色恒常性の課題である照明光の分光強度分布の変化そのものである. 以降、簡単のため

$$\mathbf{K} = [k_0^I \ k_1^I \ \dots \ k_{N-1}^I]^T = [k_0 \ k_1 \ \dots \ k_{N-1}]^T \quad (4.11)$$

とし、 $\mathbf{K}$ を分光変化率と呼ぶ. 図4-4に照明光の分光強度分布の変化と、 $\mathbf{K}$ の概念図を示す.

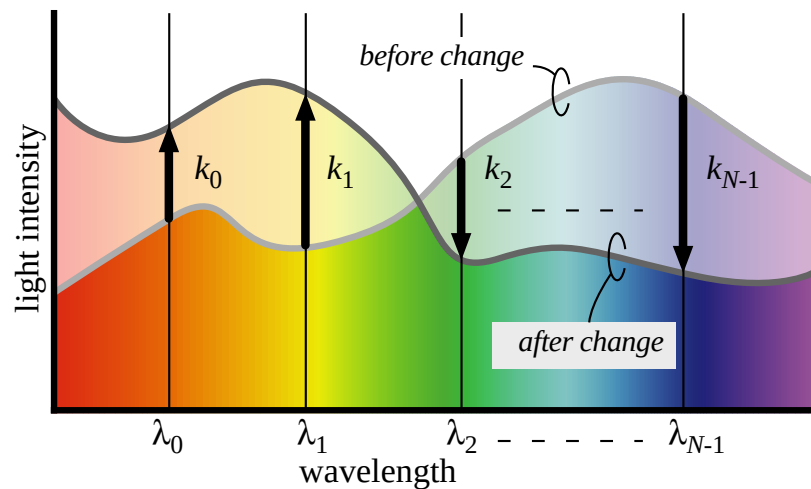


図 4-4 照明光の変化と分光変化率 κ

4.2 多色物体検出への適用

本章では、照明光の分光強度分布が未知のまま色物体の検出が可能であることを示す。物体検出の方法として、画像中の色彩の分布状態のみを利用した方法に、4.1で述べた離散分光画像の特徴を導入する。基本手法に Swain らのカラーヒストグラムを利用した方法[Swain 91]を用いる。以下、離散分光画像の正規化した画素値のヒストグラムと、Histogram Backprojection, Histogram Intersection各方法を簡単に説明し、実験に用いたアルゴリズムを述べる。

4.2.1 正規化画素値ヒストグラム

本章冒頭で述べたように、ここでは照明の明度のみの変化は考慮しない。そこで画素値 $\mathbf{c}$ の正規化画素値 $\mathbf{c}_{norm}$ を考える。

$$\mathbf{c}_{norm} = \frac{\mathbf{c}}{\|\mathbf{c}\|}, \quad \|\mathbf{c}\| = \sum_j \rho_j \quad (4.12)$$

$\|\mathbf{c}_{norm}\| = 1$ であるから、 $\mathbf{c}_{norm}$ は $\mathbf{c}$ より 1 次元少ない成分数で表現できる。画素値のヒストグラムを作成する際のクラスの分割数は、後で述べる検出処理時間に影響し、少ないほど処理コストの低減につながる。各成分のダイナミックレンジの分割数を s とすると、 $\mathbf{c}$ をそのまま用いた場合、ヒストグラムのクラス分割数 W は

$$W = s^N \quad (4.13)$$

であるのに対し、 c_{norm} を用いた場合には

$$W = \frac{\left(\prod_{j=0}^{N-2} (s + j) \right)}{(N-1)!} \quad (4.14)$$

で与えられる．式(4.13)に比べ約 $1/(N-1)!$ で，正規化によってある程度処理時間を抑制できる．以下簡単のため，正規化画素値のヒストグラムを単にヒストグラムと呼ぶ．

4.2.2 Histogram Backprojection

入力画像と，検出しようとする対象物（ターゲット）のみの画像（ターゲット画像）それぞれのヒストグラムを $L = \{L_i, i=0,1,...,W-1\}$ ， $D = \{D_i, i=0,1,...,W-1\}$ とする．Histogram Backprojection（以降 HB 法）は，入力画像上の位置 (x,y) における画素の $c_n(x,y)$ に対して $e(x,y)$ を次式で与え，出力画像とする．

$$e(x,y) = \min\left(\frac{D_w}{L_w}, 1\right) \quad (4.15)$$

ここで w は，図 4－5 に示すように， $c_n(x,y)$ が属するヒストグラム上のクラスを指す番号である． $e(x,y)$ は 0 から 1 の間の値をとり，大きい程その位置の画素値がターゲット画像の構成要素である確度が高い．ターゲットは出力画像空間上で $e(x,y)$ が最も大きな値を示す位置近傍に存在することが期待できる．この方法自体はターゲットの色彩の観測値に変化がないという前提でのみ有効である．

4.2.3 Histogram Intersection

Histogram Intersection（以降 HI 法）はヒストグラム同士の類似度ともいえ，本章では次節のアルゴリズムで述べるように評価関数として用いる．入力画像とターゲット画像のサイズが異なるものとして，それぞれのヒストグラム L ， D について次式のように定義した．

$$H(L, D) = \sum_{i=0}^{W-1} \min\left(\frac{L_i}{\sum_{j=0}^{W-1} L_j}, \frac{D_i}{\sum_{j=0}^{W-1} D_j}\right) \quad (4.16)$$

この計算値は図 4－6 のグレイ部分の面積に相当し，0 から 1 の間の値をとる．

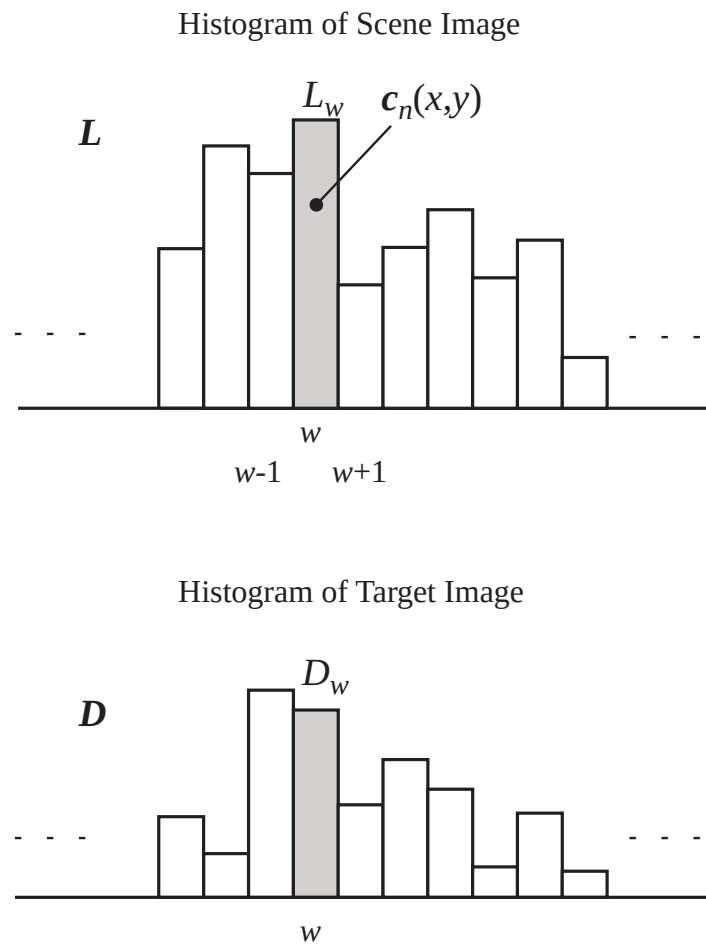


図 4－5 Histogram Backprojection における画素の属するクラスの対比

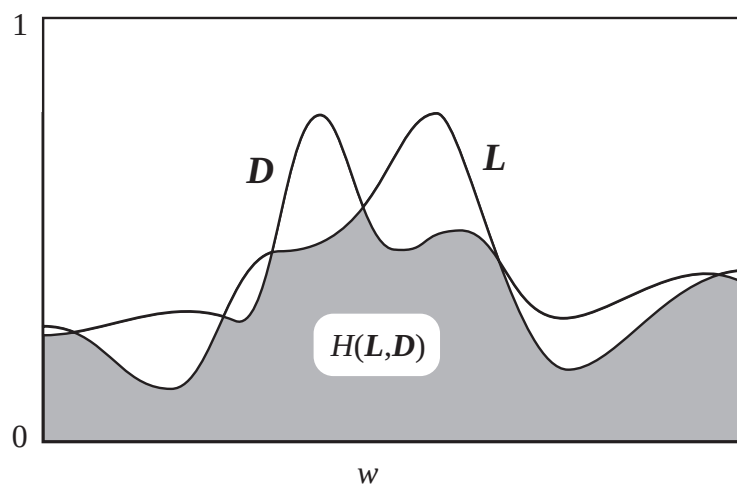


図 4－6 Histogram Intersection

4.2.4 検出方針

式(4.11)の分光変化率 K に任意の値を設定し、ターゲット画像の全画素に乗じた画像を生成する。この画像と入力画像間でHB法の手法を適用すると、 K が最適な値、即ち λ_j ($j=0,1,\dots,N-1$) における実際の照明光の分光強度分布の変化率である場合、ターゲットの検出が可能と考えられる。さまざまな K の設定値に対してHB法を適用し、その都度出力される領域とターゲットの類似の程度をHI法により評価する。評価値を最大とする K での出力領域を、求めるターゲット（色物体）とする。そしてこのときの K が照明光の分光変化率である。本稿では、最適な K を探索することで多色物体の検出が可能であることを示すことが目的であり、 K の探索法の効率化については今後の検討課題とする。

4.2.5 検出アルゴリズム

前節の方針による物体検出の条件をまとめる。

- (1) 表面は複数の M (≥ 2) 色の色彩 $R_i(\lambda)$ ($i=0,1,\dots,M-1$) で覆われているものとする。単色ではヒストグラムの分布状態を利用することが難しい。
- (2) 検出対象物に対する観測方向は変化せず、照明変化の前後で観測される色彩領域数とそれら領域相互の面積比は一定である。
- (3) 各色領域はマットな拡散面で、照明光の直接反射光（ハイライト）の影響は考えない。
- (4) 検出対象物表面の複数の色彩は全て有彩色で、また明度のみ異なる色彩の組み合わせは考えない。照明光も同様に明度のみの変化も対象外となる。
- (5) 対象物はシーン中に必ず存在する。

色物体検出アルゴリズムを次に述べる。図4-7に処理フローを図示する。

Step1: K に初期値をセットする。

Step2: ある照明 a を用いて入力した離散分光画像から、ターゲットを含む小領域を切り出し、これをターゲット画像とする。

Step3: ターゲット画像の全画素に式(4.9)に従って K を作用させる。

Step4: ターゲット画像の正規化した画素値のヒストグラム D を作成する。

Step5: a とは異なる照明 b の下で検出処理対象となる入力画像を得て、正規化した画素値のヒストグラム L を作成する。

Step6: D と L から HB 法による出力画像を得る。

Step7: 入力画像の各画素について、対応する Step6 の出力画像で、画素値が 0 でない画素のみを残すマスキングを行う。

Step8: Step7 でマスキングされた画像の正規化した画素値のヒストグラム L' を作成する。

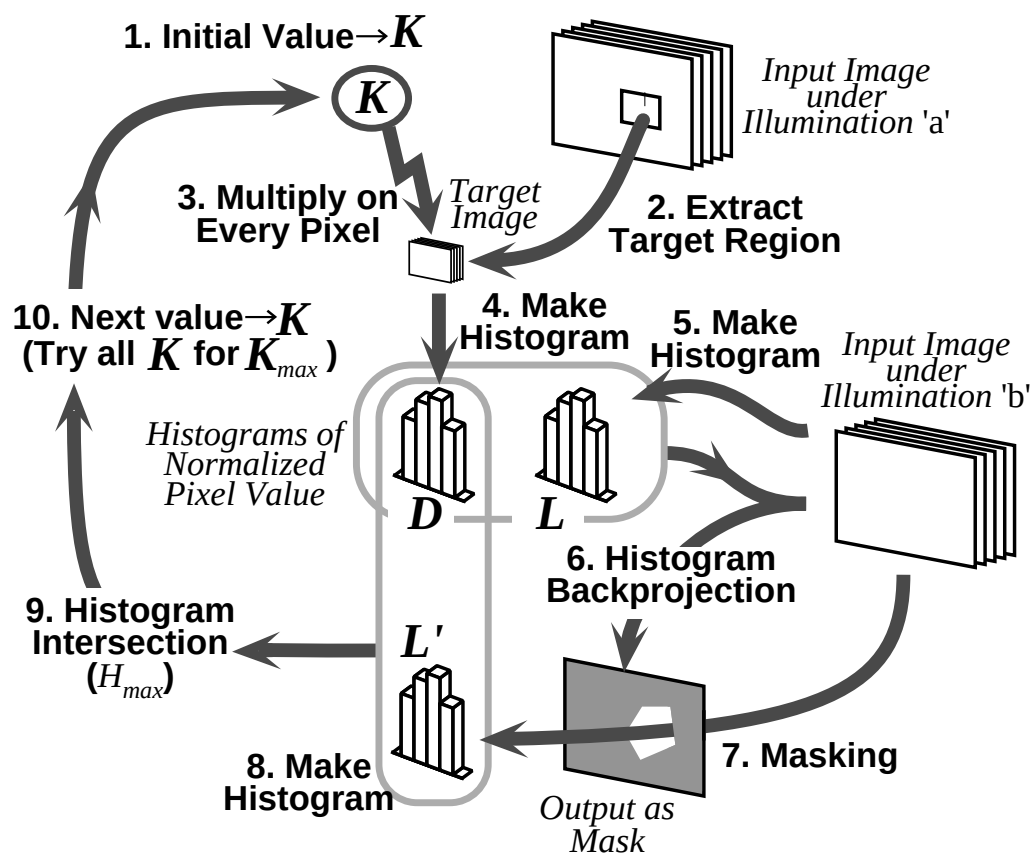


図4-7 色物体検出アルゴリズム

Step9: L' と D との式(4.16)による Histogram Intersection 値を求め H_{max} とし, そのときの K を K_{max} とする.

Step10:あらかじめ決めておいた全ての K について Step3 から繰り返す.

Step11: K_{max} に対する Step6 の出力画像をターゲットの最終検出結果とする.

4.3 実験

4.3.1 離散分光画像の撮像系

図4-8に本研究で使用した撮像系の構成を示す．式(4.4)のデルタ関数状の分光感度分布を持つカメラを，干渉フィルタをカメラレンズ前面に装着することで等価的に実現した．図4-9は実際の機器の外観である．用いた干渉フィルタは5種で，可視光から近赤外光域を含むCCDの感度域において，各々図4-10に示すような狭帯域の分光透過率をもつ．干渉フィルタの外観および特性値をそれぞれ図4-11，表4-1に示す．5枚の干渉フィルタの中心波長の選び方には特に基準はない．透過波長域の

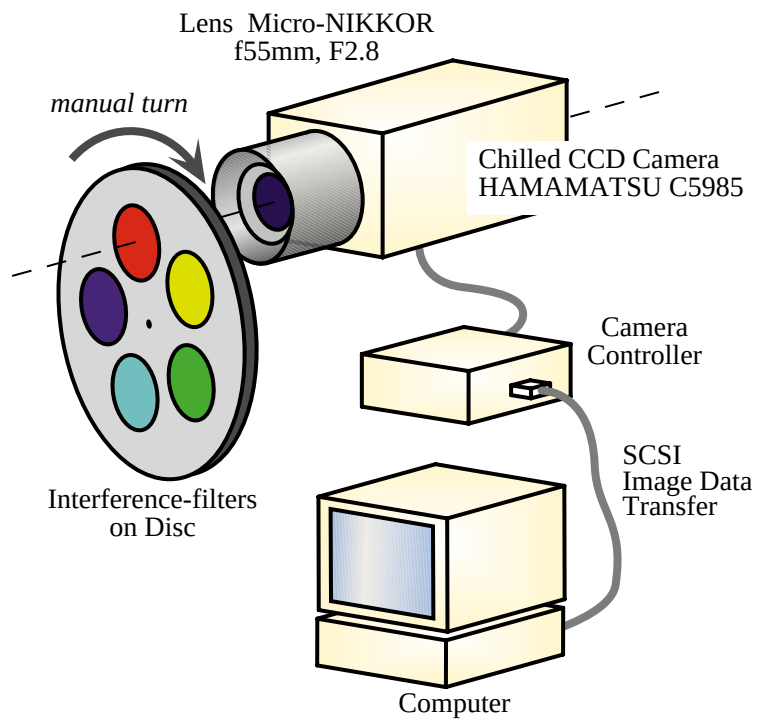


図4-8 離散分光画像撮像系



図4-9 離散分光画像撮像機器外観

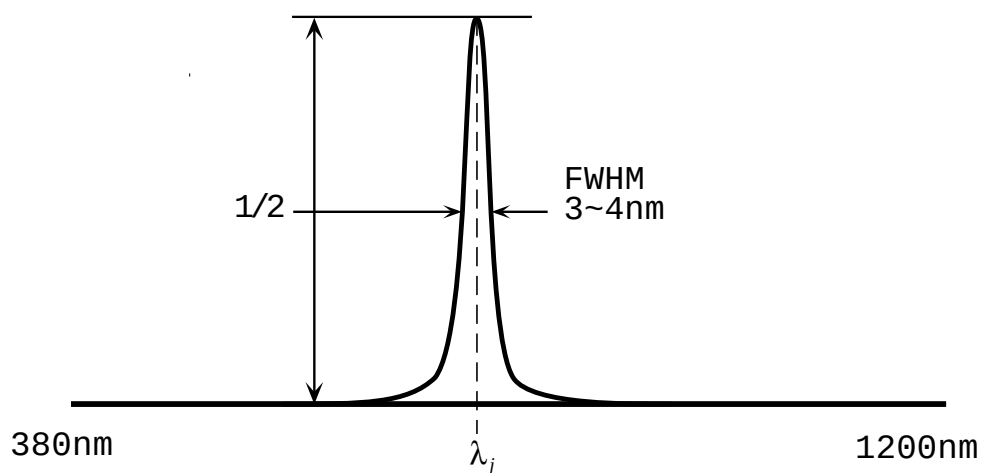


図4－10 干渉フィルタ分光透過率

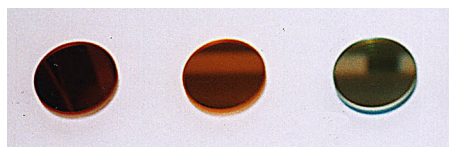


図4－11 干渉フィルタ外観

表4－1 干渉フィルタの波長

j (channel)	0	1	2	3	4
λ_j (nm)	640	580	530	490	450
FWHM (nm)	3	4	4	3	3

半値幅(FWHM)3～4nmは、一般的な分光輝度計の波長分解能に匹敵する。使用したペルチェ冷却方式の高感度CCDカメラ(図4－12)は、CCD電荷蓄積での長時間露光により、干渉フィルタを通した低光量の撮像も可能である。ひとつのシーンに対し、5枚の干渉フィルタを装着したディスクを手動により回転させ、5チャンネルの画像を順次撮像する。各チャンネル画像をカメラ内部で画素あたり8ビット階調に量子化し、パソコン上で1枚のマルチチャンネル画像データとして合成した。画像の構成に手間を要するが、通常の画像と同等の画像空間解像度が得られる。

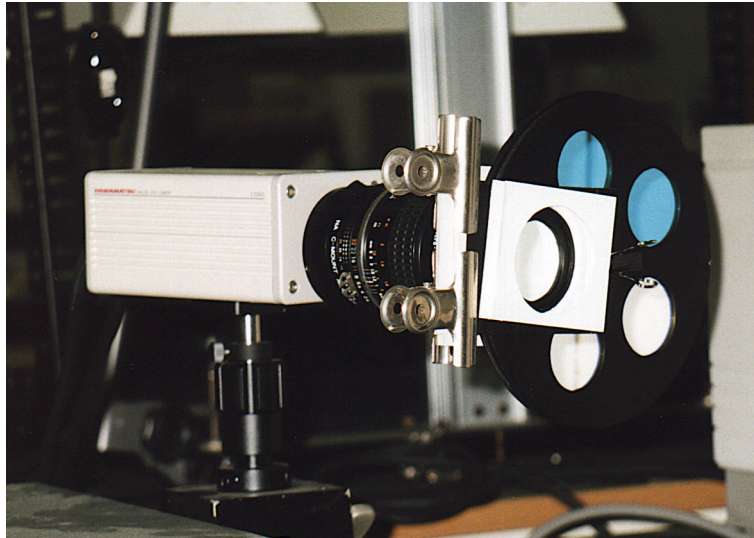


図4-12 干渉フィルタを装着した高感度 CCD カメラ

4.3.2 色不変性の検証

本章での前提である式(4.9)の性質が、前節の撮像系において成立するか否かを検証した。

さまざまな色彩を照明光の分光強度分布が異なる条件で撮像し、 K が色彩にかかわらず一様であればよい。撮像対象として、HSI 双六角錐カラーモデル[Takagi 91]における明度 50% の等明度面を昇華式カラープリンタによって印刷したカラーパレットを作成した(図4-13)。多様な色彩が連続的に分布している。照明光の分光強度分布の変化は、レンズ前面に色温度変換フィルタを装着することにより等価的に実現した。使用した色温度変換フィルタは2種類で、色温度上昇用(Cool)と、同下降用(Warm)である。それぞれの分光透過率と、干渉フィルタの中心透過波長(サンプリング波長)に対応する透過率を、それぞれ図4-14、表4-2に示す。

フィルタの未装着状態(Normal)から Cool, Warm の装着状態へ撮像条件が変化することは、照明の分光強度分布が、Normal の状態から表4-2の透過率分布を掛け合わせた状態に変化することに等しい。

4.2.1で述べた正規化画素値を用いるので、表4-2の透過率がいずれも100%以下であることは問題にはならない。照明光源にはハロゲンランプを用い、カラーパレットをハイライトが生じないよう図4-7の撮像系で、Cool, Warm, および Normal の、3状態における離散分光画像を入力した。また比較用に同じカラーパレットを単板式 CCD カラーカメラを使用して RGB 画像でも入力した。

式(4.9)で計算される K の成分値の、円盤状のカラーパレット部分の全画素値に関するヒストグラムを図4-15に示す。同じく RGB 画像に対するヒストグラムを図4-16に示す。図4-16では K が広

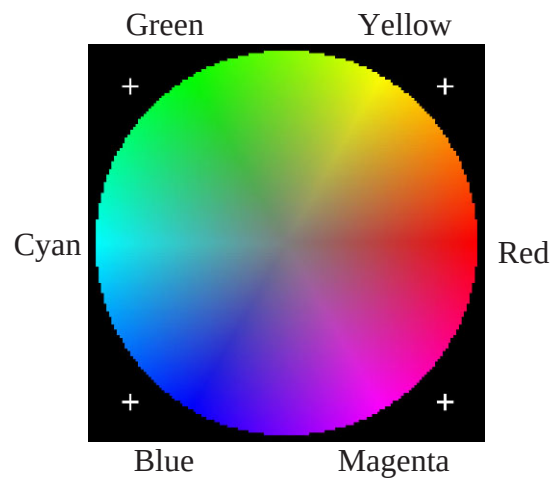


図4－13 色不変性検証のための撮像対象“カラーパレット”

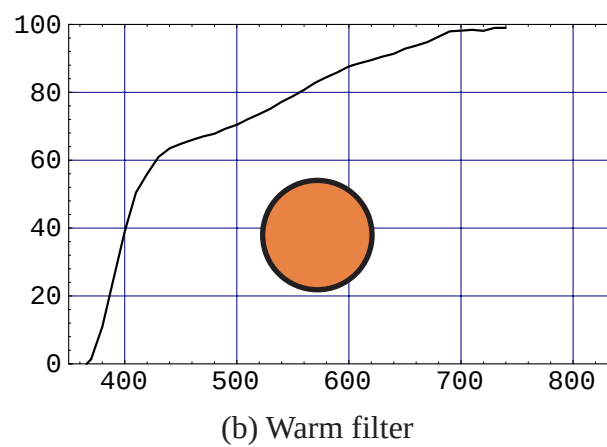
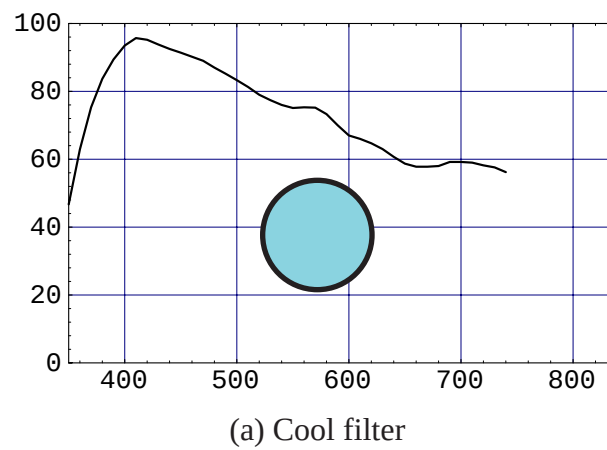


図4－14 照明光分光強度分布変化の等価的实现用の色温度変換フィルタ

表4-2 色温度変換フィルタの特性

j (channel)		0	1	2	3	4
λ_j (nm)		640	580	530	490	450
Transparency	Cool	0.61	0.73	0.77	0.85	0.91
	Warm	0.91	0.85	0.75	0.69	0.65

がった分布を示しているのに対して、図4-15では狭い範囲に集中している。そして図4-15の各ヒストグラムのピーク近傍の $\mathbf{K}$ の成分値は、表4-2の各色フィルタの透過率（この場合、照明光の分光変化率に等価となる）に近い。このことはカラーパレットのさまざまな色彩に対して照明光の変化のみに依存した $\mathbf{K}$ がほぼ均一に作用していることを裏付けており、式(4.9)がほぼ成立していると考えられる。そして干渉フィルタと高感度CCDカメラを利用した図4-8の撮像系で、式(4.4), (4.5)の性質を実現するデルタ関数状の分光感度分布を、ほぼ実現できていることがわかる。

図4-15のピーク近傍の $\mathbf{K}$ の成分値と色フィルタの透過率が厳密に一致しないのは、干渉フィルタがデルタ関数状の透過率分布ではないことと、個別に撮像した5チャンネルの画像成分を、四隅の十字マーカ（図4-13参照）を参照しながら目視で位置合わせしていることなどによる誤差と考えられる。

干渉フィルタの分光透過率の半値幅と撮像デバイスに要求される感度はトレードオフである。干渉フィルタの半値幅を小さくし、分光透過率をデルタ関数状に近づける程、より完全に式(4.9)の性質を実現できるであろうが、透過光エネルギーが低下し撮像が困難になることは容易に推察できる。

4.3.3 多色物体の検出

5色の色紙を矩形に配置したものをターゲットとした。図4-17にターゲットを配置した処理対象シーンを示す。このシーンに関して、Normal→CoolおよびNormal→Warmの2通りの照明光変化を想定してターゲット検出実験を行った。まずNormal状態で撮像した画像から図4-18に示すターゲットを含む領域を切り出し、ターゲット画像とした。図中、5色の慣用名を示す。また図4-19にターゲット表面の5色の分光反射率を示す。実験に用いた5種のサンプリング波長において、色彩相互に混同することなく識別が可能である。図4-17のシーンを、Cool, Warmの状態についてもそれぞれ撮像した。正規化分光値ヒストグラムの各チャンネルの分割数 $s=32$ とした。チャンネル数 $N=5$ である。4.2.5のアルゴリズムに従ってターゲットの検出を行った。 $\mathbf{K}$ の各成分とも0.50～0.95の範囲、0.01刻みの総当たりによって式(4.16)の評価値を最大にする最適な $\mathbf{K}$ を探索した。

表4-3に得られた $\mathbf{K}$ の推定値、および理想推定値（表4-2の色温度変換フィルタの透過率）を示

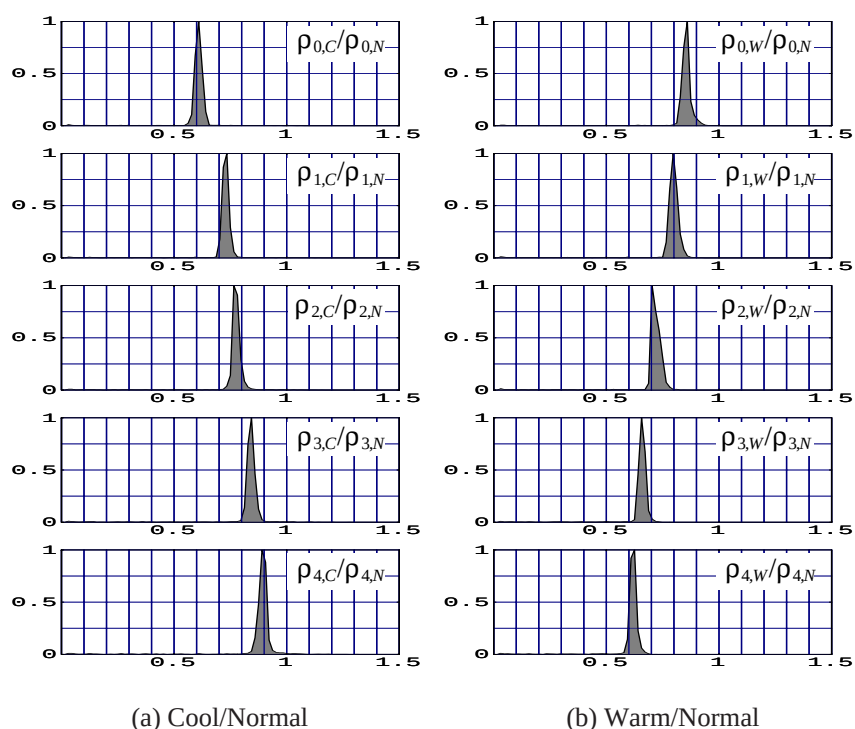


図4-15 カラーパレットに対する離散分光画像の正規化画素値ヒストグラム

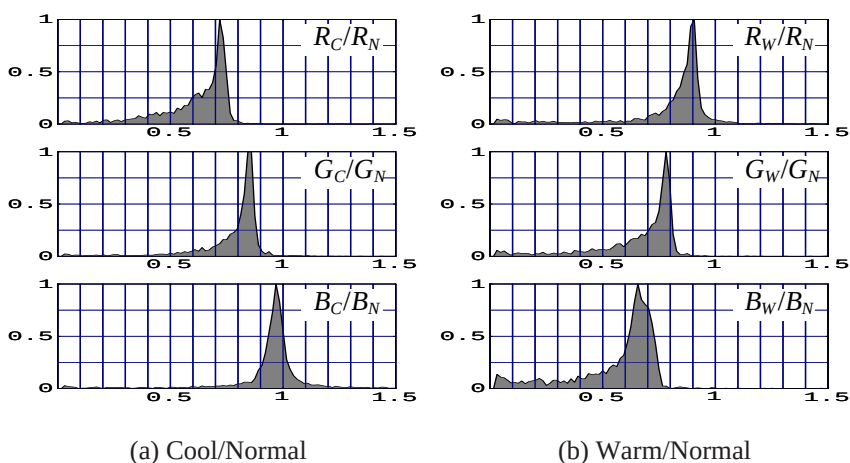


図4-16 カラーパレットに対するRGB画像の正規化画素値ヒストグラム

す. Cool, Warmとも, 理想推定値に近い推定値が得られている. また図4-20にターゲットの検出結果を示す. 同図(a),(b)はターゲットの存在する部分のHB値を示している. 同図(c),(d)に(a),(b)それぞれの0より大きな値の領域を示す. また比較のために, $\mathbf{K}$ が理想推定値と仮定した場合の結果を, 図4-20(a)~(d)に対応して同図(e)~(h)に示す.



図4-17 対象シーン



- 色慣用名
1. わすれな草
 2. アイスグリーン
 3. 小麦色
 4. ライラック
 5. ターコイズ

図4-18 ターゲット画像

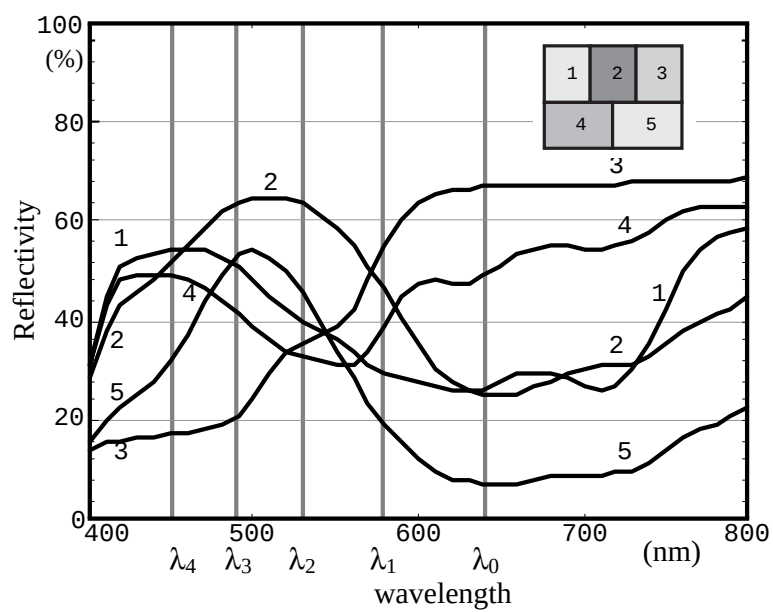


図4-19 ターゲットの5色の分光反射率

表 4－3 分光変化率 K の多色物体の検出処理から得られる推定値と理想的な推定値

j (channel)		0	1	2	3	4
λ_j (nm)		640	580	530	490	450
estimated K	Cool Normal	0.59	0.70	0.75	0.83	0.87
	Warm Normal	0.90	0.82	0.74	0.65	0.69
expected K	Cool Normal	0.61	0.73	0.77	0.85	0.91
	Warm Normal	0.91	0.85	0.75	0.69	0.65

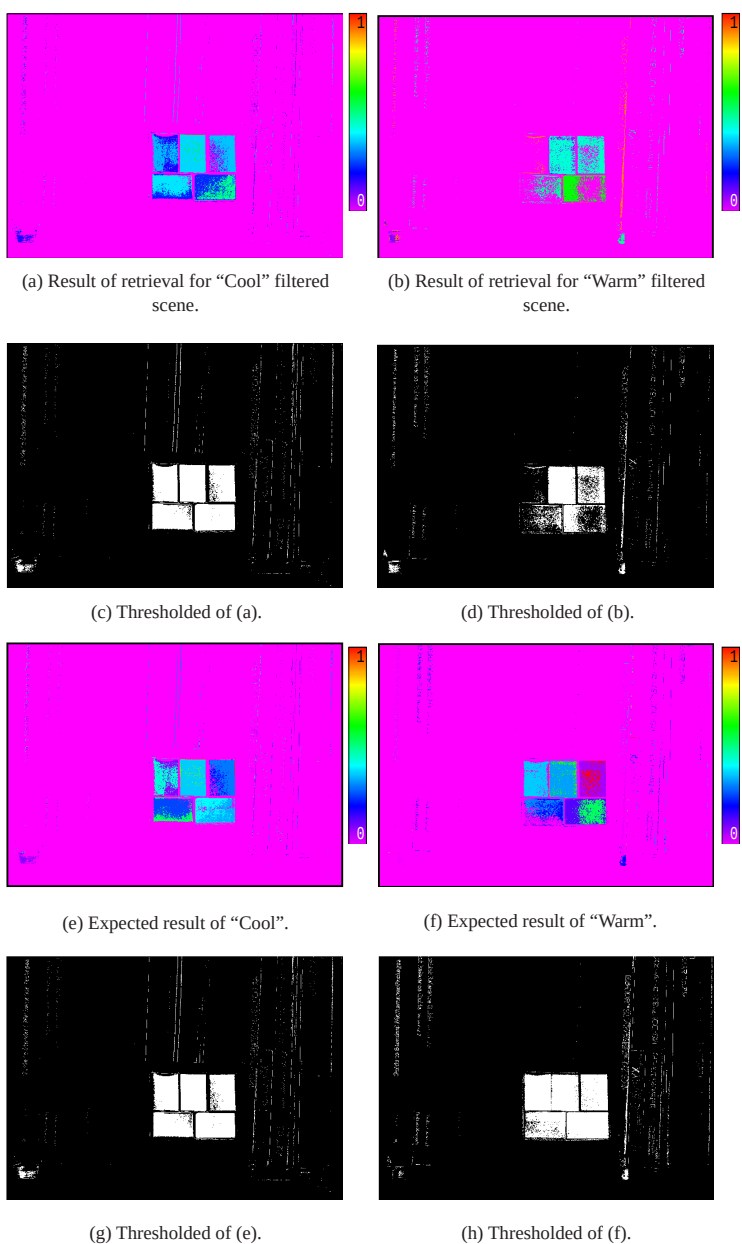


図 4－20 ターゲット検出結果

図4-20(c), (d)において、ターゲットの複数の色彩領域が同時に検出できていることから、4.3.2でも検証したように照明光の分光変化率 K がシーン中の色彩に一樣に作用しており、式(4.9)の関係が実証されていることを示すとともに、 K の推定にもほぼ成功していることがわかる。特にCoolフィルタを用いた(a), (c)では、それぞれ(e), (g)とほとんど一致し、ターゲットのみの良好な検出結果が得られていることがわかる。一方、Warmフィルタを用いた(b), (d)では、図4-18の色1にあたる領域に一部欠損が生じている。(b)のターゲット右側の背景中に比較的HB値が大きい誤検出領域が存在するが、(f)においてはこの領域のHB値が小さいことを考えると、この誤検出は、ターゲット上の色彩ときわめて近い画素値を示す色彩が背景中に存在したことが原因であると推察できる。実際の分光反射率が異なる色彩であっても、サンプリング波長によっては、離散分光画像の画素値が偶然に近い値をとることもあり得ることを示している。これを回避するには、適切なサンプリング波長を、対象シーンによって適応的に選択すること、あるいは画像データ量が抑制できるという離散分光画像の主旨からは逸れるが、サンプリング波長数を増やすことなどが考えられる。また本章では用いなかった、ターゲットの輪郭形状に関する情報を、分光反射率 K の推定の際の評価関数に導入することも、誤差の低減手段として有効と考える。

4.4 まとめ

シーンからの反射光の分光強度分布を、数点の波長でサンプリングした値を画素値にもつ離散分光画像を利用することによって、照明光の分光強度分布の復元を経ずに、照明不変な色物体の検出が可能であることを示した。狭帯域分光透過率の干渉フィルタと高感度CCDカメラを用いて5チャンネルの撮像系を構成し、離散分光画像を実際に入力した。そして照明光の変化前後の画素値の成分比が、照明光の分光変化率のみに依存することを検証した。さらにこの分光変化率の推定と、多色の対象物体の検出を同時に行う初歩的なアルゴリズムを提示した。アルゴリズムは色彩情報のみを利用しており、Histogram Backprojectionによる対象物候補領域の抽出と、Histogram Intersectionに基づく対象物との、色彩分布の適合評価関数による分光変化率の最適値探索である。照明光の分光強度分布の変化は色温度変換フィルタを用いて等価的に実現した。2通りの照明光変化状況に対して上記アルゴリズムを適用し、5色で構成される対象物を実際に抽出し、同時に照明光の分光変化率を推定した。この実験で、離散分光画像を利用して色彩情報を利用した物体検出に照明不変性を融合できることを示した。ここで示した色物体検出アルゴリズムは検出の可能性を示すための初歩的なもので、現時点では必ずしもターゲットの完全な検出を保証するものではないが、従来からの照明一定という暗黙の制約条件のもとで開発されてきた数々の手法と容易に組み合わせて改良できると考える。

分光変化率の推定は、照明光の分光強度分布の変化率を求めることであるから、照明変化前後での色

物体の対応付けと照明の分光強度分布の推定を同時に行う手段を提示することにより、色恒常性問題に対するひとつのアプローチを示した。

今後に残された課題には、画像データ処理の手法に関しては、最適分光変化率の探索の効率化や、吉野ら[Yoshino 94]が示したような対象物の輪郭形状情報の融合による対象物検出アルゴリズムの強化など、より高機能で頑健な認識手法への展開があげられる。また、離散分光画像の入力法に関しては、サンプリング波長とその点数、干渉フィルタの透過幅と検出結果の関係も、検討の余地を残している。離散分光画像を現実に利用するためには、通常のカラーカメラのような取り扱いで実時間入力可能な撮像装置が欠かせない。中野ら[Nakano 96]、Andersson-Engels ら[Andersson 94]や、Hirai ら[Hirai 94]のマルチスペクトル画像の入力機構を参考に、撮像に関しての展開も重要な課題である。

第5章 結 論

本論文は、カラー画像処理・認識に関する研究においては、とかく画像データの処理手法の開発に重点が置かれがちであるという認識のもとに、画像の内容を認識する上で必要とされる情報を、効果的に取得できるような入力特性を撮像に織り込む、という視点に立って遂行された幾つかの研究をまとめたものである。

コンピュータビジョンは、大きく分ければ画像の入力と得られた画像データ処理による認識の過程から成る。画像認識結果の信頼性を向上させるには、処理方式だけでなく、処理対象の画像に、あらかじめ良質な情報が含まれていることが重要である。特に産業分野における画像処理・認識システムの構築にあたっては、対象物の映像からどのような情報を得たいかにより、照明方法や光学系の構築に数々の工夫を凝らすことは良く知られている。画像データの処理に複雑な処理を盛り込むことは、処理時間の制約を増加させこそすれ、必ずしも正確さを保証するものではないことは確かであると考える。

まず1章では、コンピュータビジョンにおいて、近年になってようやく盛んに利用されはじめた色彩情報が有用な情報となる可能性があるものの、カラー画像として一般に用いられるRGB画像では、表現し得る色彩に関して制約が存在するという現状について述べた。色彩の精度に関する誤差や、色恒常性への対応に限界があることを指摘し、その解決法として試みられた研究について概観するとともに、本論文における対応指針を明らかにした。

2章では、RGBカラー画像の入力において、露光条件の制御による、色彩情報の精度を重視した「効率的露光制御によるカラー画像入力方式」を提案した。入射光量の強弱に起因する種々のノイズが色彩の正確さに与える影響を検討し、良好な色彩精度を得るには、各画素についてRGB各原色成分の入力信号を、飽和しない限りの最高明度で入力すればよいことを示した。そしてカラー画像の画素ごとに露光条件が異なる画像の撮像系を、電子シャッター機能付きのCCDカメラを利用して実際に構築し、得られた効率的露光制御カラー画像の色彩精度が通常のRGBカラー画像に比べて改善されていることを確認した。そして、領域分割処理に適用した場合に、処理が容易でかつ良好な結果が得られることを示した。効率的露光制御カラー画像は、色度情報が良好に得られ、色彩に関する処理が容易になることを期待できるものであるが、これに付随して、ベクトル画素値をもつ画像に対する色彩の平滑化前処理手法として、ベクトルメディアンフィルタリングの提案とその効果、そしてほとんど色度情報のみによる領域分割処理によっても、微妙な色の偏移まで良好な分離が可能であることを示した。提案した画像入力システムは、入力に長時間を要することが残された課題となっており、高速化に関するシミュレーションについても

触れている。この点に関連した最近の報告に、広ダイナミックレンジのモノクロ画像の実時間撮像を可能にしたカメラシステムがある[Yamada 95]。本研究と同様の、可変電子シャッター機能による露光制御を利用したものであって、明度と色度の着目点には相違があるが、そこで開発されたハードウェア面での工夫は、ここで述べた露光カラー画像入力方式を実時間化可能であることを示唆するものである。

3章で述べた材質感の判別については、表面に様々な反射性状を有する物体の領域中に存在するRGB画像中の画素集合が、それぞれRGB色空間中で示す「2色性モデル」に基づいた特有の分布状態と対応付けられることを利用しており、一枚の画像中に全ての反射性状をもつ領域が存在する場合を想定すると、広ダイナミックレンジの画像入力を必要とした。すなわち、低輝度から照明光源の正反射光が含まれるような高輝度までの画素値を同時に含む画像の入力法を実現することにより、材質の判別を可能とした。

ここで述べた、複数のレンズ絞りで撮像した画像の統合により1枚の入力画像を構成する手法は、後にいわゆる多重絞り画像の統合と呼ばれる[Asada 91]画像入力法の初歩的アプローチと位置づけられる。

2章、3章ともに、通常のRGB画像に比べて高精度の色彩情報が得られるため、領域分割および、複数の物体表面における多重反射を経験した光の、微妙な色彩の変化の検出に利用できることを、実験により明らかにした。

4章では、人間の視覚に存在する色恒常性をコンピュータビジョンにおいてどのように実現するかという課題に対して、RGB画像ではなく、分光分布情報の利用による一解決方法を提案した。あらかじめ色が知られた物体を、その色のみの記憶を手掛かりに、目で見えて探すという行動において、人間の色順応が機能する場面を想定した。コンピュータビジョンにおいて同様の機能を実現することは、従来から困難な課題とされている。ある既知の色をシーン中に見つけようとする場合、照明の色が異なれば、色は異なって見えるが、人間の色知覚では、順応により同じ色彩として認識することが可能である。コンピュータビジョンでは、照明色の変化によって計測値が全く異なってしまったある色彩を、改めて同一のものと認識することは、色領域の形状など色彩以外の情報を併用しない限り不可能である。本論文においては、RGBカラー画像を用いず、光が本来持つ分光強度分布に関する情報を利用することにより、コンピュータビジョンにおける照明色の変化に無関係な色恒常性の一つの実現方法を示すことができた。対象の色彩の分光強度分布情報として、数点の任意の波長におけるサンプリング値を用いる画像形式と、その画像を実際に入力するための干渉フィルタを用いた画像入力系を示し、画像入力法の工夫による問題解決の具体例を示した。

以上、カラー画像認識において、まずRGB 3原色表現で入力された画像のみを用いることにより、認識内容・機能や計算コストに制約や限界が存在する状況に対し、色彩精度やダイナミックレンジを向上させる画像入力方式を提案した。またRGB 3原色表現の制約を越えた分光強度分布をサンプリングした

情報を持つ画像形式を提案するとともに、その実際の入力を行い、具体的処理例を提示した。

画像処理一般において、画像の入力法は、多くの場合で処理方法以上に重要であり、解決すべき問題が多いことは良く知られた事実である。本論文で示したように、画像データ処理方法の工夫のみでは対処が難しい課題については、まず積極的に画像入力方法を目的に合わせた機能的方式に改善を試みることが、問題解決の近道であり、画像の認識処理を容易にすると同時に結果の信頼性も向上させることにつながる可能性が大きい。そして改善にあたっては、対象物表面の色彩に関係した反射光の特性に対する性質を把握することが重要であり、目的とする認識が可能となるよう、色彩情報、ダイナミックレンジ、分光強度分布のプロファイルなど、画像入力法が取得すべき情報の特性とそれに対応した画像入力系の機能を検討することが有効であるということを本論文の結論とする。

参考文献

- [Andersson 94] S. Andersson-Engels, J. Johansson, and S. Svanberg, "Medical diagnostic system based on simultaneous multispectral fluorescence imaging," *Applied Optics*, Vol.33, No.34, pp.8022-8029, Dec. 1994.
- [Asada 91] 浅田尚紀, 松山隆司, 望月孝俊, "多重絞リカラー画像の解析," *情処論*, Vol. 32, No. 10, pp. 1338-1348, Oct. 1991.
- [Astla 90] J. Astla, P. Haavisto, and Y. Neuvo, "Vector Median Filters," *Proc. IEEE*, Vol. 78, No. 4, pp. 678-689, Apr. 1990.
- [Bajcsy 90] R. Bajcsy, S. W. Lee, and A. Leonardis, "Color Image Segmentation with Detection of Highlights and Local Illumination Induced by Inter-reflections," *Proc. of 10th ICPR*, Vol. 1, pp. 785-790, 1990.
- [Clenk 90] M. Clenk, "A Color Clustering Technique for Image Segmentation," *CGIP*, Vol. 52, pp. 145-170, 1990.
- [Finlayson 95] G.D. Finlayson, B. V. Funt, and K. Barnard, "Color Constancy Under Varying Illumination," *Proc. IEEE 5th Intl. Conference on Computer Vision*, pp.720-725, 1995.
- [Funt 95] B. V. Funt and G. D. Finlayson, "Color Constant Color Indexing," *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.17, No.5, pp.522-529, May 1995.
- [Hashimoto 89] 橋本理, 森脇耕介, 佐藤宏介, 井口征士, "カラー画像を用いた物体表面の反射特性の認識," 第2回シグナルシステムコントロールシンポジウム講演論文集, pp.9-12, 1989
- [Hashimoto 91] 橋本理, 加藤博一, 森脇耕介, 佐藤宏介, 井口征士, "カラー画像を用いた材質感の判別と相互反射の検出," *信学論 D-II*, Vol. J74-D-II, No. 6, pp. 727-735, June 1991.
- [Hirai 94] A. Hirai, T. Inoue, K. Itoh, and Y. Ichioka, "Application of Multiple-Image Fourier Transform Spectral Imaging to Measurement of Fast Phenomena," *Optical Review*, Vol.1, No.2, pp.205-207, 1994.
- [Hotta 91] 堀田裕弘, 宮原誠, 小谷一孔, "均等色空間に基づくカラー画像の領域分割," *信学論 D-II*, Vol. J74-D-II, No. 10, pp. 1370-1378, Oct. 1991.
- [Inoue 91] T. Inoue, K. Itoh, and Y. Ichioka, "Fourier-transform spectral imaging near the image plane," *Opt. Lett.*, Vol. 16, No. 12, pp. 934-936, Dec. 1991.

- [Klinker 87] G. J. Klinker, S. A. Shafer, and T. Kanade, "Using a color reflection model to separate highlights from object color," 1st. ICCV, pp. 145-150, 1987.
- [Klinker 88] G. J. Klinker, S. A. Shafer, and T. Kanade, "Image segmentation and reflection analysis through color," Int'l Proc. of Image Understanding Workshop, pp. 838-853, 1988.
- [Klinker 90] G. J. Klinker, S. A. Shafer, and T. Kanade, "A physical approach to color image understanding," Int'l Jurnal of Computer Vision, 4, 7-38, 1990.
- [Lee 86] H. Lee, E. J. Breneman, and C. P. Schulte, "An experimental study of a color reflection model," Kodak Tech. Rep., 229507A, 1986.
- [Manabe 96] 眞鍋佳嗣, 佐藤宏介, 井口征士, " 物体認識のためのスペクトル画像による材質の判別 ," 信学論 D-II, Vol.J79-D-II, No.1, pp.36-44, Jan. 1996.
- [Matsuyama 91] 松山隆司, " 多角的視覚情報の統合 ," 信学誌, Vol. 74, No. 4, pp. 349-353, Apr. 1991.
- [Moriwaki 91] 森脇耕介, "電子シャッタを利用したC C Dカラーカメラの入力補正," 信学論 D-II, Vol. J74-D-II, No. 9, pp. 1321-1323, Sep. 1991.
- [Moriwaki 93] 森脇耕介, " 適応露光によるカラー画像の入力方式 ," 信学論 D-II, Vol. J76-D-II, No. 9, pp. 1894-1901, Sep. 1993.
- [Nagata 92] 長田典子, 亀井光仁, 赤根正樹, 中嶋紘之, " 感性計測技術に基づく真珠品質評価システムの開発 ," 電学論 C, Vol. 112, No. 2, pp. 17-22, Feb. 1992.
- [Nakaishi 87] 中石浩志, 相田貞蔵, " ビデオカメラの焦点ぼかしによる真珠の色分類システム ," 電学論 C, Vol. 107-C, No. 8, pp. 729-736, Aug. 1987.
- [Nakano 96] 中野恵一, 小宮康宏, " マルチスペクトルカメラを用いた物体認識 ," 応用物理, Vol.65, No.5, pp.496-499, May 1996.
- [Ohlander 78] R. Ohlander, K. Price, and D. R. Reddy, "Picture Segmentation Using a Recursive Region Splitting Method," CGIP, Vol. 8, No. 3, pp. 313-333, 1978.
- [Ohta 78] 大田友一, 金出武雄, 坂井利之, " 領域分割処理による画像情報の構造化 ," 情処論, Vol. 19, No. 12, pp. 1130-1136, Dec. 1978.
- [Ohta 93] 大田友一, 塚田正人, 林泰博, " 複数枚のカラー画像からの照明色と物体色の復元 ," 信学論 A, Vol.J76-A, No.12, pp.1778-1786, Dec. 1993.
- [Slater 96] D. Slater and G. Healey, "The Illumination-Invariant Recognition of 3D Objects Using Local Color Invariants," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.18, No.2, pp.206-210, Feb. 1996.
- [SONY 89a] " ソニー半導体集積回路ハンドブック ," C Q 出版, pp. 79-92, 1989.

- [SONY 89b] "CCD カラーカメラモジュール XC-711/711P サービスマニュアル," SONY, 1989.
- [Swain 91] M. J. Swain and D. H. Ballard, "Color Indexing," Int'l. J. Comput. Vision, Vol.7, No.1, pp.11-32, 1991.
- [Tajima 89] 田島譲二, 麦谷孝子, " カラーデザインのための色変更アルゴリズム," 情処研報, 89-CV-59-6, 1989.
- [Takagi 91] 高木幹夫, 下田陽久 監修, "画像解析ハンドブック," 東京大学出版会, 東京, 1991.
- [Tominaga 89] 富永昌治, " 物体のカラー反射モデルの検討," 情処研報, 89-CV-59-5, 1989.
- [Tominaga 90] 富永昌治, " カラー画像の色分類と分割," 情処論, Vol. 31, No. 11, pp. 1589-1598, Nov. 1990.
- [Tominaga 92] 富永昌治, "相互反射の色解析," 画像の認識・理解シンポジウム MIRU'92, pp. II-53-60, July 1992.
- [Tominaga 95] 富永昌治, "色恒常性を実現するカメラ系とアルゴリズム," 信学技報, PRU95-11, pp.77-84, May 1995.
- [Yamanaka 97] 山中俊夫, " 色彩学の基礎 " 文化書房博文社, 東京, 1997.
- [Yamada 95] 山田啓一, 中野倫明, 山本新, " 車載用カメラのダイナミックレンジ拡大方式," 信学論 D-II, Vol. J78-D-II, No. 10, pp. 1439-1449, Oct. 1995.
- [Yoshino 94] 吉野和芳, 青木みお, 川嶋稔夫, 青木由直, " 色特徴エネルギーによる対象物体の抽出," 信学論 D-II, Vol.J77-D-II, No.10, pp.1993-1999, Oct. 1994.

研究発表リスト

論文・速報

- [1] 森脇耕介, 橋本理, 井口征士, "主成分分析による画像の局所領域処理," システム制御情報学会論文誌, Vol. 2, No. 8, pp. 283-285, Aug. 1989.
- [2] M. Kimoto and K. Moriwaki, "Evaluation of Disbounding and Measurement of Poisson's Ratio for Plastic Composites Using Holographic Interferometry," J. Appl. Polymer Sci., Vol. 40, pp. 1085-1093, 1990.
- [3] 橋本理, 加藤博一, 森脇耕介, 佐藤宏介, 井口征士, "カラー画像を用いた材質感の判別と相互反射の検出," 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J74-D-II, No. 6, pp. 727-735, Jun. 1991.
- [4] 森脇耕介, 末国健一, "電子シャッタを利用した CCD カラーカメラの入力補正," 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J74-D-II, No. 9, pp. 1321-1323, Sep. 1991.
- [5] 森脇耕介, "適応露光によるカラー画像の入力," 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J75-D-II, No. 3, pp. 680-682, Mar. 1992.
- [6] 森脇耕介, "適応露光によるカラー画像の入力方式," 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J76-D-II, No. 9, pp. 1894-1901, Sep. 1993.
- [7] 森脇耕介, 中谷幸太郎, "離散分光画像を用いた照明不変な色物体検出," 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J81-D-II, No. 11, pp. 2574-2581, Nov. 1998.

国際会議・シンポジウム

- [1] 森脇耕介, 丸谷洋二, 中山裕, "5 × 5 局所領域の実時間抽出とマスク処理," 第 16 回画像工学コンファレンス, 3-3, 1985.
- [2] 橋本理, 森脇耕介, 佐藤宏介, 井口征士, "カラー画像を用いた物体表面の反射特性の認識," Second Signals System Control Symposium, ISCIE, pp.9-12, Jan. 1989.
- [3] K. Moriwaki, "A Study of Analysis Method for Adaptive Exposure Color Image," The 12th Sensor Symposium, B1-3, June 1994.
- [4] 森脇耕介, 中谷幸太郎, 杉井春夫, "光源の変動にロバストな色度パターン検出によるカラー画像中の多色物体認識," 第 12 回センシングフォーラム講演要旨集, pp. 151-154, Oct. 1995.
- [5] K.Moriwaki and K.Nakatani, "Illumination Invariant Detection of Multicolored Object Using Sampled Spectrum Image," Proc. of The 11th SCIA'99, June 1999. (Submitting)

全国大会

- [1] 森脇耕介, 永田伍雄, 宮本大樹, 丸谷洋二, "BSO 単結晶を用いた入射光感応形光リミッタ," 昭和 58 年電気関係学会関西支部連合大会, G14-12, 1983.
- [2] 丸谷洋二, 森脇耕介, "高速画像計測装置(I)," 昭和 59 年電気関係学会関西支部連合大会, G2-11, 1984.
- [3] 森脇耕介, 丸谷洋二, "高速画像計測装置(II)," 昭和 59 年電気関係学会関西支部連合大会, G2-12, 1984.
- [4] 森脇耕介, 丸谷洋二, 中山裕, "5 × 5 局所領域の実時間抽出およびマスク処理," 昭和 60 年電気関係学会関西支部連合大会, G8-5, 1985.
- [5] 森脇耕介, 渡辺俊明, 木本正樹, 箕輪晃男, 永田伍雄, "ホログラフィ干渉縞の画像処理解析によるポアソン比の測定," 昭和 62 年信学会春季大会, 1222, Mar. 1987.
- [6] 森脇耕介, 井口征士, "ホログラフィ干渉画像によるポアソン比の測定," 昭和 62 年信学会情報・システム部門大会, 1-116, Nov. 1987.
- [7] 丸谷洋二, 中辻秀和, 中井孝, 森脇耕介, 浅田健司, "濃淡画像処理用ハードウェアの方式比較," 昭和 63 年信学会春季大会, D-188, Mar. 1988.
- [8] 森脇耕介, 中辻秀和, 中井孝, 浅田健嗣, 丸谷洋二, "光沢のある色物体の領域分割," 昭和 63 年信学会春季大会, D-222, Mar. 1988.
- [9] 森脇耕介, 浅田健嗣, 中井孝, 中辻秀和, 丸谷洋二, "色彩を用いた高速外観検査装置の試作," 1989 年信学会春季大会, 7-217, Mar. 1989.
- [10] 橋本理, 森脇耕介, 佐藤宏介, 井口征士, "カラー画像を用いた物体表面の反射特性の認識," 1989 年信学会春季大会, D-285, Mar. 1989.
- [11] 末国健一, 森脇耕介, "電子シャッタを用いたカラー画像入力法," 1990 年信学会春季大会, D-428, Mar. 1990.
- [12] 森脇耕介, "ベクトルメディアンフィルタによる適応露光カラー画像の画質改善," 1992 年信学会春季大会, 7-222, Mar. 1992.
- [13] 森脇耕介, "離散分光画像を用いた照明色変化を考慮した色物体認識," 第 41 回システム制御情報学会研究発表講演会, pp..299-300, May 1997.
- [14] 森脇耕介, "離散分光画像を用いた照明光不変な色物体検出の一手法," 1997 年信学会情報・システムソサイエティ大会, D-12-62, Sep. 1997.
- [15] 中谷幸太郎, 森脇耕介, 亀井義弘, "布画像からの視覚的特徴量抽出," 1998 年信学会情報・システムソサイエティ大会, D-12-37, Oct. 1998.

謝 辞

本論文の執筆に当り、大阪大学大学院基礎工学研究科 井口征士教授 には誠に御懇切なる御指導を賜りました。幸いにも教授の知己を得、また研究生として1年間の御薫陶を受ける機会を得られましたことは、研究生活における誠に貴重な経験となりました。井口教授の御厚情に対しまして、ここに心よりの感謝を込め厚く御礼を申し上げます。

さらに、大阪大学大学院基礎工学研究科 谷内田正彦教授、西田正吾教授 には、本論文の内容に関しまして誠に貴重なる御指導と御助言を賜りました。両教授の御見識に深く敬意を表しますとともに、厚く御礼申し上げます。

また、大阪大学大学院基礎工学研究科 眞鍋佳嗣助手 には本論文作成に当り、さまざまな御協力を頂きました。深く感謝申し上げます。

関西電力株式会社 橋本 理氏 は、大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程在学中、共同研究者として本研究の内容に関する重要な役割を果たしておられます。ここに記し、感謝申し上げます。

北陽電機株式会社技術部 末国健一氏 には、共同研究者として実験、議論を通じて御協力を頂きました。そして同社技術部長 森 正宏氏 には、研究遂行にあたり多大な御協力を賜っております。謹んで御礼申し上げます。

大阪府立産業技術総合研究所システム技術部光応用計測グループ主任研究員 永田伍雄博士 には、同じ職場にあって日頃より多くの御助言を頂戴致しました。また、同グループ研究員 中谷幸太郎氏 には、共同研究者として御協力頂きました。ここにあらためて感謝申し上げます。また同所材料技術部総括研究員 鈴木義彦博士 をはじめとする同所関係各位、並びにセンシング技術応用研究会の皆様より頂戴した激励は、本論文執筆の大きな支えとなりました。ここに御礼申し上げます。

なお本論文の一部は、筆者が大阪府立産業技術総合研究所システム技術部光応用計測グループ在籍中に、業務の一環として遂行した研究成果であります。この研究が些かでも大阪府民の皆様のお役に立つことが出来ましたならば、筆者の望外の喜びとするところであります。

