

カラー画像の強調処理

植 田 祥 明
Yoshiaki UEDA

先端理工学部知能情報メディア課程 講師
Lecturer, Intelligent Media Informatics Course



1. はじめに

2023年4月に知能情報メディア課程に着任いたしました植田祥明です。専門は画像処理分野で、最近ではカラー画像の視認性改善に関する研究を主にしています。本稿では、画像が得られるまでの基本的なプロセスと、私が取り組んできた色相保存型カラー画像強調処理について説明します。

2. デジタル画像について

デジタル画像には、各画素が2通りの画素値をもつ（白または黒で表現される）2値画像、色味を持たない無彩色の濃淡値（8ビットで256通りなど）で表現されるグレースケール画像、R、G、Bの3チャンネル（各チャンネル8ビットずつ）で表現されるカラー画像などがあります。広義の画像処理とは、これらの画像に対して何らかの処理を施すことで新たな画像を出力したり、画像に含まれる情報を解析・抽出したり、別視点から撮影された画像やセンサ情報の助けを借りながら3次元に関する情報を復元する処理などを指します。これらのうち、狭義の画像処理といえば、画像に対して何らかの処理を施して再び画像を得るような処理を指します。筆者の主な研究テーマは、狭義の画像処理であることが

多いです。

画像処理のアルゴリズムを学ぶ際、画像データはすでに手元に存在しており、その画像に対してどのような処理を施すか、といった視点からスタートすることがほとんどです。しかし、適切な処理を施すには、処理の対象となる画像についての理解が必要であり、ひいては画像が得られるプロセスを理解しておいた方が多いことが多いです。そこで、まず、デジタルカラー画像を対象とし、その取得プロセスについて簡単に説明します。

カメラは3次元空間中の光を取り込み、2次元平面上に投影した像を得ます。光はカメラのレンズによって集められ、絞りの孔を通り、カラーフィルタを通過し、イメージセンサへと到達します。イメージセンサはフォトダイオードが並べられたものであり、センサに当たった光の量に応じて電気信号へと変換されます。その後、デモザイキング処理、色空間変換、階調値変換、量子化処理、可逆・不可逆圧縮等の処理が行われ、画像データが保存されます。

カメラが受け取る光には、光源から発せられた光、光源から発せられた光が物体（大気を含む）に当たって反射した光などがあります。これらの光をカメラに取り込むものがレンズです。レンズを通った光は「絞り」と呼ばれる、大きさが可変な孔を通

ることで光量が調整されます。イメージセンサの前にはシャッターがあり、これが開いている間のみイメージセンサへ光が到達します。すなわち、受光時間をシャッターで調整しています。このようにしてイメージセンサに到達した光が、その量に応じて電気信号へと変換されます。ここまでの説明から、イメージセンサから出力される電気信号は、光の強度×絞りの孔の面積×シャッター速度によって表されることが分かります。例えば、非常に暗い状況で撮影を行う場合、光の強度が弱いため、イメージセンサが受け取る光量が少なくなり、暗い画像になってしまいます。このような画像を強調する問題は **Low-light Image Enhancement** と呼ばれます。

画像の視認性が低下する要因のひとつに、逆光の状況下での撮影があります。逆光の状況で写真を撮影した際、画像には非常に明るい部分と非常に暗い部分が混在します。ヒトの視覚は、非常に暗い領域から非常に明るい領域まで、様々な明るさの違いを見分けることができます。つまり、暗いなら暗いなりに微妙な明暗差を見分けることができ、明るいなら明るいなりに明暗差を見分けることができます。しかし、カメラで捉えることのできる明るさの範囲はヒトのそれよりも狭いため、極端に明るい部分と暗い部分が混在している（太陽や暗い影が混在している）シーンを撮影すると、どちらかの微妙な明るさの違いが見分けられなくなり、明るい部分が白く飛んでしまったり、暗い部分が黒く潰れてしまいます。このような画像の視認性を改善する問題は **Backlit Image Enhancement** と呼ばれます。

ここまでの話を読んで、最近のスマートフォンなら十分にキレイに撮影できるのではないかと考えた方も多かもしれません。実際、最近のスマートフォンに搭載されているカメラ（や、その後段の画像処理技術）は優秀で、手軽にキレイな画像を得ることができます。しかし、世の中に存在するカメラはスマートフォンだけではありません。様々な場所に設置してある監視カメラ、車の運転のサポートをしてくれる車載カメラ、工場などでヒトの代わりに検

査をしてくれるカメラなど、現代社会を支えるカメラは至るところに存在しています。カメラの導入コストの都合上、性能の低い安価なカメラしか用意できず、キレイな画像を得ることが難しい状況においても、アルゴリズムの力で後から画像を見やすくできれば及第点といったところでしょう。筆者は画像処理を用いて画像をよりよく見えるものになりたいと考えており、特に画像強調処理とよばれる、シーンの視認性改善アルゴリズムのひとつを研究しています。

3. 画像の強調処理

多くの画像強調処理は、グレースケール画像に対する手法として考案されています。グレースケール画像では、各画素の値は白黒の濃淡の度合いを表しています。画素値を明るさだと考えれば、画素値を変換することで明るさを調整できます。一方、カラー画像の各画素は **RGB** 色空間で表現されることが多く、各画素の値は赤、緑、青の強度を表します。このままでは画素値の明るさを扱うことにはなりません。そこで、カラー画像に対しては、まず、画像を色相、彩度、明度の3成分による表現へと変換し、明度を明るさの成分だとみなして画像強調処理を施すことがよく行われます。このとき、**HSV** 色空間^[1]をはじめとした色空間が用いられます。

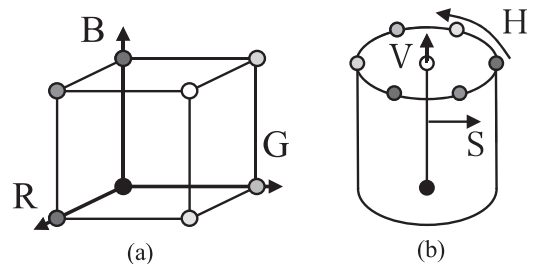


図1 色空間の概略図
(a) RGB 色空間, (b) HSV 色空間

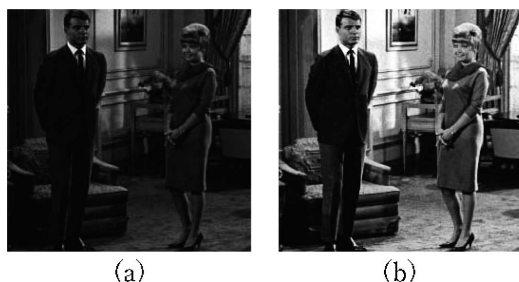


図 2 画像強調の例

明度は低いほど暗く、高いほど明るい画素であることを表します。明度を高くすると画像は明るくなり、明度の差を広げると画像のコントラストが高くなります。

3.1 トーンカーブに基づく処理

暗い画像の視認性を改善するには、明度の低い画素同士の明暗差を広げる必要があります。具体的には、最大値と最小値を変化させない、非線形の単調増加関数を用いて暗い部分を強調します。このような強調を行う方法の一つにガンマ補正があります。ガンマ補正によって画像を明るくすると、暗い部分の明暗差が強調され、視認性が向上します。一方で、明るい画素の画素値の差は縮まってしまうため、最適なトーンカーブの形状は不明です。また、画素ごとに適用するトーンカーブを変化させる方法も研究されています。

筆者の過去の研究では、複数の異なるトーンカーブを用いることで複数の画像強調結果を生成し、それらを合成することで逆光の状況下で撮影された画像を強調する方法を提案しました^[2]。

3.2 ヒストグラムベース処理

画像処理の教科書に載っている有名な方法に、ヒストグラム均等化（ヒストグラム平坦化）があります。ヒストグラム均等化では、画像の明度の出現頻度を求め、その偏りをなくす変換を画像に対して行うことで、画素値を有限の階調に均等に割り当てま

す。これにより、画像の視認性が改善されます。具体的には、出力画像の明度の出現頻度の分布が一樣分布に近づくようなトーンカーブを自動生成し、明度を変換します。

ヒストグラム均等化では、出力画像の明度の出現頻度が一樣分布に近づくように変換を行いますが、シーンの被写体や背景によっては、単に一樣分布に近づければそれでよいというわけではありません。ヒストグラム均等化を一般化したものに、ヒストグラム指定法^[3]があります。ヒストグラム指定法では、出力画像の明度の出現頻度の分布を、指定した分布（目標の分布）に近づけることができます。目標の分布を一樣分布に設定すれば、ヒストグラム均等化と等価な処理になります。適切な分布を目標の分布として指定することで、ノイズの強調を抑制したり、より強調したい部分を適切に強調できるといった利点があります。

また、イグザクトヒストグラム指定法もあります。これは、ヒストグラム均等化をはじめとしたヒストグラム指定法の特徴である「同じ画素値はどれも同じ画素値へと変換される」という点を解消したのになります。イグザクトヒストグラム指定法^[4]では、明度に基づいて各画素値を無理やり順序付けて、その順序付けに基づいて画素値を変換する処理が施されます。明度は離散的な値で表現されますが、同じ明度であっても、周辺画素の明度の情報を参考に、この画素は相対的に明るくなるべきか、暗くなるべきか等を考慮することで、同じ画素値であっても、それぞれが異なる画素値に変換され、任意のヒストグラムの形状に一致させることができます。

3.3 Retinex に基づく処理

Retinex に基づく処理では、入力画像を反射率成分と照明成分に分解し、画像強調処理が施されます。Jobson らによって提案された Multi-Scale Retinex^[5]では、画像全体の照明成分による陰影が除去されることにより、全体の視認性が向上しま

す。一方で、画像の明暗の序列が崩れ、見た目が不自然な画像となる傾向にあります。また、画像のノイズが強調されてしまい、全体的にざらついた画像になってしまいます。Retinex に基づく手法は改良が続けられており、反射率成分と照明成分の分解法や、その後の強調処理など、様々な手法が提案されています^[6, 7]。

3.4 学習に基づく処理

学習に基づく画像強調処理には、変換前の画像と理想的な変換結果を 1 対 1 のペアとして教師あり学習を行う方法や、暗い画像と明るい画像を集めて学習を行う半教師あり学習に基づくものなどがあります。これらの手法では、敵対的生成ネットワークに基づくもの^[8]や、トーンカーブを学習によって獲得するもの^[9]など、様々な手法が提案されており、概ね良好な結果を示しています。しかし、画像の変換規則が説明できないため、予期せぬ変換結果が得られる場合があります。例えば、星空を含むような画像を強調しようとする、星の周りに不自然な模様が現れることがあります。また、本来茶色だった部分が緑色に変化してしまうなど、どのような原理で変換が行われているかが説明できない（説明が難しい）ゆえの不都合が存在します。

3.5 色空間の形状を考慮したカラー画像強調

前述の通り、カラー画像の明度コントラスト強調では、画像を色相、彩度、明度の 3 成分によって表現される空間へ変換し、明度成分に対して画像強調処理を施すことが一般的です。このとき、明度成分に対してグレースケール画像と同様にヒストグラム均等化を適用し、明度の出現頻度の分布を一様分布に近づけると、不自然な暗い画像が得られることがあるという問題があります。直感的に説明すると、色相、彩度、明度の 3 成分によって表現される色空間として HSV 色空間を用いた場合、明度の高い色（白、赤、緑、青、シアン、マゼンタ、イエロー）と、明度の低い色（黒）の色数に大きな偏りがある

ため、単に明度の出現頻度の分布を一様分布に近づけるだけでは、相対的に暗い色が多くなってしまいます。したがって、適切な分布を目標の分布に設定し、ヒストグラム指定法を適用する必要があります。

筆者が取り組んだ研究^[10]では、RGB 色空間における一様分布をもとに HSV 色空間における明度の出現頻度の分布を求め、これを目標のヒストグラムに指定することで、より適切にカラー画像の明度コントラストを強調できることを確認しました。このように、グレースケール画像に対する処理を単純にカラー画像処理に拡張するだけではうまくいかない場合がありますが、色空間に関する知識を用いることで、良好な結果を得ることができると考えられます。

3.6 白、黒、純色の凸結合表現に基づくカラー画像強調

3.5 節で紹介した手法では、カラー画像の各画素を色相、彩度、明度からなる色空間で表現し、明度成分に対して処理を施す方法でした。したがって、色相成分や彩度成分は変化しません。しかし、最新の研究においても頻繁に用いられる HSV 色空間では、（定義によっては）彩度とみなしている成分は実際には飽和度（Saturation）を表しており、色の鮮やかさを表しているとは限りません。特に、明度が低い画素においては、彩度を変えなくても、明度を変えるだけで鮮やかさが大きく変わることがあります。

このように、カラー画像処理では処理の対象となる成分が増えるために、これらの相互関係を考慮したアルゴリズムを考える必要があります。筆者の研究では、多くの画像強調処理において用いられている色の表現方法とは異なる方法を用いることで、鮮やかさと明暗差を同時に扱うことのできるカラー画像強調法を提案しました。

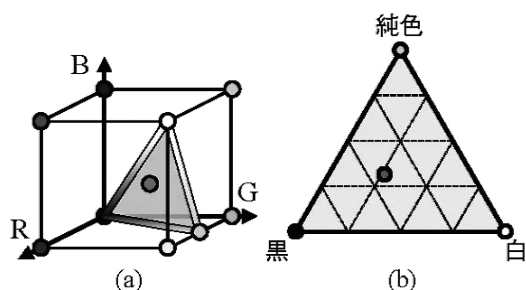


図3 色の表現方法の違い
(a) RGB 色空間上での表現
(b) 白, 黒, 純色の混合比による表現

カラー画像の各画素は RGB 色空間において赤, 緑, 青の強度によって表されます. 一方, これは, 白, 黒, 純色 (画素と同じ色相であり, 最も鮮やかさの高い色) の混ぜ合わせによって表すことができます^[11, 12]. このとき, ある画素における白の割合, 黒の割合, 純色の割合, 純色の RGB 値が必要となりますが, これらは画素の RGB 値から簡単に求められます. このような表現方法を用いることで, 画素を白さ, 黒さ, 純色の強さによって表すことができ, 白さや黒さ, 純色の強さの度合いを変換すれば, 画素を純色に近づけて鮮やかにしたり, 白に近づけたり, 黒に近づけたりできます. 純色を変えなければ画素の色相も変わらないため, 色相を保存したまま画素の明るさと鮮やかさを変更できます.

画像全体のコントラストを強調するためには, 各画素の純色の強さ, 白さ, 黒さを適切に調整しなければなりません. 例えば, 白に近い画素はより白く, 黒に近い画素はより黒く, 鮮やかな (純色の強さが強い) 画素はより純色を強く, といった変換を行うことにより, 画像の明暗差と鮮やかさを強調します. このような変換は HSV 色空間において明度や彩度を同時に調節することに対応しますが, 画像強調に適した色の表現方法を用いることで, 明暗差や鮮やかさを適切に強調することが可能になりました^[12, 13].

4. 関連する分野と発展の方向性

画像の視認性改善には, 明暗差をつけることによ

って画像を見やすくするもの以外に, 様々なものがあります. 最近では, 極端に暗い画像からシーンを復元する Extremely Low-light Image Enhancement という問題設定もあります. また, その他にも, 霧のかかった画像から霧を除去する問題では, 霧の濃さを推定し, シーンを復元するように逆問題を解いて視認性を改善します. また, 水中で撮影された画像の視認性を改善する問題では, 光の減衰をモデルで表現し, 本来の色を復元するように変換します. 他にも, 砂嵐や雨によって視界が悪くなった画像の視認性を改善する問題などもあります. 画像から画像への変換と言っても, 単なるアートだけでなく, 様々な状況において役に立つものが多いです.

5. おわりに

本稿では, 画像の取得プロセスとカラー画像の強調法について, 筆者の取り組み等を織り交ぜながら説明しました. 画像の視認性改善に関する研究の歴史は古いものの, 様々な場面で役に立つものが多いため, 現在も盛んに研究が行われています. 今後も様々な画像の視認性改善手法を模索していきたいと思っています.

参考文献

- [1] A. R. Smith, "Color gamut transformation pairs," ACM SIGGRAPH Computer Graphics, vol.12, no.3, pp.12-19, 1978.
- [2] Y. Ueda, T. Koga, and N. Suetake, "Fusion-based backlit image enhancement using multiple S-type transformations for convex combination coefficients," Proc. of 2022 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP 2022), pp.2971-2975, 2022.
- [3] R. C. Gonzales and R. E. Woods, "Intensity transformation and spatial filtering," Digital image processing 4th edition, Pearson, New York, 2018.
- [4] M. Nikolova and G. Steidl, "Fast ordering algorithm for exact histogram specification," IEEE Transactions on Image Processing, vol.23, no.12, 2014.
- [5] Z. Rahman, D. J. Jobson, and G. A. Woodell, "Multi-scale retinex for color rendition and dynamic range compression," Proc. SPIE 2847, pp.183-191, 1996.

- [6] X. Guo, Y. Li, and H. Ling, "LIME: Low-Light Image Enhancement via Illumination Map Estimation," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol.26, no.2, 2017.
- [7] C. Wei, W. Wang, W. Yang, and J. Liu, "Deep retinex decomposition for low-light enhancement," *British Machine Vision Conference*, 2018.
- [8] Y. Jiang, X. Gong, D. Liu, Y. Cheng, and X. Shen, "EnlightenGAN: Deep light enhancement without paired supervision," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 30, pp.2340-2349, 2021.
- [9] C. Guo, C. Li, J. Guo, C. C. Loy, J. Hou, S. Kwong, and R. Cong, "Zero-reference deep curve estimation for low-light image enhancement," *Proc. of CVPR2020*, pp.1780-1789, 2020.
- [10] Y. Ueda, T. Koga, H. Misawa, N. Suetake, and E. Uchino, "Gradient Norm-based Histogram Equalization Taking Account of HSV Color Space Distribution," *Optical Review*, vol.24, no.3, pp.406-415, 2017.
- [11] 玉垣庸一, 宮崎紀郎, 小原康裕, "HSV カラーモデルとオストワルト表色系の類縁性: コンピュータグラフィックスにおける色立体 (3)," *デザイン学研究*, vol.54, no.3, pp.9-18, 2007.
- [12] Y. Ueda, H. Misawa, T. Koga, N. Suetake, and E. Uchino, "Hue-preserving color contrast enhancement method without gamut problem by using histogram specification," *Proc. of 2018 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP 2018)*, pp.1123-1127, 2018.
- [13] Y. Ueda and N. Suetake, "Hue-preserving color image enhancement on a vector space of convex combination coefficients," *Proc. of 2019 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP 2019)*, pp.939-943, Sep.22-25, 2019.