Vol.2019-CG-174 No.1
2019/6/27

色彩調和処理の高速化とその応用

萬年　研人[1,a)]　岡部　誠[2,b)]　土橋　宜典[1,c)]

概要：色の組み合わせの中で，見ている人に快い視覚的認知を与える特別な関係を持つ色の組は調和する色とされている．調和する色を用いた配色を行うことで，制作物の美学的な魅力を高めることができると考えられており，色彩調和の考えは様々な分野で広く利用されている．画像は色で構成されるため，画像と色彩調和は密接に関係しており，色彩調和に基づく画像の色付けは非常に有用である．色彩調和処理とは，画像の色を調和する色に変換する処理を指す．このような調和処理をコンピュータを用いて行う手法は，手動では困難な複雑な色の関係を扱えるため，広く研究が行われている．一方で，近年では，撮影・映像技術の発達によって，高画質・大容量の画像や動画が普及してきている．そのため，一度に大量のピクセル情報を取り扱う必要性が増えてきており，画像処理技術の高速化に対する需要も高まっている．本研究では，画像処理技術の中でも画像の色彩調和処理に焦点を当て，その高速化手法の提案を行う．提案手法は，色彩調和に関する分野で広く受け入れられている研究を基にしており，高解像度画像に対しても高速に色彩調和処理を行うことができる．

1. はじめに

画像は色を用いて構成されており，私たちは色を通して画像を知覚し，多くのことを感じとる．そのため，画像内の色の組み合わせによって，見ている人に様々な影響を与えることができる．色の組み合わせの中で、見ている人に快い視覚的認知を与える特別な関係を持っている色の組は調和する色とされている．色の調和という概念は，場所，時間，文化などに依存するため，特定の色の組で定義されない．しかし，アーティストの間には色の調和に関する一致した意見があり，色空間における色の相対的な位置関係によって色の調和は定義される．調和する色を用いた配色を行うことで，画像の美学的な魅力を高めることができると考えられており，色彩調和の考えは様々な分野で広く利用されている．

アーティストらは，長年培った経験と直感を持っているため，色に関するハンドブック（例えば，Krause[1]）やインタラクティブ・アプリケーション（例えば，Meier[2]）を用いることで，所定の色の組の中から調和する色を選択することができる．しかし，調和する色を選択すると、アーティストらはその色の組で制作物を色付け，又は再色付けする必要がある．この作業は，制作物が複雑で多くの色を含む場合，非常に手間のかかる作業である．また，色に関する経験や知識を有していないような一般の人にとっては，調和する色の組を選択すること自体が困難な作業である．

色彩調和処理とは，画像の色を調和する色に変換する処理を指す．このような調和処理をコンピュータを用いて行う手法は，手動では困難な複雑な色の関係を扱えるため，広く研究が行われている．これらの手法では，色に関する知識がない一般の人でも少しのインタラクションで調和する色を選択することができる．また，画像を調和する色で再色付けすることもでき，アーティストらが煩わしい作業を行う必要がなくなる．コンピュータを用いた色彩調和手法は，アーティストの専門家と素人の両方を支援することができる．

近年では，撮影・映像技術の発達によって，4K 画像や 8K 画像のような高解像度画像や高いフレームレートの動画が普及してきている．また，既に広く普及しているスマートフォンのカメラ機能によって，一般の人でも簡単に高画質画像を撮影することが可能になってきた．そのため，画像や動画を扱う分野では，一度に大量のピクセル情報を取り扱う必要性が増えてきており，画像処理技術の高速化に対する需要も高まっている．本研究では，画像処理技術の中でも画像の色彩調和手法に焦点を当て，その高速化手法の提案を行う．提案手法は，色彩調和に関する分野で広く受け入れられている研究を基にしており，高解像度画像に対

1 北海道大学
Kita-ku, Kita 14, Nishi 9, 060-0814, Sapporo, Japan
2 静岡大学
3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu, Shizuoka, 432-8561, Japan
a) mannen@ime.ist.hokudai.ac.jp
b) m.o@acm.org
c) doba@ime.ist.hokudai.ac.jp

ⓒ 2019 Information Processing Society of Japan

しても高速に色彩調和処理を行うことができる．本研究では，ハードウェアによる問題の解決方法を採用していないため，様々なアプリケーションへの応用が可能であり，スマートフォン上などで動作させることができる．

2. 関連研究

本研究は Cohen-Or らの研究 [3] を基に行っているが，彼らの研究を基にしている研究は広く行われている．Sawant ら [4] は，動画を対象とした色彩調和手法を提案した．彼らの研究では，Cohen-Or らの手法を基に，最適な調和テンプレートの探索方法と画像の最適な領域分割方法を改善した．Sawant らの手法は，動画に対応するために，シンプルでリアルタイム処理に適した手法である．彼らの手法では，入力画像に最適な調和テンプレートを探索するためのコスト関数を調和領域内の色を持つピクセル数として計算する．Cohen-Or らのコスト関数（式 1）と比較すると，彩度を考慮しないことで計算を単純化し，最適な調和テンプレートの探索に関する処理速度を向上させた．また，グラフカット最適化手法 [5] を用いる代わりに，色相の分割位置を単純に移動させることで，一つの領域が不自然に分割される問題に対処した．

Sawant らの研究を受けて，Gruber ら [6] は仮想現実（以下，AR）のための色彩調和手法を提案した．AR を対象としているため，彼らの手法でもリアルタイム性を重視している．彼らは，Cohen-Or らの手法のフレームワークを採用し，より高速にカラーシフトするための手法を提案した．この研究は本研究と類似した実装を行っているが，本研究とは高速化させた処理が異なるという点で明確な違いがある．また，この研究で提案された手法は GPU を必要とすることから，ハードウェアへの依存度が高いという問題がある．

近年では，画像の色彩調和処理にディープラーニングを活用する研究も行われている．Tsai ら [7] は，背景画像に前景画像をトレースすることで合成画像を生成する際，画像のリアリティをディープラーニングで学習させ，前景画像の見かけを微調整する手法を提案した．この手法は，事前に大量のデータを学習させる必要があり，特定の色彩調和論に従った色変換ではないため，本研究とはアプローチが異なる．さらに，CPU 実装の場合，この手法では 512×512pix の画像に対する色彩調和処理に 3[s] 程度の処理時間を要する．

以上のように，様々な研究が Cohen-Or らの手法を参考にしている．しかし，彼らの手法と同じ結果を高速に計算できる手法は研究されていない．本研究では，Cohen-Or らの手法で出力される結果を再現することができ，GPU 等を必要としない高速化手法を提案する．

3. 色彩調和論

色彩学の分野には様々な色彩調和論が存在しているが，その中の一つに松田 [8] によって提案された色彩調和の考えがある．この考えは Itten[9] の色彩調和論に基づいており，色を伴う分野で広く採用されている．図 1 は，松田によって提案された 8 つの調和テンプレートを示している．それぞれのテンプレートのグレーで示される色相領域は調和領域と呼ばれ，この領域内の色相は調和する色と定義される．調和領域は色相環の放射状の関係を定義するものであるため，調和領域は任意の角度に回転させることができる．以降では，調和領域の方向 α でタイプ m のテンプレートを $T_m(\alpha)$ と表記する．この色彩調和の考えでは，画像の色相ヒストグラムが調和テンプレート $T_m(\alpha)$ の調和領域内に全て入る場合，画像は特定の調和テンプレート $T_m(\alpha)$ の下で調和しているとされる．

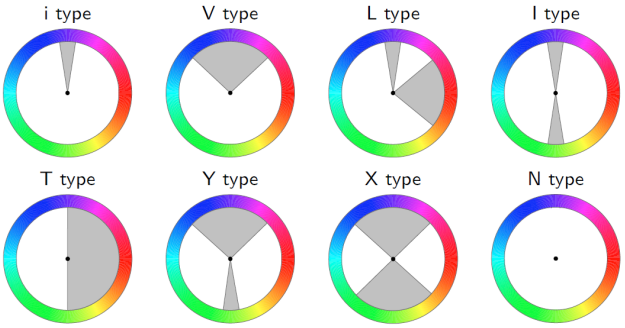

図 1 8 つの調和テンプレート（Cohen-Or ら [3]）．

4. 従来手法の概要と問題点

本研究は，色彩調和処理の研究領域で広く受け入れられている Cohen-Or ら [3] の研究に基づいている．彼らの研究では，入力画像の元の色を可能な限り変えることなく画像を調和化させる手法が提案された．提案された手法では，以下のような 3 つの処理を行うことで画像の色彩調和を実現する．

処理 1 入力画像に最適な調和テンプレートの探索
処理 2 画像のセグメンテーション
処理 3 調和テンプレートに基づく画像の再色付け

1 つ目の処理では，図 1 に示した 8 つの調和テンプレートの中で，入力画像の色相ヒストグラムに最もフィットする調和テンプレートを探索する．この処理で選択された調和テンプレートの下では，入力画像の最も多くの色が調和していると見なされるため，その調和テンプレートに基づいて処理を行うことで，最低限の色の調整で画像の色彩調和を実現できる．2 つ目の処理では，色彩調和処理後の画像の空間的一貫性を維持するために画像を領域分割する．最後の処理では，処理 1 と処理 2 の結果を踏まえて，画像を

調和した色で再色付けする．

本研究では，処理 1 に関する問題点の改善に取り組む．Cohen-Or らの手法では，入力画像のヒストグラムとテンプレートとの間の距離を定義し，その距離を最小化するという最適化問題を解くことで，画像に最も適した調和テンプレートを決める．調和配色 (m, α) に対する入力画像 X の調和を測る関数は以下のように定義される；

$$F(X, (m, \alpha)) = \sum_{p \in X} ||H(p) - E_{T_m(\alpha)}(p)|| \cdot S(p). \quad (1)$$

ここで，$H(p)$，$S(p)$ はそれぞれ，ピクセル p の色相と彩度を表している．$E_{T_m(\alpha)}(p)$ は，向き α，タイプ m のテンプレート $T_m(\alpha)$ の下で，色相 $H(p)$ に最も近い調和領域の境界の色相である．色相距離 $||\cdot||$ は色相環の弧の長さの距離を表し，調和領域内に存在する色相は距離 0 とみなされる．この関数 F を最小とする配色 (m_0, α_0) が，入力画像に最適な調和配色である．

この処理の問題点としては，入力画像の解像度が高くなるにつれて計算コストも高くなるという点である．式 (1) は調和配色 (m, α) 毎に入力画像の全てのピクセル数回だけ総和計算を行うため，入力画像の解像度が高くなると計算回数も増えるので，計算時間も長くなる．本研究では，この計算時間の問題を解決するために，新しいコスト関数の計算方法を提案する．

5. 提案手法

前章で指摘した Cohen-Or ら [3] の手法の問題点を改善する方法を提案する．別々のピクセルが同じ色を持つ場合，式 (1) の総和計算の中身の値が等しくなることを利用する．同じ色相・彩度をもつ n 個のピクセル $p_1, ..., p_n$ に対して，以下の関係式が成り立つ；

$$\begin{aligned} &||H(p_1) - E_{T_m(\alpha)}(p_1)|| \cdot S(p_1) = \cdots \\ &\quad = ||H(p_n) - E_{T_m(\alpha)}(p_n)|| \cdot S(p_n). \end{aligned} \quad (2)$$

この関係から，入力画像 X の色相-彩度ヒストグラム $N_X(h, s)$ を利用することで，式 (1) は以下のように書き換えることができる；

$$F(X, (m, \alpha)) = \sum_{i=0}^{n_h-1} \sum_{j=0}^{n_s-1} ||h_i - e_{T_m(\alpha)}(h_i)|| \cdot s_j \cdot N_X(h_i, s_j). \quad (3)$$

ここで，n_h，n_s はそれぞれ，色相の分割数と彩度の分割数を表し，h_i，s_j はそれぞれ，i 番目の色相と j 番目の彩度を表す．$e_{T_m(\alpha)}(h_i)$ は，向き α，タイプ m のテンプレート $T_m(\alpha)$ の下で, 色相 h_i に最も近い調和領域の境界の色相を表す．この式変換によって，ピクセル毎の計算を色相・彩度毎に計算することができ，画像解像度に対する計算コストの依存度を下げることができる．

式 (3) は色相距離関数 $d_{T_m}(h)$ とヒストグラム $L_X(h)$ を計算することで，さらに簡潔に記述することができる；

図 2　実験に用いた入力画像．（上）画像 X_1（解像度：$1,280 \times 853$pix），（中央）画像 X_2（解像度：$1,920 \times 1,280$pix），（下）画像 X_3（解像度：$5,000 \times 3,333$pix）

$$F(X, (m, \alpha)) = \sum_{i=0}^{n_h-1} d_{T_m}(h_i - \alpha) \cdot L_X(h_i). \quad (4)$$

ただし，

$$L_X(h_i) = \sum_{j=0}^{n_s-1} s_j \cdot N_X(h_i, s_j). \quad (5)$$

$$d_{T_m}(h) = \begin{cases} 0 & (h \in \mathcal{G}_{T_m}) \\ ||h - e_{T_m(0)}(h)|| & (otherwise) \end{cases}. \quad (6)$$

ここで，$\mathcal{G}_{T_m}$ は，テンプレート T_m の調和領域に含まれる色相の集合を表す．$d_{T_m}(h)$ と $L_X(h)$ は色相毎に定義されるため，周期 2π の離散的な周期関数であると見なすこと

ができる．従って，式 (4) は，$d_{T_m}(h)$ と $L_X(h)$ の畳み込み演算で計算することができ，この計算は高速フーリエ変換 (FFT) を用いて高速に計算することが可能である；

$$\begin{aligned} F(X,(m,\alpha)) &= (d_{T_m} * L_X)(\alpha) \\ &= \mathcal{F}^{-1}[\mathcal{F}[d_{T_m}] \cdot \mathcal{F}[L_X]](\alpha). \end{aligned} \tag{7}$$

ここで，$\mathcal{F}$ はフーリエ変換を表す．式（7）を用いることで，全ての方向 α に対するコスト関数を簡単に計算することができ，最適な配色 (m_0, α_0) も容易に求めることができる．

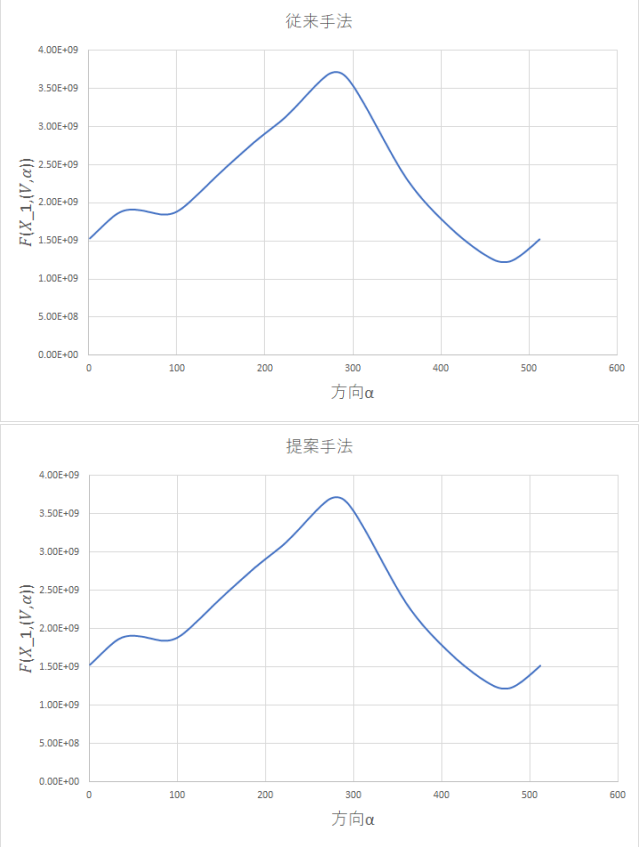

図 3　画像 X_1 に対する手法毎のコスト関数の比較

6. 実験結果

本節では，入力画像に最適な調和テンプレートを探索する処理について，Cohen-Or らの手法 [3] を用いた場合と本研究で提案した手法を用いた場合で計算時間を比較した．

まず初めに，テンプレートのタイプを固定した時のコスト関数を計算し比較する．この実験では V タイプのテンプレートを使用し，$F(X,(V,\alpha))$ のグラフを従来手法と提案手法でそれぞれ計算する．求めたグラフと計算時間を比較することで，提案手法の有効性を確認する．図 2 は実験に用いた解像度が異なる二つの入力画像である．図 3，4 に従来手法と提案手法でそれぞれ計算した $F(X,(V,\alpha))$ のグラフを示す．表 1 は従来手法と提案手法のそれぞれの計算時間を表す．

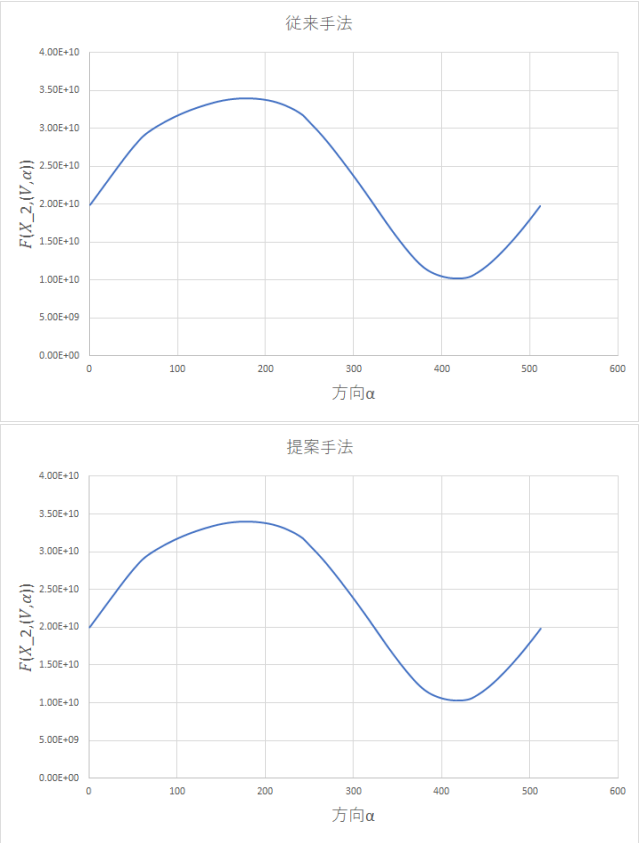

図 4　画像 X_2 に対する手法毎のコスト関数の比較

表 1　$F(X,(V,\alpha))$ の計算時間の比較結果

	画像 X_1	画像 X_2
従来手法	58,274[ms]	140,731[ms]
提案手法	27[ms]	60[ms]

画像 X_1 を用いた実験では，従来法と提案手法の間の正規化した平均誤差は 5.57×10^{-7} であった．計算時間に関しては，提案手法を用いた場合，従来手法を用いた場合よりも約 $2,160$ 倍の速さで計算できることを確認できた．画像 X_2 を用いた実験では，従来法と提案手法の間の正規化した平均誤差は 1.165×10^{-6} であった．計算時間に関しては，提案手法を用いた場合，従来手法を用いた場合よりも約 $2,350$ 倍の速さで計算できることを確認できた．

次に，入力画像 X_3 に対して，最適な調和配色 (m_0, α_0) を求める際に要する計算時間を比較する．従来手法と提案手法のそれぞれの計算時間と最適な調和テンプレートの結果を表 2 に示す．

表 2　最適配色 (m_0, α_0) の計算時間の比較結果

	計算時間 [ms]	最適値 (m_0, α_0)
従来手法	307,896	(X, 271)
提案手法	380	(X, 271)

ⓒ 2019 Information Processing Society of Japan

表 2 に示すように，従来手法と提案手法の最適な調和配色の結果は一致している．また，本研究で提案した手法は，従来手法よりも約 810 倍の速さで計算することができる．

以上の実験結果から，本研究で提案する手法は，Cohen-Or らの手法と同じ最適な調和配色を算出することができ，彼らの手法よりも高速に計算できることが確認できた．

7. アプリケーション

本節では，提案手法を応用したアプリケーションを検討することで，本研究の有用性を確認する．

7.1 合成画像のリアルタイム色彩調和システム

画像の色彩調和が有効な状況の一つは，ある画像に別の画像から切り取った画像，または透過画像をトレースし合成画像を生成する場合である．このような状況で画像の色彩調和を利用すると，前景画像と背景画像の間の色彩の違和感を緩和することができる．合成画像の色彩調和処理は，前景画像の位置が変わる毎に行う必要があるため，従来手法を用いた場合，前景画像の位置調整と色調整の試行錯誤に非常に時間を要する．本研究の提案手法は，このような状況に応用することができる．

提案手法を応用することで，リアルタイムで色彩調和処理をしながら画像合成を行うシステムを実現できる．このシステムでは，畳み込み定理の分配律を利用することでリアルタイム処理を実現する．背景画像 X_b，前景画像 X_f，前景画像でマスクされる背景部分 X_{bm} の色相-彩度ヒストグラムをそれぞれ，$N_{X_b}(h,s)$，$N_{X_f}(h,s)$，$N_{X_{bm}}(h,s)$ で表すと，それぞれのヒストグラム $L_{X_b}(h)$，$L_{X_f}(h)$，$L_{X_{bm}}(h)$ は以下のように記述される；

$$L_{X_b}(h) = \sum_{j=0}^{n_s-1} s_j \cdot N_{X_b}(h,s_j). \tag{8}$$

$$L_{X_f}(h) = \sum_{j=0}^{n_s-1} s_j \cdot N_{X_f}(h,s_j). \tag{9}$$

$$L_{X_{bm}}(h) = \sum_{j=0}^{n_s-1} s_j \cdot N_{X_{bm}}(h,s_J). \tag{10}$$

式 8，9，10 を用いると合成画像 X の色相-彩度ヒストグラム $N_X(h,s)$ は以下のように表される；

$$N_X(h,s) = N_{X_b}(h,s) - N_{X_{bm}}(h,s) + N_{X_f}(h,s). \tag{11}$$

合成画像のヒストグラム $L_X(h)$ は以下のように表される；

$$\begin{aligned} L_X(h) &= \sum_{j=0}^{n_s-1} s_j \cdot N_X(h,s_j) \\ &= \sum_{j=0}^{n_s-1} s_j \cdot \{N_{X_b}(h,s_j) - N_{X_{bm}}(h,s_j) + N_{X_f}(h,s_j)\} \\ &= L_{X_b}(h) - L_{X_{bm}}(h) + L_{X_f}(h). \end{aligned} \tag{12}$$

従って，合成画像の調和テンプレートを見つけるためのコスト関数は以下のようになる；

$$\begin{aligned} F(X,(m,\alpha)) &= (d_{T_m} * L_X)(\alpha) \\ &= \{d_{T_m} * (L_{X_b} - L_{X_{bm}} + L_{X_f})\}(\alpha) \\ &= (d_{T_m} * L_{X_b})(\alpha) + (d_{T_m} * L_{X_f})(\alpha) \\ &- (d_{T_m} * L_{X_{bm}})(\alpha). \end{aligned} \tag{13}$$

式 13 の内，前景画像が再配置される度に再計算する必要があるのは第 3 項のみである．この項は前景画像でマスクされる背景部分 X_{bm} に関する項である．画像 X_{bm} は前景画像と同じサイズで，ほとんどの場合，前景画像は背景画像よりもサイズが小さい．そのため，式 13 の関係を利用すると，合成画像全体を考慮して再計算する場合よりも高速に計算することができる．このシステムの動作の様子を図 5 に示す．

図 5 リアルタイムで前景画像に色彩調和する例

7.2 動画を対象とした色彩調和システム

本研究の提案手法は，動画を対象としたシステムにも応用することができる．動画を対象とした場合，大量の画像を扱う必要があるため，色彩調和手法の高速化によってユーザの作業効率を高めることができる．動画に色彩調和処理を行った例を図 6 に示す．このシステムでは，入力動画の全てのフレームを考慮し最適な調和配色を計算している．図 67.2 は入力動画，図 67.2 は色彩調和処理後の結果動画を示す．

また，図 7 は，動画を対象とした別のアプリケーション例を示す．このシステムでは，参照画像の色調を動画に転写することができる．カラートランスファーに色彩調和手法を用いることの利点は，色変換を緩い制約の下で行えることである．色彩調和手法では，入力画像の元の色を維持しようと努めるため，参照画像の色調に重きを置きながら対象画像の色変換を行うことができる．

ⓒ 2019 Information Processing Society of Japan

図 6　動画を対象とした色彩調和システム

図 7　動画を対象としたカラートランスファーシステム

8. まとめ

本章では，本論文で述べた色彩調和手法のための高速化手法とその効果についてまとめ，今後の課題について考察し本論文の結論とする．

本研究では，色彩調和手法が抱える計算時間の問題の解決を行った．Cohen-Or ら [3] の手法を基に，色相-彩度ヒストグラムと FFT を活用することで，高解像度画像に対しても高速に計算することができる新しいコスト関数の計算方法を提案した．従来手法と提案手法を用いた比較実験を行うことで提案手法の有効性を確認した．提案手法は，従来手法と同じ計算結果をより高速に計算することができた．また，様々なアプリケーションへ応用することで，提案手法の有用性を示した．

今後の課題として，ヒストグラム生成の高速化があげられる．色相-彩度ヒストグラムを生成するためには，全てのピクセルにアクセスする必要があるため，画像の解像度が高くなるとヒストグラム生成時間は長くなる．提案手法によって色彩調和処理の計算コストが下がり，ヒストグラム生成の計算コストが相対的に高くなったため，この処理の計算速度を高速化することで，より多くのアプリケーションに応用することが可能になると考えられる．

謝辞　This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP15H05924.

参考文献

[1] Krause, J.: *Color Index: Over 1,100 Color Combinations, CMYK andRGB Formulas, for Print and Web Media*, F&W Publications, Inc. (2002).
[2] Meier, B. J.: ACE: a color expert system for user interface design, *Proceedings of the 1st annual ACM SIGGRAPH symposium on Iser Interface Software*, ACM, pp. 117 – 128 (1988).
[3] Cohen-Or, D., Sorkine, O., Gal, R., Leyvand, T. and Xu, Y.-Q.: Color Harmonization, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 25, No. 3, pp. 624–630 (online), DOI: 10.1145/1141911.1141933 (2006).
[4] Sawant, N. and Mitra, N. J.: Color Harmonization for Videos, *Indian Conference on Computer Vision, Graphics and Image Processing*, pp. 576–582 (2008).
[5] Boykov, Y. Y. and Jolly, M.-P.: Interactive graph cuts for optimal boundary & region segmentation of objects in ND images, *Computer Vision, 2001. ICCV 2001. Proceedings. Eighth IEEE International Conference on*, Vol. 1, IEEE, pp. 105–112 (2001).
[6] Gruber, L., Kalkofen, D. and Schmalstieg, D.: Color harmonization for augmented reality, *Mixed and Augmented Reality (ISMAR), 2010 9th IEEE International Symposium on*, IEEE, pp. 227–228 (2010).
[7] Tsai, Y.-H., Shen, X., Lin, Z., Sunkavalli, K., Lu, X. and Yang, M.-H.: Deep image harmonization, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Vol. 2 (2017).
[8] 松田豊：朝倉書店 (1995).
[9] Itten, J.: *The Art of Color*, New York:Van Nostrand Reinhold Company (1960).

ⓒ 2019 Information Processing Society of Japan