

博士論文審査報告書

論文題目

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

申請者

氏名

川村

春美

Harumi

Kawamura

専攻およびプロ
ジェクト研究名
(課程内のみ)

国際情報通信学専攻
画像処理研究Ⅱ

2014年2月

近年のインターネットの普及とカメラ付携帯電話の利用拡大に伴い、誰もがデジタル画像を容易に取得・加工できるようになり、複数の実写画像の合成や実写画像とCG (computer graphics) 画像の合成等、高度な加工も行われるようになってきた。それに伴い、画像のリアリティに対するユーザの要求レベルも向上してきた。また、ロボットや自動監視等の画像処理をベースとするシステムにより様々な認識処理を行うためには、照明条件を正確に取得することが、処理の安定性や頑健性にとって必須と言える。これらの実現のためには、照明条件についての種々の情報を画像から得る必要がある。その中で、本論文では、画像から照明光の色を推定する方法を扱っている。

従来の照明光色推定手法は、画像1枚から推定する手法と、異なる照明光下で撮影された、共通の均一色領域（均一な色から構成される領域）を含む2枚の画像を用いる手法に大別される。前者は画像に様々な色が含まれることが前提であるため、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。後者は適用条件の制約や近似手法に問題があり、現時点では推定精度の高い手法は見当たらない。本論文では、(A) 1枚の画像に含まれる色数が少ない場合にも適用可能な照明光色推定手法、(B) 異なる照明光下で撮影された、共通の均一色領域を含む2枚の画像から従来法を上回る精度で照明光色を推定する手法の実現を目指している。

照明光（自然光と家庭等で使用される人工光）の色は色空間中で黒体放射軌跡の近傍にあるという点と、人間が様々な照明光下で物体の色を知覚する際にはシーン全体の平均の色を照明光色推定の手掛かりとする可能性があるという点に、本論文では着目している。上記知覚特性は、シーン中の全ての物体の色を平均すると灰色になるという灰色仮説に基づいている。従来、灰色仮説を利用した照明光色推定手法も提案されたが、仮説を満たさない画像の推定精度が低いという課題があった。本論文では照明光色が黒体放射軌跡の近傍にあることを制約条件とし、灰色仮説を満たす色の組み合わせを抽出することで局所的に灰色仮説が成立する条件を導き、(A)と(B)の課題を解決する手法を提案している。即ち、(A)の場合、局所的に灰色仮説を満たす色の組み合わせが、(A-1) 画像中に存在する場合と、(A-2) 画像中に存在しない場合に対応する手法を提案し、(B)の場合、各画像に共通する均一色領域が、(B-1) 2種類以上存在する場合と、(B-2) 1種類のみの場合の手法を提案している。以下、(A-1) から (B-2) の4つの提案手法の概要を述べる。

(A-1) 従来の灰色仮説による照明光色推定において推定精度を悪化させるのは、画像における色の平均が灰色ではなく、灰色仮説が不成立となる場合である。そこで本論文では、局所的に灰色仮説が成立する色を選択し、照明光色を推定する方法を提案している。反対色の関係にある2つの色を平均すると灰色になる。従って、ある照明光下では、反対色の平均の色は、その照明光の色に対応するので、黒体放射軌跡上に存在する。しかし、灰色仮説を満たす反対色を画像中で見出すのは不可能なので、本論文では、黒体放射軌跡より上（下）の色は照明光が変化しても上（下）の範囲のみで変化する性質を利用している。即ち、反対色の関係にある2色は、黒体放射軌跡の上下の範囲に分離されるので、上下の範囲にある色を1つずつ選択し、その平均が黒体放射軌跡に近いかなを判定し、照明光色を推定している。

(A-2) 画像における色の分布が特定の色に偏っている場合には、反対色の関係にある色を選択できないことが頻繁に起こり、(A-1) の手法は使用できない。本論文では、画像中に存在し得る色を仮想的に追加した後に、(A-1) の局所灰色仮説を適用する方法を提案している。即ち、種々の照明光下の色gamut (物体からの反射光に対応する色が存在し得る範囲) 内で色を仮想的に

追加してから、(A-1)の方法で照明光色を推定する。この推定された色と、その色 gamut の色との誤差最小の基準により、照明光の色を推定している。

(B-1) 2つの異なる色の照明光下で撮像された、共通する均一色領域を複数個含む2枚の画像の場合、局所的に灰色仮説を適用することにより2つの照明光色を推定する手法を提案している。異なる照明光下の2枚の画像に共通する複数の均一色領域の平均の色が共に黒体放射軌跡の近傍に位置する場合には局所的灰色仮説が成立することを証明し、この仮説が成立する場合には、画像毎に前述の平均の計算に用いた均一色領域の平均値を照明光色として推定している。

(B-2) 2つの異なる色の照明光下で撮像された、共通する均一色領域を1つしか含まない2枚の画像の場合、共通の均一色領域が灰色である場合を除き局所灰色仮説を適用できない。関連する従来手法では、手法の定式化において非線形空間を線形と仮定することによる原理的な誤差や、照明光が黒体放射の分光分布にほぼ一致することを前提としているため、実画像に適用すると推定誤差が大きくなるという問題があった。そこで本論文では、2枚の画像それぞれの照明光色を正しく推定すれば、2枚の画像中の均一色領域の分光反射率が一致するという原理に基づく方法を提案している。

本論文は申請者が NTT の研究所に勤務している期間および本研究科博士課程学生として在学している期間に行った研究をまとめたものである。以下、本論文の各章の概要を述べ、評価を加える。

第1章「序論」では、研究の背景、従来に関連研究、本論文の目的と提案手法の概要、本論文の構成を述べている。

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、前述の(A-1)の内容を詳述している。色空間において、類似の色をクラスタリングして統合することにより色空間を局所領域(色相カテゴリ)に分割し、反対色の関係にある2つの色相カテゴリから1色ずつ選択し、灰色仮説が成立するか否かを判定している。仮説が成立の場合は、選択された2色の平均値を照明光色の推定結果とし、不成立の場合には、前述の平均値と反対色の関係にある色相カテゴリから次の色を選択し、再度判定している。仮説成立の判定は、選択された2色の平均が色空間内で黒体放射軌跡の近傍にあることと、色の選択によって得られる平均色のばらつきが小さくなることの2つの条件で行っている。関連する従来法が全て、多くの色数が画像中に存在することを前提としていたのに対して、少ない色数の画像に適用可能な本手法を新規に提案したこと、および実画像を用いた実験により、従来手法より正確に照明光色を推定できることを示したことは高く評価できる。

第3章「仮想的色追加による局所灰色仮説」では、画像における色の分布が特定の色に偏っている場合に(A-1)(第2章)の方法が用いられないので、その対処法である(A-2)が詳述されている。(A-2)で述べた仮想的な色の追加のために、様々な照明光下における低彩度および高彩度の色領域(それぞれ低彩度 gamut, 高彩度 gamut)を用いる。低彩度の色をもつ領域からの反射光は照明光色を反映する特性をもつことから、対象画像の色を多く含む低彩度 gamut を抽出することで照明光色候補を求める。各照明光色候補の高彩度 gamut 内で色を追加し、第2章の手法により照明光色を推定する。この推定された照明光色と、高彩度 gamut に対応する照明光色候補との色差

が最も小さくなる場合の照明光色を最終的な推定値としている。新規性に優れた本手法を提案したこと、および色分布に偏りがある画像に対する実験により、従来法を凌駕する推定精度を達成したことは高く評価できる。

第4章「相異なる照明光下画像の局所灰色仮説適用条件」では、(B-1)の内容を詳述している。異なる照明光下の2枚の画像に共通する均一色領域が複数存在する場合に、灰色仮説を満たす色の組合せが存在するか否かを判定する条件を定式化し、条件成立の場合に照明光色推定を行う手法を提案している。即ち、それぞれの画像の色空間における黒体放射軌跡の上側と下側に存在する複数の色を、前述の共通の均一色領域から選択し、(B-1)で述べた推定法を適用し、2つの照明光色を推定している。灰色仮説成立と判定された場合には精度高く照明光色を推定できることを、実画像を用いた実験の結果により示したことは優れた成果と言える。

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」では、(B-2)の内容を詳述している。異なる照明光下の2枚の画像に共通する均一色領域が1つのみ存在する場合に照明光色を推定する手法を提案している。2枚の画像それぞれについて複数種類の照明光の分光特性を仮定し、2枚の画像に共通する1つの均一色領域から分光反射率を計算するようにしている。このようにして2つの画像から得られた分光反射率は、(B-2)に述べたように、原理的には一致するので、2つのそれぞれの画像から得られる分光反射率の集合において類似度の最も高い分光反射率を求めて色度に変換し、各画像の照明光色の推定結果としている。黒体放射の照明光と実在する照明光の双方を用いた実験により、本提案手法が従来手法より良好な結果を与えることを示したことは高く評価できる。

第6章「結論と今後の展望」では、各章の研究成果をまとめ、そこから結論を導き、今後の課題と展開について述べている。

以上、要するに本論文は、1枚の画像に含まれる色数が少なく、色分布の偏りが小さい場合と大きい場合、2枚の画像に共通の均一色領域が複数ある場合と1つの場合の合計4つの場合について、画像から照明光色を推定する方法を提案し、有効性を検証したものである。本論文で提案された照明光色の推定手法は、実写画像やCGをベースとした様々なコンテンツの制作だけでなく、ロボットや自動監視システムのための様々な認識技術の安定性と頑健性向上のために活用されることが期待される。今後世界各国で重要性が高まるこれらの研究分野における新たな学術的指針を本論文は多角的に示したもので、国際的な業績として高く評価でき、国際情報通信学の発展に寄与するところ極めて大きい。よって、本論文は博士(国際情報通信学)の学位を授与するに値するものと認める。

2014年2月19日

審査員：主任	早稲田大学教授	工学博士(東京大学)	大谷 淳
	早稲田大学教授	博士(人間科学)(早稲田大学)	河合隆史
	早稲田大学教授		坂井滋和
	鹿児島大学教授	工学博士(北海道大学)	大塚作一