

インタラクティブなパレットベースの 色変換のための最適化手法

水嶋 楓華^{1,a)} 佐藤 周平^{1,b)} 櫻井 快勢² 土橋 宜典³ 高尚策¹ 唐 政¹

概要：本研究では、画像を特定のテーマカラーに変換するための新しい色変換手法を提案する。そのような色変換を実現するには、元画像の自然な見た目を保つために、画像内の全ての色を調整する必要がある。この作業は容易ではなく、ユーザは試行錯誤により色を決定するため、多くの時間を要する。この問題に対し、我々はユーザ指定のテーマカラーと元画像の色分布の両方を考慮した色変換を行う最適化ベースの手法を提案する。最初にユーザが入力画像の一部の領域の色を指定し、次にシステムが入力画像の見た目を保持して自動で残りの領域の色を調整する。この自動調整は最小化問題として定式化される。量子化されたカラーパレットを用いて最小化問題を解くことで計算を高速化する。様々な例により提案手法の有効性を示す。

キーワード：画像の色変換、色の最適化、パレット、色差

1. はじめに

近年では、画像や動画を撮影したままではなく、編集や加工を施して使用することで、様々なコンテンツの表現の幅やクオリティの向上に貢献している。このために、様々な画像編集や加工の技術が提案されており、画像編集ソフトや現在ではスマートフォンにおいても、それらの技術を用いて画像の編集ができる。それらの技術の中でも、画像の色編集は最も有効でよく使われる技術の一つであり、ユーザは単純に色を変更するのみで画像の印象を容易に編集できる。しかし、所望の見た目を獲得するために適切な色の組み合わせを選択することは簡単ではなく、ユーザは大抵時間のかかる煩雑な試行錯誤により色を決める必要がある。それらに対処するために、画像の色を編集するためのさまざまな編集方法が提案されている。その中でもパレットベースの手法はユーザが画像の色を簡単に編集することが出来る。ただし、パレットの各色は手動で調整する必要があり、ユーザは面倒で時間のかかる作業からは解放されない。色彩調和理論 [1] やパレット探索 [7] などの他の手法

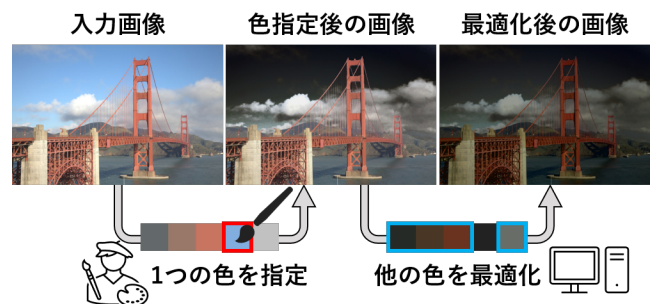


図 1: 提案システムの概要

では、画像の色を自動的に調整できる。ただし、これらの手法の目的は、元の画像の印象を維持することを考慮せず、芸術的な編集ではなく、画像の自然な外観を作成することである。特に、特定のテーマカラーを画像に適用したい場合、編集した画像を自然に見せるために、テーマカラーと元の画像の色の両方を考慮する必要がある。このような編集は、ミュージックビデオや広告などの芸術的な分野で使用されるため、カラーテーマを適用するためのシンプルな色変換システムはアーティストにとって便利である。

本研究では、ユーザ指定の色と元画像の色分布の両方を考慮して色を自動的に調整する方法を提案する。我々の定式化では、元画像、ユーザ指定の色、および画像内の色間の相対的な差といった3つの要素との差分を評価するエネルギー関数を最小化して最適な色の組み合わせを得る。しかし、画像内の色の数は大抵非常に多いため、最小化問題を

¹ 富山大学
University of Toyama

² 株式会社ドワンゴ
DWANGO Co., Ltd.

³ 北海道大学
Hokkaido University

a) m2171138@ems.u-toyama.ac.jp

b) ssato@eng.u-toyama.ac.jp

解くコストが膨大になる。そのため、我々はカラーパレットの技術を用いて画像を表現する代表色を求めることで色の数を削減し、最適化されたカラーパレットを計算する。このパレットベースのアプローチにより計算を大幅に高速化でき、インタラクティブな色の編集を可能とする。我々のシステムでは、ユーザがパレット内のある1つの色を変更すると、残りの色が自動的に更新され、リアルタイムに結果の画像を表示する(図1)。写真やイラストを含む様々な例を示すことで提案手法の有効性を実証する。

2. 関連研究

画像編集のための色変換手法が数多く提案されている。Color harmonizationの手法[1]は色彩調和理論に従って色を自動的に変換する。この手法では、調和テンプレートの1つに画像の色彩ヒストグラムがフィットするように色を修正する。しかし、我々の実験では、この理論に基づいた結果は不自然になることが多かった。既存のデータセットに基づく提案システム[2]は、所望の色のパターンの画像を作ることが出来るが、提案される色はデータセット内に含まれるパターンに制約されてしまう。そのため、もし結果が満足のいくものでなければ、追加のデータセットを用意する必要がある。パレットベースの手法[3], [4], [5], [6]はカラースペースを少数のクラスタに分解し、それらをカラーパレットとして利用する。そして、ユーザはパレットを介して画像の色をローカルに編集できる。しかし、これらの手法はパレット内のすべての色を手動で変更する必要があり、これは煩雑で時間のかかる作業である。これに対し我々の手法は、パレット内の1つの色をユーザが変更すると、他の色を自動的に決定する。

制約に基づくパレット探索の手法[7]は、ユーザ指定の色が与えられると、自動的にパレットの色を決定する。しかし、この手法は元画像の色分布を考慮しないため、結果の画像の印象は、入力画像の印象とは異なるものとなってしまい、我々の目的には合わない。一方で、我々の手法は色の間の相対的な関係を可能な限り保持することで、元画像の印象を保ったまま色を最適化する。

3. 提案手法

3.1 パレットの作成

まず、Changらの手法[3]を用いて、与えられた入力画像に対してカラーパレットを作成する。パレットは、画像中の代表的な色を示すものである。この方法では、代表色を選択するためにk-means法を用い、クラスタの中心の色を代表色として使用する。入力画像の色は、クラスタの中心からの距離が最小のクラスタに各色を繰り返し割り当てることにより分類される。色間の距離は、Lab色空間において計算される。k-means法の結果は初期クラスタの中心に依存するため、この方法では初期中心が一定の距離を保

つように初期中心を均一に分散させる。基本的に、入力画像のヒストグラムの上からk番目までの色が、クラスタの初期中心に使用される。初期中心を分散させるために、この方法では、すでに選択されているクラスタ中心の近くの色を選択することを避ける。さらに、他のクラスタに多くの暗い色が含まれないようにするため、初期クラスタの中心の1つに黒色が追加される。一度カラーパレットが得られると、ユーザは画像の色を編集できる。

3.2 パレットの色の最適化

ユーザがパレット内のある1つの色を変更すると、我々のシステムは即座に以下に記述する最小化問題を解くことでパレットの残りの色を更新する。我々の目的関数は、ユーザの編集した色との差を最小化しつつ、元画像の印象を保つようにデザインされている。パレット内のn番目の色を I_n と記載し、ユーザにより編集された色を I_u とする。そして、最小化問題は以下のように定式化される。

$$\arg \min_{\bar{\mathbf{I}}} \sum_{\substack{n=1 \\ (n \neq u)}}^{N_I} \{ \alpha (I_n - I_n^o)^2 + (1 - \alpha) (I_n - I_u)^2 \\ + \frac{\beta}{N_I - 1} \sum_{\substack{m=1 \\ (m \neq n)}}^{N_I} ((I_n - I_m) - (I_n^o - I_m^o))^2 \}, \quad (1)$$

ここで、 $\bar{\mathbf{I}} = \{I_1, \dots, I_{u-1}, I_{u+1}, \dots, I_{N_I}\}$ は I_u を除く色のセットであり、 N_I はパレット内の色の数である。 I_n^o は入力画像に対して計算された、パレットの元の色を表す。 α と β は、式(1)の各項の影響を調整するユーザ指定の係数である。第1, 2項目は元の色およびユーザ指定の色からの差分をそれぞれ意味する。第3項目は最適化後の各パレット間の色の差が、元のパレットにおける色の差を可能な限り保つように働く。我々は色空間としてLab色空間を用い、式(1)は3つの成分について独立に計算される。

上記の目的関数に対し、 I_n で微分を計算することで連立一次方程式が得られ、LU分解を用いて解く。パレット表現により色の数を削減しているため、最適化された色のセットを即座に得られる。

3.3 色変更処理

パレットが最適化された後、ピクセルの色は次のように更新される。ピクセルの色を更新する際に、我々の色変換では元のパレットと変更されたパレットの差分を考慮する。我々は、入力画像のピクセル色にLab色空間での差分を追加する従来手法[3]を使用する。この方法において、ピクセルに追加される色は、最適化されたパレットの色と元のパレットの色との差の加重平均として得られる。ピクセルの色に近いパレットの色には大きな重みが割り当てられ、逆に遠いパレット色の重みは小さくなる。重みは、radial

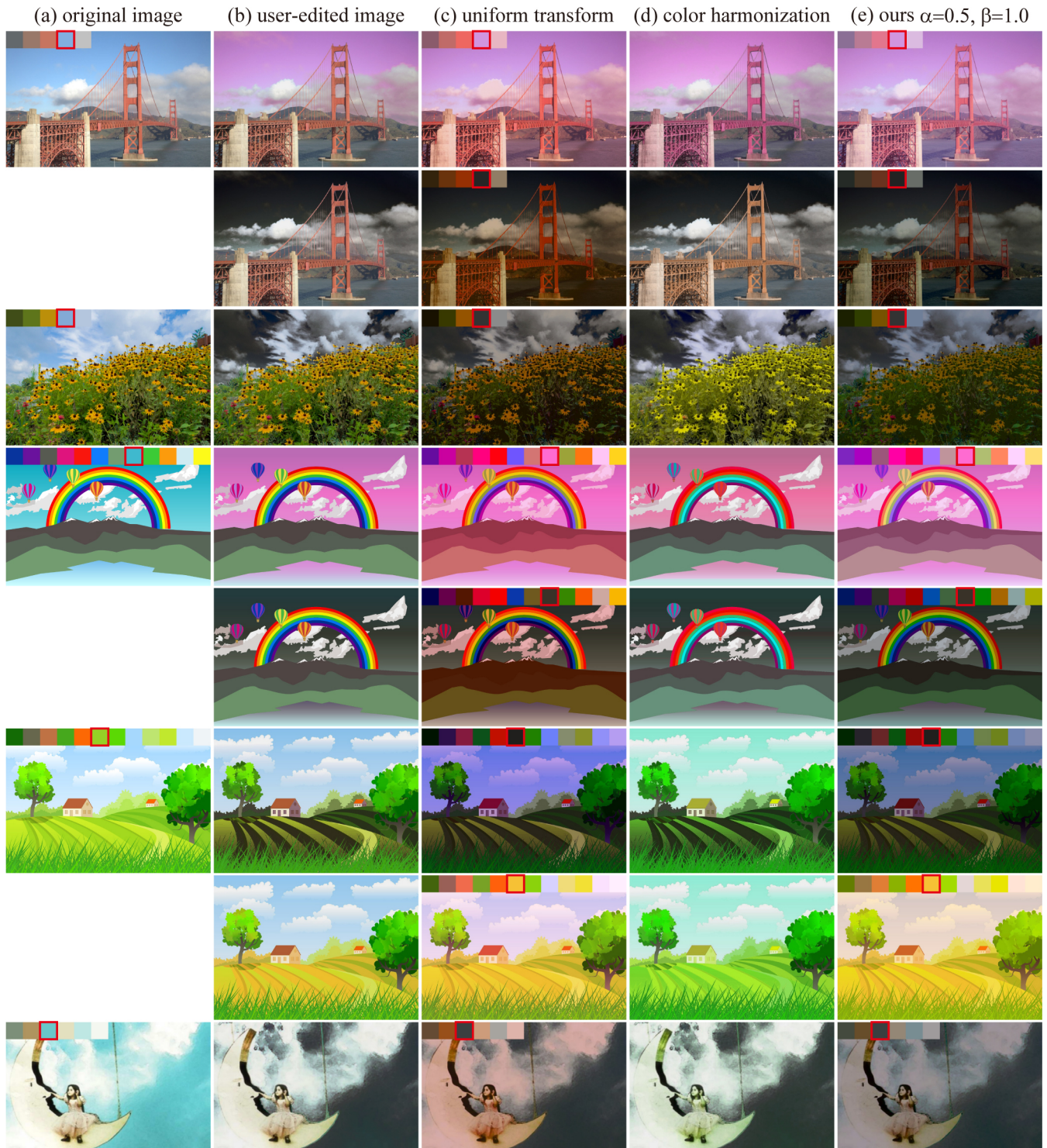


図 2: 実写およびイラストへの適用例

basis function を使用して計算される。我々は Chang らの手法 [3] で用いられている Gaussian kernel を使用した。新しいピクセルの色が Lab 色空間の範囲を超えてしまった場合は、その色を色空間の境界に投影する。

4. 実験結果

図 2 に提案手法および他の 2 つの色変換手法による比較を示す。これらの図において、(a) は入力となる元画像

であり、左上にそれぞれの入力画像において計算されたパレットの画像を示す。パレット内の赤色の矩形はユーザが編集する色を示している。(b) はユーザが赤色矩形で示すパレットの色を変更した後の画像である。ユーザは最初に指定したい領域のパレットを 1 つ選択し、次にテーマカラーを CIELAB 色空間で指定する。(c) では、ユーザが編集したパレットの色と、そのパレットの元の色との差分の半分の量だけ、残りのすべてのパレットの色を一様に変

更した場合の結果である。(d)は(b)の画像に対し、color harmonizationの手法[1]を適用して得られたものである。そして、(e)は提案手法による結果であり、2つのパラメータはそれぞれ、 $\alpha = 0.5$, $\beta = 1.0$ に設定した。

これらの結果を見てわかる通り、(c)の一部の領域では、元の画像とテーマカラーの色相から大きく逸脱している。特に橋の画像の例(1行目と2行目)では、空、山、海の領域に赤みがかかった色が見られる。一部のイラストでの結果(5, 6, 8行目)では、元の画像やテーマカラーにはない色が見られる。山と雲(5行目)がわずかに赤くなり、雲の色(6行目)が紫になり、雲と月(8行目)が赤みを帯びている。

一方、図2(d)では、いくつかの領域の色が元画像から大きく変化してしまっているが、明るさは(b)とほとんど同じままであり、不自然な見た目となっている。

これら他の色変換の結果に対し、提案手法ではユーザ指定の色を反映しつつ、元画像の各色間の関係性も保つことが出来ている。しかし、一部の例では一様な変換(c)と提案手法(e)の結果の違いはわずかである。そのため、提案手法の有効性を検証するためユーザスタディを行った。

5. ユーザスタディ

上述の通り、提案手法と一様な変換との間には大きな違いがない例も存在する(図2の(c)と(e)を参照)。そこで、「元画像の印象を保ちつつ、画像の色をテーマカラーへ変更する」という目的に適した結果を検証するためユーザスタディを行った。我々のユーザスタディではまず、被験者に元画像、テーマカラーおよびその指定箇所を示す。また、提案手法と一様な変換によって得られた画像を提示する。次に被験者は目的により適した画像を1つ選択する。この実験では、図2に示す8つの画像を使用した。図3は、ユーザスタディで被験者に提示した画面のスクリーンショットである。被験者は、1年半以上の研究経験を持つ修士課程の学生と半年以上の研究経験を持つ学部生からなる9人である。

ユーザスタディの結果を図4に示す。横軸の数字は図2の行に対応し、縦軸は投票数を表す。ほとんどの例で、より提案手法の方が多くの票を獲得している。一方、一様な変換のほうが投票の多い3番目、7番目の例でも大きな差はなく、ほぼ同数となった。これは、これらの例では提案手法と一様な変換の画像の間にわずかな違いしか見られないため、このような結果になったと考えられる。これらのユーザスタディの結果から、提案手法は一様な変換よりも優れた、または同様の結果を得られることがわかった。そのため、我々の定式化は元画像の印象を保ちつつ画像の色をテーマカラーへ変更する手法として効果的であると言える。広範囲な画像への有効性を示すため、ユーザスタディに利用した結果も含めたその他の結果を図5, 6に示す。

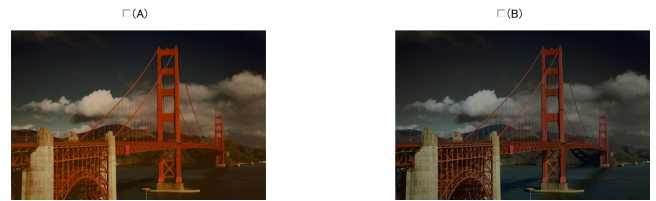
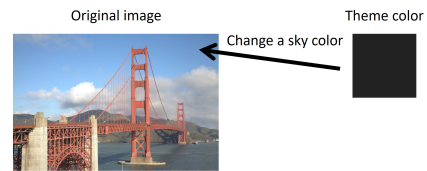


図3: ユーザスタディで実際に使用された画面のスクリーンショット

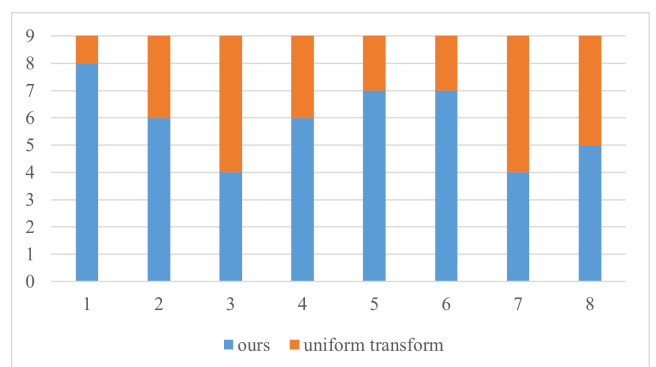


図4: ユーザスタディにおける各実験の分布

6. まとめと今後の課題

本稿では、ユーザ指定の色と元画像の色分布の両方を考慮した色変換手法を提案した。パレットベースの色の量子化は、最適化される色の数を減らすために適用される。ユーザーが1つの色を指定すると、最小化問題を解くことにより残りの色が自動的に決定される。結果のカラーパレットは、ユーザー指定の色と元画像の色間の関係を反映する。私たちのシステムは効率的であるため、私たちの結果は目的の画像の初期ソリューションとして使用できる。ユーザーは結果の画像を手動で微調整できる。

ユーザスタディの結果の8番目の例で、提案手法と一様な変換の色相が異なる部分があるにも関わらず、投票数はほぼ同じとなった。今後の課題として、この理由を調査し、式をさらに改善する。また、ユーザ指定の色が複数の場合にも対応できるよう、式を拡張する予定である。

参考文献

- [1] D. Cohen-Or, O. Sorkine, R. Gal, T. Leyvand, and Y.-Q. Xu: *Color harmonization*, ACM Transactions on Graphics, vol. 25, no. 3, p. 624-630, Jul. 2006.
- [2] S. Lin, D. Ritchie, M. Fisher, and P. Hanrahan: *Probabilistic Color-by-Numbers: Suggesting Pattern Colorizations Using Factor Graphs*, ACM Transactions on



図 5: 実写の画像への適用例 (画像の典拠: <https://data.csail.mit.edu/graphics/fivek/>)

- [3] Graphics, vol.32, no. 4, Article 37, Jul. 2013.
H. Chang, O. Fried, Y. Liu, S. DiVerdi, and A. Finkelstein: *Palette-based photo recoloring*, ACM Transactions on Graphics, vol. 34, no. 4, Article 139, Jul. 2015.
- [4] Q. Zhang, C. Xiao, H. Sun, and F. Tang: *Palette-based image recoloring using color decomposition optimization*, IEEE Transactions on Image Processing, vol. 26, no. 4, p.1952–1964, Feb. 2017.
- [5] J. Tan, J. Echevarria, and Y. Gingold: *Efficient palette-based decomposition and recoloring of images via rgbxy-space geometry*, ACM Transactions on Graphics, vol. 37, no. 6, Article 262, Dec. 2018.
- [6] M. Shugrina, A. Kar, K. Singh, and S. Fidler: *Nonlinear color triads for approximation, learning and direct*



図 6: イラストへの適用例 (画像の出典: <https://publicdomainq.net/countryside-field-0033553/> (上段の画像), <https://jospicturelweg.blogspot.com/2021/05/70-234986.html?3> (中段の画像), 文献 [8] (下段の画像))

- [7] N. Mellado, D. Vanderhaeghe, C. Hoarau, S. Christophe, M. Brédif, and L. Barthe: *Constrained palette-space exploration*, ACM Transactions on Graphics, vol. 36, no. 4, Article 60, Jul. 2017.
- [8] B. Wang, Y. Yu, T.-T. Wong, C. Chen, and Y.-Q. Xu: *Data-driven image color theme enhancement*, ACM Transactions on Graphics, vol. 29, no. 6, Article 146, Dec. 2010.