

黒体放射軌跡に基づく
カラー画像からの照明光色推定
に関する研究

Research on Estimating Illuminant Colors
from Color Images
Based on Blackbody Radiation Locus

2014年3月

川村 春美

黒体放射軌跡に基づく
カラー画像からの照明光色推定
に関する研究

Research on Estimating Illuminant Colors
from Color Images
Based on Blackbody Radiation Locus

2014 年 3 月

早稲田大学大学院国際情報通信研究科
国際情報通信学専攻画像処理研究Ⅱ

川村 春美

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 照明光の分類.....	2
1.3 関連研究.....	3
1.3.1 画像の照明光色を入手する手段.....	4
1.3.2 照明光色推定手法の分類.....	6
1.4 研究目的とアプローチ.....	8
1.4.1 画像1枚による色選択を用いる局所灰色仮説.....	10
1.4.2 仮想的色追加による局所灰色仮説.....	11
1.4.3 異照明光下画像からの色選択.....	11
1.4.4 異照明光下画像の1色利用.....	12
1.5 論文の構成.....	12
第2章 画像1枚による色選択を用いる局所灰色仮説	14
2.1 はじめに.....	14
2.2 提案手法.....	15
2.2.1 提案手法の概要.....	15
2.2.2 画像からの色選択.....	16
2.3 実験.....	21
2.3.1 実験構成.....	21
2.3.2 実験方法（実験Ⅰ）.....	21
2.3.3 実験結果（実験Ⅰ）.....	24
2.3.4 実験方法（実験Ⅱ）.....	24
2.3.5 実験結果（実験Ⅱ）.....	26
2.4 考察.....	28
2.5 まとめ.....	32
第3章 仮想的色追加による局所灰色仮説	33
3.1 はじめに.....	33
3.2 提案手法.....	33
3.2.1 2章で提案した手法の課題.....	33
3.2.2 提案手法.....	34
3.3 実験.....	40
3.3.1 実験方法.....	40
3.3.2 実験結果.....	42

3.4 考察.....	43
3.4.1 推定精度悪化の原因分析.....	43
3.4.2 高彩度 gamut による色追加の効果.....	44
3.4.3 低彩度 gamut による照明光候補抽出の効果.....	44
3.4.4 照明光の色温度間隔による推定精度への影響.....	47
3.4.5 低・高彩度 gamut のサイズによる影響.....	48
3.4.6 色追加必要性の判定.....	49
3.5 まとめ.....	50
第4章 相異なる照明光下画像の局所灰色仮説適用条件	52
4.1 はじめに.....	52
4.2 灰色仮説成立条件の定式化.....	52
4.2.1 反射光と黒体放射軌跡の関係.....	52
4.2.2 灰色仮説成立の判定条件の導出.....	53
4.2.3 人間の知覚特性を考慮した灰色仮説の判定条件と照明光推定.....	55
4.2.4 灰色領域の選択.....	56
4.3 実験.....	56
4.3.1 実験方法.....	56
4.3.2 実験結果.....	58
4.4 まとめ.....	61
第5章 相異なる照明光下画像における1同色領域の利用	66
5.1 はじめに.....	66
5.2 提案手法.....	66
5.2.1 コンセプト.....	66
5.2.2 処理概要.....	68
5.3 実験.....	72
5.3.1 実験1.....	72
5.3.2 実験2.....	74
5.3.3 実験3.....	78
5.4 考察.....	80
5.4.1 従来手法との推定誤差比較と要因分析.....	80
5.4.2 分光反射率集合生成における照明光種類の影響.....	81
5.4.3 物体における均一色領域の色推定の可能性.....	82
5.5 まとめ.....	82
第6章 結論と今後の展望	84
6.1 結論.....	84
6.2 今後の展望.....	86

謝辭.....	88
参考文献.....	89
研究業績.....	92

第1章 序論

1.1 研究背景

1990年代に民生用のコンパクトデジタルカメラが市場に登場したことを契機に、写真を銀塩写真の形態ではなく電子データとして記録・蓄積する文化が醸成されてきた。さらに、携帯電話が小型化・高機能化する過程でカメラ機能がデフォルトで搭載されるようになり、現在では、画像解像度も高くなったことに伴って目前の情景を電子データ化することが日常的に行われている。また、1980年代後半から90年代にかけてのインターネットの普及により、ブログやコンテンツ共有サイト上でコンシューマが取得した画像を共有する機会が増大してきた。最近では、タブレット端末やスマートフォンが携帯電話に代わって台頭し始めており、コンシューマ自身が画像を編集・加工するニーズも高まってきている。

画像の編集・加工においては、キャプションを付与するレベルの簡易なものから、拡大・縮小等のサイズ変更に加え、エンボス調やエッジ強調等のフィルタリング、更には、二値化やトーンカーブ変更等の高度な処理が行えるツールも普及してきている。さらに、AR (Augmented Reality : 拡張現実) や MR (Mixed Reality : 複合現実) のように、現実世界とCGとの融合を実現するためのソフトウェアライブラリ (ARToolKit) も開発され、コンシューマ自らが日常的に画像を加工できる環境が整い始めている。

このように、コンシューマが自身で撮った画像自体を加工、また、他人が撮った画像と合成、さらには、ARToolKitを用いて実画像にCG等を合成する機会の増加に伴って、合成画像の品質に対する要求も向上する。通常、画像の合成においては、一方を他方にそのまま重畳すると画像を単に貼り付けたような結果になる。この主な要因として、両画像の解像度や光源・陰影方向が異なることや色味の違いが考えられる。特に色味の違いは合成画像のリアリティを左右する上で重要な要素である。したがって、リアリティの高い画像を得るには、画像の色を構成する要素、即ち、画像中の物体の色と照明光の色を制御することが重要になる。しかしながら、画像の色、即ち、画素値は、物体の分光反射率、照明光の分光分布、および、カメラ等の撮像系の分光感度特性の積で表されており、画素値をこれら構成要素に分解することは逆問題となる。

一方、カラーマネジメントの分野では、カメラ等の撮像系を含めカラー画像を扱う入出力機器 (スキャナー、プリンタ、モニタ等) の特性を International Color Consortium (以下、ICC)[1]が規定したプロファイルに記述することによって、色再現空間の異なる複数の機器間で統一的に色を扱う仕組みがデファクトスタンダードとなっている。ICCの仕組みでは、図 1.1 に示すように、現実世界における色空間 (たとえば XYZ 三刺激値や CIELAB

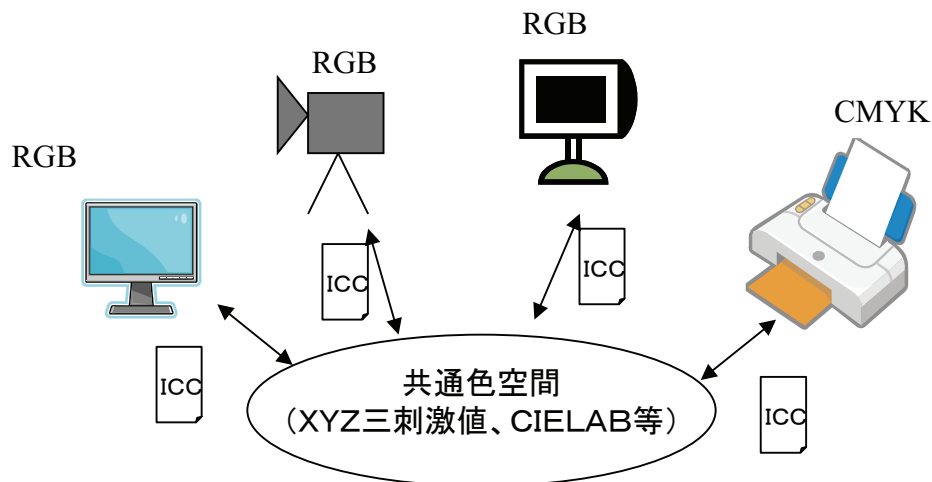


図 1.1 ICC によるカラーマネジメントの仕組み

空間)を共通色空間とし、各機器に固有の色空間(たとえば RGB や CMYK 等)との対応関係をプロファイルに記述し、共通色空間を介して色情報の受け渡しを行うことによってトータルとしてデバイスに依存しない色表現を実現する。現在では、各メーカーが機器の出荷時にプロファイルを添付するケースも増えてきており、Web から入手可能な場合もある。しかしながら、実際には、これらプロファイルを扱えるツールは ADOBE 社の Photoshop 等、一部の画像レタッチソフトに限られている。

また、デジタルカメラやデジタルビデオ等の映像入力機器においては、ホワイトバランス機能[2][3]を用いて、撮像時の照明光環境に依存しない色に変換して撮像することも可能であるが、まだ十分な性能であるとは言えない。

1.2 照明光の分類

まず、推定対象の照明光の分類を行う。表 1.1 に示すように、照明光は自然光(太陽光)と人工光に大別でき、人工光はさらに、演色性^{※1}の高い照明光と低い照明光に分類される。自然光は黒体放射^{※2}の分光分布で近似できることが知られており、その分光分布は式(1.1)に示すように、波長 λ と色温度 T の関数であるプランクの放射式で表される。

※1 演色性とは、人工照明に対して自然光(太陽光)下での物体の色の見えの近さを示す指標であり、高い数値ほど自然光下での見えに近いことを示す。

※2 黒体放射とは、分光吸収率が全ての波長について1となる物体であり、温度を与えるプランクの放射式にしたがった分光特性をもつ熱を放射する仮想的な物体である。

表 1.1 照明光の分類

照明光の種類		特徴
自然光		黒体放射の分光特性で近似できる
人工光	高演色性	黒体放射に近い色をもつ
	低演色性	黒体放射とは異なる色をもつ

$$M(\lambda, T) = c_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} \right)^{-1} \quad (1.1)$$

但し, $c_1 = 3.7415 \times 10^{-16}$ (W・m²), $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2}$ (m・K)とする.

また, 演色性の高い人工光は, 学校やオフィスのように日常的に主に過ごす環境で用いられているものであり, 自然光下での物体の見えに近くなるように設計されているため黒体放射の色に近い色となる. 一方, 演色性の低い人工光は, コンサート会場やイベント会場等で非日常的な照明効果を狙って使用されるものであり, 黒体放射の色とは異なる. ここで, 黒体放射の色とは, 式(1.1)に基づいて, 色温度T毎の分光分布を明るさ成分を同一視した色空間(XYZ三刺激値のxy色度座標^{*1}上にマッピングしたものであり, 図1.2に示すように1本の曲線(黒体放射軌跡)をなす. 本論文では, 表1.1において, 自然光と演色性の高い人工光を対象とする. なお, これらの色は図1.2に示すように色空間上で黒体放射軌跡の近傍に位置する.

自然光と演色性の高い人工光であれば, 図1.2に示すようにその色は色空間上で黒体放射軌跡の近傍に位置するが, これらの照明が複数種類, シーン中に混在する場合には, 必ずしも同一軌跡の近傍に分布するとは限らない.

1.3 関連研究

画像の構成要素のうち, カメラ等の撮像系の分光感度特性に関しては, ICC ファイルを扱えるツールが十分に整備されていないという課題があるが, これら情報が扱えるようになるのは時間の問題であり, 現状, 色票と測定器があればカメラ入力前の色票からの反射光の色とカメラ入力後の画像における各色票領域の色との対応関係を計算することで得ることも可能である. 一方, 画像における照明光と物体の色は, 照明光色が分かれば白色光源下における物体の色が分かり, また, その逆も然りという関係にある. 即ち, どちらか一方の情報が入手できれば他方もわかるという関係にある. 通常, 照明光は画像上で空

^{*1} xy色度とは, 3次元で表現される色空間における輝度の変化を同一視した2次元の色空間であり, 2値の組み合わせで色の3属性のうちの色相と彩度の両方を表す.

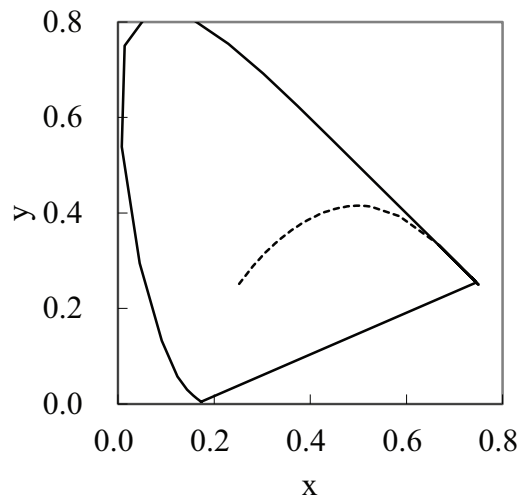


図 1.2 xy 色度座標上の黒体放射軌跡

間的に分布し、画像全体として大きく変化しないという特性をもつが、物体領域は局所的に分布し物体の反射特性（鏡面反射の有無）によって画像上の色が変わるといった特性がある。そこで、以下では画像全体に均等して分布する照明光色を取得することに関して議論を進める。

以下、画像として撮像されたシーンから照明光色を得る手段に関して分類を行う。

1.3.1 画像の照明光色を入手する手段

画像中の照明光色を入手するには、撮影する際にセンサを利用する方法と画像のみから得る方法に分類できる（表 1.2）。

前者は、例えば、色彩輝度計[4]（コニカミノルタ製）のようなセンサを照明光に向けて測定することにより直接的に照明光の色を得る方法である。しかしながら、センサを用いる手法は正しいデータが得られる反面、画像取得時に常に携帯する必要があり持ち運びが煩雑であること、また、既に取得済の画像やネット等で共有されている画像に対してはセンサによる測定情報がないため照明光色を得ることが不可能であるという欠点がある。さらに、外光が入る屋内や複数の異なる照明光が照射する環境下では関連する全ての照明光を測定する必要があることや、屋外に設置された固定の監視カメラ画像に対しては太陽光の動きに応じた測定も必要であり、運用上、現実的ではない。加えて、これらセンサを利用するには、色を扱う上での専門的知識も必要となる。

一方、後者の画像のみから照明光色を得る方法は、さらに 2 種類の方法に分類できる。1 つめは、撮影時に照明光を画像に映り込ませることによって間接的に照明光の色を求める方法である。この方法を実現するには、全周囲カメラや魚眼カメラを用いて対象シーンを取り囲む環境光全てを画像として取り込む方法[5][6]と、鏡面球をシーン中において撮像し、鏡面球に映った照明光を画像に取りこむ方法[7]がある。共に、画像中の照明光領域を抽出することによって照明光色を得ることが可能である。

表 1.2 照明光色を入手する手段の分類

手段		長所	短所
測色機器		直接的に照明光色を得る	<ul style="list-style-type: none"> ・持ち運びに不便/かさばる ・関係する照明光全ての測定が必要 ・屋外監視カメラ画像の場合、太陽光の方向変化の考慮が必要 ・専門家用途 ・取得済の画像には適用不可
画像	照明光を映す場合	画像から直接的に照明光色が得られる	<ul style="list-style-type: none"> ・全方位カメラや鏡面球等の特殊デバイスが必要 ・ダイナミックレンジの広い画像を取得するスキル（専門知識）が必要
	照明光が映っていない場合	鏡面反射あり	<ul style="list-style-type: none"> ・鏡面反射領域から間接的に照明光色推定可能 ・一般の画像に適用可 ・専門家の知識不要 ・取得済の画像にも適用可
			<ul style="list-style-type: none"> ・一般の画像に適用可 ・専門家の知識不要 ・取得済の画像にも適用可 ・反射特性の制約不要

しかしながら、これらの手法では、撮像系に使用する全方位カメラや魚眼カメラはコンシューマが通常利用するものではなく、また、鏡面球についても同様に一般的ではない。さらに、画像中に照明光自体を映り込ませる際には、画像のダイナミックレンジを広くして撮る必要がある。ダイナミックレンジの広い画像を取得するには、HDR (High Dynamic Range) 対応のカメラを用いるか、もしくは、通常のダイナミックレンジをもつカメラで露光を数段階に調節して撮像した画像を合成することで HDR 画像を得る方法があるが、HDR 対応のカメラ自体はまだ汎用的なデバイスではなく、また、露光の異なる画像を合成するには画像処理に関する知識やスキルが必要である。したがって、照明光を映り込ませて画像を撮影する方法に関しては、撮像デバイスや撮像時に使用する特殊な参照物体を利用するという制約条件があり、さらにこれら機器を扱うには専門のスキルが必要である。

2つめの画像のみから照明光色を得る方法は、上述した特殊な機器や参照物体を必要とせず、一般に普及しているカメラで撮像された画像を対象とするものであり、以下、この

方法に関して説明する。画像のみを利用する場合には、上述の測色機器を用いる場合や全方位カメラ等を用いて画像中に照明光領域を映り込ませる場合と比較して、撮像時に特殊なデバイスを準備する必要もなく、また、取得済の画像にも適用可能である。この方法は、鏡面反射成分の有無によってさらに2種類の手法に分類される。鏡面反射成分を含む場合には、画像中にある誘電体の鏡面反射領域が照明光の色を反映していることを利用する手法[8]が提案されている。さらに、金属光沢をもつ物体を含む場合に拡張する手法 [9]も提案されている。しかしながら、これらの手法では、鏡面反射領域のもつ性質を利用したものであり、これら領域が存在しない場合には適用できない。

鏡面反射成分を含まない画像を対象とする場合には、鏡面反射成分が無い場合であっても適用可能であり、より広範な画像を対象とすることができるが、直接的には照明光色を推定できない。本論文では、表 1.2 の太枠に示す範囲である、鏡面反射成分を含まない画像からの照明光色推定を対象とする。

1.3.2 照明光色推定手法の分類

推定対象の照明光が自然光もしくは演色性の高い人工光1種類であれば、図 1.2 に示すようにその色は黒体放射軌跡の近傍にあると言えるが、これらが複数存在する場合、例えば、屋内の窓際のシーンのように人工光と自然光の双方の影響が想定される場合には、これら組合せによる照明光色は黒体放射軌跡の近傍に位置するとは限らない。また、複数の異なる照明光が照射するシーンを対象とした従来技術は今のところ見当たらない。そこで、本論文では、1枚の画像に含まれる照明光が1種類である場合を対象とする。

本節では、1枚の画像に含まれる照明光が1種類である条件下で照明光色を推定する手法を分類する (図 1.3)。

1枚の画像中に均一の色領域が1種類しか存在しない場合 (図 1.3 の左下) には原理的に解くことができないため、従来手法では、1枚の画像に含まれる均一色領域数が多数存在することを前提とする手法[10]-[24]と、画像中の均一色領域数が少ない場合に別な照明光下での画像も利用する手法[27]-[30]が提案されている。

1枚の画像からの照明光色推定手法は事前知識を利用する手法[11]-[18]と、事前知識の代わりに照明光や物体の色に関する特性を利用する手法[19]-[24]に大別される[10]。

前者は、様々な照明光の下での色の範囲 (gamut) を事前に取得することで入力画像の特性から照明光の色を推定する手法[11]-[14]や、確率的な手法で照明光の色を推定する手法[15]-[17]、逆色度空間を用いる手法[18]等が提案されている。gamut を利用する手法[11]-[14]では、照明光毎の色票の gamut と標準光下の gamut との対応関係 (変換行列) を事前に求め、入力画像を全ての変換行列に適用し得られた gamut が最も大きいものを抽出することによって照明光色を推定する手法であり、入力画像には様々な色が含まれていることを前提としており、図 1.3 において破線で囲った部分、即ち、画像中に含まれる均一色領域数が少ない場合に適用すると推定精度が悪くなる。

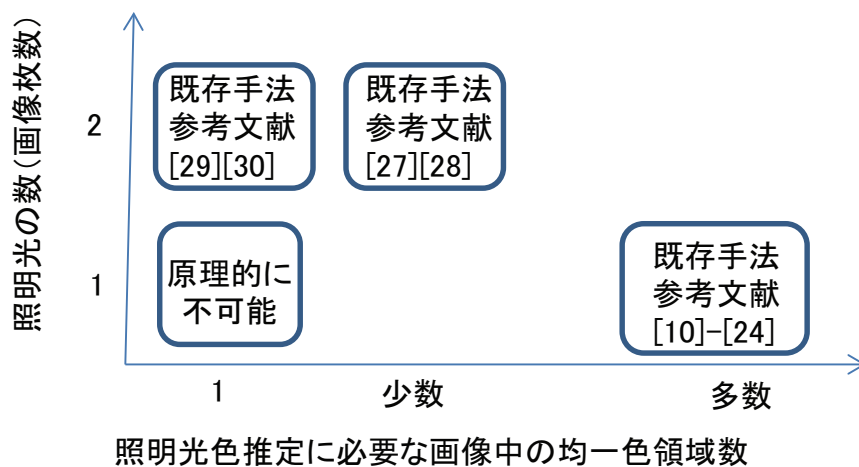


図 1.3 照明光色推定手法の分類

後者の、事前知識を用いない手法には、画像中で最も明るい領域を白色領域とみなす手法[19]，シーン中の物体の色の平均が灰色であると仮定（灰色仮説）し，画像の平均の色を照明光色とする手法[20]-[23]，シーン中のエッジの平均を灰色であると仮定する手法[24]等がある．特に，灰色仮説に基づく照明光色の推定では，アルゴリズムがシンプルであることから FPGA (Field Programmable Gate Array) による実装[22][23]も行われている．これら事前知識が不要な手法では，前提とする条件，例えば，シーン中のもっとも明るい物体領域の色は白色であることや，シーン中に含まれる物体の色の平均が灰色であること等の条件が満たされない場合には推定精度が悪くなる．

一方，異なる照明下の画像を用いる手法では，画像中に含まれる均一色領域数が 2 個ある場合の手法[27],[28]と 1 個しか存在しない場合の手法[29],[30]に分類できる．前者の場合，照明光や物体の分光特性を基底関数[25]，[26]で表現する手法[27]，[28]が提案されている．この手法は，事前に様々な照明光の分光分布[25]や様々な色空間の色票[26]の分光反射率を主成分分析し，寄与率の高い上位 N 個（画像が RGB の 3 次元であるため $N = 3$ とする場合が多い）を基底関数として画像の色を表現する際の重み係数を求める問題に帰着させる．しかしながら，対象画像中の物体の分光反射率や照明光の分光分布が基底関数の線形和で十分に表現できるとは限らないため，推定精度の悪化の要因となる．

後者の手法[29][30]では共に，照明光の異なる画像それぞれから得られる物体の色が一致するという考え方に基づいて照明光色を推定する．[29]では，事前に，想定し得る照明光下における様々な色票の画像の色を取得しておき，各照明光下の画像の色から，標準的な照明光（たとえば白色光源）下の画像の色への変換を 2 行 2 列の対角行列として表現し，異なる照明光下の各画像から変換される色の共通部分が 1 種類しか存在しない均一色領域

であることを利用する。また、[30]は、照明光が黒体放射の分光分布であると仮定し、式(1.1)における色温度 T を推定する問題に帰着させている。しかしながら、[29]の手法は、標準的な照明光下の画像に変換する際の変換行列の要素を決定する際の近似方法に問題があるため原理的に推定誤差が大きいこと、また、[30]の手法では、照明光の分光分布が理想的な黒体放射と0.1%以上異なる場合には推定精度が大幅に悪化する。

なお、異なる照明下の各画像に共通する均一色領域数が3個以上の場合には、2個の手法を適用するか、もしくは、1個の場合の手法を各均一色領域に適用し、得られた照明光色推定結果を統合することで対応可能である。

1.4 研究目的とアプローチ

1.3.2節で述べたように、1枚の画像のみから照明光色推定を行う場合には、画像中に含まれる均一色領域数が多い場合の手法しか存在せず、色数が少ない画像に適用すると推定精度が悪いという課題がある。また、照明光色が異なる2枚の画像から照明光色を推定する場合は、適用範囲が限定的であり、また、前提とするモデルでの再現精度に問題があり十分な推定精度が得られないという課題もある。

そこで、本研究では上述の課題を解決するため、1枚の画像を対象として画像中の均一色領域数が少ない場合の照明光色推定手法、および、照明光色が異なる2枚の画像を対象とした照明光色推定手法を提案する。本論文で提案する照明光色推定では、表1.1での自然光および演色性の高い人工光の色を対象としており、その色は色度座標上で黒体放射軌跡(図1.2)の近傍にあるという制約条件を用いる。

また、人間には、様々な照明光の下においてもシーン中の物体の色を知覚できるという特性(色の恒常性)があることが知られている。このような色知覚の手掛かりの一つとして灰色仮説に基づく可能性を示唆する心理物理実験の結果[31]があることから、本論文では灰色仮説ベースの手法を提案する。

灰色仮説ベースの照明光色推定[20][21]では、1.3.2節で説明したように、シーン中に存在する全ての物体の色を平均すると灰色になるという仮説に基づいて画像の平均値を照明光色として推定するが、この仮説が成立しないシーンには適用できないという課題があった。そこで、灰色仮説のコンセプトである、”平均すると灰色になるような複数の色領域における画像の色を平均すると照明光の色を表す”という性質を維持した上で、照明光色推定を行う手法を提案する。

そこで、1枚の画像のみを用いる場合には、画像中の全ての色を照明光色推定に用いる代わりに灰色仮説を満たすような色を選択することによって上述の課題を解決する手法を提案する。色選択の手段として、画像中から候補を抽出する場合と、画像取得時と同じシーンに存在し得る色を仮想的に追加する場合の両方に対応する手法をそれぞれ提案する(図1.4)。

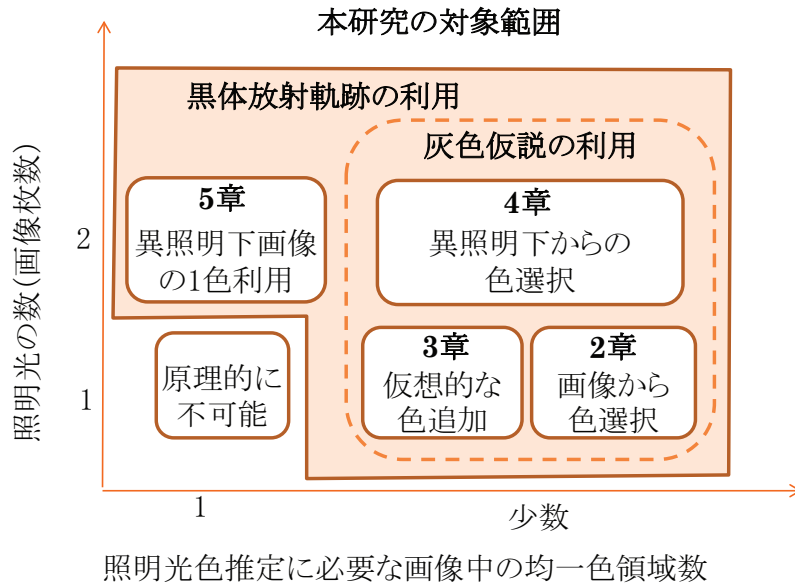


図 1.4 本論文で提案する手法の位置づけ

また，照明光色が異なる 2 枚の画像を用いる場合には，各画像に共通して存在する同一分光反射率をもつ均一色領域が複数種類存在する場合と 1 種類しか存在しない場合に対し従来手法を上回る精度をもつ手法を提案する（図 1.4）．特に前者では，灰色仮説を満たす色の組み合わせがもつ性質が，異なる照明光下の画像においても継承されることを利用する．後者の場合には，各画像に共通する均一色領域が 1 種類しか存在しないため，灰色仮説を適用することができず，既存手法[29][30]と同じ考え方（照明光の異なる画像それぞれから得られる物体の色が一致する）を利用しつつ，分光反射率の情報を扱うことにより推定精度の向上を図る．

本論文で提案する手法は全部で 4 つあり，各手法の対応関係を図 1.5 に示す．2 章，3 章で説明する手法は，同一照明光下の画像が 1 ないし複数枚ある場合に適用可能な手法である．同一照明光下の画像が複数枚ある場合は，個々の画像を大きな 1 枚の画像を部分的に切り取ったものとみなすことができるため，照明光色推定においては，画像枚数というよりは 1 照明光下の画像に含まれる色数という観点で扱うことが可能である．したがって，適用する手法は画像全体として含まれる色数（バリエーション）に依存する．画像中に含まれる色に偏りが無い場合には 2 章の手法，偏りがある場合には 3 章の手法を適用することができる．一方，異なる照明光下の画像が複数枚ある場合には，各画像に共通する物体の同一均一色領域の数に応じて決まり，2 個以上の場合には 4 章の手法，1 個のみの場合には 5 章の手法を適用することができる．

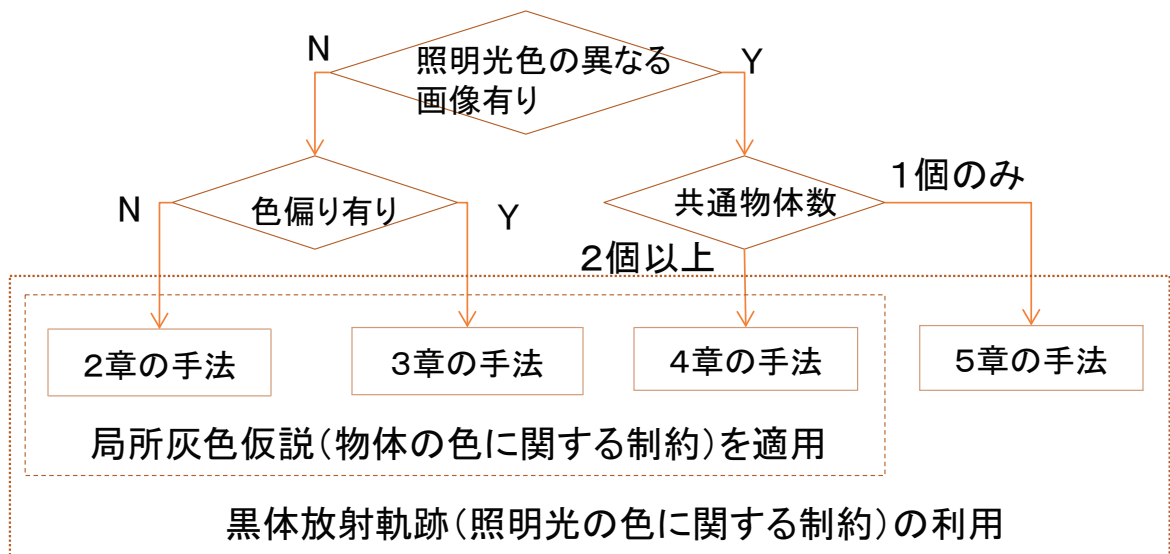


図 1.5 各章での提案手法の関係

本節の冒頭で述べたように、本論文で扱う照明光色推定法では、照明光色に関しては、照明光の色が色空間上で黒体放射軌跡の近傍に位置するという条件、および、物体の色に関する制約条件として人間の色知覚特性（色の恒常性）に基づいた灰色仮説のコンセプトを利用する。特に2～4章で提案する手法は、1枚の画像から局所的に灰色仮説を満たす色を選択する手法（2章）、1枚の画像が取得されたシーンに存在し得る色を用いて仮想的に追加し局所的に灰色仮説を満たす色を選択する手法（3章）、および、共通物体を含む別な照明下の画像も含めて灰色仮説を満たす色を選択する手法（4章）に対応する。5章で提案する方法は、1色しかない場合には、その色が灰色である場合を除き灰色仮説を適用することができないため、照明光色に関する制約を用いる。

以下、それぞれの手法に対応する研究目的を述べる。

1.4.1 画像1枚による色選択を用いる局所灰色仮説

1枚の画像から灰色仮説ベースで照明光色を推定する手法[20]-[23]では、画像全体の平均を照明光色とするため、画像全体として仮説を満たさない場合には推定精度が悪くなるという課題がある。この理由として、(1) 面積の広い均一色領域の影響を大きく受けること、および、(2) 均一色領域の数の多い色の影響を大きく受けること、の2点が考えられる。

そこで、本論文では、(1)への対応として、画像の画素値に基づいて類似の色をもつものをクラスタリングし統合することで、1種類の色として代表させる。さらに、(2)に関しては、画像全体ではなく、灰色仮説が成立するような色の組み合わせを画像中から選択することで対応する。色の選択では、色の三属性の一つである色相環において、反対色の

関係にある色同志を平均すると灰色になるという性質を用いる。

反対色の関係にある色を選択するため、画像の色を色空間内で類似の色相からなる色相カテゴリに分割し、反対色の関係にある色相カテゴリから色選択をしながら灰色仮説成立可否を判定する。

1.4.2 仮想的色追加による局所灰色仮説

1.3.1 節で説明した手法の場合、画像中に灰色仮説を満たす色の組み合わせが存在することが前提となるが、例えば、画像中に含まれる均一色領域の色の種類が特定の色相に偏っている場合、即ち、森林や海岸のように画像の色が緑や青系統の色相に偏っている場合には反対色の関係をもつ色の組み合わせが存在しない。

そこで、反対色の組み合わせを得るため、画像中ではなく、画像を取得したシーンに存在し得る色を仮想的に追加する。画像とは、ある照明光下におけるシーンの一部をカメラ等の撮像系で切り出し RGB 等の異なる色チャネル値の濃度の組み合わせで表現したものである。したがって、切り出し位置によっては、上述したように灰色仮説を満たさない場合があり得る。シーンに存在し得る色には、各照明光下における様々な物体の色の取り得る範囲 (color gamut) を用いる。

color gamut とは、様々な照明光下における様々な物体領域からの反射光の色の取り得る範囲を色空間上に示したものであるが、色追加に color gamut を用いる際には照明光色を特定する必要である。そこで、低彩度の色領域からの反射光が照明光の色を反映していることを利用し、color gamut を利用する際の照明光色を複数種類、抽出する。複数種類得られた照明光色候補それぞれに対応する color gamut に基づいて、入力画像の色に仮想的に色追加を行い、得られた結果と color gamut 利用時の照明光色候補の色との整合性に基づいて最終的な照明光色を推定する。

実画像に適用し、画像の色が特定の色相に偏っている場合であっても仮想的な色追加によって反対色の組み合わせを抽出し照明光色が推定できることを示す。

1.4.3 異照明光下画像からの色選択

照明光色の異なる 2 枚の画像に共通して存在する同一の分光反射率をもつ物体における均一色領域が複数種類、存在する場合に、これらの色を用いて灰色仮説の適用可否を判定する方法を提案する。

灰色仮説が局所的にでも成立する場合には、平均の色は色度図上で黒体放射軌跡の近傍に位置し、その色を照明光色として推定することができるが、逆、即ち、複数の均一色領域の平均の色が黒体放射軌跡の近傍にあることのみから、灰色仮説成立を判定することはできない。しかしながら、異なる照明光下の画像に共通して存在する同一の分光反射率をもつ物体領域が複数種類ある場合、画像毎に、これら均一色領域の平均の色が黒体放射軌跡の近傍に位置する場合には灰色仮説が成立することを示す。

上記条件によって仮説成立と判定された場合には、精度よく推定できることを示す。

1.4.4 異照明光下画像の1色利用

照明光色の異なる2枚の画像に共通して存在する同一の分光反射率をもつ物体における均一色領域が1つしか存在しない場合に照明光色を推定する手法を提案する。

従来手法においては、照明光を黒体放射とし、各画像に共通する物体における同一の均一色領域の色から、その色が白色光源下の色として取り得る範囲をRGB空間における相対値 ($R/B, G/B$) で求める。照明光色の異なる画像から得られた共通物体領域の色の範囲(曲線)の交点が共通物体における均一色領域に対応することを利用して照明光色を推定する。

しかしながら、従来手法では、モデル化の過程で非線形的特徴をもつ色空間を線形と仮定することによって生じる原理的な誤差があること[29]や、照明光の分光特性を黒体放射に限定してモデル化を行っているため、黒体放射の分光特性とは一致しない照明光下の画像に適用すると推定誤差が大きくなるという課題がある。

そこで、提案手法では、共通物体領域における均一色領域の色をRGB空間の相対比ではなく分光反射率で表現し、照明光の分光特性が黒体放射に一致しない(照明光の色は黒体放射軌跡の近傍にあるという条件は維持)場合であっても、照明光色推定を行う。数値シミュレーションおよび実画像を用いた実験によって提案手法の有効性を示す。

1.5 論文の構成

本論文の構成は以下のようになる。

第2章では、1枚の画像から灰色仮説ベースで照明光色を推定する際に、反対色同志の平均が灰色になるという色空間の性質に基づいて、画像中から灰色仮説を満たす色の組み合わせを選択する手法(局所灰色仮説)を提案する。実験では、まず、灰色仮説を満たす場合、満たさない場合の双方について数値シミュレーションによって提案手法の有効性を示し、さらに、実画像に適用し、従来手法[20][24]よりも小さい誤差で推定できることを示す。

第3章では、1枚の画像を対象とし2章で提案した局所灰色仮説を適用する際に、仮説を満たすような色選択を画像中ではなく、シーン中に存在し得る色を **color gamut** を利用して仮想的に追加する手法を提案する。3章の提案手法は、1枚の画像に含まれる均一色領域が特定の色相に偏っている場合に適用されるものである。**color gamut** とは、様々な照明光下において、様々な色をもつ物体からの反射光の色の取りうる範囲を表す。実画像に適用し、提案手法の有効性を示す。

第4章では、異なる照明光下の画像2枚に共通する同一の分光反射率をもつ物体の均一色領域が複数存在する場合に、灰色仮説が適用できる条件を定式化し、条件を満たす場合には高い推定精度で照明光色を推定できる手法を提案する。数値シミュレーションを用い

た実験を行い，上述の定式化によって灰色仮説成立と判定された場合には精度よく推定できることを示す．

第 5 章では，異なる照明光下の 2 枚の画像に共通する同一の分光反射率をもつ色領域が 1 種類のみ存在する場合に照明光色を推定する技術を提案する．4 章での提案手法において灰色仮説成立とならない場合にも適用できる．照明光が黒体放射の場合と実在する照明光（分光分布は黒体放射とは異なるが黒体放射軌跡の近傍にある色）に対して，数値シミュレーションおよび実画像を用いた実験を行い，実在する照明光を用いる場合には提案手法の方が従来手法に比較して推定誤差が小さくなることを示す．

第 6 章では，本論文をまとめ，残された課題について述べる．

第2章 画像1枚による色選択を用いる局所灰色仮説

1枚の画像から、灰色仮説をベースとしてシーン中に含まれる色のバランスが悪い場合についても高精度で照明光色を推定できる手法を提案する。本来、灰色仮説とは、シーン中に含まれる色の平均を灰色であるとする仮説であり、この仮説が成立する場合には、画像の平均の色を照明光色として推定することが可能であるが、実際に対象とする画像がこの仮説が成立するシーンを撮像したものであるとは限らない。したがって、灰色仮説が成立しない画像に対して上述したように平均の色を求めても照明光色とはならない。そこで、本章では、灰色仮説が成立しない場合、即ち、画像中に含まれる色の平均が灰色にならない場合に対しても、照明光の色が精度よく推定できる手法を提案する。実験より、画像中の色の平均が灰色でない場合に対しても、従来手法に比較して提案手法の方が精度よく照明光色を推定できることを示す。

2.1 はじめに

本章では、画像が灰色仮説を満たさない場合であっても、精度よく照明光色を推定する手法を提案する。提案手法では、画像全体の平均の色の代わりに、灰色仮説を満たす色の組み合わせを反対色の性質を利用して抽出する。反対色とは、色空間を構成する色の三属性の一つである色相環において180度の位置関係にある色を表し、これらの平均の色は灰色となるという特徴をもつ。したがって、画像中から反対色の関係にある色を選択することによって、局所的に灰色仮説を満たす色の組み合わせを取得することが可能となる。

提案手法では、画像全体から平均をとる代わりに灰色仮説を満たすような色を抽出することによって、得られた色の平均を照明光色として推定を行う。具体的には、(1)画素値を色空間上で類似の色相をもつカテゴリに分割、(2)反対色の関係にある色相カテゴリから色を選択、(3)選択された色の平均と黒体放射軌跡との合致度に基づいて灰色仮説成立可否を判定し、仮説成立の場合に選択色の平均を照明光色として推定する。(3)で仮説不成立と判定された場合は、再度(2)に戻って、選択色の平均と反対色の関係にある色相カテゴリから追加で色を選択する。

本章は、5節から構成される。2.2節において提案手法を説明し、2.3節で実験、2.4節で考察、最後に2.5節にまとめを行う。

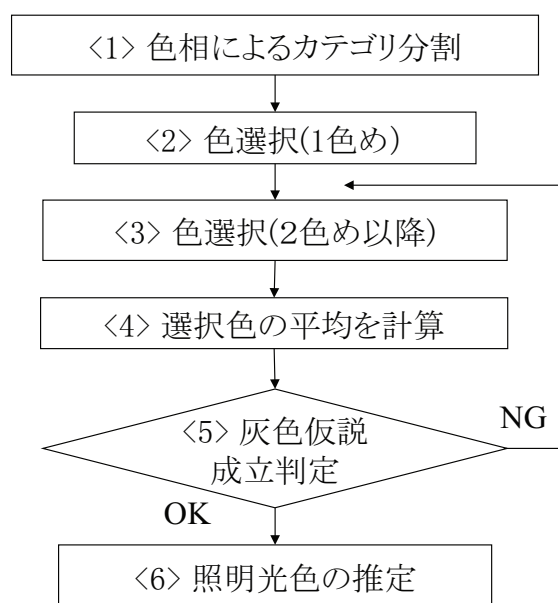


図 2.1 提案手法の処理の流れ

2.2 提案手法

2.2.1 提案手法の概要

本章では、シーン中（ここでは画像中）の全ての物体の色の平均を灰色であるとする灰色仮説の概念を拡張し、画像中の一部の色の平均を用いて照明光の色を推定する手法を提案する。具体的には、反対色の関係にある色の平均が灰色になるという性質を利用し、物体自体の平均が灰色になるような色を選択する手法[32]と、画像中から選択された複数の色から灰色仮説の成立可否を判定する手法[33]を組み合わせることにより、照明光の色を推定する。ここで物体の色とは白色照明光下において物体表面から反射される色（物体のもつオリジナルの色と考えられる）とし、画像における物体上の均一色領域における色（ある照明光下で物体から反射される光の色）とは区別する。

本提案手法による照明光推定の流れを図 2.1 に示す。

まず、画像中の全画素がもつ色を xy 色度座標上で類似の色相をもつカテゴリに分割する（<1>）。初期値として画像中からランダムに1色を選択し（<2>）、その色が属する色相カテゴリと反対色の関係にある色相カテゴリから2.3.2節で述べる方法により次の色を選択する（<3>）。処理<2>および処理<3>で選択された2色の平均を求め（<4>）、選択された色が灰色仮説を満たすか否かを判定する（<5>）。処理<5>において仮説を満たすと判定された場合には上記処理<4>で得られた色の平均を照明光の色であると推定する（<6>）。一方、仮説を満たさないと判定された場合には、再度、処理<3>に戻って次の色を選択する。2回目以降に処理<3>によって色を選択する際には、直前の処理<4>での平均値が含まれる色

相カテゴリと反対色の関係にある色相カテゴリから次の色を選択する。その後、処理<4>において処理<2>以降に選択された全ての色の平均値を求め、灰色仮説の成立可否を判定する（処理<5>）。このように、灰色仮説成立の判定条件を満たすまで、色選択と平均値の計算（<3>、<4>）を繰り返す。以下、提案手法の詳細を説明する。

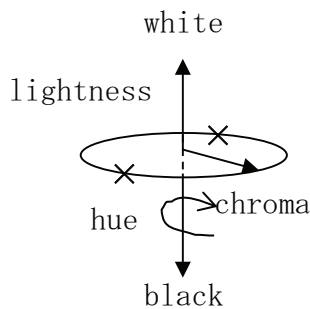
2.2.2 画像からの色選択

本節では、画像中の各画素値から変換された xy 色度に基づいて、画像中の色を類似の色相からなるカテゴリに分割する方法および分割結果に基づいて色を選択する方法を説明する（図 2.1 の<1>～<3>に対応）。画像からの色選択においては、反対色の関係にある色同士の平均が灰色になるという性質を利用するため、事前に類似の色相をもつカテゴリに分割する。

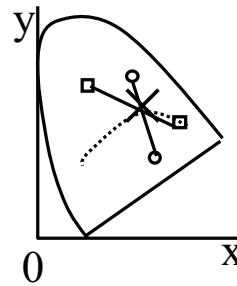
(1) 色相カテゴリへの分割

反対色とは同一の彩度からなる色相環上で中心を通る直線の反対側に位置する色同士である。図 2.2 に、色空間における反対色の関係を示す。

図 2.2 (a)は、明度 (lightness)、彩度 (chroma)、色相 (hue) の 3 属性から構成される円柱状の色空間を模式的に示したものであり、円盤上に示した×のように互いに 180° 離れた位置関係にある色同志を一方を他方の反対色と呼ぶ。この色空間に対し、明度軸を同一視し、彩度 (円柱の半径方向) と色相 (円柱の回転方向) の組み合わせからなる xy 色度図上にマッピングしたものが図 2.2 (b)である。図 2.2 (b)において、実線で示す馬蹄形の内部が可視光の範囲であり、破線で示す曲線が黒体放射軌跡、○および□はそれぞれ反対色の関係にある色のペアである。同図より、反対色の関係にある 2 色のペアは、xy 色度図上で灰色の物体領域からの反射光の色 (×) を中心として互いに黒体放射軌跡の反対側に位置する。このことは、円柱状の色空間において、ある明度の面において中心 (明度軸) を通って反対側にある色同士が反対色の関係にあることに対応する。即ち、反対色の関係にある色を画像中から選択することができれば、それらの色が灰色仮説を満たす可能性が高くなり、選択色の平均値を照明光の色として推定することができると考えられる。しかしながら、画像の色は照明光の情報を含んでおり、灰色の物体領域からの反射光の色や物体自体の色は不明であるため、直接的に反対色のペアを抽出することはできない。



(a) 色の三属性



(b) 色度座標における反対色の関係

図 2.2 色空間における反対色の関係

一方、 xy 色度図上において黒体放射軌跡に対して上側にある色 (y 座標が大きい値をもつ色) は照明光の色が変化しても同軌跡よりも上側の範囲で変化するという特徴があり、同軌跡の下側にある色 (y 座標が小さい値をもつ色) も同様の特徴をもつ。また、反対色の関係にある色同士は、図 2.2 (b) に示すように黒体放射軌跡の上側と下側でそれぞれ左右逆の方向に位置する。そこで、照明光の影響を含む画像の色から反対色の関係にある色を選択するため、 xy 色度図上において黒体放射軌跡を境界として、上側にある色と下側にある色に分割し、さらに、それぞれを右側 (x 座標が大きい値をもつ色) と左側 (x 座標が小さい値をもつ色) に分割する。上述の分割により、 xy 色度図上で黒体放射軌跡の左上と右下、右上と左下に位置する色がそれぞれ反対色の関係に対応する。画像上で同一物体における均一色領域の画素値は、色空間内で互いに近傍に位置するが、相互反射や入力系によるノイズ等の影響によって同一の値をもつとは限らない。画像上に占める同一物体における均一色領域の面積 (画素数) による影響を除外するため、 xy 色度図上で近い色をもつ色同士を最短距離法に基づく階層的クラスタリング手法を用いて統合する。クラスタへの統合の結果に基づいて、黒体放射軌跡を中心として左上、右上、左下、右下の 4 つの色相カテゴリに分割する。

具体的には、黒体放射軌跡の上側、下側それぞれに属する色に対し、生成されたクラスタ数に基づいて右側、左側への分割を行う。例えば、黒体放射軌跡の上側もしくは下側で生成されたクラスタ数が 2 種類の場合、各クラスタを色相カテゴリとする。クラスタ数が 1 種類の場合は複数の色相が隣接して存在していると判定し、同一クラスタ内に含まれる色の平均を境界として左右に分割することにより 2 種類の色相カテゴリとし、クラスタ数が 3 以上の場合には色度図上で最も左側 (クラスタ内に含まれる色の平均 x 座標が最も小さいもの) と最も右側 (クラスタ内に含まれる色の平均 x 座標が最も大きいもの) にあるクラスタ以外をクラスタ内に含まれる色の平均値の近さで左側か右側どちらかのクラスタに統合することによって、最終的に得られた 2 種類のクラスタを色相カテゴリとする。

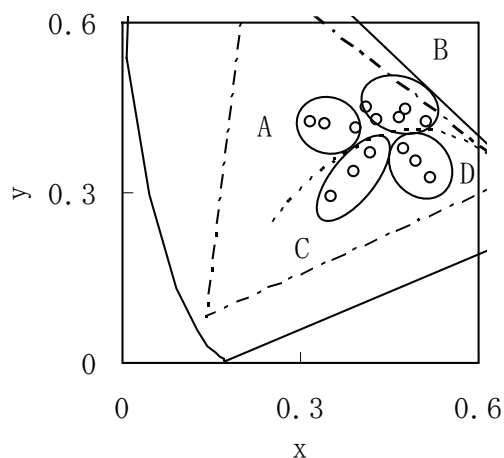


図 2.3 色相カテゴリへの分割例

このように似た色をクラスタリングによって統合し、黒体放射軌跡を中心に4種類の類似の色相をもつカテゴリに分割する。図 2.3 に画像の画素値から得られた xy 色度 (○) を、4種類 (A~D) の色相カテゴリに分割する例を示す。*

(2) 色相カテゴリに基づく色選択

図 2.4 を参照しながら、各色相カテゴリから色を選択する方法を説明する。最初の色 (図 2.1 の処理<2>) は xy 色度に変換された色の中からランダムに選択する。図 2.4 (a) に最初の色 (赤丸で示す) を色相カテゴリ A から選択した状態を示す。次の色 (図 2.4 の処理<3>) は最初に選択した色の色相カテゴリと反対色の関係にある色相カテゴリから選択する。図 2.4 (b) は、色相カテゴリ A と黒体放射軌跡をはさんで反対色の関係にある色相カテゴリ D から次の色 (赤丸) を選択した場合である。もし、最初に選択された色が色相カテゴリ C からである場合には次の色を色相カテゴリ B から選択する。2種類の色が選択された後、これらの平均の色を計算し (図 2.1 の処理<4>), 得られた平均の色に近い色相カテゴリと反対色の関係にある色相カテゴリから3色めの色を選択する。図 2.4 (c) に×で示す色が選択された2色の平均に対応し、×に近い色相カテゴリがCであることから、3色めの色を色相カテゴリ B から選択する (図 2.4 (d))。同様に4色めの色は、選択された3色の平均の色に最も近い色相カテゴリと反対色の関係にある色相カテゴリから選択す

*色度座標上における反対色は黒体放射軌跡をはさんで対角の位置関係にあり、これらの関係にある色を選択するには、黒体放射軌跡の上側と下側の色相カテゴリ数が同一であることが最低限必要となる。一方、画像の色は照明光の影響を受けており、画素値から被写体自体の色相を正確に求めるには、照明光の推定が必要となる。画素値のみの情報から色相に分割すると、分割数の増大に伴い実際とは異なる色相に分類される可能性が増し、反対色の関係にある色を適確に選択できなくなることが考えられる。そこで、分類する色相数を最低限 (黒体放射軌跡の上下に2つずつの計4分類) にすることによって上述の可能性を軽減する。なお、最適な色相分割数については今後の検討課題である。

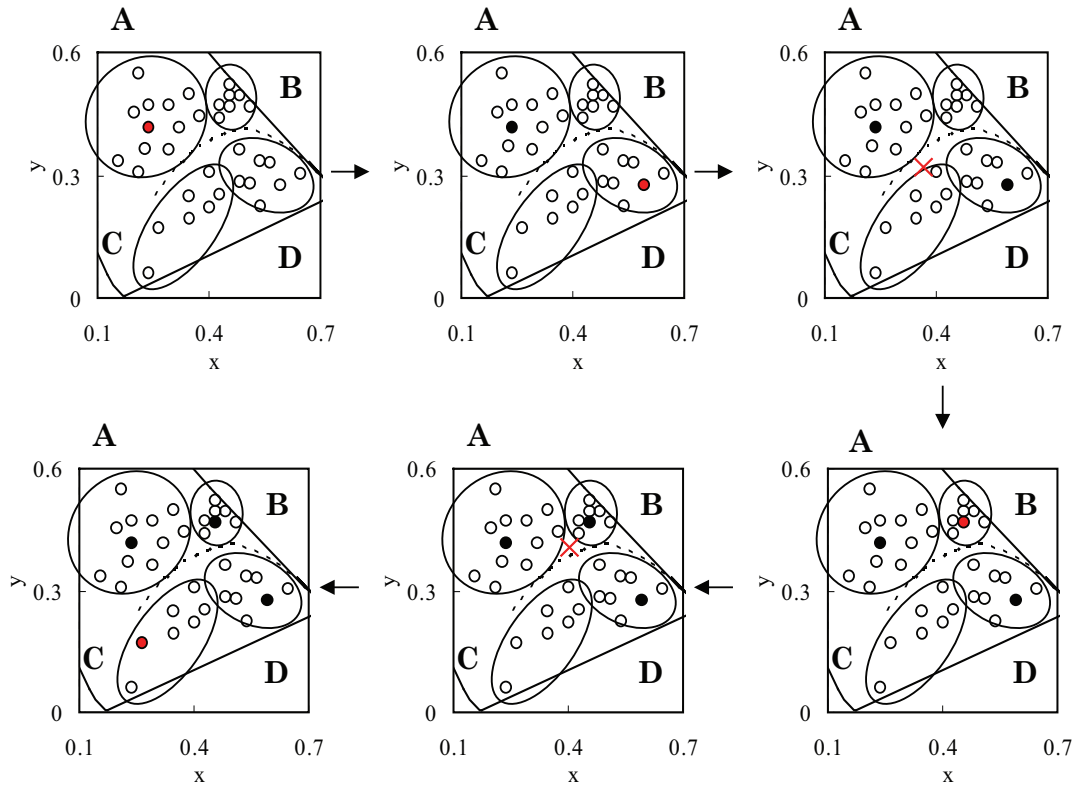


図 2.4 色相カテゴリに基づく色選択処理

る。図 2.4 (e)では、3色の平均の色 (×) が色相カテゴリ B に近いいため、次の色を色相カテゴリ C から選択する (図 2.4(f)の赤丸)。このように、平均の色を計算しながら、平均の色に近い色相カテゴリと反対色の関係になる色相カテゴリから色を選択する。

上述の色選択の過程において、平均値の計算後、灰色仮説成立判定 (図 2.1 処理<5>: 後述) を行い、仮説を満たすと判定された場合には平均値を照明光の色として推定し、満たさないと判定された場合には、再度、図 2.1 の処理<3>に戻って、直前の処理までに選択された色の平均値に最も近い色相カテゴリと反対色の関係にある色相カテゴリから次の色を選択する。

(3) 灰色仮説成立の判定

次に、選択された色が灰色仮説を満たすか否かの判定手法を説明する (図 2.1 の<4>~<6>に対応)。まず、選択された複数の色の平均を XYZ 三刺激値で計算し xy 色度に変換する。その後、選択された色が灰色仮説を満たすか否かを判定する。冒頭で説明したように、推定対象の照明光色は色度図上で黒体放射軌跡の近傍に位置する。よって、灰色仮説が成立するか否かの判定条件を選択色の平均が色度図上で黒体放射軌跡の近傍であることとす

る。この判定条件は、選択色の平均値 \bar{C}_k と黒体放射軌跡 BL との距離が閾値 th_1 未満である場合を示す。

$$dis1(BL, \bar{C}_k) < th_1 \quad (2.1)$$

但し、 $\bar{C}_k = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k C_i$ であり、選択色 C_i ($i=1, 2, \dots, k$ 但し、 k は選択色の数) の平均値を表す。なお、 $dis1()$ は黒体放射軌跡と選択色の平均値との距離であり、閾値 th_1 より小さい場合に条件を満たすと判定する。

しかしながら、本提案手法による色選択では、反対色の関係にある色相カテゴリからランダムに色を選択しているため、正確には反対色の関係を満たす色のペアを選択しているとは限らない。そのため、選択された色の平均値は、低彩度の物体領域からの色に一致する可能性もありえる。このことは、即ち、灰色仮説を満たさなくても上記条件を満足する場合があります。ここで、灰色仮説を満たす場合には、選択された色数が増加することによってその平均値のばらつきが小さくなるという性質に基づいて2つめの条件を追加する。

$$|\sigma_k - \sigma_{k-1}| < th_2$$

$$\text{但し、} \sigma_k = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (\bar{C}_i - \bar{C}'_k)^2}, \quad \bar{C}'_k = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \bar{C}_i \quad \text{とする。} \quad (2.2)$$

上式において、 σ_k は 2~ k 種類までの選択色の平均 \bar{C}_i の標準偏差であり、 σ_{k-1} との差が閾値 th_2 よりも小さい場合に条件を満たすと判定する。

よって、選択された色が式(2.1)および式(2.2)に示す2つの条件を満たす場合に、灰色仮説を満たすと判定し、その平均を照明光の色として推定する。なお、上記どちらか一方でも満たさない場合は、2.3.1 節に記載の方法に基づいて追加する色を選択し、再度、灰色仮説判定を行う。

(4) 推定方法の評価

照明光の推定手法の性能評価は、正解の照明光と推定照明光の色差によって行う。正解および推定照明光の色をそれぞれ C_{illum} 、 C_{esti} とし、色差 ΔE を次式によって求める。

$$\Delta E = dis2(C_{illum}, C_{esti}) \quad (2.3)$$

$dis2()$ は、色度図上における2色、 C_{illum} と C_{esti} のユークリッド距離とし、 ΔE が小さい程、正解値との誤差が小さい、即ち、推定精度が高いことを表す。本論文では、色差を人

間の知覚特性に対応した均等色空間である $u'v'$ 色度図におけるユークリッド距離を用いる。

2.3 実験

2.3.1 実験構成

本提案手法による照明光推定手法の有効性を示すため、灰色仮説を満たす場合、満たさない場合の両方について数値シミュレーション(実験 I)による照明光色推定実験を行い、従来手法と推定精度を比較する。また、本手法を実画像にも適用し(実験 II)、推定精度の評価を行う。実験 I では、物体および照明光の分光特性を設定し、物体領域から反射される光の色を数値計算で求め、従来手法および提案手法を適用し、推定精度を評価する。実験 II では、カメラで被写体を撮影した画像を対象とし、灰色仮説[20][21]と灰色エッジ仮説[24]を従来手法とし、提案手法を適用した場合との推定精度を評価する。なお、実験および結果の解析にあたっては、Pentium IV プロセッサ搭載の PC1 台を用いた。実験 II での被写体は Macbeth Chart (色票)、カメラは Nikon 製 D100 を用いた。

2.3.2 実験方法 (実験 I)

実験 I では、物体の分光反射率を \sin 関数で表現し、灰色仮説を満たす場合の条件(実験で使用した全ての分光反射率の平均が灰色であること)を作成する。照明光は、A 光源、 D_{65} 光源、Cool White 蛍光灯の 3 種類である。A 光源は白熱灯(色温度 2856 K)、 D_{65} 光源は標準的な昼光の色(色温度 6504 K)であり、Cool White 蛍光灯は一般的にオフィス等で用いられている昼白色の蛍光灯である。図 2.5 に実験で用いた 3 種類の照明光の分光特性を 560 nm での放射強度を 100 に正規化し示す。図 2.5 において、実線は A 光源、破線は D_{65} 光源、点線は Cool White 蛍光灯の分光特性である。

灰色仮説を満たす場合の分光反射率セットは、 \sin 関数の振幅と位相を変化させて作成する。振幅は 0.1 きざみで 0.1 から 0.5 までの 5 段階、位相を $\pi/4$ きざみで $0 \sim 7\pi/4$ までの 8 段階として作成し合計 40 種類とした。灰色仮説を満たさない場合の分光反射率セットは、分光反射率データベース(DB)[34]の自然素材および人工素材のデータから 30 種類を選択した。灰色仮説を満たす場合と満たさない場合の分光反射率の例を図 2.6 に示す。灰色仮説を満たす場合(図 2.6(a))は、振幅 0.5、位相 0(実線)、振幅 0.3、位相 1.5π (破線)、および振幅 0.1、位相 π (点線)に対応する \sin 関数であり、満たさない場合(図 2.6(b))は、分光反射率 DB の“flower&leaves”(実線)、“paint”(破線)および“oil paints”(点線)のグループから選択したものである。

次に実験手順を説明する。照明光、分光反射率の分光特性に基づいて所定の照明光下で物体体表面から反射される色(XYZ 三刺激値)を計算する。灰色仮説を満たす分光反射率セットを用いた場合(図 2.7)、仮説を満たさない場合(図 2.8)における物体表面からの反射光の色を色度図上に示す。それぞれ(a)、(b)、(c)が A 光源、Cool White 蛍光灯、 D_{65}

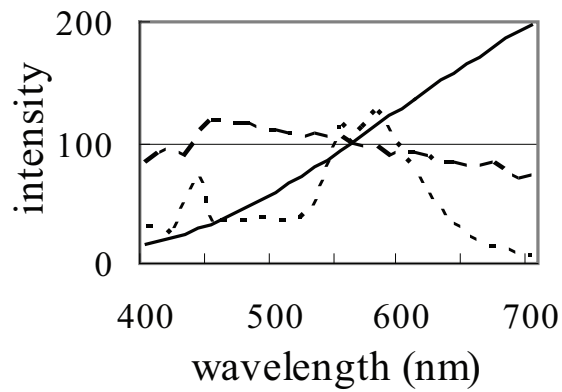
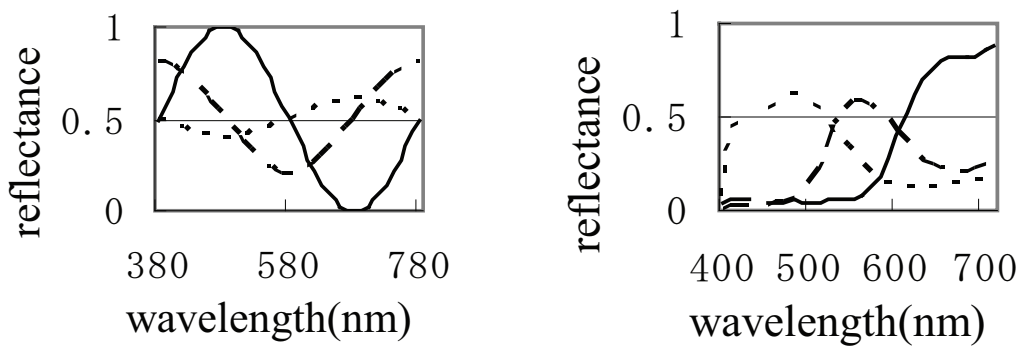


図 2.5 実験で用いた 3 種類の照明光の分光分布

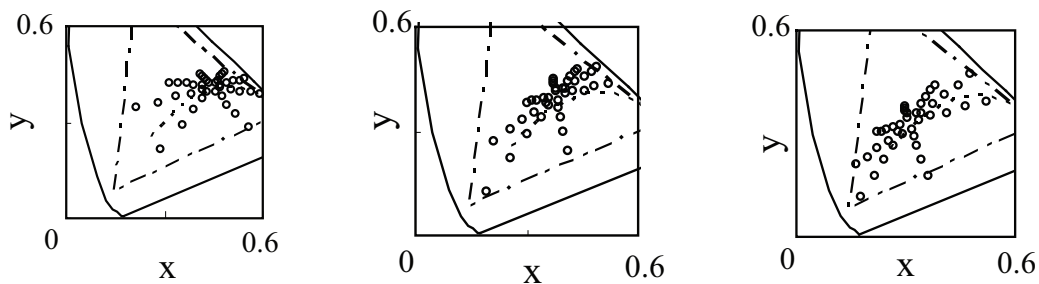


(a) 灰色仮説を満たす場合

(b) 灰色仮説を満たさない場合

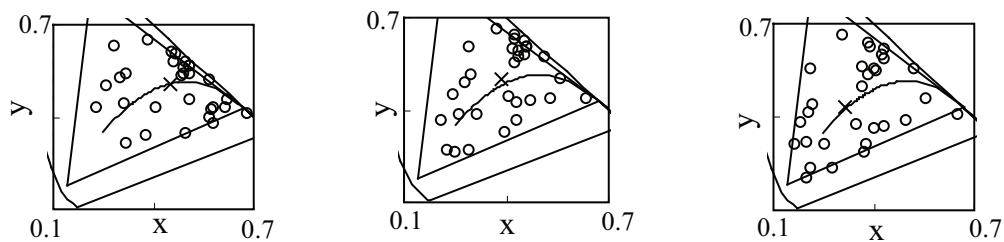
図 2.6 実験で用いた分光反射率のサンプル

光源, の場合である. 図中, 各○が個々の分光反射率をもつ物体からの反射光の色に対応する.



(a) A 光源 (b) Cool White 蛍光灯 (c) D_{65} 光源

図 2.7 各照明光下における物体からの反射光の色分布 (灰色仮説を満たす場合)



(a) A 光源 (b) Cool White 蛍光灯 (c) D_{65} 光源

図 2.8 各照明光下における物体からの反射光の色分布 (灰色仮説を満たさない場合)

図 2.7, 図 2.8 に示す反射光の色に対して, 色度図上で互いに近い色をクラスタ化して統合した後, 類似の色相をもつカテゴリに分割する. 分割された色相カテゴリに基づいて, 色を選択しながら灰色仮説成立判定を行う. 最終的に灰色仮説成立と判定された場合に, 選択した色の平均を照明光の色として推定する. なお, 実験では黒体放射軌跡との近さを表す閾値 $th_1=0.01$, 選択色の平均値のばらつきに関する閾値 $th_2=0.001$ とした. これらの値は, [35]の均等楕円の短径より小さい値 ($=0.01$) である.

表 2.1 照明光色推定結果（灰色仮説を満たす場合）

illuminant		Estimation by proposed method	Estimation based on G.W. assumption
A	(0.448, 0.408)	0.001 (0.449, 0.409)	0.003 (0.444, 0.408)
Cool White	(0.383, 0.400)	0.013 (0.384, 0.378)	0.006 (0.378, 0.407)
D ₆₅	(0.313, 0.329)	0.004 (0.314, 0.324)	0.000 (0.313, 0.329)

表 2.2 照明光色推定結果（灰色仮説を満たさない場合）

illuminant		Estimation by proposed method	Estimation based on G.W. assumption
A	(0.448, 0.408)	0.009 (0.432, 0.404)	0.019 (0.483, 0.422)
Cool White	(0.383, 0.400)	0.012 (0.389, 0.384)	0.020 (0.416, 0.440)
D ₆₅	(0.313, 0.329)	0.008 (0.307, 0.316)	0.034 (0.358, 0.382)

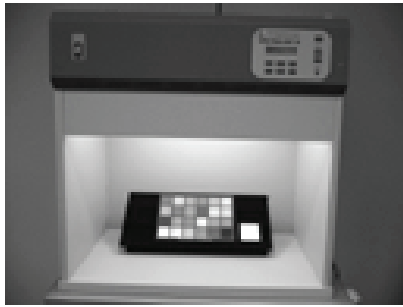
2.3.3 実験結果（実験 I）

灰色仮説を満たす分光反射率セット，満たさない分光反射率セットを用いた場合の照明光の推定結果をそれぞれ表 2.1 および表 2.2 に示す．表では，正解の照明光の色度，提案手法および従来手法（灰色仮説に基づく照明光推定法：以下，G.W.）による照明光の推定結果を，色度（括弧内の座標）と正解との色差（数値）で示す．照明光の色は xy 色度で求め，色差は人間の知覚に対応した均等色空間である $u'v'$ 色度図上のユークリッド距離で求めた．

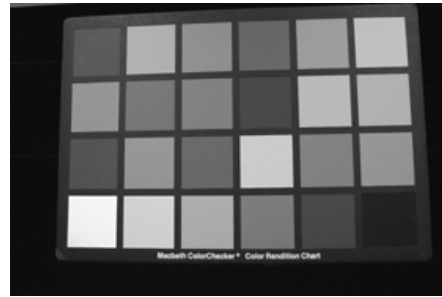
表 2.2 より，灰色仮説を満たす場合には，従来手法，提案手法共に，照明光の違いによらず正解の照明光に近い色に推定できていることがわかる．灰色仮説を満たさない分光反射率セットを用いた場合（表 2.2），提案手法による照明光色の推定結果は，照明光の違いによらず，従来手法よりも正解の照明光に近い．また，提案手法の場合，Cool White 蛍光灯を除いて推定誤差が 0.01 未満である．0.01 は上述したように MacAdam の均等楕円の短軸よりも小さいことから，A 光源と D₆₅ 光源の場合については，提案手法による推定照明光と実際の照明光の色とは同色として知覚される範囲内に含まれる．

2.3.4 実験方法（実験 II）

実験 II では，実際の画像を用いて照明光の色推定を行う．実験画像は，Macbeth Chart（色票）を被写体として Nikon 製 D100 のデジタルカメラで撮像した色票画像（図 2.9 (b)）と，Barnard らの色恒常性評価用の画像データベース（DB）[36]を用いる．色票画像は，図 2.9 (a)に示す光源装置（Macbeth SpectraLight III）内で実験 I と同様の A 光源，D₆₅



(a) 光源装置の外観図



(b) 色票 (Macbeth Chart) 画像

図 2.9 実験環境 (光源装置) および実験画像

光源, Cool White 蛍光灯下で撮像する.

色恒常性評価用画像 DB は, 2010 年 12 月 28 日現在, [36]に示すサイトからダウンロード可能なものを用いる. 上記サイトにある 4 種類の画像セットの中から鏡面反射成分が最小であるものを対象とし, 11 照明光下の 21 被写体の画像 (合計で 212 枚) をダウンロードする. また, 上記画像はサイトに記載があるように, ダイナミックレンジ調整等のプリプロセスによって, 一部の高輝度な画素値の影響で被写体部分の画素値が相対的に低くなっている. そのため, 16 ビット版の画像における各 RGB 成分に対し同じ倍率をかけて被写体領域の画素値レベルをあげ, 8 ビットに変換したものを用いる.

照明光色の推定において, カラー画像の画素値 RGB を XYZ 三刺激値に変換するため, カメラの入出力特性を推定して変換処理を行う. カメラの入出力特性は, 所定の照明光下での色票の XYZ 三刺激値と該当する各色票領域の RGB 画素値に対して, 2 次の項を用いた重回帰分析[37]によって求める. 色恒常性評価用画像 DB の場合, 上記入出力特性は, [36]に, SonyDXC-930 を用いたキャリブレーションデータとして, 11 種類の照明光下における Macbeth Chart の各色票 (N2 色票を除く 23 色分) からの反射光を分光放射計 PR-650 によって測定した分光測色値と画像の対応する色票領域の RGB 画素値が掲載されているので, 分光測色値を XYZ 三刺激値に変換し同様に入出力特性を求める. なお, 照明光推定の実験手順は, 実験 I と同様である.

カメラの入出力特性の取得手順を簡単に説明する. D100 を用いる場合, Macbeth Chart に含まれる各色 (合計 24 色) に対して, 照明光下での反射光の測色値を X_k, Y_k, Z_k ($k=1, 2, \dots, 24$), 色票画像の対応する色領域の平均画素値を R_k, G_k, B_k ($k=1, 2, \dots, 24$) とし, 非線形補正を行う.

$$\begin{aligned}
R'_k &= R_k^{\gamma R} \\
G'_k &= G_k^{\gamma G} \\
B'_k &= B_k^{\gamma B}
\end{aligned}
\tag{2.4}$$

ここで、 R'_k 、 G'_k 、 B'_k は、 k 番目の色領域の平均画素値に対応する非線形補正後の値である。また、 γR 、 γG および γB は R, G, B 成分毎の非線形補正係数であり、Macbeth Chart の無彩色色票 6 色の輝度値とカメラ入力後の画素値の関係から、 $\gamma R = 2.5$ 、 $\gamma G = 1.8$ 、 $\gamma B = 1.2$ を求めた。非線形補正後、以下の式を満たす 3×10 の変換行列 $A_{i,j}$ を求める。色恒常性評価用画像 DB の場合、カメラのガンマ補正を OFF に設定して撮像しているため、上述の非線形補正は不要である。

以下の式を満たす変換行列 $A_{i,j}$ を事前に求めておき、画像の各画素値に変換行列 $A_{i,j}$ を適用することによって XYZ 三刺激値が得られる。なお、変換行列 $A_{i,j}$ を求める際には、Macbeth Chart に含まれる 24 色全ての測色値と色票画像の対応する色領域の平均画素値を用いた ($n=24$)。

$$\begin{pmatrix} X_1 & X_2 & \cdots & X_n \\ Y_1 & Y_2 & \cdots & Y_n \\ Z_1 & Z_2 & \cdots & Z_n \end{pmatrix} = (A_{i,j}) \cdot \begin{pmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ R_1 & \cdots & R_n \\ G_1 & \cdots & G_n \\ B_1 & \cdots & B_n \\ R_1^2 & \cdots & R_n^2 \\ G_1^2 & \cdots & G_n^2 \\ B_1^2 & \cdots & B_n^2 \\ R_1 \cdot G_1 & \cdots & R_n \cdot G_n \\ G_1 \cdot B_1 & \cdots & G_n \cdot B_n \\ B_1 \cdot R_1 & \cdots & B_n \cdot R_n \end{pmatrix}
\tag{2.5}$$

2.3.5 実験結果 (実験 II)

色票画像を対象とした場合の推定結果を表 2.3 に示す。表 2.3 では、提案手法、G.W.、Gray-Edge に基づく照明光推定手法 (以下、G.E. と表記する) の 2 種類の従来手法^{*}を、3 種類の照明光下における色票画像に適用した際の、推定照明光の xy 色度と推定精度が示

^{*} G.W. および G.E. では、[24]に記載のようにミンコフスキーノルムに基づいた一般式が紹介されているが、提案手法と次元を統一して比較するため 1 次元に統一した。また、G.E. は一次微分でエッジを求める。

表 2.3 色票画像を用いた場合の照明光色推定結果

illuminant		Estimation by proposed method	Estimation based on G.W. assumption	Estimation based on G.E. hypothesis
A	(0.448, 0.408)	0.000 (0.447, 0.408)	0.037 (0.506, 0.494)	0.025 (0.408, 0.402)
C.W.	(0.383, 0.400)	0.012 (0.376, 0.376)	0.057 (0.492, 0.508)	0.020 (0.370, 0.361)
D ₆₅	(0.313, 0.329)	0.004 (0.312, 0.323)	0.103 (0.481, 0.519)	0.005 (0.313, 0.322)

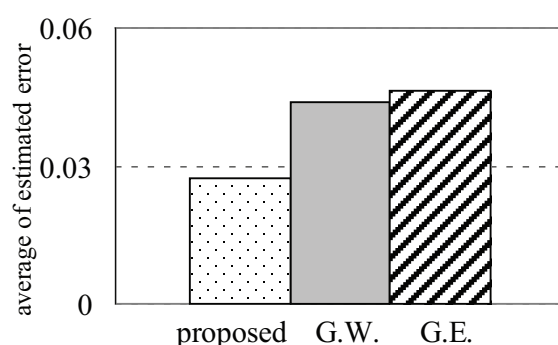


図 2.10 色恒常性評価用画像 DB への適用結果（推定誤差の比較）

されている。表 2.3 より、実験 I と同様に従来手法に比較して提案手法の方が正解値に近いことがわかる。また、Cool White 蛍光灯 (C.W. と略記) を除いて提案手法の推定誤差は 0.01 未満であり、実際の照明光と知覚的に区別できない範囲で推定されていることがわかる。

次に、色恒常性評価用の画像 DB を利用した場合の推定結果を示す。図 2.10 に、サイトからダウンロードした全ての画像（21 種類の被写体、11 種類の照明光の組み合わせによる 212 枚）に提案手法、G.W. と G.E. の 2 種類の従来手法を適用した結果を示す。図では、3 種類の手法に対する推定誤差（正解値と推定照明光の $u'v'$ 色度におけるユークリッド距離）の平均値が示されている。推定誤差に対して一元配置の分散分析を行った結果、1% の棄却域に対しても $p=5.47 \times 10^{-10}$ であり、有意差があることが確認できた。提案手法では、反対色同士の平均の色が灰色になるという性質を利用しているため、シーン中に存在する色が黒体放射軌跡の上側や右側等に偏っている場合には、色相カテゴリを 4 種類生成できない場合が生じる。提案手法を上記画像 DB に適用すると同様の事象が生じる場合があり、その際には反対色のペアとなる色が選択できないと判定し推定を行わない。図 2.10 では、上記事象が生じた画像（38 枚）は除外している。なお、上記提案手法に関する適用範囲については、次節にて考察する。

表 2.4 選択した色の平均色度と灰色に対する色差

gray	proposed method			conventional method
	illuminant A	illuminant C.W.	illuminant D ₆₅	
(0.333, 0.334)	0.013 (0.351, 0.352)	0.019 (0.352, 0.320)	0.008 (0.330, 0.322)	0.033 (0.381, 0.384)

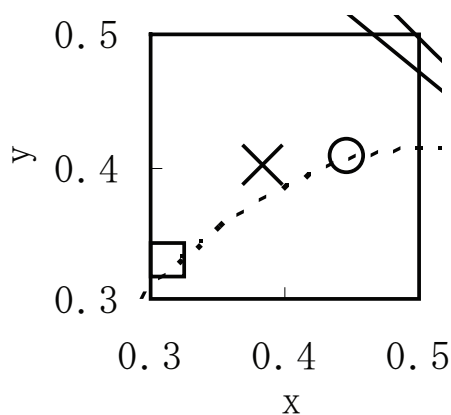


図 2.11 実験で使用した照明光と黒体放射軌跡との位置関係

2.4 考察

まず、提案手法と従来手法における照明光の推定精度を比較する。表 2.2 および表 2.3 より、従来手法による推定照明光と正解値との誤差は提案手法より 1 桁程度大きい値になっている。これは、従来手法においては、シーン中の物体の色が灰色仮説を満たすか否かに関わらず物体領域からの反射光の平均を照明光と推定することが原因であると考えられる。実験で用いたデータは、図 2.8 より全体的に橙（図中右上）に色分布が密になっている箇所があり、この色の偏りが推定結果に影響を及ぼしたと考えられる。表 2.4 より、従来手法での照明光推定結果が、照明光の種類によらず正解値よりも x, y 座標値が共に大きい（色度図上では正解値の右上にある）ことから色分布による影響を受けていることが考えられる。提案手法では、色相カテゴリへの分割の際に、互いに類似する色をクラスタ化することによって色分布の偏りによる影響を受けずに照明光色が推定できたと考えられる。

また、提案手法による推定結果（表 2.2, 表 2.3）において Cool White 蛍光灯を用いた場合、A 光源、D₆₅ 光源を用いた場合に比較して、推定精度が多少落ちる傾向が見られる。本提案手法では、照明光の色を色度図上において黒体放射軌跡の近傍にあるとして推定しているため、図 2.11 に示すように、Cool White 蛍光灯の色（×）が、A 光源（○）や D₆₅

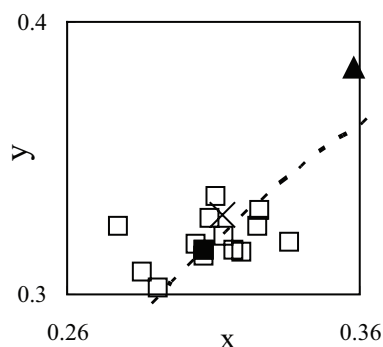


図 2.12 選択色と推定照明光との関係

光源 (□) と比較して黒体放射軌跡 (破線) と離れていることが上記推定精度の要因と考えられる。

次に、提案手法によって選択された色が灰色仮説を満たす色であるか否かを検証する。実験 I で用いた灰色仮説を満足しない場合の分光反射率セット全てを平均した色 (従来手法) と、提案手法での選択色に対応する分光反射率を平均した色を表 2.4 に示す。表 2.4 において、gray は灰色の分光反射率に対応する色であり、下段の括弧内の数値が各手法での色度座標と gray との色差 ($u'v'$ 色度図上のユークリッド距離) である。表 2.4 より、提案手法による選択色に対応する分光反射率の色と gray との色差が従来手法に比較して小さいことがわかる。このことは提案手法によって、灰色仮説を満たす色が選択できていることを示している。

さらに、本提案手法における灰色仮説成立の判定に用いた条件の妥当性を検証する。図 2.12 および図 2.13 は、灰色仮説を満たさない場合の分光反射率セットで D_{65} 光源下における反射光の色データを用いた場合の、選択色の増加と照明光色の推定値 (平均値) および灰色仮説判定条件との関係を示す。図 2.12 は図 2.1 における<2>~<4>の処理で得られた選択色の平均値の分布を色度図上に示したものであり、選択色の平均値を□、正解の照明光を×、提案手法による照明光の推定値を■、従来手法による照明光の推定値を▲で表す。なお、図中、□ (選択色の平均値) のほとんどがほぼ× (正解の照明光) の近傍に分布していることがわかる。図 2.13 は、選択色の数 (横軸) に対する黒体放射軌跡と選択色の平均値との距離 (実線: 左側の軸) と選択色の平均値の分散の差 (マーカ付き実線: 右側の軸)、および、選択色の平均値と実際の照明光の色との色差 (破線) である。この図において、前 2 者がそれぞれ式(2.1) (条件 1)、式(2.2) (条件 2) に示す灰色仮説成立可否を判定する条件に対応する。図より、条件 1 もしくは条件 2 のどちらか一方が 2.4.2 節で

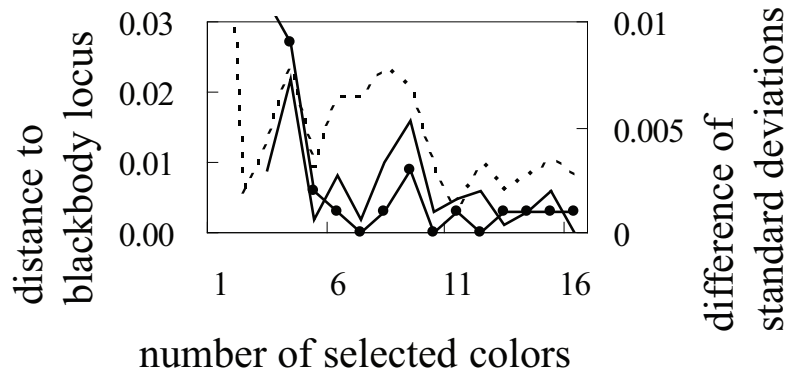
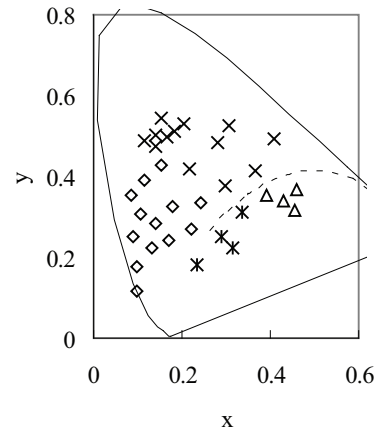
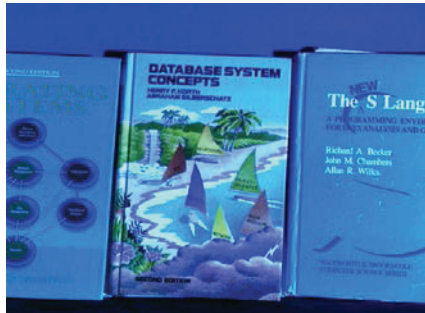


図 2.13 選択色の増加による平均値の変化

説明した閾値より大きい場合に、選択色の平均値と正解照明光との差が大きくなる傾向が見られる。よって、これら 2 つの条件が精度の高い照明光色を推定する際に有効に働いていると考えられる。

最後に、本提案手法において前提とした、反対色のペアをもつ色を選択することに関する妥当性を検証する。図 2.14 に、4 種類の色相カテゴリへの分割ができた例を示す。図 2.14 (a) は、色恒常性評価用画像 DB における Solux 4700K+Roscolux 3202 の照明光下の books-2 の画像であり、この画像の画素値をクラスタリングし、4 種類の色相カテゴリに分類した結果を図 2.14(b) に示す。同図中、○、×、* および △ はそれぞれ異なる色相カテゴリを表す。元々、books-2 における被写体は青みがかっており、青みの強い照明光下の画像は、更に、青みの強い画素値が偏った画像になっている。しかしながら、図 2.14 に示すように、4 種類の色相カテゴリに分類することができることが示されている。この理由として、books-2 では、面積は少ないものの赤や黄色、緑が含まれており、色の種類という観点でみると、反対色のペアを作ることができたと考えられる。実際、図 2.14 に示すように、推定誤差は提案手法が最も小さく、G.W. による推定結果は被写体の色みである青色の影響を受け、正解の照明光よりも青みの強い色として照明光の色が推定されている。通常は、シーン中に特定の色みが多い場合であっても、色の種類として色相カテゴリを 4 種類もつケースは多く存在すると考えられる。今回、実験に使用した色恒常性評価用画像 DB にある画像全体の 82% において色相カテゴリが生成されている。このことから、シーン中に反対色の関係が成立するような色が存在するという前提は、実際のシーンとして有り得ることであると考えられる。



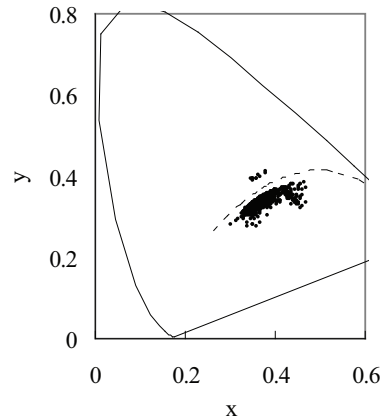
(a) Solux 4700K+Roscolux 3202 の照明光
下の “books-2” の画像

(b) 色相カテゴリへの分割例

図 2.14 色相カテゴリへの分割例 (4 種類に分割できた場合)

一方で、シーン中に含まれる色種類が少なすぎるために色相カテゴリが生成されず、照明光の色が推定できなかったケースもある。図 2.15 は、Solux 4100K 下の clothes-3 の画像の画素値をそのまま色度座標上に射影したものである。clothes-3 の画像は淡いピンクと青みの布地から構成されている。同図より、この画像の場合、黒体放射軌跡の上側には局所的にしか色分布が存在していない。そのため、4 種類の色相カテゴリが生成されず照明光の色が推定されなかった（プログラムとしては途中終了する）と考えられる。

このように、提案手法の場合には、黒体放射軌跡をはさんで反対色の関係をもつ色相カテゴリが生成されることを前提としている。そのため、上述の clothes-3 の画像のようにシーン中に含まれる色の種類が極端に少ない場合は提案手法の適用範囲外となる。提案手法の適用可否を自動的に判定する手法に関しては今後の検討課題である。



(a) Solux 4100K 下の clothes-3 の画像 (b) 色相カテゴリが 4 種作成されない場合
の色分布例

図 2.15 色偏りの大きい色分布の例

2.5 まとめ

本章では、1 枚の画像から照明光の色を推定する手法として、灰色仮説に基づく新たな手法を提案した。提案手法では、反対色同士の色が平均が灰色になる性質を利用し、画像中から反対色の関係にあるような色を選択し、得られた色が灰色仮説を満たすか否かを判定する。具体的には、(1) 画素値を色度空間上で類似の色相をもつカテゴリに分割、(2) 反対色の関係にある色相カテゴリから色を選択、(3) 選択色の平均と黒体放射軌跡との合致度に基づいて灰色仮説成立を判定し、仮説成立の場合に平均の色を照明光の色として推定する。数値シミュレーションおよび色票や色恒常性評価用画像 DB を用いた実験により、シーン中の物体の色の平均が灰色でない場合、即ち、灰色仮説を満たさないシーンに対しても、提案手法における色の選択と灰色仮説の判定によって従来手法よりも精度良く照明光の色を推定できることを示した。今後は、提案手法の適用可否の判定手法と共に、色相カテゴリから色を選択する際の初期値（最初に選択する色）による推定精度への影響、色相カテゴリへの分割数に関する検討、また、適用不可と判定された色数が少ないシーンへの対応についても検討し、様々な画像に適用することによって本提案手法の有効性を評価する予定である。

第3章 仮想的色追加による局所灰色仮説

2章では画像が灰色仮説を満たさない場合、即ち、画像中に含まれる全ての物体の平均の色が灰色とはならない場合に、画像中から灰色仮説を満たす色の組み合わせを抽出することによって、得られた色の平均を照明光色として推定する手法を提案した。しかしながら、画像中に含まれる色が特定の色相に偏っている場合には上述の手法が適用できないという課題があった。そこで、本章では、上記の課題を解決するため、照明光毎に得られた物体の色からの反射光の取り得る範囲である色ガマットを利用し、この色ガマットの範囲内で色を仮想的に追加することによって照明光色を推定する手法を提案する。実画像を用いた実験を行い、従来手法に比較して精度よく照明光色を推定できることを示す。

3.1 はじめに

本章では、画像中に灰色仮説を満たす色の組み合わせが存在しない場合、即ち、画像中に含まれる色が特定の色相に偏在している場合に、色ガマットを利用することによって色の不足を補って照明光色を推定する手法を提案する。色ガマットとは、様々な照明光下において、様々な色をもつ物体からの反射光の色を取りうる範囲を表す。画像が取得された際に、本来、そのシーン中に存在し得る色の範囲（色ガマット）内で色を追加することによって色偏在による色の不足を補う。以下、3.2節に提案手法、3.3節に実験、3.4節に考察、3.5節にまとめを述べる。

3.2 提案手法

3.2.1 2章で提案した手法の課題

まず、2章で提案した手法の概要および課題を説明する。2章では、シーン中に含まれる全ての物体の色を平均すると灰色になるとする灰色仮説をベースとし、画像中から反対色の性質を利用して画像中から灰色仮説が成立する色の組み合わせを抽出することによって灰色仮説が成立しない画像に対しても精度よく照明光色を推定する手法を提案した。この手法は図3.に示すように以下の処理から構成される。

- (1) 類似の色のクラスタリング
- (2) 色相によるカテゴリ分割

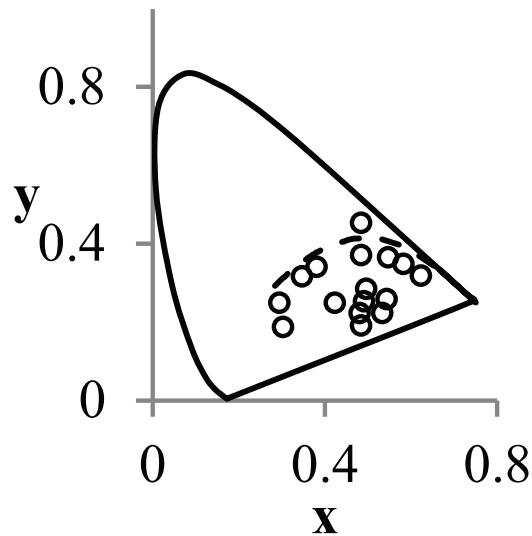


図 3.1 色偏在の例

- (3) 反対色の性質を利用した色選択
- (4) 選択した色の平均
- (5) 選択した色に対する灰色仮説成立可否判断
- (6) 照明光色の推定

上記処理の中で、(5) において仮説成立と判定されるまで (3), (4) を繰り返す。

しかしながら、画像中に存在する色数が少ない場合や、色度図上で黒体放射軌跡の一方のみに色が偏在している (図 3.1) と反対色の関係を満たす色を選択できず照明光色推定ができなくなるという課題があった。

3.2.2 提案手法

本章では、入力画像に色ガマット (以下, color gamut) 内で仮想的に色を追加し反対色の関係にある色の選択を可能とすることで上記課題を解決する手法を提案する. color gamut を用いる際には照明光色の特定が必要であるため, 低彩度の色領域からの反射光が照明光の色を反映していることを利用し, 複数の照明光色候補を抽出する. 色追加後の色分布に[38]を適用すると照明光色候補の数に応じて推定結果 (仮の照明光色とする) が得られるが, 色追加時の color gamut に対応する照明光色と入力画像の照明光色 (未知) との整合性, 即ち, 仮の照明光色と gamut の照明光色との色差が小さくなるという考えに基づいて最終的な照明光色を推定する.

本章で提案する照明光色推定の基本的方針を図 3.2 に示す. 画像の色分布から低彩度 gamut を用いて照明光色の候補を複数種類, 抽出する. 図 3.2 では, N種類の候補が抽出

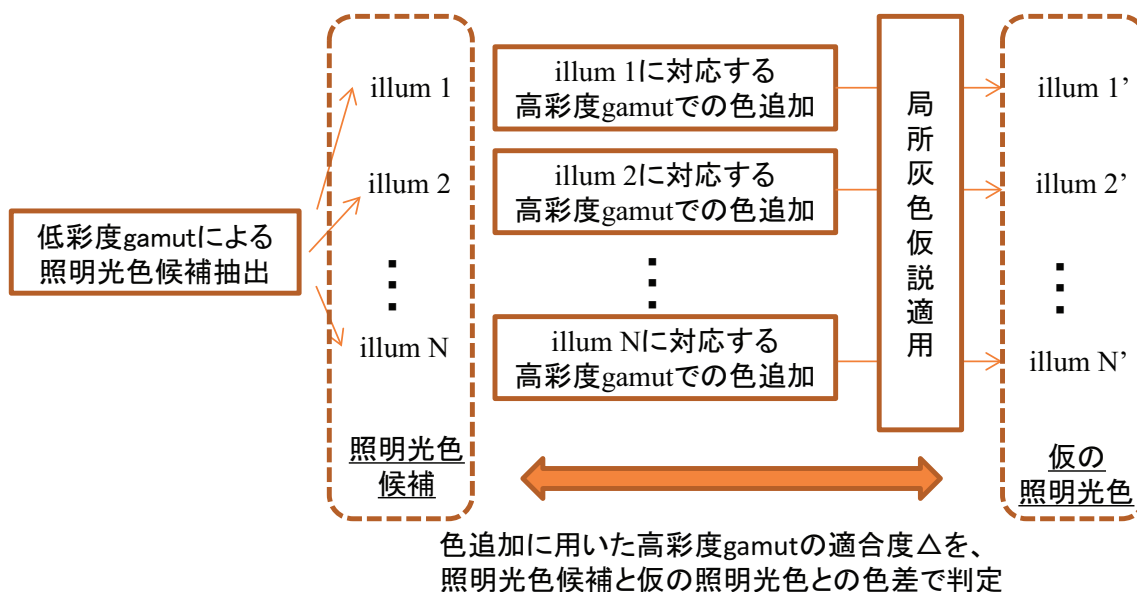


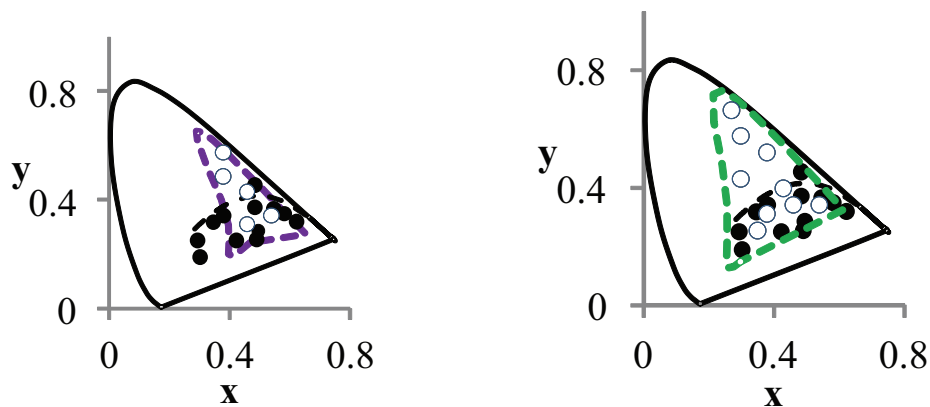
図 3.2 照明光色推定の基本的方針

された場合を示す (illum i , ただし, $i=1, 2, \dots, N$). 各照明光色の候補に対応する高彩度 gamut を用いて入力画像の色分布に色追加を行い, 局所灰色仮説を適用する. その結果, 照明光色候補の数, 即ち, N 個分の照明色 (以下, 仮の照明光色) (illum i' , ただし, $i=1, 2, \dots, N$) が得られる. もし, 照明光色候補が照明光色の真値に近い場合には, 入力画像の色分布と高彩度 gamut による色の範囲が合致し, 局所灰色仮説を適用した結果, 即ち, 仮の照明光色も真値に近くなると考えられる. そこで, 入力画像と色追加に用いた高彩度 gamut との適合度を, 各照明光色候補とその照明光色候補を用いて得られた仮の照明光色との色差 ($\Delta = \text{illum } i - \text{illum } i'$) に基づいて判定することにより, 最も小さい色差になる仮の照明光色を最終的な照明光色として推定する.

図 3.3 に, 入力画像の色 (黒丸で示す) に対して, 低色温度の照明光に対応する高彩度 gamut 内で色追加 (白丸で示す) を行った場合 (a), および, 高色温度の照明光の高彩度 gamut を用いた場合 (b) に得られる色分布を模式図で示す. (a) の場合, 破線で示す高彩度 gamut の外側にも入力画像の色 (黒丸) が分布することから, 高彩度 gamut で用いた照明光色は入力画像撮影時のものとは異なり, 適合度 Δ は低いと考えられる. 一方, (b) の場合には, 高彩度 gamut の内部に入力画像の色が分布しており, 高彩度 gamut で用いた照明光色が入力画像撮影時のものに近い可能性があり, 適合度 Δ は高くなると考えられる.

次に, 提案手法における処理の流れ (図 3.4) を参照しながら詳細を説明する. 図中, 太い枠線で囲った部分が提案手法で新規に追加した処理である.

以下, 太枠で囲った部分について順を追って説明する.



(a) 色温度の低い照明光色に対応する高彩度 gamut 内で色追加を行う場合
 (b) 色温度の高い照明光色に対応する高彩度 gamut 内で色追加を行う場合

図 3.3 高彩度 gamut による色追加を行った場合の色分布例

(1) 照明光色候補の抽出

color gamut を利用するため、照明光色を特定する方法を説明する (図 3.4<a>)。低彩度の色をもつ物体領域からの反射光は照明光の色に類似、即ち、黒体放射軌跡の近傍に位置するがその逆は一般的には成り立たない。しかしながら、黒体放射軌跡の近傍にある色の中には、低彩度の色をもつ物体領域からの反射光が含まれる可能性がある。そこで、クラスタリング後の色分布が、各照明光下の低彩度色領域からの反射光の取り得る範囲 (以下、低彩度 gamut と呼ぶ) 内にある場合に、その色が低彩度色領域からの反射光、即ち、照明光色候補の可能性があると考える。上述したように、低彩度以外の色領域からの色も含まれるため、低彩度 gamut 内にある色数の多いものから上位 N 個と照明光色候補として抽出する。 N の数による推定精度への影響に関しては 3.4.3 節で考察する。

次に、低彩度 gamut の作成方法を説明する。低彩度 gamut は、彩度の低い色をもつ物体の分光反射率と照明光の分光分布から計算される。彩度の低い色とは、可視光の波長域 (ここでは、400~700 nm とする) で反射率が大きく変化しない分光特性をもち、全波長域で反射率が同一 (即ち一直線) の場合が無彩色に対応する。そこで、分光反射率 $\rho(\lambda)$ を式に示す形式で表現し、 a の値を彩度の高低を表すパラメータとする。 a が 1 に近いほど彩度が低くなり、色度座標上で黒体放射軌跡の近傍に分布する。

式 (3.1) より、分光反射率は $\lambda_k=400+10(k-1)$ の場合に反射率が 1、それ以外は a となる分布と、短波長側 (450 nm) と長波長側 (650 nm) のみ反射率が 1 で残りが a となる分布の合計 32 種類から構成される。

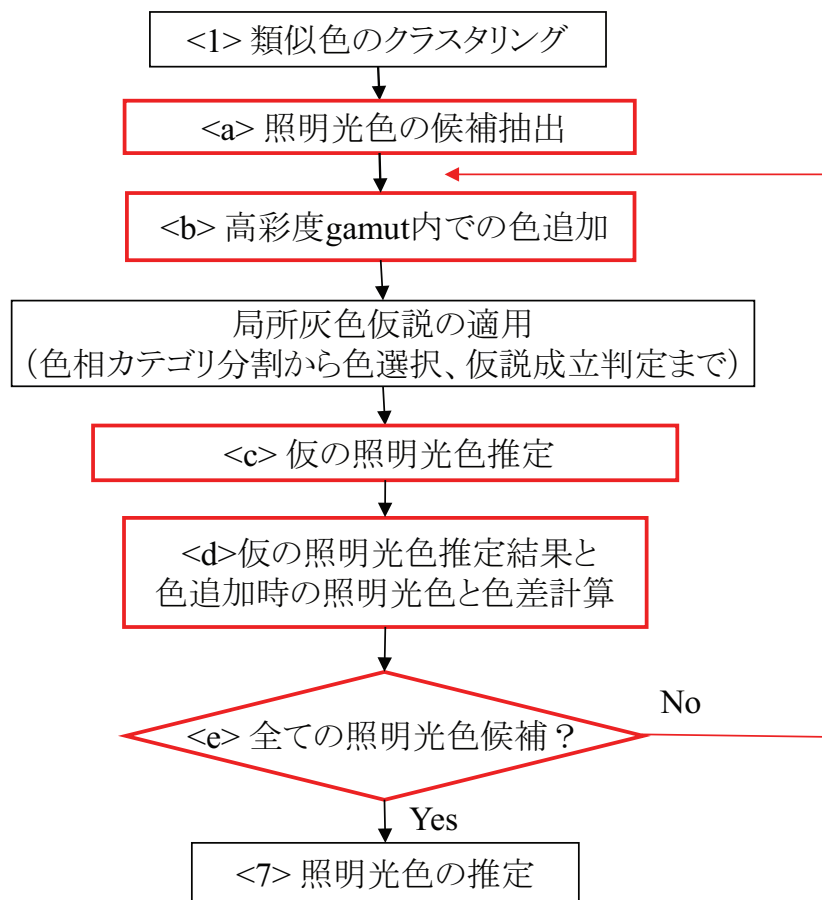


図 3.4 提案手法の処理の流れ

$$\rho(\lambda) = \begin{cases} 1 & (\lambda = \lambda_k, k = 1, 2, \dots, 31) \\ a & (otherwise) \end{cases} \quad (3.1)$$

式 (3.1)での a の値は、代表的な顕色系の一つであるマンセル表色系に基づいて決定する。マンセル表色系では、色相、彩度、明度という三属性の組み合わせで色を表現し同一属性内では知覚的に等間隔で色が配置されている。そこで、C光源下でのマンセル色票の測色値[39]から、中明度 (V=5) の色相面で測色値が存在する最小の彩度値 (C=2) に対応するように実験的に求め a=0.3 とした。

一方、照明光は、色温度 T と波長 λ の関数であるプランクの放射式で表現される黒体放射 (式(1.1)) とし、色温度 T を 47.5~682 mired (1466~21053 K) の範囲で 23.5 mired おきにとり、合計 28 種類とする。上記分光反射率と照明光の分光分布の積和を xy 色度に変換したものが低彩度 gamut となる。図 3.5 に個々の低彩度 gamut のサンプルを示す。

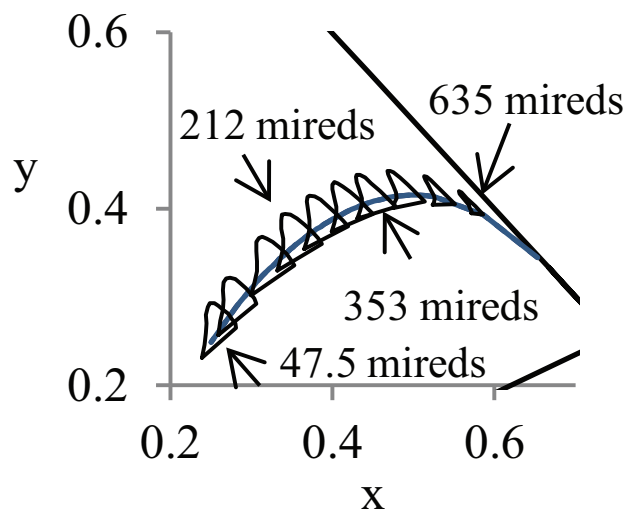


図 3.5 様々な照明光下での低彩度 gamut の例

(2)色データの追加

次に、クラスタリング後の色分布に色を追加する方法を説明する (図 3.4)). 色追加は、入力画像の色分布が偏在している場合であっても反対色の関係にある色を選択できるようにするために行う。シーン中の物体の色がとりうる範囲内での色追加を行うため、高彩度の色がとりうる色の範囲 (以下、高彩度 gamut と呼ぶ) を用いる。高彩度の色は色度座標上で外側に分布し、高彩度 gamut 内には、ほとんどの色が含まれると考えられる。そこで、クラスタリング後の色分布に対し、“(1)照明光色候補の抽出”で得られた N 個の照明光色候補に対応する高彩度 gamut 内で色をランダムに発生させ仮想的に色追加を行う。

以下、高彩度 gamut の作成方法を説明する。高彩度の色をもつ分光反射率とは、可視光の範囲内で反射率の高低差が大きい、即ち、特定の波長のみ反射率が 1 でそれ以外の波長の反射率は 0 となるものであり、式 (3.1) で $a=0$ の時に対応する。しかしながら、この場合、特定の波長しか反射率をもたないため、照明光が変わっても反射光は不変である。そこで、低彩度 gamut と同様、分光反射率の形式を式 (3.1) とし、マンセル表色系の特性に基づいて $a (>0)$ の値を設定する。マンセル表色系では色相毎に彩度の最大値が異なるため、[39]での測色値の中で、中明度 ($V=5$) の色相面で 2.5 歩度きざみの色相全てに共通して取り得る最大の彩度値 ($C=12$) に対応するように実験的に求め、 $a=0.01$ とした。高彩度 gamut の一例を図 3.6 に示す。

図 3.1 の色分布に高彩度 gamut 内で色追加した例を図 3.7 に示す。図中、黒丸が入力画像の色 (図 3.1 と同じ) であり、白丸が破線で示す高彩度 gamut 内で追加した色である。色追加を行うことによって色度座標上に、より高い密度で色が分布することが分かる。

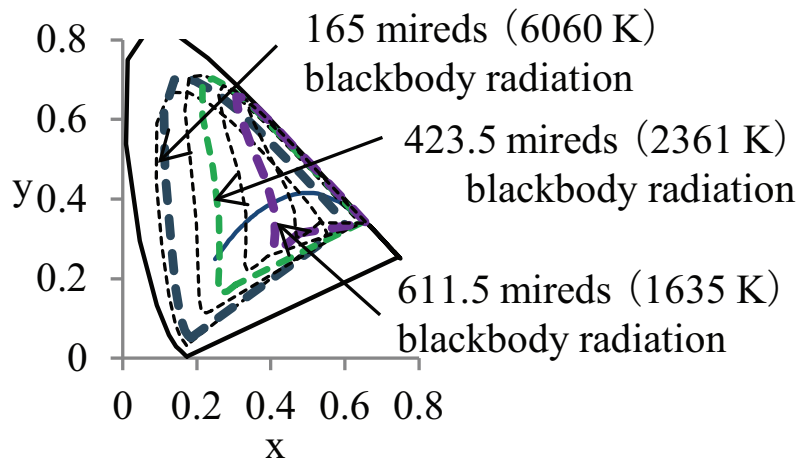


図 3.6 高彩度 gamut の例

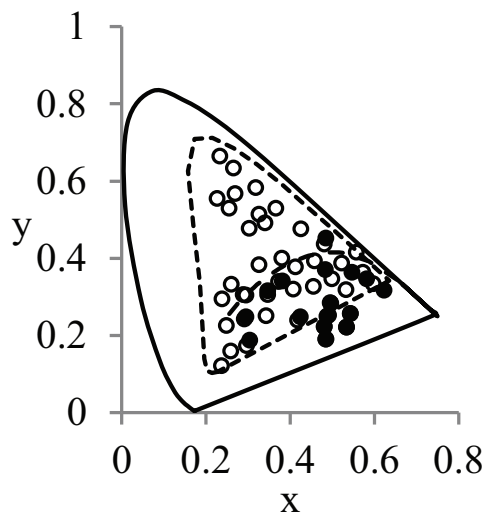


図 3.7 色度座標上への色追加例

なお、高彩度 gamut の外にある黒丸は、入力画像の色分布の中に高彩度 gamut で想定した彩度よりも高い色があることを示す。

色追加後の色分布に対し、[38]での照明光色推定手法を適用する（図 3.4 の<2>～<6>までの処理）。

(3)照明光色の推定

本節では、上述の処理（図 3.4 の<6>）で得られた、N種類の仮の照明光色から最終的な照明光色を推定する方法を説明する。最終的な照明光色は、色追加に用いる高彩度 gamut に対応する照明光色と、入力画像自体の照明光色（未知）との適合度 Δ に着目する。即ち、色追加時の照明光色候補が真の照明光に近ければ推定照明光色も真値に近くなり、逆に、照明光色候補が真値と異なれば追加する色分布は本来の画像の色分布と適合していないため推定精度が悪くなると考えられる。そこで、照明光色候補と色追加後の推定結果（仮の照明光色）との適合度として色差を用いる。色差は適合度が高いほど小さくなることから、照明光色候補と仮の照明光色との色差の最小値を抽出し（図 3.4 の<d>）、最終的な照明光色 I を推定する（式(3.2)）。

$$I = \arg \min(\Delta E_i) = \left\{ \bar{C}_i \mid \Delta E_i = \text{dis}(I_i, \bar{C}_i) \right\} \quad (3.2)$$

(4)推定精度の評価

推定精度は、均等色空間における $u'v'$ 色度の真値と推定値とのユークリッド距離（色差）とし、距離が短い程、推定誤差が小さい、即ち、推定精度が高いことを表す。

3.3 実験

3.3.1 実験方法

提案手法の有効性を確認するため、実画像を用いて照明光色推定を行い、推定精度を従来手法と比較する。比較対象の従来手法は、灰色仮説に基づく手法（[21]、以下、G.W. と表記）、color gamut を利用する手法（[11]、以下、Gamut と表記）および2章で提案した手法（[38]、以下、Prev と表記）とする。本論文では、提案手法の有効性を示す指標として、従来手法 G.W. および Gamut による推定誤差のうち、小さい方を目標値とする。

Gamut の実装では照明光毎の color gamut を x-rite 社の Digital ColorChecker SG（計 140 色）[40]を用いる。また、color gamut 作成時の照明光数が推定精度に影響する可能性を考慮し、本論文で提案の条件である 28 種類の照明光の他、表 3.2 に示す計 7 パターンについても評価を行う。

実験画像は、色恒常性評価用画像 DB [36]の中で、鏡面反射成分の少ない画像セット内の画像全て 223 枚を用いた。この DB 内の画像は、布地やプラスチック製の物体を被写体とする 22 種類のシーンを 11 種類の照明光下で撮像した画像であるが、一部のシーンについて全ての照明光下の画像が揃っていないものが存在する（合計 19 枚の画像）。画像は、ガンマ補正（ $\gamma=1$ ）されたカメラで撮影され、照明光の分光分布も公開されている。実験に用いた画像の一例を図 3.8 に示す。また、11 種類の照明光色を色度座標上にプロットした結果を図 3.9 に示す。

図 3.9 より、実験で用いる照明光色は黒体放射軌跡の近傍に位置していることが分かる。



(a) "blocks1"



(b) "clothes2"

図 3.8 実験画像の一例

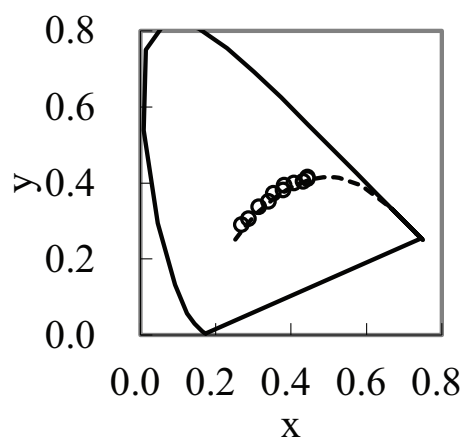


図 3.9 実験で用いた照明光色の分布

なお、照明光色候補の数は、クラスタリング後の色分布を多く含む低彩度 gamut の上位 5 位まで (N=5) とする。また、照明光色の真値 (色度) は、上記サイト [36] で公開されている照明光の分光分布から計算で求めた。

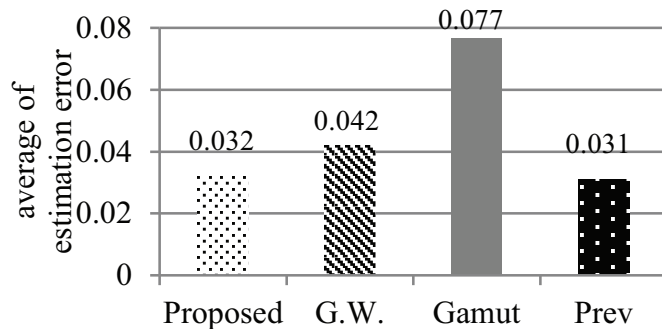


図 3.10 推定精度の比較

3.3.2 実験結果

画像セット内の全ての画像 223 枚に対して、提案手法および従来手法による平均の推定誤差を図 3.10 示す。図より、Proposed（本論文での提案手法）での平均の推定誤差は、G.W. と Gamut の従来手法よりも小さく Prev と同程度である。なお、Gamut では、照明光の色温度の間隔を 7 段階に変化させて実験し、最も推定誤差の小さかった場合（照明光数 = 42）の結果^{*}を示す。また、Prev では、照明光色が推定できた場合、即ち、類似色相カテゴリが 4 種類生成できた場合のみの推定誤差の平均である。Proposed と G.W. による平均の推定誤差について 1 対の標本による平均値の検定 (t 検定) を行った結果、P 値 (両側) = 1.49×10^{-5} となり、棄却域 5% で有意差があると判定された。なお、Proposed と Prev に関しては有意な差は見られなかった。

また、相関色温度が 119, 160, 190, 210, および 280 mired に対応する照明光下の各画像の照明光色の推定誤差を表 3.1 に示す。上記相関色温度は、日常的に用いられている照明 (5000~6500 K) を含む範囲であり、表中、-となっている箇所はデータセット中に対応する画像がないことを表す。表 3.1 より、色温度の高低に関わらず、ほとんどの画像において G.W. での推定誤差 0.042 よりも小さい誤差で照明光色を推定できていることがわかる。

Prev では、clothes2 や clothes3 の画像は、被写体自体に色の偏りが大きいため類似色

^{*}照明光の色温度の間隔を 7 段階に変化させて Gamut を適用した結果、数値上は照明光数が 42 の場合が最も小さい推定誤差を示したが、平均の推定誤差に関して t 検定を行った結果、照明光数が 56 の場合以外は全て 5% の棄却域で有意差無しであった。この結果より、Gamut において照明光数による推定精度への影響は少ないと考えられる。Gamut では、G.W. と同様、入力画像に様々な色が含まれていることを前提としており、今回対象とした画像セットには、色の偏りのある画像も含まれていたため、トータルとして推定精度が悪くなったと考えられる。なお、複数の色が含まれる "macbeth" (マクベスチャート) の画像では平均の推定誤差は 0.038、色偏りの大きい "clothes2" の画像では 0.084 と 2 倍以上の推定誤差となり、画像の色分布の偏りが影響していると思われる。

表 3.1 照明光色の推定誤差

	Correlated color temperature of illuminant (mired)				
	119	160	190	210	280
apples	—	—	—	—	0.028
apples2	—	—	0.025	0.025	0.032
ball	0.023	0.006	0.017	0.009	0.041
blocks1	0.042	0.060	0.025	0.054	0.022
books2	0.023	0.031	0.015	0.051	0.050
clothes2	0.011	0.007	0.013	0.020	0.018
clothes3	0.024	0.013	0.015	0.026	0.021
clothes4	0.006	0.007	0.005	0.037	0.031
hdr_mondrian	0.011	0.007	0.004	0.040	0.033
jersey	—	0.009	0.015	—	0.040
macbeth	0.008	0.007	0.008	0.015	0.040
monkey1	0.024	0.044	0.031	0.059	0.020
munsell1	0.014	0.038	0.009	0.025	0.041
munsell2	0.012	0.031	0.025	0.014	0.038
munsell3	0.006	0.017	0.024	0.037	0.050
munsell4	0.009	0.034	0.026	0.018	0.033
munsell5	0.006	0.010	0.014	0.040	0.015
paper1	0.012	0.009	0.009	0.038	0.015
paper2	0.054	0.019	0.045	0.009	0.025
rope	0.013	—	0.024	0.042	—
Sml_mondrian1	0.010	0.014	0.039	0.041	0.003
Sml_mondrian2	0.045	0.046	0.003	0.038	0.058

相カテゴリが4種類生成できず照明光色を推定できなかったが、本提案手法ではこれら画像を含むすべての画像について照明光色が推定された。なお、目標値以上の推定誤差となった画像（表中、太字で示す）については、その要因を考察で述べる。

3.4 考察

3.4.1 推定精度悪化の原因分析

表 3.1 において、G.W. よりも推定誤差の大きかった画像を分析した結果、推定精度悪化の原因は2種類に分類された。1つめは、照明光色候補の抽出において真値に近い照明光色が抽出されなかった場合であり、相関色温度 210 mired 下の blocks1 および 160 mired

下の sml_mondrian2 が該当する。これらの画像の場合、上位 10 位までを候補とすると推定誤差は 0.025, 0.026 になった。2つめの要因は、色追加によって画像の色分布のバランスが崩れたことが考えられる。対象の画像（太字の数値で表す画像のうち、上記 2 画像以外）には元々様々な色が含まれており、Prev を適用した方が推定誤差が小さかった。低彩度 gamut による照明光色候補抽出数および色追加の妥当性に関しては後の節で考察する。

3.4.2 高彩度 gamut による色追加の効果

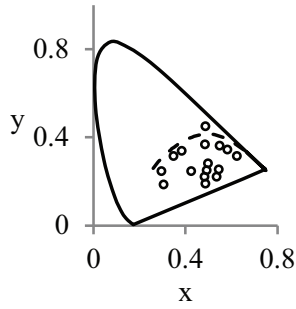
次に、色追加による色相カテゴリの生成可否を確認する。ここでは、画像の色分布の偏りが大きいため Prev では照明光色推定ができなかった画像のうち、“相関色温度 330 mired の光源下の clothes2”、“相関色温度 90 mired 光源下の blocks1”、“相関色温度 160 mired 光源下の clothes3”および“相関色温度 250 mired の光源下における paper1”の 4 画像を例に色追加前・後の色分布および色追加後の色相カテゴリへの分割結果を図 3.11 に示す。図中、(a)～(d)が入力画像の類似色クラスタリング後の色分布（色追加前）、(e)～(h)が色追加後の色分布、破線で示す曲線が黒体放射軌跡、点線で囲んだ楕円が色相カテゴリである。色追加前は、色度座標上で黒体放射軌跡の上部（図 3.11 (b)）や下部（図 3.11 (a)）、色度空間の左側（図 3.11 (c)）や右側（図 3.11 (d)）に色が偏在していたため反対色の関係にある色相カテゴリが生成できず、灰色仮説を満たす色を選択できなかったが、色追加後（図 3.11 (e)～(h)）は色度座標上に密度高く色が分布しており、色相カテゴリを 4 種類生成できている。色追加によって、反対色の関係にある色を選択できるようになったことがわかる。

3.4.3 低彩度 gamut による照明光候補抽出の効果

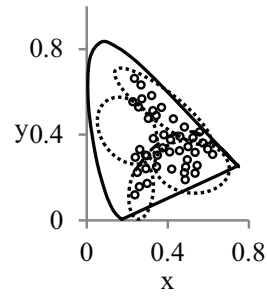
低彩度 gamut は、高彩度 gamut での色追加を行う際の照明光色候補を抽出するために用いられる。本論文では、クラスタリング後の色を多く含む低彩度 gamut から上位 5 位までを抽出し、対応する照明光を候補としており、この候補抽出の妥当性を検証する。

図 3.12 に、低彩度 gamut による照明光色候補の取得順位に対して、候補中に真値に近い照明光が含まれる画像の割合（今回用いた画像セット数に含まれる総数 223 枚に対する比率）を示す。ここで真値に近い照明光とは、低彩度・高彩度 gamut を作成した際に用いた 28 種類の黒体放射の色の中から、画像セットでの 11 種類の照明光の色に $u'v'$ 色度で最も色差の小さいものとする。なお、真値に近い照明光として選ばれた黒体放射の色と真値との $u'v'$ 色差は最大で 0.009 程度である。図より、画像セット全体に対して、上位 5 位までなら約 75%、上位 10 位までなら約 92%の画像において低彩度 gamut による照明光色候補の中に真値に近い照明光が含まれていることがわかる。即ち、低彩度 gamut による照明光色候補の絞りこみが有効に働いていることが分かる。

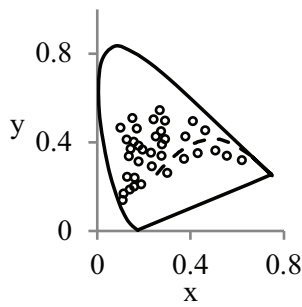
次に、低彩度 gamut で抽出する照明光の候補数について検討する。図 3.13 に、低彩度 gamut で照明光候補を取得する際の取得数（上位 N 位まで）に対する、平均の推定誤差と



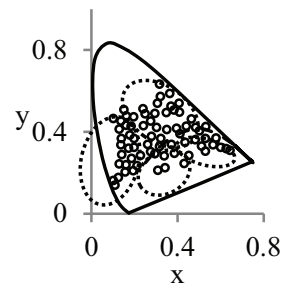
(a) clothes2 のオリジナル色分布



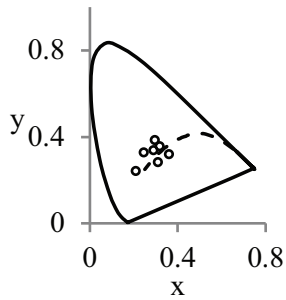
(e) 色追加後の clothes2 の色分布



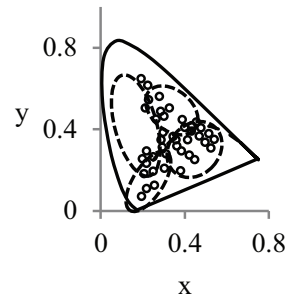
(b) blocks1 のオリジナル色分布



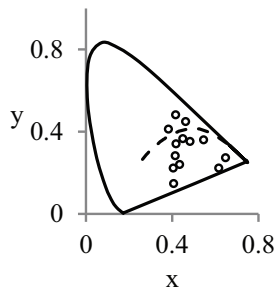
(f) 色追加後の blocks1 の色分布



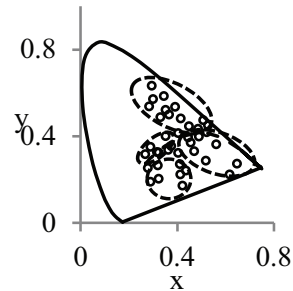
(c) clothes3 のオリジナル色分布



(g) 色追加後の clothes3 の色分布



(d) paper1 のオリジナル色分布



(h) 色追加後の paper1 の色分布

図 3.11 色追加による色分布の変化

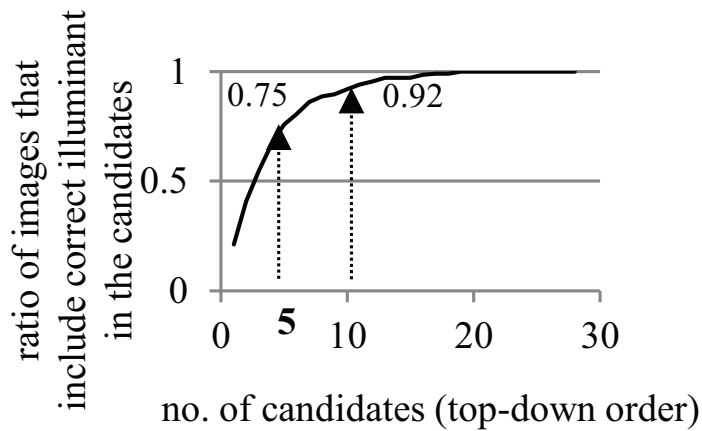


図 3.12 低彩度 gamut による照明光候補の数に対して真値が含まれる画像の割合

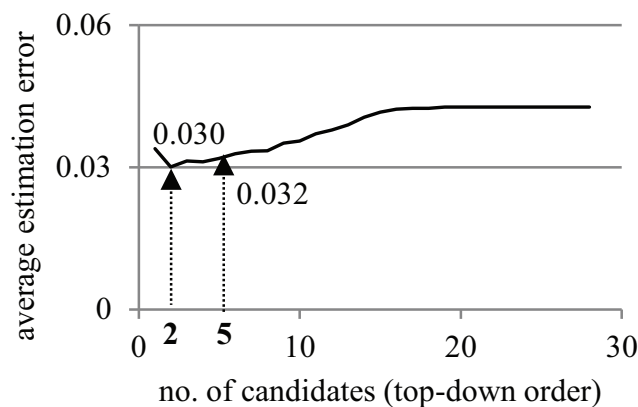


図 3.13 低彩度 gamut による照明光候補の数と平均推定誤差との関係

の関係を示す。同図より、実験で用いた画像セットにおいては、上位 2 位までとった場合が最も平均推定誤差が小さく、それ以降は全体的に候補数の増加に伴い平均の推定誤差は増加傾向にあることがわかる。

そこで、平均推定誤差の最小値をとる上位 2 位までの結果と本論文の実験で用いた上位 5 位までの結果に対し、一対の標本による平均の検定 (t-検定) を行った結果、P 値 (両側) = 0.064 となり 5% の棄却域で有意差無しという判定になった。即ち、上位 5 位まで照明光候補をとった場合であっても、最小の推定誤差をとる上位 2 位までの場合と統計的に有意な差がないということである。また、上位 6 位まで (平均推定誤差 0.033) と上位 2 位までの結果に対して同様に検定を行うと、P 値 (両側) = 0.008 となり、5% 棄却域で有意差有りという結果になった。

表 3.2 照明光の範囲および色温度間隔

Number of gamuts	Range (mired)	Intervals (mired)
14	47.5 ~ 658.5	47.0
28	47.5 ~ 682	23.5
42	47.5 ~ 683	15.5
56	47.5 ~ 680	11.5
70	47.5 ~ 668.5	9.5
84	47.5 ~ 670	7.5
96	47.5 ~ 678	6.5

このことから、本論文で用いた画像セットについては、 $2 \leq N \leq 5$ が妥当であったと言える。しかしながら、3.4.1 節で分析したように、個々の画像では推定精度の目標値よりも悪い場合もあるため、N の設定法に関しては今後の検討が必要であると思われる。

3.4.4 照明光の色温度間隔による推定精度への影響

本論文では、低彩度・高彩度 gamut を生成する際、47.5~682 mired の間で色温度を 23.5 mired おきにとった黒体放射の分光分布 28 種類を照明光として用いている。そこで、黒体放射の色温度間隔と推定精度への影響を検討する。黒体放射の色温度間隔は、表 3.2 に示すように本章で示した条件と色温度の範囲はほぼ変更せずに色温度間隔のみを 7 段階に変化させた。

3.3 節と同様の画像セットを用いて照明光色推定した結果を図 3.14 に示す。図では、gamut 数（gamut 作成時の黒体放射の色温度の種類数）に対する照明光色推定誤差の平均を表しており、右側ほど黒体放射の色温度間隔が狭いことを示す。gamut 数が 28 以上の推定誤差はほぼ横ばいであるが、14 の場合は他と比較して推定誤差が大きい傾向にある。gamut 数が 28 の場合とそれ以外について平均の推定誤差に関して t 検定を行った結果、gamut 数が 14 と 84 の場合についてのみ 5% の棄却域で有意差有りとなり、それ以外の場合には全て 1% の棄却域で有意差無しという結果であった。このことから、gamut 数が少ない、即ち、黒体放射の色温度間隔が広い場合には推定精度が悪化する傾向があり、一方、gamut 数が 28 以上、即ち、色温度が 23.5 mired 間隔より狭い場合には、推定精度はほとんど変わらないか、もしくは、若干向上する傾向があることが分かった。

また、gamut 数の増加による計算負荷を考察する。gamut 数の増加が計算量に影響する処理は、照明光毎の低彩度・高彩度 gamut の作成時および低彩度 gamut による照明光色候補抽出時である。前者は事前に作成する処理であり、一旦作成すれば毎回の処理は不要である。一方後者は、各低彩度 gamut に含まれるクラスタリング後の色数を取得する処理であり、色数が N の場合、比較回数が 28N から 98N に増加するが計算負荷の増大は小さい。なお、照明光色推定の過程では、低彩度 gamut により抽出された照明光色候補についてののみ

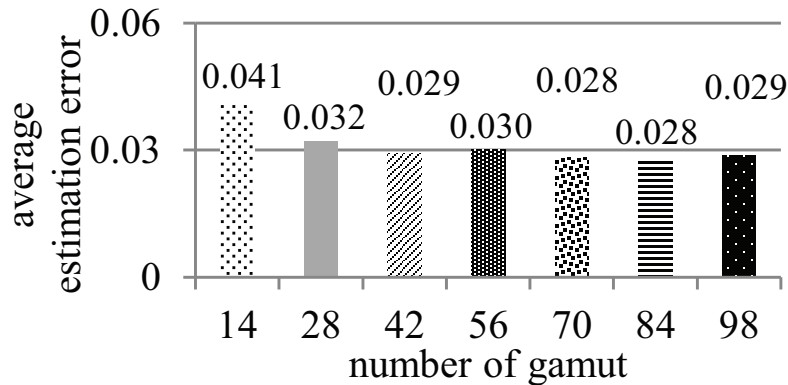


図 3.14 gamut 数に対する照明光色推定結果への影響

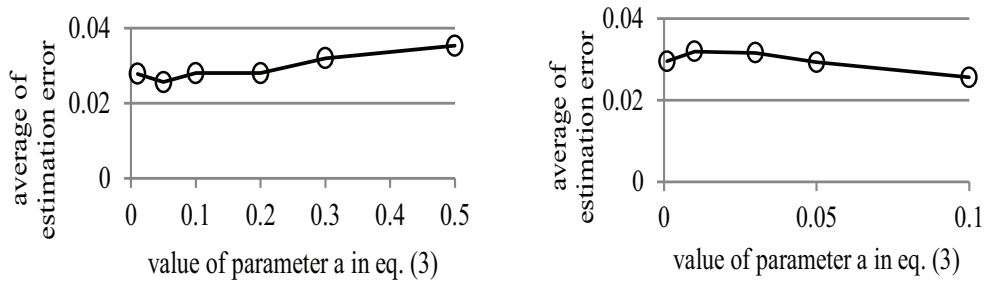
推定を行っているため、gamut 数増加による計算量は変化しない。よって、照明光数は 28 以上、即ち、色温度間隔が 23.5 mired より狭い場合は推定精度への影響が小さく、さらに、gamut 数の増減による計算負荷への影響も少ないと言える。

3.4.5 低・高彩度 gamut のサイズによる影響

本節では、低彩度および高彩度 gamut の領域、即ち、式 (3.1) における a の値に対する推定精度への影響を考察する。本章では、マンセル表色系での彩度の値を基準に低彩度 gamut を $a=0.3$ 、高彩度 gamut を $a=0.01$ と設定しているが、これらの値を変化させた場合の推定精度の変化を検討する。

図 3.15 では、(a)に高彩度 gamut を固定し低彩度 gamut のパラメータ a の値を 0.01~0.5 まで変化させた場合、および、(b)に低彩度 gamut を固定して高彩度 gamut のパラメータ a の値を 0.001~0.1 まで変化させた場合の平均推定誤差である。前者の低彩度 gamut のパラメータを変化させた場合には、 $a=0.05$ の時がもっとも推定誤差が小さく ($a=0.3$ の場合とは 5%の棄却域で有意差あり)、 a が大きくなるにつれ推定誤差が上昇する傾向にある。

一方、後者の場合、本章での提案手法で用いた値 ($a=0.01$) が最も推定誤差が大きくなったが、一対の標本による平均の検定を行った結果、 $a=0.1$ の場合を除いて全て 5%の棄却域で有意差無しであったが、パラメータ a の値をさらに小さくするとより推定誤差を小さくできる可能性があると考えられる。なお、これらの結果は、提案手法で用いた値に対して低彩度 gamut もしくは高彩度 gamut のどちらか一方のパラメータ a を固定した場合の結果であり、最適な組み合わせは今後の検討が必要である。



(a) 低彩度 gamut のパラメータ a の変化 に対する平均推定誤差 (高彩度 gamut 固定)
 (b) 高彩度 gamut のパラメータ a の変化 に対する平均推定誤差 (低彩度 gamut 固定)

図 3.15 gamut サイズによる推定精度への影響

3.4.6 色追加必要性の判定

最後に、色相カテゴリ数による判定の必要性に関して検討する。本論文では、類似色のクラスタリング後の色分布に対して高彩度 gamut 内で色追加を行う手法を提案しているが、色相カテゴリへの分割結果に基づいて色追加が必要であると判定された場合にのみ色追加を行う場合と推定精度を比較する。

色相カテゴリへの分割結果に関わらず色追加を行う場合（色相分割判定無し）と色相カテゴリが 4 種類生成できないと判定された場合に色追加を行う場合（色相分割判定有り）の平均の推定誤差を図 3.16 に示す。図より、「色相分割判定有り」の方が若干、平均の推定誤差が小さいことが分かる。そこで、一対標本による平均の検定（t 検定）を行った結果、P 値（両側）=0.013 となり、「色相分割判定有り」の方が棄却域 5%で有意差有りと判定された。

よって、色相カテゴリ数による判定を導入することでより精度の高い照明光色を推定できる可能性があることが分かった。3.4.1 節で分析したように、色の偏りが極端でない画像に色追加を行うと、元々の入力画像の色分布との重複が推定値に誤差をもたらしていることが考えられる。より詳細な解析と同時に、色追加方法に関しても検討が必要である。

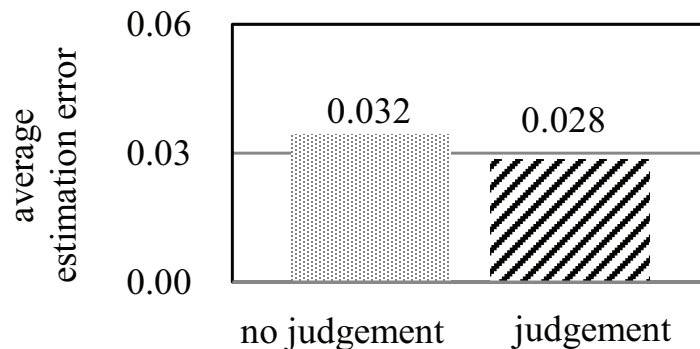


図 3.16 色偏り判定の有無による推定精度の比較

3.5 まとめ

本章では、灰色仮説と色 gamut を組み合わせた照明光色推定法を提案した。提案手法で用いた色 gamut は、照明光色を反映する低彩度 gamut と、物体の色の取り得る範囲を表す高彩度 gamut の 2 種類であり、前者は照明光色候補の抽出、後者は入力画像への色追加に利用した。

具体的には、入力画像に対して類似色でクラスタリングを行った後、低彩度 gamut 内に含まれるクラスタリング後の色数の多いものを抽出し（本章で用いた実験セットの場合、上位 5 位までを抽出）、得られた低彩度 gamut に対応する照明光を候補とする。次に、各照明光候補に対応する高彩度 gamut の範囲内で、入力画像のクラスタリング後の色分布に仮想的に色追加を行い、2 章で提案した反対色の性質を利用した灰色仮説ベースの照明光色推定法[38]を適用して仮の照明光色を推定する。照明光候補の色と仮の照明光色との色差が最も小さいものを最終的な照明光色として推定した。

実画像に適用した結果、

- (1) 色分布に偏りがある画像であっても、高彩度 gamut の範囲内で色を仮想的に追加することによって、色空間内で色相に偏りなく色が分布するため照明光色推定が可能であること、
- (2) 低彩度 gamut による照明光色候補を抽出することによってより高精度な推定ができること、
- (3) 低彩度・高彩度 gamut を作成する際の黒体放射の色温度間隔は 23.5mired より狭い場合には、比較的安定した推定誤差で照明光色を推定できること、
- (4) 低彩度・高彩度 gamut のサイズ（パラメータ a の変更）を変更することによってより推定誤差を小さくできる可能性があること、
- (5) 色相カテゴリへの分割結果に基づいて色追加是非を判定することにより精度の高い

照明光色推定が期待できること、
が分かった。

今後は、低彩度 gamut に基づいて抽出する照明光候補数の決定方法や、高彩度 gamut 内での色追加方法、また、低彩度 gamut および高彩度 gamut の定義方法を検討すると共に、様々な実画像に適用して評価していく予定である。

第 4 章 相異なる照明光下画像の局所灰色仮説適用条件

2 章, 3 章においては, 1 枚の画像から照明光色を推定する際に灰色仮説をベースとした手法を提案した. 2 章では, 対象とする画像が灰色仮説を満たさない場合に画像中から仮説を満たす色の組み合わせを抽出する手法を提案し, 3 章では, 灰色仮説を満たす色の組み合わせが画像中に存在しない場合に照明光毎に様々な物体からの反射光の色の取り得る範囲 (color gamut) 内で仮想的に色追加を行うことによって仮説を満たす色の組み合わせを抽出し照明光色を推定する手法を提案した. 本章と 5 章では, シーン固定で照明光色が異なる状況からの照明光色推定を検討対象とする. 4 章では, 異なる照明光下の画像に共通する物体が複数種類存在する場合に灰色仮説をベースとして照明光色を推定する手法を提案する.

4.1 はじめに

本章では, 異なる照明光下の画像がそれぞれ共通の物体を含む場合に, 共通物体における反射光から灰色仮説が成立するか否かを判定し, 成立する場合のみ照明光を推定する手法を提案する. 提案手法では, 各画像から選択された色の平均がいずれも黒体放射軌跡の近傍にあるか否かに基づいて灰色仮説成立と判定し, その際に得られた平均の色を照明光色として推定する. 本章では, 4.2 節において, 共通物体をもつ異なる照明光下の画像から灰色仮説成立の可否を判定する条件を導き, 4.3 節に上記条件に基づいて照明光色推定が可能であることを数値実験として示し, 4.4 節にまとめを行う.

4.2 灰色仮説成立条件の定式化

4.2.1 反射光と黒体放射軌跡の関係

最初に, 画像中にある物体の分光反射率と, 画像上で対応する物体領域の色および照明光との関係を定式化する. 灰色仮説が成立する場合, 反射光の平均と照明光の色が一致することから, 反射光は必ず黒体放射軌跡上に位置する. しかしながら, 反射光の平均の色が黒体放射軌跡上にあっても, 物体の平均の色は灰色であるとは限らない. ここでの問題を整理するために, 平均の物体の色のもつ条件に対する反射光と黒体放射軌跡および照明光との関係を図 4.1 に示す. 灰色仮説に基づく照明光推定は(A)の場合である.

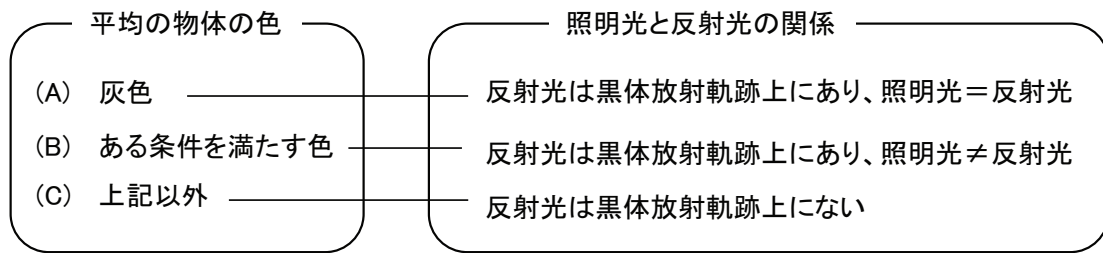


図 4.1 平均の物体の色に対する反射光と黒体放射軌跡および照明光との関係

図 4.1 (B)に示す条件を次に定式化する.

ρ_j は物体の分光反射率 $R(\lambda)$ の各成分, e_{Tj} は色温度 T をもつ黒体放射を分光分布とする照明光 $E_T(\lambda)$ の各成分, l_j は照明光 $E_T(\lambda)$ 下における分光反射率 $R(\lambda)$ の物体領域から反射する光の分光分布 $L(\lambda)$ の各成分であり, 照明光の色が色度座標上で黒体放射軌跡上にある条件は, 式(4.1)で表される. この式では, 分光反射率の各成分が黒体放射の分光分布の成分ごとの比で表されることを意味する. この条件の導出法は付録 1 に示す.

$$\rho_j = l_j / (k \cdot e_{Tj}), \quad (j=1,2,\dots,N) \tag{4.1}$$

ただし, k は定数である.

反射光の色が黒体放射軌跡 (破線) 上の \times (色温度 6504K) の位置にある場合に, 照明光の色温度 T を変化させた場合に得られる分光反射率の取り得る範囲を式(4.1)を用いて得られた結果を図 4.1 に実線で示す. 同図より, 物体の平均の色の範囲は, 灰色 (図中, \circ で示す) を通る曲線になる.

4.2.2 灰色仮説成立の判定条件の導出

灰色仮説が成立する場合, 反射光の平均は黒体放射軌跡上にのるが, 逆は成立しないので, 反射光の平均の色から灰色仮説成立の可否を判定することはできない. しかしながら, 相異なる照明光下における共通物体からの反射光の平均が共に黒体放射軌跡上にあれば, 各照明光下の反射光から得られる物体の平均の色の範囲を表す曲線は必ず交点をもつ (共通物体の平均の色 (灰色)) ので, 照明光の色が一意に定まると考えられる.

そこで, 相異なる 2 種類の照明光下における共通物体からの反射光の平均が黒体放射軌跡上にある場合には, 共通物体の平均の色が灰色であり (局所的な灰色仮説の成立), 共通物体からの反射光の平均を照明光の色として推定できることを示す.

共通物体の分光反射率の平均を $R(\lambda)$, 相異なる照明光の分光分布をそれぞれ, $E_1(\lambda)$,

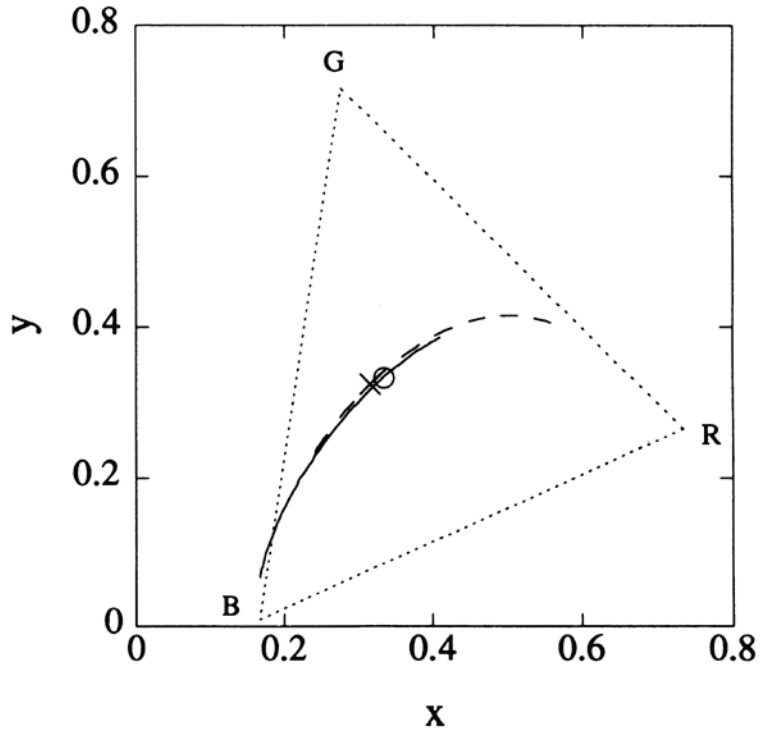


図 4.2 反射光の色が黒体放射軌跡上にある場合の物体の平均の色の範囲

$E_2(\lambda)$ とすると、各照明光下における共通物体からの平均の反射光 $L_1(\lambda)$, $L_2(\lambda)$ は次式で表される.

$$L_1(\lambda) = E_1(\lambda) \cdot R(\lambda) \quad (4.2)$$

$$L_2(\lambda) = E_2(\lambda) \cdot R(\lambda)$$

ここで、 $E_1(\lambda) \neq E_2(\lambda)$ であるから、 $L_1(\lambda) \neq L_2(\lambda)$ である.

式(4.2)より、反射光 $L_1(\lambda)$, $L_2(\lambda)$ は、同一の $R(\lambda)$ を含むことから、次の関係が成り立つ.

$$\frac{L_1(\lambda)}{E_1(\lambda)} = \frac{L_2(\lambda)}{E_2(\lambda)} \quad (= R(\lambda)) \quad (4.3)$$

反射光の色が共に黒体放射軌跡上にある場合、照明光は式(4.4)に示す関係を満たすことが必要十分である.

$$E_1(\lambda) = k \cdot L_1(\lambda) \quad (4.4)$$

$$E_2(\lambda) = k \cdot L_2(\lambda)$$

但し、 k は定数である.

このとき、 $R(\lambda)$ は波長によらず一定値 (灰色) をとる分光反射率になり、反射光 L_1

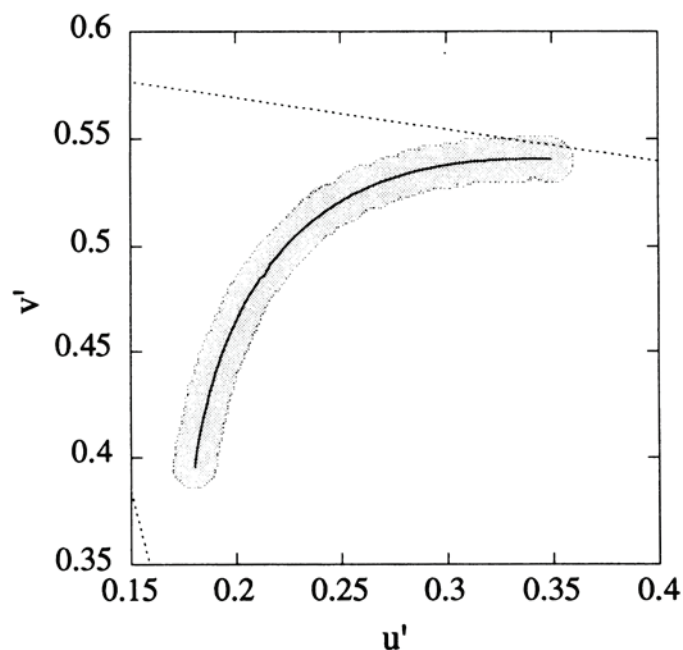


図 4.3 黒体放射軌跡の同色知覚領域

(λ) および $L_2(\lambda)$ それぞれから得られる物体の平均の色を表す曲線は 1 点 (灰色) でのみ交点をもつことになる. $E_1(\lambda)$, $E_2(\lambda)$, $L_1(\lambda)$ および $L_2(\lambda)$ が式(4.4) の関係を満たすとき, 式(4.3)が成立することは自明であるので, 逆の場合のみ証明を付録 2 に示す.

以上より, 相異なる照明光下における共通物体からの反射光の平均が共に黒体放射軌跡上にあれば, 共通物体の平均の色が灰色になる (局所的灰色仮説の成立) ので, 照明光の色は共通物体からの反射光の平均の色に等しい. 上の証明では, 2 種類の照明光下における共通物体からの反射光に基づいて照明光が推定可能であることが示されているが, 実際には, 2 種類以上の照明光下での画像に対して適用できる. したがって, 2 種類以上の相異なる照明光下における共通物体の反射光に基づいて, 局所的な灰色仮説の成立の可否が判定でき, 成立する場合, 照明光の推定ができる.

4.2.3 人間の知覚特性を考慮した灰色仮説の判定条件と照明光推定

前節では, 反射光の平均から灰色仮説成立の可否を判定する条件を示したが, 現実の画像に対して, 常に, 灰色仮説が成立するとは限らない. そこで, 相異なる照明光下における共通物体からの反射光の平均が共に, 黒体放射軌跡上の色と同じ色に知覚される領域に含まれる場合にも, 局所的に灰色仮説が成立するとみなす.

黒体放射軌跡上の各点に対して, 同色知覚領域を求め, 図 4.3 に示す領域 (以下, 黒体放射軌跡の同色知覚領域) を得る. 図 4.3 では, $u'v'$ 色度座標上に, 黒体放射軌跡を実線,

黒体放射軌跡の同色知覚領域を灰色で示す。u'v'は CIELUV 均等色空間における色度座標であり、CIELUV 均等色空間は、人間が知覚する色差と色空間内のユークリッド距離が対応する色空間である。したがって、均等色空間内では、どの点においても、色の差が知覚できない色領域は同一の半径をもつ。図 4.3 において同色知覚領域の半径（色差）は、u'v'色度座標上で、MacAdam[35]による均等知覚楕円の半径（短径）より小さい値である 0.01 を設定する。共通物体からの反射光の平均が、黒体放射軌跡の同色知覚領域に含まれる場合、灰色仮説が知覚的に成り立つとし、反射光の平均と同じ色温度をもつ黒体放射を照明光として推定する。

4.2.4 灰色領域の選択

4.2.2 節および 4.2.3 節において、相異なる照明光下における共通物体からの反射光の平均の色から、灰色仮説が成立するか否かの判定条件、および、条件を満たす場合の照明光推定法に関して述べた。実際に、共通物体が複数ある場合には、色の選び方によって反射光の平均の色が様々に変わり得るため、適切に反射光を選択することが必要になる。ここでは、複数の共通物体の中から、平均の色が灰色になるような組合せを選択する方法を示す。

黒体放射軌跡は、灰色の物体に黒体放射の分光分布をもつ照明光が照射した場合の反射光の色の軌跡と一致する。したがって、互いに平均すると灰色になる分光反射率の組み合わせがあれば、反射光の平均が照明光の色に一致する。この場合、反射光の色度座標は、それぞれ黒体放射軌跡の反対側（上と下）に位置する。そこで、黒体放射軌跡の異なる側から反射光を同数ずつ選択することによって、分光反射率の平均を灰色に近づけることができると思われる。さらに、黒体放射軌跡の同じ側で近い色をもつ反射光がある場合、1色にまとめて計算する（平均を求める）ことによって、選択する色の偏りをなくし、物体の平均をより灰色に近づかせることができる。

4.3 実験

4.3.1 実験方法

相異なる照明光下における共通物体の反射光の平均から、灰色仮説成立の可否の判定および仮説が成立する場合の照明光の推定精度に関する実験を行う。以下に示す 2 種類の実験により、4.2.3 節の灰色仮説成立の判定条件（実験 I）および 4.2.4 節の反射光の選択方法（実験 II）の有効性を示す。

(1) 実験 I

実験 I では、異なる照明光下における共通物体からの反射光の平均に基づいて、灰色仮説が局所的に成立すると判定される場合の照明光推定の精度を調べる。以下の様に、共通物体の平均の分光反射率および照明光の分光分布を作成する。平均の分光反射率は、波長

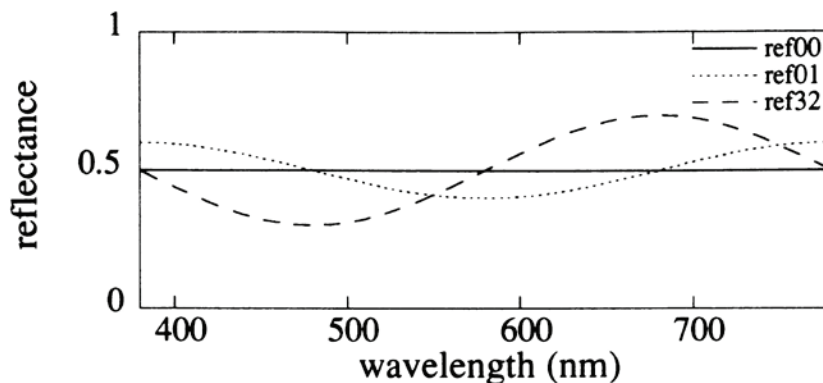


図 4.4 実験 I の分光反射率例

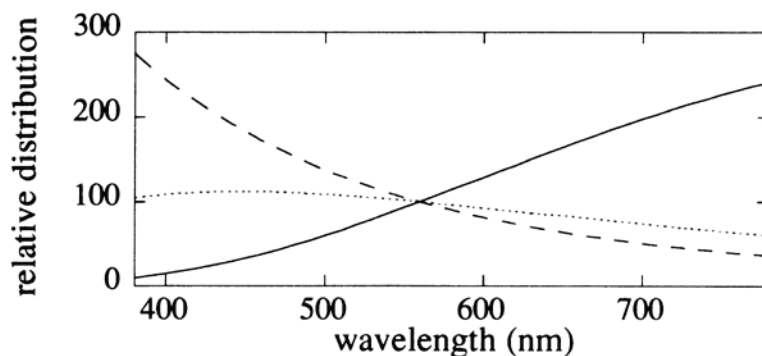


図 4.5 照明光の相対分光分布

に対してフラットな分布と、灰色の分光反射率（図 4.4 の ref00）に位相と振幅をパラメータとする cosine 関数を足し合わせたもの（図 4.4 の ref01,ref32）を用いる。ref**の*は、左側の数値 (0,1,2,3) が cosine 関数の位相のずれ ($0, 1/2\pi, \pi, 3/2\pi$) に対応し、右側の数値 (0,1,2,3,4,5) が振幅 (0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5) に対応する。照明光は 3 種類あり、色温度が 2856K(標準光源 A と同じ色温度), 6504K(標準光源 D_{65} と同じ色温度), 15000K (晴天の時の太陽光の色温度) の黒体放射の分光分布をもつものとする。図 4.5 に、横軸に波長、縦軸に分光分布の相対値 (560nm で 100 に正規化) をとり、2856K(実線), 6504K (点線), 15000K (破線) の色温度をもつ黒体放射の相対分光分布を示す。

反射光の色 ($u'v'$ 色度座標) は、上述の分光反射率と照明光の分光分布を用い、XYZ空間から LUV空間への変換式[41]に基づいて計算する。

黒体放射の色度座標および相関色温度を計算する際の等色温度直線は、JIS8725[42]の付表 1 に基づく。

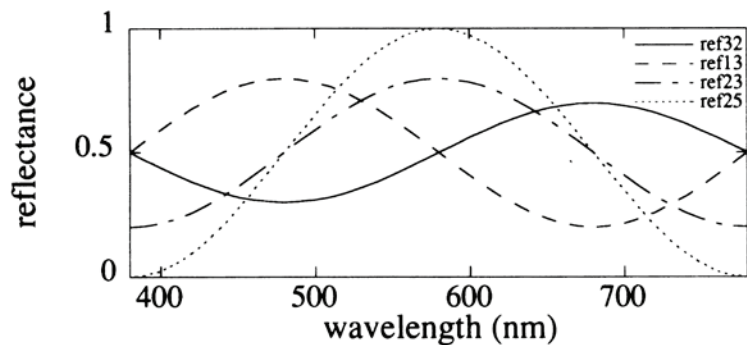


図 4.6 実験 II の分光反射率

(2) 実験 II

実験 II では，相異なる照明光下において，共通物体が複数ある場合に，黒体放射軌跡の互いに異なる側から同数ずつ反射光を選択して平均の反射光を求める場合の照明光推定の精度について調べる．反射光の平均から照明光推定までの手順は 4.2.3 節にしたがう．

複数ある共通物体の分光反射率は，実験 I と同様に灰色の分光反射率と cosine 関数との和で表されるものを四種類用意する（図 4.6）．各反射率の ref^{**} の $**$ は実験 I と同様の意味を表す．照明光は，実験 I と同様の 3 種類を用いる．

4.3.2 実験結果

(1) 実験 I の結果

図 4.7 に，平均の分光反射率に対応する各照明光下の反射光および実際の照明光を $u'v'$ 色度座標上に示す．図中，○，△，◇ は色温度が 2856K, 6504K, 15000K の照明光下における 3 種類の分光反射率 ($ref00, ref11, ref25$) をもつ領域からの反射光であり，記号の右下に ref^{**} の $**$ を識別子として付けて示す．× は 3 種類の照明光（下から順に 15000K, 6504K, 2856K），実線は黒体放射軌跡，点線で囲まれた領域は黒体放射軌跡の同色知覚領域を表す．特に， $ref00$ は波長に対してフラットな分光反射率であるため，実際の照明光と反射光の色が重なって表示されている．表 4.3 に，灰色仮説が成立すると判定された場合（3 照明光下における平均の反射光が全て黒体放射軌跡の同色知覚領域に含まれる場合）と不成立と判定された場合の推定照明光と推定誤差（＝推定照明光と実際の照明光との色度座標上におけるユークリッド距離）を示す．推定照明光は，反射光と同じ色温度を持つ黒体放射の色として求める．表 4.1 では，太い実線の上側が灰色仮説成立の場合，下側が不成立の場合の結果である．本方法では，異なる照明光下における平均の反射光が共に黒体放射軌跡の同色知覚領域に含まれる場合のみ，灰色仮説が局所的に成立するとみなしている．そのため，1 照明光下での反射光から得られる推定照明光が実際の照明光に近い場合でも，灰色仮説が不成立であれば，他照明光下での推定誤差が大きくなるこ

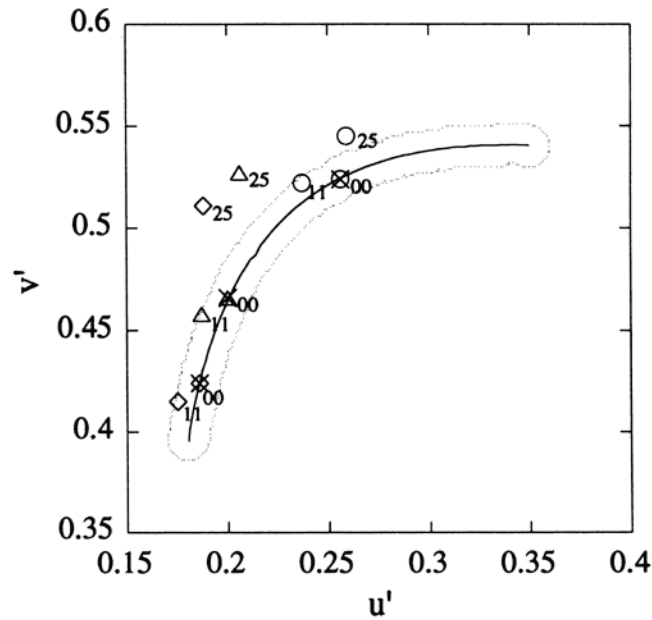


図 4.7 照明光の推定結果

表 4.1 推定照明光と推定誤差

		2856 K (0.256, 0.524)	6504 K (0.200, 0.466)	15000 K (0.186, 0.424)
灰色仮説成立	ref00	0.000 (0.256, 0.524)	0.000 (0.200, 0.466)	0.001 (0.186, 0.425)
	ref01	0.003 (0.253, 0.523)	0.019 (0.193, 0.448)	
	ref11	0.018 (0.240, 0.515)	0.016 (0.194, 0.451)	0.013 (0.183, 0.411)
	ref21	0.002 (0.258, 0.525)	0.013 (0.206, 0.477)	0.020 (0.191, 0.443)
	ref31	0.021 (0.275, 0.532)	0.020 (0.210, 0.483)	0.018 (0.191, 0.441)
不成立	ref02	0.009 (0.248, 0.520)	0.045 (0.186, 0.423)	
	ref25	0.007 (0.262, 0.527)	0.038 (0.221, 0.498)	0.061 (0.209, 0.481)

とがわかる。図 4.7 および表 4.1 より、相異なる照明光下での反射光が共に、(1)黒体放射軌跡上にあれば、正確に照明光の推定ができること (ref00 の結果より)、(2)黒体放射軌跡の同色知覚領域に含まれていれば、相関色温度により、良い精度で照明光の推定ができることが確認できる。

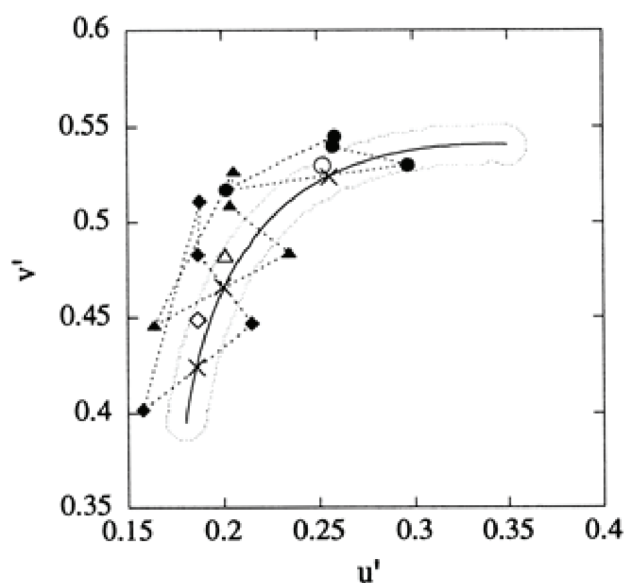


図 4.8 共通物体からの反射光

表 4.2 推定照明光と推定誤差

	2856 K (0.256, 0.524)	6504 K (0.200, 0.466)	15000K (0.186, 0.424)
2 色の平均	0.008 (0.249, 0.521)	0.001 (0.200, 0.465)	0.002 (0.186, 0.426)
3 色の平均	0.002 (0.254, 0.523)	0.013 (0.206, 0.477)	0.022 (0.192, 0.445)
4 色の平均	0.010 (0.265, 0.528)	0.017 (0.209, 0.481)	0.030 (0.195, 0.453)

(2) 実験Ⅱの結果

各照明光下における 4 種類の共通物体における同一の均一色領域からの反射光の色を $u'v'$ 色度座標上に示す (図 4.8)。同図中、 \times は 3 種類の照明光 (下から順に 15000K, 6504K, 2856K)、実線は黒体放射軌跡、点線で囲まれた領域は黒体放射軌跡の同色知覚領域、 \bullet , \blacktriangle , \blacklozenge はそれぞれ、2856K, 6504K, 15000K の照明光下における共通物体からの反射光であり、4 色 (ref32, ref13, ref23, ref25) ずつ示されている。同図より、2856K の照明光下における反射光 4 色のうち 2 色が、色度座標上で非常に近い位置にあるので 1 色と見なし (平均する)、残りの 2 色とあわせて 3 色の平均値を求める。図中、 \circ , \triangle , \diamond が、それぞれ、2856K, 6504K, 15000K の照明光下における反射光の中から選択された 3 色の平均である。どの照明光下においても、反射光の平均が黒体放射軌跡の同色知覚領域に含まれるので、灰色仮説が局所的に成立するとみなすことができる。反射光の平均と同じ色温度をもつ黒体放射を照明光として推定した結果および推定誤差を表 4.2 に示す。同表中、3 種類の結果が示されており、それぞれ、3 色の平均の場合が近い色を

1色とみなして他の2色との平均から得られた結果、4色の平均の場合が表 4.2 に示した4種類の反射光全ての平均から得られた結果、2色の平均の場合が図 4.6 の ref32 および ref13 の分光反射率をもつ物体における反射光の平均から得られた結果である。

表 4.2 より、結果的には、2色の平均の場合がもっとも誤差の小さい照明光推定であるが、図 4.8 に示す4種類の反射光の中から、このような2色を選択することは容易ではない。また、得られる反射光全ての平均に基づく照明光推定（4色の場合）は、似た色がある場合には、その色の方向に平均が偏り、推定精度を悪化させる可能性がある。3色の場合は、似た色を1つにまとめることによって、反射光を色空間上で均等に選択できるため、4色の平均の場合より推定誤差を小さくできる。

したがって、複数の反射光の中から、色度座標上の黒体放射軌跡で分割される2領域から均等に色を選択することにより、平均を灰色に近づける（局所的に灰色仮説が成立する色の組が選択される）ので、照明光推定の精度を上げることができる。

4.4 まとめ

本章では、共通の物体を含む、異なる照明光下での画像を用いて、灰色仮説に基づく照明光推定の適用可否の判定条件および数値シミュレーションによる判定条件の有効性を述べた。相異なる照明光下における共通物体からの平均の反射光が共に、(1)黒体放射軌跡上にある場合、共通物体の領域では局所的に灰色仮説が成立し、共通物体からの反射光の平均を照明光の色として正確に推定できること、(2)黒体放射軌跡上の同色知覚領域に含まれる場合、平均の反射光の相関色温度を照明光の色温度とすることにより、照明光を良い精度で推定できることがわかった。また、各照明光下の画像に共通の複数物体の反射光から平均を求める際には、(1)近い色の反射光同士を1つにまとめ、(2)黒体放射軌跡の異なる側から反射光を同数ずつ選択する、ことによって、物体の色の平均が灰色に近いような反射光を選択でき、より推定精度の高い照明光推定が可能になることが確認できた。

本方法は、例えば、同一シーンをカメラ等を用いて屋外で撮像した動画像に対して適用することができる。各フレームから推定された照明光の色に基づき、画像中の各物体領域の色を推定することが可能になる。

[付録 1] 反射光が黒体放射軌跡上にある場合の物体の色の条件

反射光の分光分布を $L(\lambda)$ 、色温度 T の黒体放射で表される照明光の分光分布を $E_T(\lambda)$ 、物体の分光反射率を $R(\lambda)$ 、等色関数を $S_x(\lambda)$ 、 $S_y(\lambda)$ 、 $S_z(\lambda)$ とすると、 $E_T(\lambda) \cdot R(\lambda)$ と $L(\lambda)$ の XYZ 三刺激値は以下のように表される。但し、以降の式の変形を容易にするため、積分記号 \int を和の記号 Σ に置き換えて表現し直す。

$$\begin{aligned}
 X_L &= \sum_{j=1}^N S_x(\lambda_j) \cdot L(\lambda_j) \\
 Y_L &= \sum_{j=1}^N S_y(\lambda_j) \cdot L(\lambda_j) \\
 Z_L &= \sum_{j=1}^N S_z(\lambda_j) \cdot L(\lambda_j) \\
 X_T &= \sum_{j=1}^N S_x(\lambda_j) \cdot E_T(\lambda_j) \cdot R(\lambda_j) \\
 Y_T &= \sum_{j=1}^N S_y(\lambda_j) \cdot E_T(\lambda_j) \cdot R(\lambda_j) \\
 Z_T &= \sum_{j=1}^N S_z(\lambda_j) \cdot E_T(\lambda_j) \cdot R(\lambda_j)
 \end{aligned} \tag{A.1}$$

上式において、 X_L 、 Y_L 、 Z_L 、 X_T 、 Y_T 、 Z_T はそれぞれ $L(\lambda)$ および $E_T(\lambda) \cdot R(\lambda)$ の XYZ 三刺激値であり、 N は可視領域におけるサンプリング数である。

反射光の色と、照明光の分光分布と物体の分光反射率の積による色が一致することは、各々の xy 色度座標が一致することに対応するので、式(A.1)での XYZ 三刺激値の相対値(比)が一致することと同値である(式(4),(5))。このことから、次の関係を得る。

$$\begin{aligned}
 X_L &= k \cdot X_T \\
 Y_L &= k \cdot Y_T \\
 Z_L &= k \cdot Z_T
 \end{aligned} \tag{A.2}$$

但し、 k は定数である。

次に、式(A.2)を式(A.1)に代入し、整理する(式(A.3))。

$$\begin{aligned}
\sum_{j=1}^N [S_x(\lambda_j) \cdot \{L(\lambda_j) - k \cdot E_T(\lambda_j) \cdot R(\lambda_j)\}] &= 0 \\
\sum_{j=1}^N [S_y(\lambda_j) \cdot \{L(\lambda_j) - k \cdot E_T(\lambda_j) \cdot R(\lambda_j)\}] &= 0 \\
\sum_{j=1}^N [S_z(\lambda_j) \cdot \{L(\lambda_j) - k \cdot E_T(\lambda_j) \cdot R(\lambda_j)\}] &= 0
\end{aligned} \tag{A.3}$$

上式を行列表現する (式(A.4)).

$$\begin{pmatrix} \bar{x}_1 & \bar{x}_2 & \cdots & \bar{x}_N \\ \bar{y}_1 & \bar{y}_2 & \cdots & \bar{y}_N \\ \bar{z}_1 & \bar{z}_2 & \cdots & \bar{z}_N \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} l_1 - k \cdot e_{T1} \cdot \rho_1 \\ l_2 - k \cdot e_{T2} \cdot \rho_2 \\ \vdots \\ l_N - k \cdot e_{TN} \cdot \rho_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{A.4}$$

式(A.4)において, $x_j, y_j, z_j, (j=1,2,\dots,N)$ は等色関数 $S_x(\lambda), S_y(\lambda), S_z(\lambda)$ の成分, $l_j, e_{Tj}, (j=1,2,\dots,N)$ はそれぞれ反射光 $L(\lambda)$, 照明光 $E_T(\lambda)$ の分光分布の成分であり, $\rho_j, (j=1,2,\dots,N)$ は分光反射率 $R(\lambda)$ の成分である. $3 \times N$ の等色関数行列 S に対し, 擬似逆行列 S^* を式(A.5)により定義し, 式(13)の両辺に S^* を左からかける (式(A.6))

$$S^* = ({}^t S \cdot S)^{-1} \cdot {}^t S \tag{A.5}$$

但し, ${}^t S$ は行列 S の転置行列である.

$$l_j - k \cdot e_{Tj} \cdot \rho_j = 0 \quad (j=1,2,\dots,N) \tag{A.6}$$

式(A.6)を ρ について整理し, 次式を得る.

$$\rho_j = l_j / (k \cdot e_{Tj}), \quad (j=1,2,\dots,N) \tag{4.1}$$

式(4.1)は, 分光反射率の各成分 ρ_j が反射光と照明光の分光分布の成分比 l_j / e_j で表されることを示している. 即ち, 分光反射率が式(4.1)の条件を満たす場合, 灰色 ($\rho_1 = \rho_2 = \dots = \rho_N$) であるか否かに関わらず, 反射光は黒体放射軌跡上にある.

【付録2】式(4.3) ⇒ 式(4.4) の証明

式(4.3)を満足する $E_1(\lambda)$ および $E_2(\lambda)$ は、式(4.4)に示す場合しか存在しないことを示す。

ここでは、 $E_1(\lambda) \neq k \cdot L_1(\lambda)$ または $E_2(\lambda) \neq k \cdot L_2(\lambda)$ であると仮定し、矛盾を導くことにより、上記命題を証明する。

$$\frac{L_1(\lambda)}{E_1(\lambda)} = \frac{L_2(\lambda)}{E_2(\lambda)} \quad (= R(\lambda)) \quad (4.3)$$

黒体放射の分光分布 $E_T(\lambda)$ は、プランクの放射式(式(1.1))により、色温度 T と波長 λ の関数で表される。

$L_1(\lambda)$, $L_2(\lambda)$ および $E_1(\lambda)$, $E_2(\lambda)$ は黒体放射の分光分布で表されることから、色温度をそれぞれ $T_{L1}, T_{L2}, T_{E1}, T_{E2}$ とし、式(4.3)に代入して整理すると次式が得られる。

$$\exp\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T_{E2}}\right) - 1 = \frac{\left(\exp\left(\frac{c}{\lambda \cdot T_{L2}}\right) - 1\right) \cdot \left(\exp\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T_{E1}}\right)\right)}{\left(\exp\left(\frac{c}{\lambda \cdot T_{L1}}\right) - 1\right)} \quad (A.7)$$

$T_{L1} \neq T_{L2}$ ($L_1(\lambda) \neq L_2(\lambda)$) であることと、仮定より、 $T_{E1} \neq T_{L1}$ ($E_1(\lambda) \neq k \cdot L_1(\lambda)$) であることから、式(A.7)の右辺は既約である。式(A.7)の右辺 = $A(\lambda)$ とおき、左辺の1を移行し、両辺の対数をとって整理する。

$$\frac{c_2}{T_{E2}} = \log(A(\lambda) + 1)^\lambda \quad (A.8)$$

T_{E2} は $E_2(\lambda)$ の色温度であり、 c_2 は定数であるから、式(A.8)の左辺は λ に依存しない定数になる。 $A(\lambda)$ は既約分数であることから、 $A(\lambda) + 1$ も既約分数となり、式(A.8)の右辺が λ に依存するか否かは、 $A(\lambda) + 1$ の分子および分母の λ 乗を調べればよい。分子、分母各々の λ 乗が共に λ に依存しない場合のみ、式(A.8)の右辺が λ に依存しない定数になる。

$A(\lambda) + 1$ の分母の λ 乗は式(A.9)で表される。

$$c_0 = \left(\exp\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T_{L1}}\right) - 1 \right)^\lambda \quad (\text{A.9})$$

式(A.9)の右辺は明らかに λ の関数であるので、 $(A(\lambda) + 1)^\lambda$ も λ の関数になる。このことは、式(A.8)の左辺が λ に依存しないことに矛盾する。したがって、” $L_1(\lambda) \neq L_2(\lambda)$ の条件下で、 $E_1(\lambda) \neq k \cdot L_1(\lambda)$ である”という仮定に誤りがあったことになる。同様に、” $E_2(\lambda) \neq k \cdot L_2(\lambda)$ である”と仮定して、式(4.3)から矛盾を導くことができ、さらに、” $E_1(\lambda) \neq k \cdot L_1(\lambda)$ かつ $E_2(\lambda) \neq k \cdot L_2(\lambda)$ である”場合も、上記の2通りの場合に含まれるので、同様に矛盾が導かれることになる。

以上のことから、式(4.3)を満足する、 $E_1(\lambda)$ 、 $E_2(\lambda)$ は、式(4.4)に示す関係($E_1(\lambda) = k \cdot L_1(\lambda)$ かつ $E_2(\lambda) = k \cdot L_2(\lambda)$)以外には存在しないことが示される。

第 5 章 相異なる照明光下画像における 1 同色領域の利用

第 4 章では，異なる照明光下の画像に共通して含まれる均一色領域の平均が黒体放射軌跡の近傍にあるか否かに基づいて灰色仮説適用可否を判定することによって照明光色を推定する手法を提案した．しかしながら，各画像に共通する均一色領域全ての組み合わせを用いて上記判定を行っても仮説成立適用可とならない場合もあり得る．そこで，本章では，異なる照明光下に共通する 1 物体の同一均一色領域を用いた照明光色推定手法を提案する．本章で扱う手法は，均一色領域が 1 つしか存在しない場合の手法であるため，第 2 ～4 章までに提案した手法のように灰色仮説をベースとすることはできない．数値シミュレーションおよび実画像を用いた実験によって，提案手法の有効性を示す．

5.1 はじめに

本章では，2 種類の異なる照明光下の画像に共通する 1 物体における同一均一色領域から，照明光毎の反射光の色と分光反射率との関係を利用して分光反射率の取り得る集合を求め，各画像から得られた分光反射率集合の積集合が共通物体に対応することを利用して照明光色を推定する．以下，5.2 節に提案手法，5.3 節に実験，5.4 節に考察，5.5 節にまとめを述べる．

5.2 提案手法

5.2.1 コンセプト

提案手法では Finlayson ら[29]や Kawakami ら[30]と同様，2 種類の照明光下に共通する 1 種類の物体における均一色領域のみを用いて照明光色を推定する．従来手法では，照明光を黒体放射に限定し，色を 2 次元で表現することにより，適用範囲に制約があり近似による誤差が生じていると考えられる．そこで，提案手法では，照明光を黒体放射のみに限定せず，さらに，照明光と物体の色を分光分布で扱うことにより上述の課題を解決する．以下，提案手法における照明光色推定のコンセプトを説明する．

相異なる 2 照明光 A, B 下の画像に共通する物体における同一均一色領域に対応する分光反射率を $\rho(\lambda_i)$ ，照明光 A の分光分布を $E_A(\lambda_i)$ とすると，照明光 A 下の共通物体における同一均一色領域からの反射光の色 (XYZ 三刺激値) は，式(5.1)に示すように，等色関数 $\bar{x}(\lambda_i), \bar{y}(\lambda_i), \bar{z}(\lambda_i)$ と照明光の分光分布から成る行列 D_A を用いて表される．ただし，

$i=1,2,\dots,N$, N は可視光内での波長を表す識別子とし, 行列の左肩にある t は転置を表す. また D_A の式では, 簡略化のため, (λ_i) を i のみの添え字で示す.

$$\begin{pmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda_1) & \cdots & \bar{x}(\lambda_N) \\ \bar{y}(\lambda_1) & \cdots & \bar{y}(\lambda_N) \\ \bar{z}(\lambda_1) & \cdots & \bar{z}(\lambda_N) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_A(\lambda_1) & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \\ 0 & & E_A(\lambda_N) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \rho(\lambda_1) \\ \vdots \\ \rho(\lambda_N) \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

$$= D_A \cdot {}^t(\rho(\lambda_1) \cdots \rho(\lambda_N))$$

ただし, $D_A = \begin{pmatrix} \bar{x}_1 \cdot E_{A1} & \bar{x}_2 \cdot E_{A2} & \cdots & \bar{x}_N \cdot E_{AN} \\ \bar{y}_1 \cdot E_{A1} & \bar{y}_2 \cdot E_{A2} & \cdots & \bar{y}_N \cdot E_{AN} \\ \bar{z}_1 \cdot E_{A1} & \bar{z}_2 \cdot E_{A2} & \cdots & \bar{z}_N \cdot E_{AN} \end{pmatrix}$

同様に, 照明光 B (\neq 照明光 A) 下にも共通する物体における同一均一色領域からの放射光と分光反射率との関係は次式となる.

$${}^t(X_B \ Y_B \ Z_B) = D_B \cdot {}^t(\rho_1 \cdots \rho_N) \quad (5.2)$$

$N=3$ の場合には, 式(5.1), (5.2)の両辺に, それぞれ左から D_A, D_B の逆行列, $N>3$ の場合には D_A, D_B の擬似逆行列, 即ち, ${}^t D_A \cdot (D_A \cdot {}^t D_A)^{-1}, {}^t D_B \cdot (D_B \cdot {}^t D_B)^{-1}$ をかけると, 右辺はそれぞれ分光反射率のみの項となり, それらは一致する.

しかしながら, 行列 D_A, D_B の要素には未知である照明光の分光分布を含んでいる. そこで, 黒体放射や蛍光灯等の実在する照明光の分光分布を用いて行列 D_A, D_B を作成し, 照明光毎に行列 D_A, D_B の逆行列/擬似逆行列を式(5.1), (5.2)の両辺に作用させることにより分光反射率が得られる. この場合, 行列 D_A, D_B の作成に用いた照明光それぞれに 1 種類の分光反射率に対応するため, 結果的に行列 D_A, D_B に用いた照明光の種類に応じた数の分光反射率 $\hat{\rho}$ が得られることになる. 以下, これを分光反射率集合 $\mathbf{P}_A, \mathbf{P}_B$ と呼ぶ. 行列 D_A, D_B に用いた照明光の中に真値が含まれていれば, 照明光 A, B 下の画像それぞれに共通する物体における均一色領域から得られた分光反射率集合の積集合は共通物体に対応すると考えられる. 積集合は, 集合 $\mathbf{P}_A, \mathbf{P}_B$ の部分集合であり, 各集合の要素同士が類似するものを表す. 上述の関係を式(5.3), (5.4)を用いて表現する. 行列 D_A, D_B の逆行列を式(5.1), (5.2)に作用させる関数をそれぞれ $f()$, $g()$ とし, これら関数によって得られる分光反射率 $\hat{\rho}$ の集合をそれぞれ $\mathbf{P}_A, \mathbf{P}_B$ とする. なお, s は照明光の色温度であり, 25~600 mired の範囲とする.

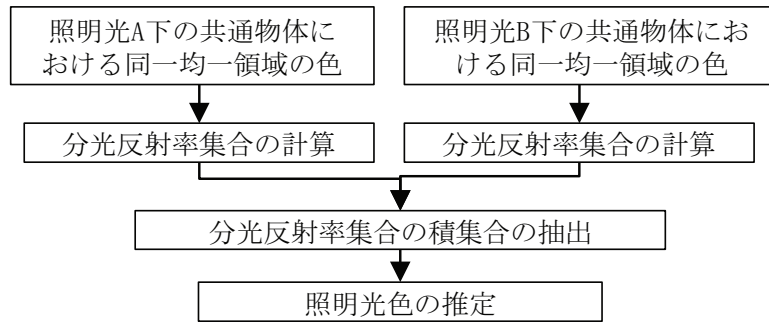


図 5.1 提案手法の処理の流れ

$$\begin{aligned}
 \mathbf{P}_A &= \left\{ \hat{\rho} \mid \hat{\rho} = f'(X_A \ Y_A \ Z_A), 25 \leq s \leq 600 \right\} \\
 \mathbf{P}_B &= \left\{ \hat{\rho} \mid \hat{\rho} = g'(X_B \ Y_B \ Z_B), 25 \leq s \leq 600 \right\}
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

$$\{\rho_0\} = \mathbf{P}_A \cap \mathbf{P}_B \tag{5.4}$$

分光反射率集合 $\mathbf{P}_A, \mathbf{P}_B$ の積集合で得られる分光反射率は各画像に共通する物体の同一均一色領域に対応することから、 $\mathbf{P}_A, \mathbf{P}_B$ において $\{\rho_0\}$ を得る際に用いた照明光の色温度を用いて照明光色を推定することができると考えられる。

5.2.2 処理概要

提案手法では、図 5.1 に示す流れで照明光色推定を行う。本論文では、異なる 2 種類の照明光下の画像に共通する物体における同一均一色領域は同定されており、また、撮像系（カメラ）による入出力特性は事前に得られているものとする。以下、各画像に共通する物体における同一均一色領域から分光反射率集合の計算、次に、分光反射率集合から積集合の抽出、最後に、照明光色の推定について順に説明する。

(1) 共通被写体領域の反射光の色から表面反射率への変換

まず、式 (5.3) における分光反射率集合の取得方法を説明する。反射光と分光反射率とは、式 (5.1), (5.2) より 3 行 N 列の行列 $\mathbf{D}_A, \mathbf{D}_B$ で関係づけられている。 $N=3$ 、即ち、照明光と等色関数が 3 種類の波長の成分のみで表現される場合には $\mathbf{D}_A, \mathbf{D}_B$ に逆行列が存在し、直接、分光反射率を計算できるが、 $N>3$ の場合には逆行列が存在しないため、直接的には分光反

射率を計算できない。このような場合、分光反射率を得る方法として、擬似逆行列、ウィナー推定や重回帰分析が用いられている。

擬似逆行列の手法では、 $\mathbf{D}_c \cdot (\mathbf{D}_c' \mathbf{D}_c)^{-1}$ 、(但し、 $C=A$ または B) を式 (5.1)、(5.2) の両辺に左から掛けることで分光反射率 $\hat{\rho}$ を得る。重回帰分析では、 m 種類の分光反射率 ρ_i と反射光 X, Y, Z (以下、 L_i と表す) の組、 $\mathbf{P}=(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_m)$ 、 $\mathbf{L}=(L_1, L_2, \dots, L_m)$ を利用し、式 (5.5) の関係を満たす行列 \mathbf{H} を求め、式 (5.6) に基づいて分光反射率を得る。

$$\mathbf{P} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{L} \quad (5.5)$$

$$\hat{\rho} = \mathbf{H}' (X \ Y \ Z) \quad (5.6)$$

一方、ウィナー推定は、分光反射率の真値と推定値との平均自乗誤差を最小化する手法であり、式 (5.7) に示すように分光反射率の自己相関行列 R_{rr} 、ノイズの自己相関行列 R_{mm} を用いて表される。 R_{rr} や R_{mm} は通常不明であるが、 R_{rr} はサンプルとして用いる分光反射率の統計的な性質が代用可能であると考えられ、また、 $R_{mm}=0$ とおくと二次の重回帰分析に相当する [43] ことも知られている。

$$\hat{\rho} = R_{rr}' D \cdot (D \cdot R_{rr}' D + R_{mm})^{-1} \cdot (X \ Y \ Z) \quad (5.7)$$

そこで、本論文では、ウィナー推定を二次の重回帰分析と見なし、擬似逆行列、一次の重回帰分析、二次の重回帰分析を比較し最適な手法を検討する。また、上述の変換は3次元の反射光から N 次元の分光反射率への変換であり不定解を多く含むことが考えられるため、基底関数¹⁴⁾⁻¹⁵⁾を利用する手法 (3~7次元) についても比較・検討する。基底関数を用いる場合、分光反射率 ρ は式 (5.8) に示すように1種類の基底関数 \mathbf{u} と1種類の基底の係数 σ によって以下のように表される。

$${}^t(\rho_1 \ \dots \ \rho_N) = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{21} & \dots & u_{l1} \\ u_{12} & u_{22} & & u_{l2} \\ \vdots & & & \vdots \\ u_{1N} & u_{2N} & & u_{lN} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \vdots \\ \sigma_l \end{pmatrix} \quad (5.8)$$

したがって、擬似逆行列の場合には、等色関数と照明光の分光分布からなる行列に、さらに、式 (5.8) の基底関数 \mathbf{u} との積を \mathbf{D}_c として基底関数の係数行列 σ を得る。また、重回帰分析 (一次・二次) の場合には、 m 種類の分光反射率をそれぞれ基底関数表現した際の係数 σ を事前に求めておき、係数 σ と反射光 \mathbf{L} との関係を満たす式 (5.5) の行列 \mathbf{H} を計算することによって反射光から基底関数の係数を得る。

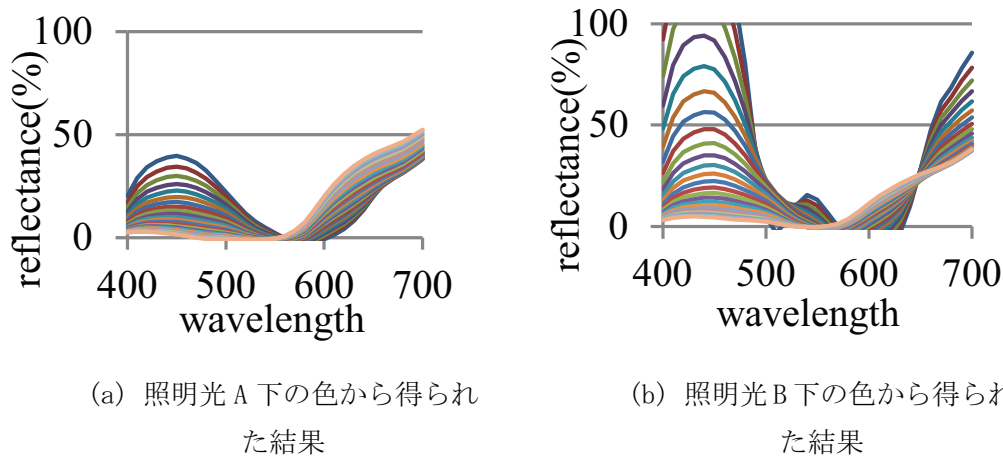


図 5.2 計算過程で得られた分光反射率集合の例

(2) 分光反射率集合から積集合の抽出

次に、分光反射率集合から積集合を抽出する方法を説明する。異なる照明光下に共通する物体における同一均等色領域から得られる分光反射率集合は、式 (5.1), (5.2) において行列 D_A, D_B に用いた個々の照明光に対応して 1 種類ずつ得られるため、その要素数は照明光種類に一致する。したがって、照明光 A および照明光 B 下の各共通物体における同一均一色領域から得られる各分光反射率集合 (式 (5.3) の P_A, P_B) は、行列 D_A, D_B に用いた照明光の種類 (ここでは 24 種類の黒体放射) に応じた数得られ、図 5.2 に示すような分光特性となる。行列 D_A, D_B に用いる照明光の分光分布が照明光 A, B と大きく異なる場合には、図 5.2 (b) に示すように分光反射率が 100% を超える場合があり得る。特に、短波長側にピークをもつ分光分布である照明光 B 下の共通被写体の色 (XYZ 三刺激値) に対し、行列 D_B に用いる照明光が低色温度、即ち、長波長側にピークをもち短波長側の強度が相対的に低い場合に、式 (5.3) によって得られる分光反射率 $\hat{\rho}$ の短波長側の成分が極端に大きな値となる。

上記、相異なる照明光下の共通物体における同一均一色領域から得られた分光反射率集合 P_A, P_B から分光反射率同士の類似度に基づいて積集合を抽出する。類似度は、各分光反射率を可視光 (400~700 nm) の範囲で 10 nm おきにサンプリングし 31 次元のベクトルと見なし、2 ベクトルのなす角 θ で判定する。照明光 A 下の反射率集合の要素 $\hat{\rho}_i \in P_A$ と照明光 B 下の反射率集合の要素 $\hat{\rho}_j \in P_B$ のなす角 θ_{ij} に対し、 $\cos(\theta_{ij})$ の値が大きい (=1 に近い) ほど 2 つの分光反射率の類似度が高いと判定する。

分光反射率集合 P_A の各分光反射率と、分光反射率集合 P_B の各分光反射率との全ての組み合わせに対し式 (5.9) で定義した類似度を判定し、 $\cos(\theta_{ij}) > th$ となる組み合わせを

積集合として抽出する．なお，th は類似度判定の閾値とする．

$$\cos(\theta_{ij}) = \frac{\sum_{k=1}^{31} \hat{\rho}_{ik} \cdot \hat{\rho}_{jk}}{\|\hat{\rho}_i\| \cdot \|\hat{\rho}_j\|} \quad (5.9)$$

但し， $\|\hat{\rho}_*\| = \sqrt{\frac{1}{31} \sum_{k=1}^{31} (\hat{\rho}_{*k})^2}$ ， * = i or j

$\hat{\rho}_i \in P_A$, $\hat{\rho}_j \in P_B$, i, j=1, 2, 3, ..., M (M は照明光種類)

また，積集合 P_A' および P_B' は以下の式で表現される．

$$\begin{aligned} P_A &\supset P_A' = \{\hat{\rho}_i \mid \cos(\theta_{ij}) > th\} \\ P_B &\supset P_B' = \{\hat{\rho}_j \mid \cos(\theta_{ij}) > th\} \end{aligned} \quad (5.10)$$

提案手法では，共通物体を 1 種類としているため，上記条件で得られる分光反射率集合の積集合 P_A' , P_B' の要素数は，理想的には 1 つであるはずであるが，照明光の分光特性によっては複数個，抽出される場合も想定される．このような場合，積集合内の分光反射率は互いに類似しており，対応する照明光の色温度も近いと考えられる．そこで，積集合に含まれる複数の分光反射率の中から 1 種類の分光反射率を選択した際に，それが真値と異なる場合が有り得るため，推定誤差を悪化させる要因となることが想定される．そこで，積集合に含まれる分光反射率を平均化 (= ρ_{AVE}) することにより推定値と真値との誤差を大きくするリスクを軽減させる．

(3) 照明光色の推定

最後に，分光反射率集合の積集合から照明光色を推定する方法を説明する．式(5.3)より分光反射率集合の各要素は，式(5.1)，(5.2)において行列 D_A , D_B に用いた個々の照明光，即ち，照明光の色温度に対応していることから，前節で得られた分光反射率集合の積集合を用いて照明光色を推定する．

分光反射率集合の積集合の要素数が 1 個である場合は，該当の分光反射率に対応する照明光の色温度から照明光色を計算する．色温度から照明光色の計算では，JIS 色彩 Z8720 で定義されている CIE 昼光のデータを用いる．CIE 昼光とは，太陽光の分光分布の実測値に基づいて CIE が規定した昼光の分光分布であり，相関色温度 4000~25000 K の範囲を対象に相関色温度から xy 色度座標を計算する式が定義されている．ここで定義されている式をさらに u' v' 色度図上の座標に変換し照明光の色として推定する．なお，相関色温度が 4000 K 未満および 25000 K を超える場合は色温度毎にプランクの放射式で表される黒体放射の分光分布から CIE 1931 の等色関数を用いて xy 色度座標を求め，u' v' 色度図上の座標に変換する．また，積集合の要素数が 2 個以上の場合，分光反射率集合の中か

ら ρ_{AVE} に最も近い分光反射率 $\hat{\rho}_i, \hat{\rho}_{i+1}$ 2種類を抽出し、各分光反射率の色度の色度図上の位置関係に基づいて ρ_{AVE} に対応する照明光色を計算する。具体的には、 $\rho_{AVE}, \rho_i, \rho_{i+1}$ の u', v' 色度図上の座標をそれぞれ $(u'_{ave}, v'_{ave}), (u'_i, v'_i)$ および (u'_{i+1}, v'_{i+1}) とし、

$$(u'_{ave}, v'_{ave}) = k \cdot (u'_i, v'_i) + (1-k) \cdot (u'_{i+1}, v'_{i+1}) \quad (5.11)$$

上式の関係を満たす k を求める。一方、分光反射率 ρ_i, ρ_{i+1} を得る際の D_A, D_B に使用した照明光の色温度をそれぞれ s_i, s_{i+1} とし、上記 k を用いて式(5.12)に代入して照明光の色温度を計算する。

$$s_{est} = k \cdot s_i + (1-k) \cdot s_{i+1} \quad (5.12)$$

なお、色温度から照明光の色度への計算は、積集合の要素が1個の場合と同様である。

5.3 実験

本論文では、3種類の実験を行う。最初に、反射光から分光反射率を得る際の最適な手法を選定するため、5.2節で述べた各方式に関し分光反射率の再現精度を評価する（実験1）。実験2, 3では、その結果に基づいて照明光色推定実験を数値シミュレーション（実験2）と実画像（実験3）を用いて行い、従来手法と推定精度を比較する。

5.3.1 実験1

実験1では、反射光から分光反射率を得る際の再現精度を5.2節で述べた3方式（擬似逆行列、一次重回帰分析、二次重回帰分析）に適用し比較する。

(1) 実験方法

分光反射率の再現精度を数値的に比較するため、既知の分光反射率を用い照明光は単純な一様分布の白色とみなして反射光の三刺激値を計算し、その値を入力として各手法によって得られる分光反射率と真値との誤差を比較する。

比較対象の手法は、擬似逆行列および一次と二次の重回帰分析とする。また、式(5.1)～(5.4)に基づいて分光反射率を直接計算する場合とさらに式(5.8)に示す関係式を用いて基底関数の係数から分光反射率を求める場合についても同様に再現精度を検証する。基底関数はCohenらの基底[26]（最大4次元）とVrhelらの基底[44]（最大7次元）とし、擬似逆行列の場合には、基底の次数を3にする場合と全ての次元数を用いる場合とを比較する。

(2) 実験データ

分光反射率は、様々な自然物（植物や人物肌等）、人工物（印刷用インク等）を測定した。色再現評価用標準物体色分光データベース（以下、物体色分光データベースと呼ぶ）（ISO/TR 16066）[34]の中から” typical sets”（全部で 235 種）を用いる。この物体色分光データベース（ISO/TR 16066）には 5 万を超える自然物、人工物の分光反射率が格納されており、” typical sets” は物体色分光データベース（ISO/TR 16066）内の要素を代表するものとして抽出された分光反射率である。なお、各分光反射率は 400～700 nm の範囲で 10 nm おきにサンプリングされている。

(3) 評価方法

分光反射率の計算値と真値に対し、2 つの観点で再現精度を評価する。画像上の色（画素値）から照明光色の推定においては、明るさが不定、即ち、照明光強度と被写体の明るさを分離できないことから色のみを扱う（照明光色としては色度の推定）こととし、分光反射率の再現精度評価においても明るさを同一視した観点で評価を行う。したがって、1 つめは、分光反射率をベクトルと見なした際の 2 ベクトルの角度で評価する方法であり、2 つめは、分光反射率を CIE 1976 UCS 色度図上の座標 u' v' （以下、 u' v' 色度図上の座標）に変換し、色度図上でのユークリッド距離（色差）で評価する方法である。前者は分光反射率の値そのものの再現であり、後者は色として人間が知覚する空間での再現に対応する。なお、基底関数を用いる場合は、基底関数の係数を用いて得られる分光反射率を計算値として評価する。

(4) 実験結果

表 5.1、表 5.2 はそれぞれ、擬似逆行列および重回帰分析を用いた分光反射率の再現精度であり、表中の数値は計算値と真値との類似度 ($\cos \theta$) および CIE 1976 UCS 色度図（以下、 u' v' 色度図）上の色差を示す。 $\cos \theta$ は 1 に近い程、 u' v' 色度図上の色差は 0 に近い程、真値に近いことを表す。両手法とも、分光反射率を直接計算する場合と基底関数の係数から分光反射率を計算する場合の結果も合わせて示す。

表 5.1、表 5.2 より、分光反射率自体の再現精度（類似度 $\cos \theta$ ）および人間が知覚する色（ u' v' 色度図上の色差）の両方の観点において、二次の重回帰分析で分光反射率を直接的に求める方式がもっとも誤差を小さく計算できることが分かった。

再現結果の一例を図 5.3 に示す。図 5.3 では、オリジナル分光反射率(a)を対象に Cohen の基底関数 3 次元を用いた場合の再現結果(b)、および、二次重回帰分析による分光反射率を直接的に計算した場合の再現結果(c)である。図 5.3 より、二次の重回帰によって再現された分光反射率の方が、擬似逆行列による場合と比較してより、オリジナルの分光反射率に近いことがわかる。以降、実験 2 および 3 における照明光色推定実験においては、共通物体における同一均一色領域の三刺激値から分光反射率を計算する際には二次の重

表 5.1 擬似逆行列を用いた場合

手法		$\cos \theta$	u' v' 色差
表面反射率直接		0.756	0.003
Cohen 基底関数	3次元	0.974	0.001
	4次元	0.974	0.001
Vrhel 基底関数	3次元	0.756	0.003
	7次元	0.935	0.003

表 5.2 重回帰分析を用いた場合

手法		$\cos \theta$	u' v' 色差
表面反射率直接	一次	0.974	0.002
	二次	0.979	0.001
基底関数利用	一次	0.877	0.074
	二次	0.878	0.074

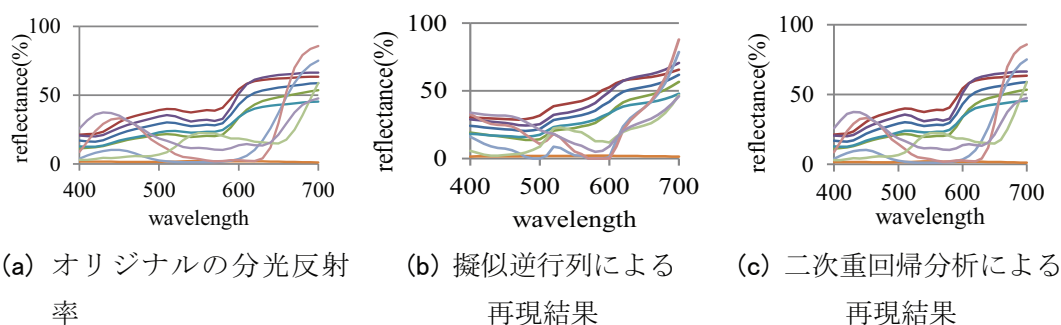


図 5.3 表面反射率の再現結果の比較

回帰分析を用いる。

5.3.2 実験 2

次に、数値シミュレーションで照明光色を推定し、従来手法と推定精度を比較する。比較対象の従来手法は、2 照明光下に共通する 1 種類の被写体からの照明光色推定手法である Finlayson らの手法[29]（以下、従来手法 1）および Kawakami らの手法[30]（以下、従来手法 2）とする。

(1) 実験方法と実験データ

分光反射率と照明光の分光特性からなる数値データを用いて、各照明光下に共通する物体における同一均一色領域から反射光の色の三刺激値を数値的に求め、その値を入力とし

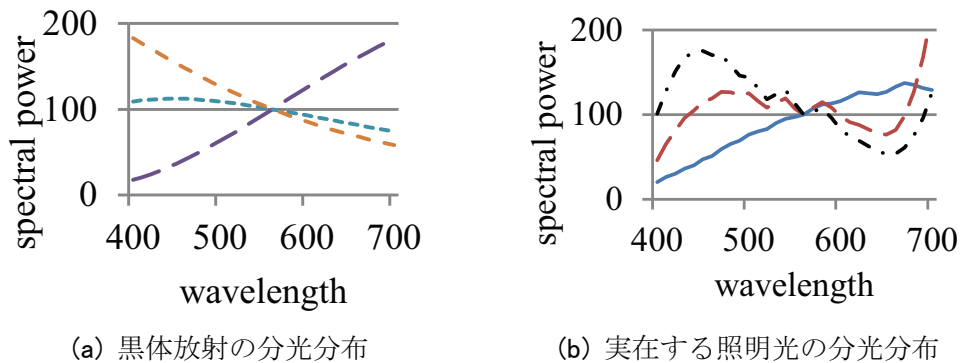


図 5.4 実験で使用する照明光の分光分布

て照明光色を推定し真値との誤差を比較する。

実験に用いる照明光には、色温度が 3000 K、6500 K および 10000 K の黒体放射（照明光グループ 1）と、実画像を用いた実験 3 で使用する実在する照明光の中から上記黒体放射の色温度に近い相関色温度をもつ、3571 K、6250 K および 11111 K の照明光（照明光グループ 2）を用いる。実験では、照明光グループ 1 に含まれる 3 種類の照明光の中から 2 種類選択する 3 通りの組み合わせ、照明光グループ 2 の照明光の中から 2 種類選択する 3 通りの組み合わせ、および、照明光グループ 1、2 からそれぞれ 1 種類ずつ選択する 9 通りの組み合わせについて行う。

図 5.4 に実験で用いた照明光グループ 1（黒体放射）およびグループ 2（実在する照明光）の各 3 種類の照明光の分光分布を示す。黒体放射を照明光とする場合(a)は滑らかな分光分布であるのに対し、実際の照明光(b)は細かい凹凸があることがわかる。なお、分光分布は 560nm を 100 に正規化し 0~200 までの範囲を表示する。また、図 5.5 に示すように黒体放射の色度（図中○で示す）と実験 3 で使用する照明光の色度（図中×で示す）は色度座標上で共に黒体放射軌跡の近傍に位置し、相関色温度に近いもの同士は色度座標上も近傍にあることがわかる。

分光反射率は、マクベスチャートの 24 色票の測定値と、物体色分光データベース (ISO/TR 16066) [34] から自然物の代表として “flower” (148 種) を用いる。マクベスチャートの測色値は、ユニカ・ミノルタ製の分光測色計 CM-700d を用いて測定した。図 5.6 に “flower” に含まれる分光反射率のサンプルを示す。

なお、二次の重回帰分析を用いて反射光から分光反射率集合への変換行列 (式(5.6)における行列 H) を作成する際の分光反射率は物体色分光データベース (ISO/TR 16066) [34] の “typical sets” 235 種類とし、個々の分光反射率に対応する反射光を計算する際の照明光は、24 種類の黒体放射と実験 3 で用いる画像セットで使用されている 11 種類の合計 35 種類を用いた。なお、黒体放射は、25~600 mired (1666~40000 K) の範囲で 25 mired おきの色温度をもつものとする。また、分光反射率集合の積集合を求める際の類似度判定

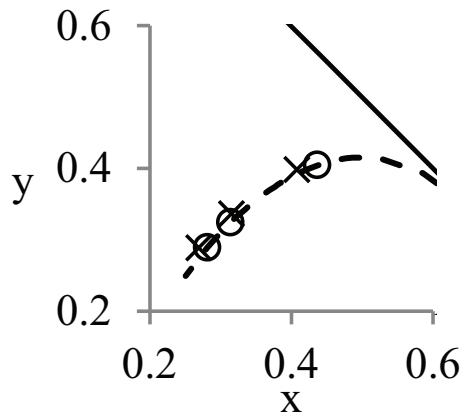


図 5.5 実験で使用した照明光の色

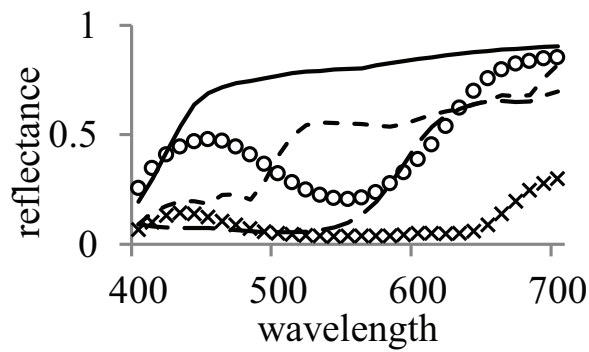


図 5.6 “flower” の分光反射率サンプル

の閾値 th (式(5.9))は予備実験の結果, 0.999 と定めた. 予備実験では, “物体色分光データベース (ISO/TR16066)” の “typical set” から任意に選択した 20 種類の分光反射率と黒体放射 3 種類 (相関色温度 3000 K, 6500 K および 10000 K) から数値シミュレーションにより分光反射率を作成し, 積集合に真値の照明光に対応する分光反射率が確実に含まれる類似度の閾値の最大値として求めた. th が小さいほど, 真値の照明光とは対応関係のない分光反射率が多くなり推定精度悪化の要因となる.

(2) 評価方法

推定照明光色と真値との均等色空間の u' v' 色度座標のユークリッド距離を用いて推定精度を評価する.

表 5.3 照明光色推定結果(黒体放射の照明光)

(a) Macbeth Chart				(b) "flower"			
照明光	提案手法	従来手法 1	従来手法 2	照明光	提案手法	従来手法 1	従来手法 2
3000K	0.032	0.052	0.0004	3000K	0.021	0.065	0.0006
6500 K	0.041	0.098	0.0004	6500 K	0.029	0.084	0.0007
10000 K	0.041	0.112	0.0005	10000 K	0.031	0.069	0.0008

表 5.4 照明光色推定結果(実在する照明光)

(a) Macbeth Chart				(b)"flower"			
照明光	提案手法	従来手法 1	従来手法 2	照明光	提案手法	従来手法 1	従来手法 2
3571K	0.026	0.049	0.381	3571K	0.026	0.051	0.381
6250 K	0.038	0.083	0.397	6250 K	0.035	0.076	0.396
11111 K	0.045	0.103	0.414	11111 K	0.054	0.090	0.414

(3) 実験結果

提案手法および従来手法 1, 2 での照明光色推定結果を表 5.3, 表 5.4 に示す. 表 5.3 は照明光グループ 1 (黒体放射の照明光) 内から 2 種類, 表 5.5 は照明光グループ 2 (実験 3 で用いる実在の照明光) 内から 2 種類の照明光を選択した場合の結果であり, マクベスチャート(a), "flower"(b)を表す. 同一照明光グループから 2 種類ずつ照明光を選択する条件を 3 通りのパターン (表 5.5 の場合は 3000 K と 6500 K, 6500 K と 10000 K, および 10000 K と 3000 K の色温度をもつ黒体放射の組み合わせ 3 通り) で実施しているため, 表中の数値は, 各パターンで得られた照明光色に対する真値との誤差の平均を表す.

提案手法と従来手法 1 との比較では, 照明光の違い, 被写体の違いによらず平均の推定誤差はそれぞれ 0.03 前後, 0.08 前後となり, 前者の方が安定して推定誤差が小さく, t 検定を行った結果, 5%棄却域で有意差がありと判定された.

一方, 提案手法と従来手法 2 との比較では, 照明光が黒体放射の場合, 従来手法 2 の推定誤差は照明光の色温度や被写体によらず 0.001 よりも小さい値になるが, 実在する照明光の場合には, 表 5.4 に示すように平均の推定誤差が 0.4 前後となり, 極端に推定精度が悪化する傾向がみられる.

表 5.5 照明光色推定結果（対象照明光全ての組み合わせ）

		(a) Macbeth Chart			(b) “flower”		
照明光		提案手法	従来手法 1	従来手法 2	提案手法	従来手法 1	従来手法 2
group 1	3000K	0.039	0.030	0.039	0.033	0.033	0.030
	6500 K	0.042	0.125	0.042	0.040	0.126	0.037
	10000 K	0.030	0.144	0.030	0.030	0.136	0.295
group 2	3571K	0.034	0.050	0.034	0.034	0.052	0.323
	6250 K	0.053	0.136	0.053	0.052	0.136	0.279
	11111 K	0.072	0.111	0.072	0.075	0.108	0.164

また、照明光グループ 1, 2 それぞれから 1 種類の照明光を選択した場合の結果を表 5.5 に示す。表 5.5 の数値は、表 5.3, 表 5.4 の場合と同様、すべての照明光の組み合わせで得られた推定照明光色と真値との推定誤差の平均値である。表 5.5 より、ほとんどの場合において提案手法の方が従来手法 1 および 2 よりも推定誤差が小さいことがわかる。(a) Macbeth Chart では、色温度 3000K の黒体放射を用いた場合、提案手法における平均の推定誤差は、従来手法 1 および従来手法 2 の平均の推定誤差に比較して大きい結果となっているが、t 検定を行った結果、5%棄却域で有意差無と判定された。同様に、(b) “flower” においても、色温度 3000 K および 6500 K の黒体放射を用いた場合に従来手法 2 の平均の推定誤差の方が小さい値となっているが、t 検定の結果、5%棄却域で有意差無と判定された。

5.3.3 実験 3

実験 3 では、実画像を対象に照明光色の推定実験を行い、実験 2 と同様、従来手法と推定誤差を比較する。

(1) 実験方法と実験データ

実験で用いる画像には、色恒常性の評価用画像[36]の中で鏡面反射成分の少ない画像セットを用いる。この画像セットの画像は γ 特性を off（即ち、 $\gamma = 1$ ）に固定したカメラで撮像され、カメラ入出力特性の計算に必要な情報や照明光（11 種類）の分光特性が画像と共に公開されている。評価用画像の照明光は黒体放射とは分光分布が異なるが色度座標上では黒体放射軌跡（色度図上を左右に横断する破線で示す曲線）の近傍にある（図 5.7）。

実験 3 では、シーン内で同一の分光反射率をもつ物体の同一均等色領域を用いて相異なる 2 種類の照明光下の画像における上記領域の色の XYZ 三刺激値から照明光色を推定す

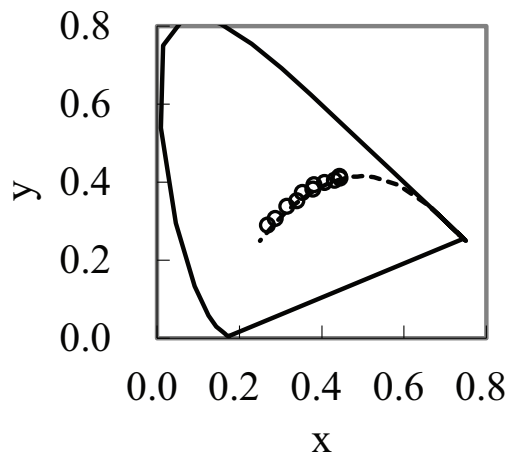


図 5.7 評価用画像の照明光の色

る．実験画像として，画像セットの中からマクベスチャートの画像（637×468 pixel）を用い，黒を除く 23 種類の各色票領域から 40×40 pixel の領域の平均値（RGB 画素値）を抽出し反射光の色とした．照明光色は画像セットで使われている 11 種類の照明光から 2 種類を選択する全ての組み合わせ，即ち， ${}_{11}C_2=55$ 通りについて行う．

また，分光反射率集合の積集合を求める際の類似度判定の閾値 th （式(5.9)）は実験 2 と同様，0.999 とする．

(2) 評価方法

実験 2 と同様，推定照明光色と真値との u' v' 色度図上のユークリッド距離を用いて推定誤差を計算する．なお，従来手法 2 は推定された黒体放射の色温度を色度座標に変換し推定誤差を求める．

(3) 実験結果

図 5.8 に提案手法および従来の 2 手法をマクベスチャート画像の個々の色領域に適用した際の平均の推定誤差を示す．同図より，提案手法の平均の推定誤差（図中に数値を示す）が 3 手法のうちでもっとも小さいという結果になった．

また，図 5.9 に 11 種類の照明光毎の平均の推定誤差を示す．横軸が各照明光の相関色温度（K），縦軸が推定誤差の平均を表す．11 種類の照明光のうち，分光分布は異なるが色温度が同じ照明光がそれぞれ 2 種類ずつ存在する．提案手法による推定誤差は，マクベスチャートの場合は 0.051～0.095，従来手法 1，2 では，それぞれ 0.121～0.187，0.154～0.278 である．このことから，照明光の色温度，分光分布によらず，提案手法による平均の推定誤差は従来手法より小さいこと，また，安定的に推定できていることがわかる．

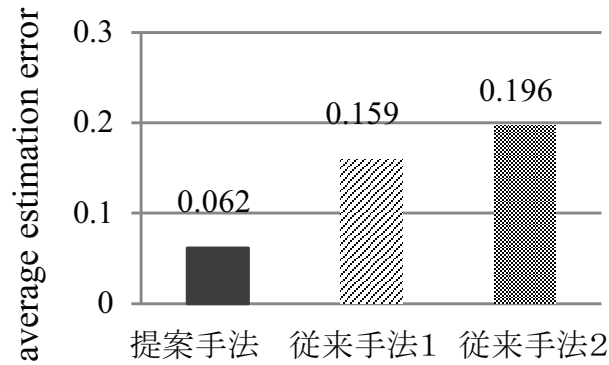


図 5.8 実験 3 の結果

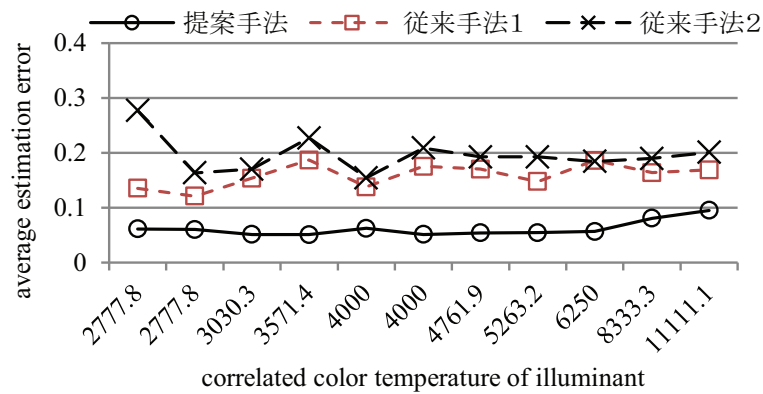


図 5.9 照明光毎の推定誤差

5.4 考察

5.4.1 従来手法との推定誤差比較と要因分析

本論文では、数値シミュレーションと実画像の両方に対して照明光が理想的な黒体放射の場合と実際の照明光の場合について照明光色を推定し従来手法と比較した。本節では推定誤差の精度に関して考察する。

提案手法と従来手法1との比較では、数値シミュレーションおよび実画像を用いた実験結果(表 5.3, 表 5.4 および図 5.8)より、照明光の分光分布や共通被写体の種類によらず、提案手法の方が小さい推定誤差で照明光色を推定できている。従来手法1での推定精

度が悪くなる要因として、標準照明光下への変換行列の対角成分同士が線形関係にあると近似していることが挙げられる。この近似によって変換行列による結果に誤差を含むことになり数値シミュレーションのようにノイズによる影響がない状況下であっても推定誤差が大きくなったと考えられる。

一方、従来手法 2 は、照明光が黒体放射である場合は照明光の色温度に関わらず、推定誤差が 0.001 未満であるのに対し（表 5.3）、黒体放射とは異なる分光分布である実際の照明光の場合には、推定誤差が 3 桁程度大きくなっている（表 5.4）。この傾向は数値シミュレーションだけでなく画像を用いた場合にも認められた（図 5.8）。[30]でも述べられているように、従来手法 2 は照明光を黒体放射としているため、理想的な黒体放射の分光特性との差異が大きくなるほど、推定精度が悪化する傾向にある。このことが実在する照明光を用いた場合に推定誤差が大きくなった要因と考えられる。実際、実験 2 で用いた実在する照明光は、図 5.5 に示すように黒体放射を照明光とする場合と色度は近いが分光分布は異なっている。

提案手法では、従来手法 1 のような近似や従来手法 2 での照明光の分光特性に関する制約を設けていないため、これら手法よりも推定誤差を小さく、かつ、照明光の色温度や被写体の種類にも依存しなかったと考えられる。

5.4.2 分光反射率集合生成における照明光種類の影響

提案手法では、反射光から分光反射率集合を取得する際の変換行列を分光反射率と反射光のセットを利用して生成する。分光反射率は、自然物と人工物の測定データから成る物体色分光データベース（ISO/TR 16066）[34]から” typical sets” 内の全 235 種とし、照明光は 25~600 mired の色温度をもつ黒体放射 24 種類と実験 3 の画像セットに使われている 11 種類の照明光の計 35 種類を用いた。本節では、変換行列を生成する際に使用した照明光の種類による推定精度への影響に関して考察する。

変換行列作成時に用いる照明光を、(1) 黒体放射 24 種類のみの場合、(2) 実験 3 の画像セットに使用されている 11 種類のみ、(3) 上記(1)+(2)の 35 種類の場合の 3 パターンとして、実験 2 の数値シミュレーションと同じ分光反射率を用いて照明光色推定を行った。

図 5.10 より、推定対象の照明光と同じ照明光が変換行列作成時に使用されている方（画像セット光源）が全く使用していない場合（黒体放射のみ）よりも推定誤差が小さい傾向にあることが分かる。また、画像セットでの光源のみの場合と、双方（黒体放射と画像セット光源）の場合の平均の推定誤差を比較すると前者の方がより推定誤差が小さい。このことは、変換行列作成時の照明光のバリエーションが少ない方がより精度よく照明光色を推定できる可能性があると考えられる。

実際には、黒体放射のみや画像セットの光源のみの環境で撮像された画像が対象となることは稀であるため、自然光の代表として黒体放射に加え、日常的に利用される人工照明（蛍光灯や白熱灯）を含めて変換行列を作成することでより安定的に照明光色を推定でき

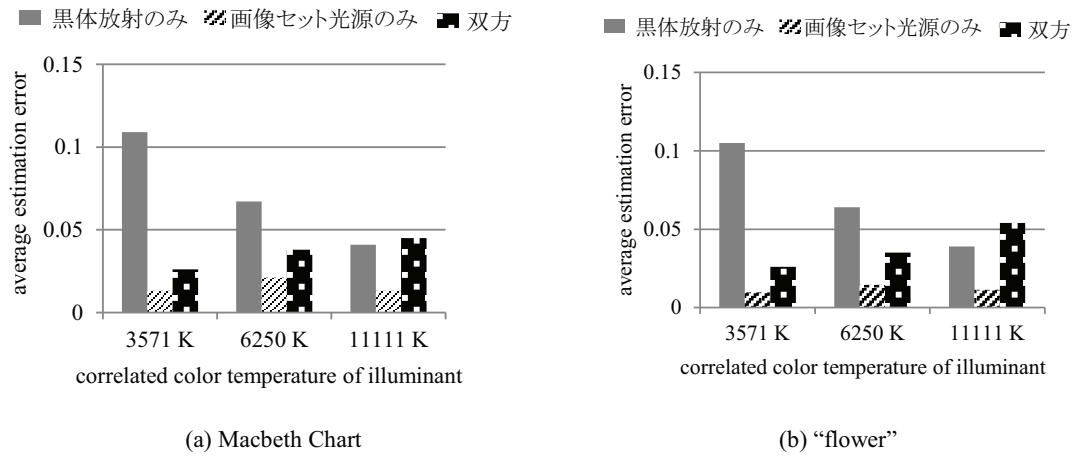


図 5.10 変換行列生成時の照明光種類による推定誤差の比較

ると考えられる。

5.4.3 物体における均一色領域の色推定の可能性

提案手法では、2 照明光下に共通する被写体領域の色から得られる分光反射率集合の積集合が、共通物体に対応することを利用して照明光色を推定する。そこで、照明光色推定の過程で得られる分光反射率集合の積集合に基づいて共通物体における同一均等色領域の色の推定可能性を検討する。

分光反射率の真値と推定値との精度比較を行うため、実験 2 の数値シミュレーションでの結果を用いる。図 5.11 に、分光反射率集合の共通部分として得られた分光反射率の色と真値との誤差 (u' v' 色度図上のユークリッド距離) を示す。共通物体の同一均等色領域における色の推定誤差は実験 2 での提案手法による照明光色の推定誤差と同程度であることが確認できる。このことから、分光反射率集合の共通部分として抽出されたものから共通物体の同一均等色領域の色を推定できる可能性があることが示唆される。

しかしながら、推定精度は 4.2 節で述べたように、分光反射率集合を得る際の変換行列の作成方法 (照明光の種類) に依存する可能性もあり、用いる照明光のバリエーションを考慮する必要があると考えられる。その場合には、基底関数を用いて存在し得る照明光を網羅的に表現することで上述のバリエーションを増やし被写体の色の推定精度を向上させることができると考えられる。

5.5 まとめ

本章では、2 照明光下に共通する 1 種類の物体の均一色領域から照明光色を推定する手法を提案した。提案手法では、反射光から分光反射率集合を得る際の変換行列を作成し、異なる照明光下の色から得られる個々の分光反射率集合の積集合を利用することによっ

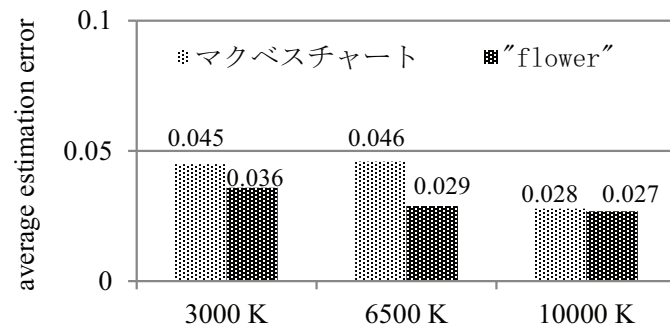


図 5.11 被写体の色の推定誤差

て照明光色を推定する。

数値シミュレーションおよび実画像を用いた実験により，照明光が理想的な黒体放射の分光分布以外の特性をもつ場合についても安定的に真値との誤差を小さく推定できるという観点で提案手法の有効性を示した．また，分光反射率集合の共通部分を用いて被写体の色の推定可能性も確認できた．

しかしながら，考察で述べたように，反射光から分光反射率を得る際の変換行列の作成方法についてはより詳細な検討が必要であると考えられる．また，各画像に共通する物体の均一色領域の自動検出・抽出法についても検討が必要である．

第6章 結論と今後の展望

6.1 結論

本研究では、鏡面反射を持たない画像から照明光色を推定する手法に関し、1枚の画像に対しては、画像中に含まれる均一色領域の数が多数では無い場合を対象とする手法、異なる照明光下の画像が2枚以上の場合には、各画像に共通する同一分光反射率を有する均一色領域が存在する場合の手法についての研究を行った。特に、人間が様々な照明光下でも安定的に物体の色を知覚する際に灰色仮説（シーン中に存在する全ての物体の色を平均すると灰色になるとする仮説）を利用している可能性を示唆する心理物理実験の結果[31]に基づいて、画像1枚のみを用いる手法では画像全体ではなく灰色仮説を満たす色を抽出する（局所灰色仮説）ことで既存手法[20][21]における課題を解決した。また、照明光色が異なる画像を用いる場合には、各画像に共通する物体があることを利用する。共通物体が複数種類存在する場合には、上述の局所灰色仮説のコンセプトを利用し、1種類しか存在しない場合には、既存手法[29][30]では適用条件を緩和すると同時に推定精度を向上させた。

第1章では、画像の照明光色を推定する手段を分類し、各手段の特徴を整理することにより本研究が汎用的に様々な画像に適用可能であることを述べ、また、照明光の種類を3種類に分類した上で本論文が対象とする照明光色が日常的によく利用される照明を対象にしていること、さらには、その色が色空間内で黒体放射軌跡上にほぼ乗っているという制約があることを説明した。従来では推定精度が十分に取れなかった、画像中に含まれる均一色領域数が少ない場合の画像にも適用できる手法を提案するという本研究の目的を明らかにした。

第2章「画像1枚による色選択を用いる局所灰色仮説」では、画像中から灰色仮説を満たす色を選択する際に、色の三属性の一つである色相環において、互いに反対色の関係にある色同士の平均が灰色になるという性質があることを利用する。そのため、画像の色を類似の色相からなる色相カテゴリに分類することで、反対色の関係にある色相カテゴリから色選択を行うことで灰色仮説を満たす色の組み合わせを抽出する。さらに、灰色仮説を満たすかどうかの判定条件として、得られた複数の色の平均が黒体放射軌跡の近傍にあること、および、新しく色を追加することによって得られる平均の色のばらつきが小さくなることの、2つの条件を利用する。数値シミュレーションおよび実画像を用いた実験により、灰色仮説を満たす画像、満たさない画像の両方に対しても、従来手法よりも精度良く

照明光の色を推定できることを示した。

第3章「仮想的色追加による局所灰色仮説」では、画像中の色が特定の色相に偏っている等によって灰色仮説を満たす色の組み合わせを選択することができない場合に、画像が取得されたシーン中に存在し得る色を仮想的に追加することによって画像から局所灰色仮説により照明光色を推定する手法を提案する。シーン中に存在する色には、様々な照明光下における様々な物体領域からの反射光の色の取り得る範囲である、color gamut を用いた。Color gamut は照明光毎に得られる色の範囲であるため、画像に適用する際には、低彩度の色領域が画像上で照明光色を反映した色になるという特性を利用し、低彩度の色をもつ物体領域における反射光の取り得る範囲として低彩度 gamut を定義した上で、照明光色に対応する各低彩度 gamut に含まれる画像中の色数に基づいて複数の照明光色候補を抽出する。各照明光色候補に対して、2章で提案の局所灰色仮説を適用し、得られた結果と照明光色候補との色差が最も小さいものを最終的な照明光色として推定する。実画像に適用した結果、画像の色が特定の色相に偏っている場合であっても反対色の組み合わせを抽出することができ、最終的に従来手法よりも推定誤差を小さく照明光色を推定できることを示した。

第4章「相異なる照明光下画像の局所灰色仮説適用条件」では、照明光色の異なる2枚の画像に共通して存在する同一の分光反射率をもつ物体が複数種類、存在する場合に、これらの色を用いて灰色仮説の適用可否を判定する方法を提案した。各画像に共通する物体領域からの反射光の色と灰色仮説成立条件を定式化した。相異なる照明光下における共通物体からの平均の反射光が共に、黒体放射軌跡上の同色知覚領域に含まれる場合には、共通物体の領域では局所灰色仮説が成立し、共通物体領域からの反射光の平均を照明光の色として推定できることを数値シミュレーションによって示した。

第5章「相異なる照明光下画像における1同色領域の利用」では、照明光色の異なる2枚の画像に共通して存在する同一の分光反射率をもつ物体が1つしか存在しない場合に照明光色を推定する手法を提案した。このような場合、共通する色が灰色の物体である以外は、第2~4章で述べてきた局所灰色仮説を適用できないため、共通する物体の色を分光反射率で表現し、さらに、様々な照明光下における物体の分光反射率と反射光との関係を二次の重回帰分析によって得られる変換式を用いることによって、照明光色を推定する手法を提案した。数値シミュレーションでは、照明光が黒体放射のみ、実在する照明光のみ（照明光の色は黒体放射軌跡の近傍にある）、および、黒体放射と実在する照明の組み合わせの3パターンで行い、実在する照明光を用いる場合には提案手法の方が他2従来手法に比較して推定誤差が小さいこと、および、実画像を用いた実験でも同様の傾向があることを示した。

本論文で提案した手法は、1枚の画像からの照明光色推定で2手法（2章、3章）、共通物体をもつ相異なる照明光下の画像からの照明光色推定で2手法（4章、5章）である。1枚の画像からの照明光色推定では、1.3節で説明したように、従来は、画像中には様々な

色をもつ物体が多く存在することを前提とした手法が提案されており、これら手法を色数の少ない画像に適用すると推定誤差が大きくなるという課題があった。2章、3章で提案する手法は、上述の、色数が少ない画像にも適用できる手法であり、局所灰色仮説という画像中から部分的に灰色仮説を満たす色を選択することによって照明光色を推定する。2章と3章の違いは、画像中に灰色仮説を満たす色の組み合わせが存在するかが適用時の判断となる。即ち、画像の色が特定の色相に偏っているために画像中に灰色仮説を満たす色が存在しない場合には、3章で提案した手法を適用し、逆に、画像中に灰色仮説を満たす色が存在する場合には2章で提案の手法を適用する。3章の考察で述べたように、画像中に灰色仮説を満たす色が存在する場合に2章で用いたものと同じ画像セットを3章の手法に適用すると、逆に色バランスが崩れることによって2章で提案の手法の方が誤差を小さく推定できるという結果になった。

一方、異なる照明光下の画像を用いる手法では、画像1枚からの推定手法に比較すると従来手法の数は多くなく、さらに、既手法では適用条件に制約があり、また、モデル化における近似に無理があることによって推定誤差が大きくなるという課題があった。4章では、共通する物体が2種類以上ある場合、5章では1種類のみしかない場合について、前者は2、3章と同様に局所灰色仮説のコンセプトを利用し、後者では、共通する物体の取り得る範囲を分光反射率で表現することで、黒体放射に限らず実在する他の高演色性人工光に対しても従来を上回る精度での推定を可能にした。このように本章で提案した手法は、従来手法では対応できなかった範囲であるか、もしくは、従来手法が存在していても適用条件に制約があったり、推定精度が悪い等の場合に対応できるものである。

6.2 今後の展望

まず、各章で提案した個々の手法に関する課題を述べる。

2章で提案の「画像1枚による色選択を用いる局所灰色仮説」での残課題は、反対色の組合せを取得する際に用いた色相カテゴリへの最適な分割数についてである。2章では、黒体放射軌跡を挟んで上側と下側にそれぞれ2つずつ類似の色相をもつ色相カテゴリに分割した。反対色のペアを選択するには、黒体放射軌跡の上側、下側、共に同数である必要があり、分割数を増やすことに対する推定精度への影響および画像の色分布による最適な分割数決定法についても検討が必要であると思われる。

3章で提案の「仮想的色追加による局所灰色仮説」での残課題は、低彩度 gamut および高彩度 gamut のサイズの決定方法、低彩度 gamut に基づいて抽出する照明光候補数の最適な決定法、さらには、高彩度 gamut 内で色追加する方法（3章ではランダムに追加）である。

4章で提案の「相異なる照明光下画像の局所灰色仮説適用条件」での残課題は、照明光の異なる各画像に共通する物体における均一色領域の様々な組み合わせを適用しても灰色仮説成立と判定されなかった場合の対処である。この課題への対処として5章に述べる

1 色の場合を提案する.

5 章で提案の「相異なる照明光下画像における 1 同色領域の利用」での残課題は、反射光から分光反射率を得る際の変換行列の作成方法および均一色領域の自動検出および抽出法である.

次に、照明光色推定手法全体としての残課題を述べる.

1 つめは本論文で提案した各手法を適用する際の判定手法である. 即ち、任意に画像が与えられた場合 (1 枚ないし複数枚)、どの手法を適用すれば最適な結果が得られるかについての判定条件が必要であると考えられる.

2 つめは適用シーンの拡大である. 序論で述べたように、本論文では、1 画像中に 1 照明光という条件での照明光色推定法を提案しているが、実シーンを考えると、屋外・屋内にかかわらず、複数種類の照明光が関わる場合にも適用可能な手法についても検討が必要である. さらに、LED や遊技場等で利用されているような演色性の低い人工光への対応も重要である. また、空間的に不均一な照明に対しても適用できる手法も必要であると考えられる.

最後に、今後の展望について述べる. 照明光色推定は、画像処理・合成を行う上での要素技術であり、様々な利用シーンへの適用が想定される. 画像処理の前処理として照明光色を除去した画像を生成するだけでなく、コンシューマの手持ちのカメラ (デジタルカメラや携帯電話等のモバイル機器付属のカメラ等) で、日時やカメラアングルも異なる状況で撮像された画像を合成して 3 次元モデルを生成する際の自動色補正、大量の画像データ (ビックデータ) を用いた検索において、照明光色の影響を除去することによって自動的メタデータ付与へも貢献が期待される. また、照明光色を除去し、別な照明光下の画像に変換することによって、着せ替えシミュレーションや建築、インテリア分野でのシミュレーションへの適用も期待される.

謝辞

本論文を執筆する機会を与えて頂き、ご多忙中にも関わらず熱心にご指導いただいた大谷淳教授に心よりお礼申し上げます。

また、本論文をまとめるにあたり、ご指導いただき、ご審査および適切なご助言をいただきました、坂井滋和教授、河合隆史教授、および、鹿児島大学 大塚作一教授に感謝いたします。

さらに、本研究を進めるにあたって議論いただいた、芝浦工業大学 米村俊一教授に感謝いたします。

本研究は、日本電信電話株式会社 NTT メディアインテリジェンス研究所（旧 NTT ヒューマンインタフェース研究所、旧サイバースペース研究所）において進めてきたものであり、NTT メディアインテリジェンス研究所 画像メディアプロジェクト 奥田英範マネージャ、高臨場映像通信技術グループ小島明グループリーダーには、研究方向性に関しご指導いただき、また、共同研究者の八尾泰洋研究員には研究内容に関する適切なコメントをいただき感謝しております。また、画像メディアプロジェクト員の皆様にも日頃からの議論に参加いただき感謝しております。

本研究を進める過程で、国際情報通信研究科の教員・職員の皆様、および大谷研究室所属の皆様感謝します。

参考文献

- [1] <http://www.color.org/index.xalter>
- [2] 武下哲也, “撮像装置”, 特開 2002-290988.
- [3] 須藤靖, “白バランス制御方法及び装置”, 特開平 11-205812.
- [4] <http://www.konicaminolta.jp/instruments/products/light/cs100a/index.html>.
- [5] 大石岳史, 大蔵苑子, 川上玲, 阪野貴彦, 池内克史., “全方位カメラを用いた光源環境と対象物の同時撮影法に基づく人物モデルのMRシステムへの重畳”, MIRU2009 OS13-4, pp. 398-405, 2009.
- [6] 大蔵苑子, 川上玲, 池内克史, “光源環境と対象物の同時撮影による屋外物体の拡散反射率推定とその評価”, 情報処理学会論文誌 CVIM, Vol. 2, No. 1, pp. 32-41 2009.
- [7] Debevec P.E. “Rendering Synthetic Objects into Real Scenes: Bridging Traditional and Image-based Graphics with Global Illumination and High Dynamic Range Photography”, Proceedings of SIGGRAPH'98 pp.189-198, 1998.
- [8] G.J. Klinker, S.A. Kanade, “Using a color reflection model to separate highlights from object color”, Proceedings of the First International Conference on Computer Vision, pp.145-150, 1987.
- [9] S.Tominaga, “Dichromatic reflection models for a variety of materials”, Color Research and Application, vol. 19, no. 4, pp.277-285. 1994.
- [10] A. Gijsenij, T. Gevers, “Color Constancy using Natural Image Statistics”, Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition, pp.1-8, 2007.
- [11] D.A. Forsyth, “A novel algorithm for color constancy”, International Journal of Computer Vision, vol.5, no.1, pp.5-36, 1990.
- [12] G.D. Finlayson, “Color in perspective”, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.18, no.10, pp.1034-1038, 1996.
- [13] G.D. Finlayson, S.D. Hordley and I. Tastl, “Gamut constrained illuminant estimation”, International Journal of Computer Vision, vol.67, no.1, pp.93-109, 2006.
- [14] S.Tominaga, B.A. Wandell, “Natural scene-illuminant estimation using the sensor correlation”, Proceedings of IEEE, vol.90, no.1, pp.42-56, 2002.
- [15] D.H. Brainard, W.T. Freeman, “Bayesian color constancy,” Journal of the Optical Society of .

- America., vol.14, no.7, pp.1393-1411 (1997).
- [16] C. Rosenberg, M. Hebert, and S. Thrun, "Color constancy using KL-divergence", Proceedings of International Conference of Computer Vision, pp.239-246, 2001.
- [17] S. Hirose, T. Suenaga, K. Takemura, R. Kawakami, J. Takamatsu, and T. Ogasawara, "Surface color estimation based on inter- and intra-pixel relationships in outdoor scenes", Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition, pp.271-278, 2010.
- [18] R. Kawakami, K. Ikeuchi, "Color estimation from a single surface color", Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition, pp.635-642, 2009.
- [19] Land, E.H. , "The retinex theory of color vision", Scientific American, vol.236, no.6, pp.108-128, 1977.
- [20] R. Gershon and A.D. Jepson, "The computation of color constant descriptors in chromatic images", Color Research and Application, vol.14, no.6, pp.325-334, 1989.
- [21] G. Buchsbaum, "A spatial processor model for object colour perception", Journal of the Franklin Institute, vol. 310, no.1, pp.1-26, 1980.
- [22] Marc Ebner, "Color constancy based on local space average color," Machine Vision and Applications, vol.11, no.5, pp.283-301, Jul., 2009.
- [23] M. Ebner, " Color constancy using local color shifts", Proceedings of the 8th European Conference on Computer Vision, vol.3023, pp.276-287, 2004.
- [24] J. van de Weijer, T. Gevers, and A. Gijsenij, "Edge-Based Color Constancy", IEEE Transaction of. Image Processing, vol.16, no.9, pp.2207-2214, 2007.
- [25] D.B.Judd, D.L.MacAdam and G.Wyszecki, "Spectral distribution of typical daylight as a function of correlated color temperature", Journal of the.Optical.Society of America, vol.54, no.8, pp.1031-1036, 1964.
- [26] J. Cohen, "Dependency of the spectral reflectance curves of the Munsell color chips", Psychonomic Science, vol.1, pp.369-370, 1964.
- [27] L.T. Maloney, B.A. Wandell, "Color constancy: A method for recovering surface spectral reflectance", Journal of the.Optical.Society of America A, vol.3, no.1, pp.29-33, 1986.
- [28] 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光色と物体色の復元”, 電子情報通信学会論文誌 A Vol. J76-A, No. 12, pp.1778-1786, 1993.
- [29] G.D. Finlayson, B.V. Funt and K. Barnard, “Color Constancy Under Varying Illumination,” Proceeding of IEEE International Conference on Computer Vision, pp.720-725, 1995.

- [30] Rei Kawakami, Jun Takamatsu, and Katsushi Ikeuchi, "Color constancy from blackbody illumination," *Journal of the Optical Society of America A*, Vol.24, No.7, pp.1886-1893 (2007).
- [31] 川村春美, 乾敏郎, 鈴木智, 徳永幸生, " カラー画像における灰色仮説の適用条件と照明光の推定", *電子情報通信学会論文誌 (D)*, vol. J80-D-II, no. 5, pp. 1046-1056 (1997).
- [32] 川村春美, 米村俊一, 大谷淳, 松浦宣彦, " 色相に着目した灰色仮説に基づく照明光推定法の一提案", *情報処理学会技術報告 AVM 研報*, vol.2010-AVM-70, no.6, pp.1-6, 2010.
- [33] 川村春美, 乾敏郎, 鈴木智, 徳永幸生, "複数枚の画像を用いた, 灰色仮説に基づく照明光推定法", *電子情報通信学会技術報告*, PRMU96-64, pp.37-42, 1996.
- [34] ISO/TR 16066, *Graphic technology-Standard object colour spectra database for colour reproduction evaluation (SOCS)*, 2003.
- [35] MacAdam, D.I, "Visual sensitivities to color differences in daylight", *Journal of the Optical Society of America.*, vol.32, no.5, pp.247-274, 1942.
- [36] http://www.cs.sfu.ca/~colour/data/colour_constancy_test_images/index.html
- [37] 嶋野法之著, " 色彩工学の基礎と応用", pp. 130-134, コロナ社, 東京, 2009.
- [38] 川村春美, 米村俊一, 大谷 淳, 松浦宣彦, " 反対色の特性を利用した色選択による灰色仮説判定に基づくカラー画像からの照明光推定法, " *電子情報通信学会論文誌 (D)*, vol. J94-D, no. 8, pp. 1346-1358, Aug. 2011.
- [39] S.M. Newhall, D. Nickerson and D.B. Judd, "Final report of the O.S.A. subcommittee on the spacing of the Munsell colors," *Journal of the Optical Society of America*, vol.33, no.7, pp. 385-418, Jul. 1943.
- [40] http://xritephoto.com/ph_product_overview.aspx?ID=938
- [41] 日本工業規格 JIS Z8729, "L*a*b*表色系およびL*u*v*表色系による物体色の表示方法"
- [42] 日本工業規格 JIS Z8725, "光源の分布温度及び色温度・相関色温度の測定方法"
- [43] 津村徳道, 羽石秀昭, 三宅洋一, "重回帰分析によるマルチバンド画像からの分光反射率の推定", *光学*, vol.27, pp.384-391 (1998)
- [44] M. J. Vrhel, R Gershon, and L. S. Iwan, "Measurement and Analysis of object reflectance spectra," *Color Research and Application*, Vol.19, No.1, pp.4-9, Feb. 1994.

研究業績

論文誌

- (1) ○川村春美, 八尾泰洋, 米村俊一, 大谷淳, 小島明, “相異なる照明光下の固定カメラ画像からの照明光色推定法”, 画像電子学会誌, Vol. 43, No. 2 (掲載決定)
(本論文 5 章に関連)
- (2) ○川村春美, 米村俊一, 大谷淳, 小島明, “高彩度・低彩度 gamut と反対色特性を利用した灰色仮説ベースの照明光色推定法”, 電子情報通信学会論文誌 D Vol. J96-D, No. 12, pp. 3079-3089 , Dec. 2013.
(本論文 3 章に関連)
- (3) ○川村春美, 米村俊一, 大谷淳, 松浦宣彦, “反対色の特性を利用した色選択による灰色仮説判定に基づくカラー画像からの照明光推定法”, 電子情報通信学会論文誌 D Vol. J94-D, No. 8, pp. 1346-1358, Aug. 2011.
(本論文 2 章に関連)
- (4) ○川村春美, 乾敏郎, 鈴木智, 徳永幸生, “カラー画像における灰色仮説の適用条件と照明光の推定”, 電子情報通信学会論文誌 D-II Vol. J80-D-II, No. 5, pp. 1046-1056 , May 1997
(本論文 4 章に関連)

国際会議 (査読付き)

- (5) ○Harumi Kawamura, Shunichi Yonemura, Jun Ohya, Akira Kojima,
“Gray-World-Assumption-based Illuminant Color Estimation using Color Gamuts with High and Low Chroma,” SPIE Electronic Imaging 2013, Vol.8652, pp. 86520C-1-86520C-8, Feb. 2013
(本論文 3 章に関連)
- (6) ○Harumi Kawamura, Yasuhiro Yao, Shunichi Yonemura, Jun Ohya, Akira Kojima,
“Estimating Object Colors in Outdoor Scenes with same object region but different illuminants,” AIC (International Colour Association) Interim Meeting 2012, pp.582-585, Sep. 2012
(本論文 5 章に関連)

- (7) ○Harumi Kawamura, Shunichi Yonemura, Jun Ohya, Norihiko Matsuura, “Illuminant Color Estimation by Hue Categorization Based on Gray World Assumption,” SPIE Electronic Imaging 2011, Vol. 7873, pp.787312-1-787312-12, Jan. 2011
(本論文 2 章に関連)

国内研究会

- (8) 川村春美, 米村俊一, 大谷淳, 小島明, “高彩度および低彩度 gamut を用いた灰色仮説に基づく照明光色推定の一提案”, 情報処理学会技術研究報告, オーディオビジュアル複合情報処理研究会, Vol. 2013-AVM-80 No. 3 pp. 1-6, 2013. 02.
- (9) 川村春美, 米村俊一, 大谷淳, 松浦宣彦, “色相に着目した灰色仮説に基づく照明光推定法の一提案”, 電子情報通信学会論文誌 D Vol. J96-D, No. 12, pp. 3079-3089, Dec. 2013. 情報処理学会技術研究報告, オーディオビジュアル複合情報処理研究会, 2010-AVM-70, No. 6, pp. 1-6 2010. 08.
- (10) 川村春美, 乾敏郎, 鈴木智, 徳永幸生, “複数枚の画像を用いた, 灰色仮説に基づく照明光推定法”, 電子情報通信学会技術研究報告, ヒューマン情報処理, Vol. 96, No. 306, pp. 37-42 1996. 10

国内研究会

- (11) 川村春美, 米村俊一, 大谷淳, 小島明, “低彩度および高彩度色領域を用いた灰色仮説に基づく照明光色推定法の一提案”, 画像電子学会 第 40 回年次大会, R7-1, 2012. 06.
- (12) 川村春美, 米村俊一, 大谷淳, 松浦宣彦, “灰色仮説に基づく照明光推定法の提案”, 画像電子学会 第 39 回年次大会, R2-3, 2011. 06.
- (13) 川村春美, 乾敏郎, 鈴木智, 徳永幸生, “同一照明光下の画像を用いた灰色仮説に基づく照明光推定”, 電子情報通信学会 総合大会講演論文集. 情報システム(2), p. 429, 1997. 03
- (14) 川村春美, 乾敏郎, 鈴木智, 徳永幸生, “照明光推定における灰色仮説の適用条件”, 電子情報通信学会 ソサエティ大会講演論文集 情報システム, p. 390, 1996. 09

その他業績

論文誌

- (15) 石井亮, 小澤史朗, 川村春美, 小島明, “窓越しインタフェース MoPaCo による指示作業への効果検証”, 電子情報通信学会論文誌 D Vol. J96-D, No. 12, pp. 3044-3054 Dec. 2013.
- (16) 石井亮, 小澤史朗, 川村春美, 小島明, 中野由紀子, “映像コミュニケーションにおける窓越しインタフェース MoPaCo によるテレプレゼンスの増強”, 電子情報通信学会論文誌 D Vol. J96-D, No. 1, pp. 110-119, Jan. 2013. 他 3 件

国際会議 (査読付き)

- (17) Ayumi Matsumoto, Dan Mikami, Harumi Kawamura, Akira Kojima, “Proficiency estimation for motor learning assistance by motion variability obtained from single camera input”, Proceedings of icSPORTS 2013, First International Congress on Sports Science Research and Technology Support, pp.147-153, Sep. 2013.
- (18) Yasuhiro Yao, Harumi Kawamura, Akira Kojima, “Hand as a Shading Probe,” SIGGRAPH 2013, Jul. 2013
- (19) Yasuhiro Yao, Harumi Kawamura, Akira Kojima, “Shading Derivation from an Unspecified Object for Illumination Consistency,” 21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2012), pp.57-60, Nov. 2012
- (20) Yasuhiro Yao, Harumi Kawamura, Akira Kojima, “Acquiring Perceptually Diffuse Shading from General Objects in Actual Scenes,” SIGGRAPH 2012, Aug. 2012.
- (21) Ayumi Matsumoto, Xiaojun Wu, Harumi Kawamura, Akira Kojima, “3D Motion Estimation of Human Body from Video with Dynamic Camera Work,” Multimodal Pattern Recognition of Social Signals in Human-Computer-Interaction, Lecture Notes in Computer Science Vol. 7742, pp. 71-78, Nov. 2012.
- (22) Harumi Kawamura, Sadayuki Hongo, Osamu Yoroizawa, “Region-based Dichromatic Estimation Method for Illumination Color Estimation”, Proc. SPIE 2094, Visual Communications and Image Processing '93, pp.1249-1258, Oct. 1993. 他 7 件

国内研究会

- (23) 林田智樹, 高橋昌平, 奥屋武志, 大谷淳, 川村春美, “映像合成のための RGB 画像からの 3 次元復元結果と Depth 画像との比較による光源方向推定法に関する研究”, 電子情報通信学会技術報告 画像工学研究会, Vol.12, No. 473, pp.145-150, 2013.03
- (24) Ryan Jones, Yasuhiro Yao, Harumi Kawamura, Akira Kojima, “Obtaining Shading Properties from Multi-Viewpoint Images,” 電子情報通信学会技術報告 マルチメディア・仮想環境基礎研究会, Vol.112, No. 386, pp.275-280, 2013.01 他 22 件