

カラー顔画像の簡易アルベド推定に基づく高画質化 Color Face Image Enhancement Based on Simple Albedo Estimation

塚田 正人[†]
Masato Tsukada

石山 塁[†]
Rui Ishiyama

新井 雅年[‡]
Masatoshi Arai

舟山 知里[†]
Chisato Funayama

1. はじめに

カラー画像機器において、その画質は重要な要素である。特に顔画像は人の注意を引きやすく、高い画質が要求される。近年、様々な肌の反射モデル[1]や顔の形状復元モデル[2]が提案されており、これらのモデルを応用し、顔画像を分光特性などよりプリミティブな物理特性を復元し補正することで、顔画像の高画質化性能のさらなる向上が期待できる。実際、筆者らは、顔画像の効果的な高画質化手法として、カラー画像中の顔領域を分光空間で補正する手法や、2次元画像における顔の3次元形状を用いてアルベドを復元し、これを分光空間で補正する方法を提案した[3][4]。

一方、カラー画像装置へのソフトウェア実装を目的とする場合、アルゴリズムの高度化による計算コスト増の問題が発生する。例えば、文献[4]の場合、良好な高画質化が得られるものの2次元画像における顔の3次元形状の推定処理は、計算コストが高く（処理時間が長く）、ソフトウェア実装におけるネックとなる。

本論文では、文献[4]の課題であった高い計算コストを要する顔の3次元形状の推定処理を使用せずに、同様の処理を実現するアルゴリズムを提案する。本アルゴリズムでは、顔領域における反射特性に着目し、低周波成分を利用して肌の色情報を、陰影情報を含んだ完全拡散成分と表面反射成分に分解する。そして、肌本来の色情報を表すアルベドを算出し、これを補正する。補正されたアルベドに、上記表面反射成分、陰影情報を加算し、顔領域の画像情報を再構成する。カラー画像装置へのソフトウェア実装を想定したシミュレーション実験にて、処理時間を評価し本手法の有効性を示す。

2. 表面反射成分とアルベドの簡易推定

顔画像の高画質化に関し、入力画像中の顔領域の肌色情報をそのまま補正する文献[5]などの一般的な従来手法では、肌色は改善されるものの顔領域における陰影や表面反射成分(テカリ)が考慮されていないため、これらの成分にも一様に補正が掛かり、顔の見かけの印象に影響を与えてしまう。つまり、色補正により肌色の再現性は改善されるが、顔領域の陰影による明暗コントラストが抑制され、顔の見えに重要な立体感が失われるという問題があった。

この問題を解決するためには、肌本来の色情報を表すアルベドに色補正を施すことである。図1は、入力画像中の顔領域の色情報から、陰影および表面反射成分を含まないアルベドを復元する過程を示したものである。

今、入力画像の座標位置 x におけるチャンネル k の画素値を $V_k(x)$ 、照明照度、つまり陰影を含んだ完全拡散成分の輝度を $E_k(x)$ 、アルベドを $\rho_k(x)$ 、表面反射成分を $\delta_k(x)$ とすると、肌の反射モデルは以下のように表される。

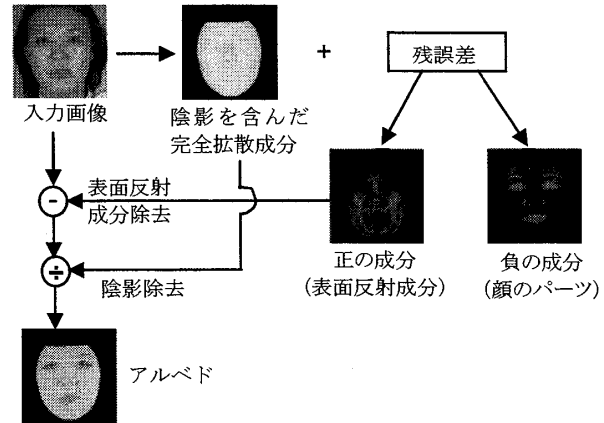


図1 顔のアルベドの算出

$$V_k(x) = \rho_k(x)E_k(x) + \delta_k(x) \quad (1)$$

照明条件が未知の顔画像において、キャストシャドウおよび近接照明の影響が無視できるのであれば、陰影を含んだ完全拡散成分は法線ベクトルの球面調和関数で近似できることが知られているが[6]、この場合、顔の3次元形状が必要となるため、文献[4]では、1枚の顔画像から顔の3次元形状を推定する3次元モーファブルモデル[2]を用いた。しかし、この顔の3次元形状の推定処理は、一般に、高い計算コストを要する。

本手法では、3次元形状の推定処理の代わりに、肌の反射特性に着目し、計算コストを抑えた手法を提案する。人間が知覚する物体の見かけの色情報は、その物体の材質(単一色のプラスチックなど)により、図2に示す2色性反射モデルとして表せる場合がある。この場合、物体からの反射光は、表面反射成分と完全拡散成分の2つの反射成分のミクスチャーで表される。完全拡散成分は、観察方向には依存せず、どの方向から見ても変化しない。一方、表面反射成分は、入射角と反射角が等しくなった角度で最も大きくなる。言い換えると、完全拡散成分は低い周波特性を、そして、表面反射成分は高い周波特性を有することに相当する。

顔の場合、2色性反射モデルそのものを適用できるわけではないが、表面反射成分が確認できるのであれば、その表面反射成分は、高い周波特性を有する特徴があると言ってよい。今、入力画像の座標位置 x におけるチャンネル k の低周波成分の画素値を $VL_k(x)$ とすると、表面反射成分 $\delta_k(x)$ は以下のように表わされる。

$$\delta_k(x) = \text{Max}(V_k(x) - VL_k(x)) \quad (2)$$

入力画像から表面反射成分を取り除き、陰影を除去することで、アルベドが算出できる。

$$\rho_k(x) = (V_k(x) - \delta_k(x)) / E_k(x) \quad (3)$$

[†]NEC 情報・メディアプロセッシング研究所

[‡]NEC 情報システムズ

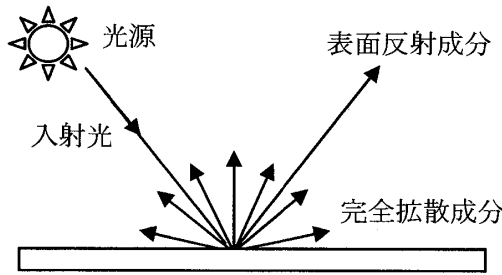


図2 2色性反射モデル

3. アルベド補正

本手法では、顔領域のアルベドを、参照肌色の表面反射率を用いて分光空間で補正する基本アルゴリズムを使用する[4][7]。本章では、このアルベド補正が線形計算で表わされることを示す。

まず、アルベドのRGB値を線形変換し、三刺激値XYZを得る。三刺激値XYZは、光源の分光分布 $I(\lambda)$ 、アルベドの表面反射率 $O(\lambda)$ 、等色関数を $x(\lambda)$ 、 $y(\lambda)$ 、 $z(\lambda)$ の積の可視光領域における積分値として表わされる。

$$X = \int I(\lambda)O(\lambda)x(\lambda)d\lambda \quad (Y, Z \text{ も同様}) \quad (4)$$

ここで、 X 、 $x(\lambda)$ は既知で、 $I(\lambda)$ は文献[8]で復元できる。 $O(\lambda)$ を、以下に示す有限次元線形モデルで表現する。

$$O(\lambda) = o_0(\lambda) + \sum_{i=1}^3 a_i o_i(\lambda) \quad (i=1\sim 3) \quad (5)$$

ここで、 $o_i(\lambda)$ は既知の基底ベクトルであり、 a_i は、肌色を表現する特性パラメータである。式(4)に式(5)を代入して観測方程式を作成し、未知特性パラメータ a_i を解くことで、 $O(\lambda)$ を得る。

肌色が好ましい色で再現されるようあらかじめ設定された参照表面反射率 $O_{ref}(\lambda)$ を参照して $O(\lambda)$ を補正する。まず、入力画像中の顔領域の平均表面反射率 $O_{avg}(\lambda)$ を求め、波長 λ に関する補正関数 $F(\lambda)$ を以下のように定義する。

$$F(\lambda) = O_{ref}(\lambda) / O_{avg}(\lambda) \quad (6)$$

顔領域の各画素について、 $O(\lambda)$ を算出し、 $F(\lambda)$ を適用して、補正後の表面反射率 $O_{md}(\lambda)$ を算出する。

$$O_{md}(\lambda) = F(\lambda)O(\lambda) \quad (7)$$

$O_{md}(x)$ を式(4)の $O(\lambda)$ に代入し、補正後のアルベドの三刺激値 $X'Y'Z'$ を計算する。そして、ディスプレイの色特性に基づいて RGB 値を算出する。

上記アルベド補正処理において、式(7)を式(4)に代入すると、以下の式で表わされる。

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fIO_{1x} & fIO_{2x} & fIO_{3x} \\ fIO_{1y} & fIO_{2y} & fIO_{3y} \\ fIO_{1z} & fIO_{2z} & fIO_{3z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} fIO_0x \\ fIO_0y \\ fIO_0z \end{bmatrix} \quad (8)$$

ここで、 $fIO_x = \sum F(\lambda)I(\lambda)o_i(\lambda)x(\lambda)$ であり定数係数となる。 fIO_y 、 fIO_z も同様である。一方、式(4)と式(5)から得られるアルベドの表面反射率を復元する観測方程式は、

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} IO_{1x} & IO_{2x} & IO_{3x} \\ IO_{1y} & IO_{2y} & IO_{3y} \\ IO_{1z} & IO_{2z} & IO_{3z} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X - IO_0x \\ Y - IO_0y \\ Z - IO_0z \end{bmatrix} \quad (9)$$

である。ここで、 $IO_x = \sum I(\lambda)o_i(\lambda)x(\lambda)$ である。 IO_y 、 IO_z も同様である。式(9)を式(8)の右辺に代入することで、アルベドの三刺激値 XYZ を線形変換でダイレクトに補正する補正式が得られる。

4. 実験

カラー画像装置へのソフトウェアの組み込みを想定し、提案手法のプログラムを ARM11 485MHz 上で実行した場合の処理時間を評価した。プログラムは、CPU 独自のネイティブコードを使用せず ANSI-C に準拠し、固定小数点化などの高速化を行った。画像の色空間は、入出力ともに YUV422 である。図 3は、本プログラムによる高画質化の過程を示したものである。

処理時間の計測は、ARM Developer Suite(ADS)1.2 を使用し、提案手法のプログラムのクロック数を計測し、処理時間とクロック数が既知である参照プログラムのデータと比較し、本プログラムの処理時間を算出した。その結果、処理時間は、1 Mピクセル当たり約 700ms となった。

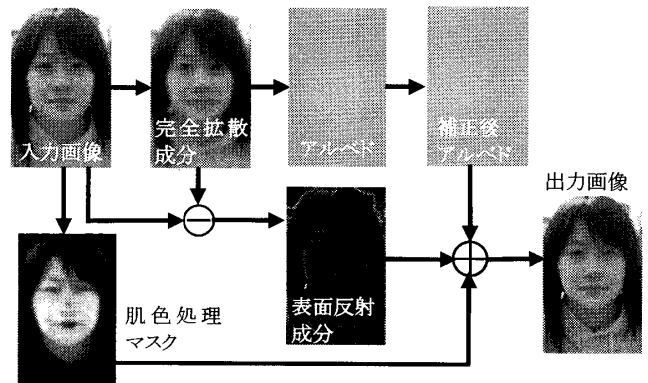


図3 簡易アルベド推定による顔画像の高画質化

5. まとめ

顔画像の高画質化手法に関し、従来法[4]の課題であった高い計算コストを要する顔の3次元形状の推定処理を使用せずに、顔領域における反射特性に着目し、低周波成分を利用して肌の色情報を、陰影情報を含んだ完全拡散成分と表面反射成分とに分離し、アルベドを推定する手法を提案した。従来法[4]では、Pentium といった高パフォーマンスのCPUでのソフトウェア実装が前提であったが、本提案手法は、ARM11 上でも十分実装が可能であることが実験により確認された。

参考文献

[1] T. Weyrich et al., "Analysis of human faces using a measurement based skin reflectance model," ACM Trans. on Graphics, vol.25, pp.1013-1024, 2006.
 [2] R. Ishiyama et al., "Fast and accurate facial pose estimation by aligning a 3d appearance model," ICPR, vol.4, pp.388-391, 2004.
 [3] 塚田ら, "分光特性に基づく肌色再現とその評価," 電子情報通信学会総合大会講演論文集, D-11-100, 2009.
 [4] C. Dubout et al., "Face image enhancement using 3D and spectral information," Proc. ICIP, pp.697-700, 2009.
 [5] M. Tsukada et al., "Automatic color preference correction for color reproduction," Proc. SPIE, Vol.4300, pp.216-223, 2000.
 [6] R. Basri et al., "Lambertian reflectance and linear subspaces," Proc. ICCV, vol.25, pp.383-390, 2001.
 [7] 塚田ら, "3次元および分光情報を用いた顔画像の高画質化," FIT2009, pp.279-280, 2009.
 [8] 塚田ら, "記憶色に基づく色再現とその高画質化応用," 映像情報メディア, Vol.60, No.3, pp.348-357, 2006.