

プリンタ階調性評価方法の研究

A Study of Smoothness Evaluation Method for Printed Gradations

鬼頭 伸一郎* 洪 博 哲*
Kitoh, Shin-ichiroh Hung, Po-Chieh

We have proposed a new method to evaluate the smoothness of printed gradations. In this method, smooth curves are estimated from gradation curves in a uniform color space, which are calculated from a captured image of output media. Various chromatic and statistic values are generated from the difference between the smooth curves and the gradation curves. We experimentally optimize an evaluating function based on these values. The final evaluation indexes of the gradation are obtained from these values and the function. By visual experiment using gray gradation patterns, we derived the evaluating function with a correlation efficient of 0.8 between subjective judgements and the indexes. Based on this experiment, we have implemented the smoothness evaluation method into a Photoshop plug-in module. By this work, it becomes possible to quantify the smoothness of a gradation image easily and systematically.

1 はじめに

近年、高画質なデジタルカメラやカラープリンタの普及に伴い、一般のデジタル画像がカラープリンタで手軽にハードコピーされる機会が増えている。それに伴い、これらプリンタの品質を定量的に評価する技術が求められており、今まで主に色再現、鮮鋭性、ノイズ感の定量化方法が研究開発されてきた。また、人物画や風景画などの一般的な自然画像では、青空や夕焼け、人肌など色や階調が徐々に変化するシーンを良好に再現することが以前から重要視されており、そういった「階調変化の滑らかさ」(以後“階調性”と呼ぶ)も評価方法が幾つか提案されてきた。^{1),2),3)}しかし、従来の階調性評価方法は視感的な検証が足りず、定量評価値と人間の視感がどの程度対応しているかが不明確であった。また、これらの方法は評価に複数のパッチ画像を使用しており(一部、グラデーション画像と組み合わせたものもあるが、実際の定量評価ではパッチ画像を使用していた¹⁾)、階調性を主観評価する場合に通常よく用いられるグラデーション画像を使用した例はなかった。

そこで本稿では、評価用パターンにグラデーション画像を用いて、人間の視感に対応した階調性の定量評価を行う方法について提案する。さらに、提案手法を実現するために行った視感評価実験とその結果について述べる。

2 階調性評価の方法

本章では、定量的な階調性評価方法を説明する。始めにその特徴を簡単に説明し、次に具体的な処理の流れを説明する。また方法の一般化のため、本章ではカラーのグラデーション画像を評価する場合を想定する。

2.1 階調性評価方法の特徴

(1) 人間の視覚システムを考慮

人間の視覚に対応した定量評価値を得るために、視覚システムを考慮した処理を行う。そこで、以前我々がノイズ感評価方法⁴⁾に使用した色知覚モデル^{5),6)}を本手法に適用する。この色知覚モデルでは、網膜上の3種類の錐体による受光信号を次段の視神経領域で反対色(赤-緑、黄-青、白-黒)に変換する。さらに次段の視神経領域で、各反対色に対し視覚空間周波数特性⁷⁾によるフィルタをかけ、最終的に大脳視覚領で色を明度・色相・彩度として認識可能な均等色空間値に変換する。グラデーション画像に対しても同様な処理を施して、均等色空間値を導出する。

(2) 階調ムラ成分の抽出

小領域内で同一濃度を持つパッチ画像のデータを比較して定量評価を行う従来の方法¹⁾では、定量評価値をグラデーション画像による主観評価と対応させるのは難しい。また、一例として L^* 比例の関数を理想的な階調変化と仮定して実際との違いを比較する方法も考えられるが、その仮定が現実と合っていないければ評価の妥当性が低くなる。実際、プリンタ毎に階調特性は異なるため、汎用的ではない。

そこで提案手法では、グラデーション画像から均等色空間内の階調変化カーブを導出した後、その階調変

*中央研究所 第2開発グループ

本稿はカラーフォーラム Japan2001 に発表された原稿を編集しなおしたものである。

化カーブから滑らかな変化を持つ仮想的な階調変化カーブを推定する。この仮想階調変化カーブは、そのプリンタを用いて滑らかな変化の階調を出力したと想定した場合の階調変化カーブである。この仮想階調変化カーブと実際の階調変化カーブの違いを計算し、階調性のムラに相当する成分を抽出する。Fig. 1 に階調ムラ成分抽出の概念図を示す。

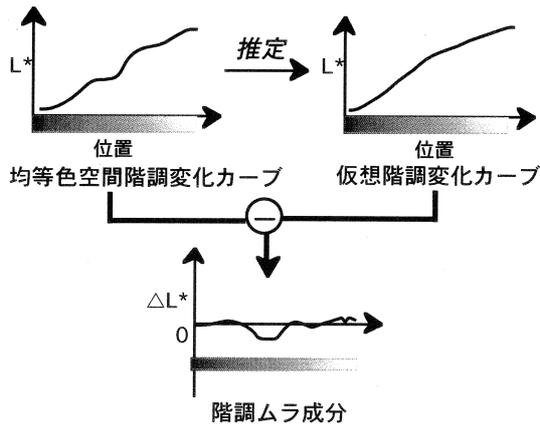


Fig. 1 Method of obtaining elements of gradation roughness

を持つ仮想階調変化カーブを推定する。推定方法は様々考えられるが、本手法では、この階調変化カーブから階調変化方向に均等に8点を抽出し、三次スプライン補間法で8点間を曲線補間する方法を使用する。この方法で仮想階調変化カーブを作成し、両者の差分から階調ムラの成分を抽出する。

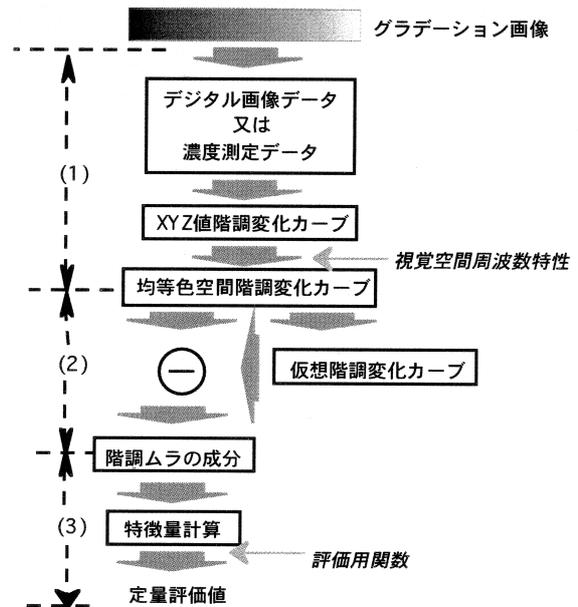


Fig. 2 Flow chart of this method

(3) 視覚実験から評価用関数を導出

視覚に対応した定量評価値を得るために、抽出した階調ムラ成分から様々な特徴量を算出する。さらに、別途実験的に抽出される評価用関数を用いて特徴量から最終的な定量評価値を導出する。

2.2 具体的手法

前述の特徴を具体化した提案手法の流れ図を Fig. 2 に示す。処理の流れを(1)から(3)の3部に分け、各部を簡単に説明する。

(1) グラデーション画像～均等色空間階調変化カーブ

プリント出力したグラデーション画像を、マイクロデンシトメータやスキャナを用いて濃度測定データもしくはデジタル画像データにする。これらデータに対して測定機器やスキャナのシステム特性を補正し、三刺激値 (XYZ 値) による階調変化カーブを得る。その後、前述の色知覚モデルに従って、反対色変換、視覚の空間周波数特性を考慮した空間フィルタリングを行い、均等色空間における階調変化カーブを導出する。

(2) 均等色空間階調変化カーブ～階調ムラ成分

均等色空間階調変化カーブから、滑らかな階調変化

(3) 階調ムラ成分～定量評価値

Fig. 3 に概念図を示す。各均等色空間値における階調ムラ成分を均等分割し、各分割区間毎に色彩データやその統計データの特徴量として抽出する。階調ムラ成分の分割は、視覚評価実験時にグラデーション画像を階調変化方向に分割するのと同様に行う。抽出する色彩データや統計データの種類の、視覚評価実験で評価用関数 (特徴量をパラメータとした重み付き関数) を最適化することで決定される。最適化された評価用関数と階調ムラ成分から抽出された特徴量を用いて階調性の定量評価値を導出する。

3 視覚評価実験

この方法による評価を実現するためには、視覚評価実験を行い視感と対応した評価用関数を抽出する必要がある。評価方法の説明ではカラーグラデーション画像を対象としたが、実験では単純化のためグレイの画像を用いた。以下に、実験手順と結果を説明する。

3.1 実験手順

滑らかに変化するグレイのグラデーション画像に、任意の周波数成分を含む階調ムラパターンを付加したサンプルを9種類（教師用6種、検定用3種）作成し、明度比例の階調特性を持つように調整された銀塩方式プリンタ（富士写真フィルム社製ピクトグラフィ 3000）でプリント出力した。被験者は画像処理研究に携わっている者7名で、ライトブース光源下（GretagMacbeth社製 SpectraLight II、Daylight 光源使用、サンプル面照度 1100 lx）で 30 cm の距離から各サンプルを評価した。

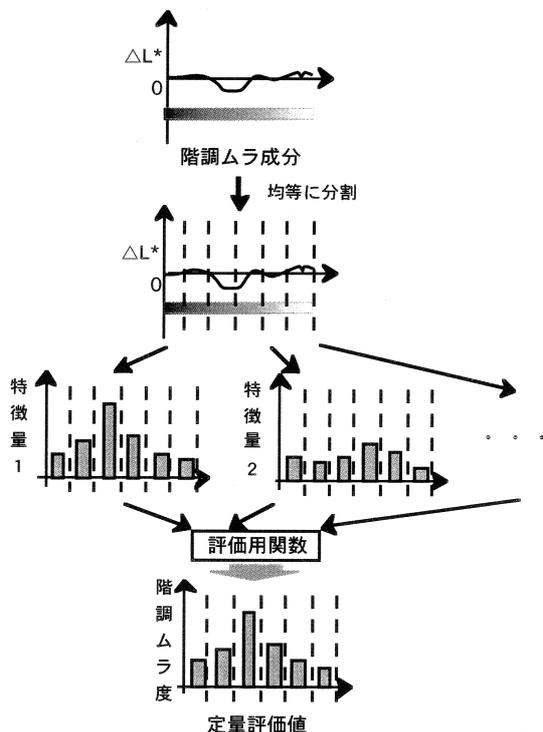


Fig. 3 Flow of deriving evaluation indexes from the element of gradation roughness

実験では、これらサンプル画像と評価の分割区間を記載したアンカー用画像を被験者に与えた。また、分割区間内の階調ムラがアンカー用画像の階調ムラと同程度であると判断した場合は評価点 10 を、階調ムラがないと判断した場合は評価点 0 を各分割区間毎に与えるように指示した。Fig. 4 に実験に使用したアンカー用画像とサンプル画像の一部を示す。

3.2 実験結果

視覚評価実験で各サンプルの視覚評価値を得る一方、同じサンプル画像をフラットベッドスキャナ（Umax Data Systems 社製 PowerLook3000）を用いて画像データ化し、提案手法を用いて ΔL^* と ΔE_{uv}^* の階調ムラ成分を算出した。さらに、視覚評価実験におけるサンプル

画像の分割区間（全 17 区間）毎に 22 種類の特徴量を算出した。その中から定量評価時に有効な特徴量と評価に寄与する度合い（特徴量に対する重みに相当）を抽出した。特徴量の重みを変えて視覚評価値と定量評価値の相関性を最適化するために、特徴量の 1 次項と 2 次項の重み付き線形和を評価用関数とした。最適化には Microsoft 社の表計算ソフトウェア Excel の分析ツールである「ソルバー」を用いた。

結果を Fig. 5 に示す。視覚評価値と定量評価値が傾き 1 の比例軸近辺に分布していることから両者に相関性があることが確認でき、相関係数は 0.82 となった。また、最適化により抽出された特徴量とその重みを Table 1 に示す。重みが最も大きい特徴量は、 ΔL^* の階調ムラ成分の標準偏差値であった。従って、グレイにおける階調性の良し悪しは、階調変化方向における明度変化量のばらつきが大きく関与している、と考えられる。

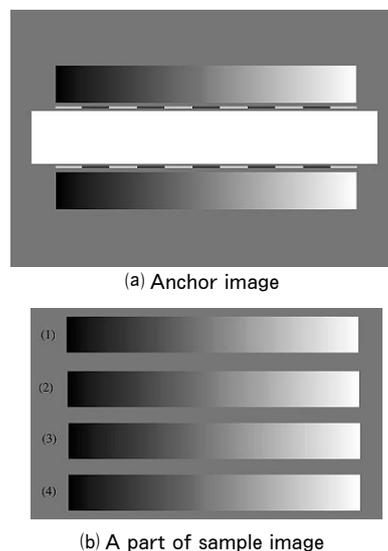


Fig. 4 Anchor image and sample image for visual experiment

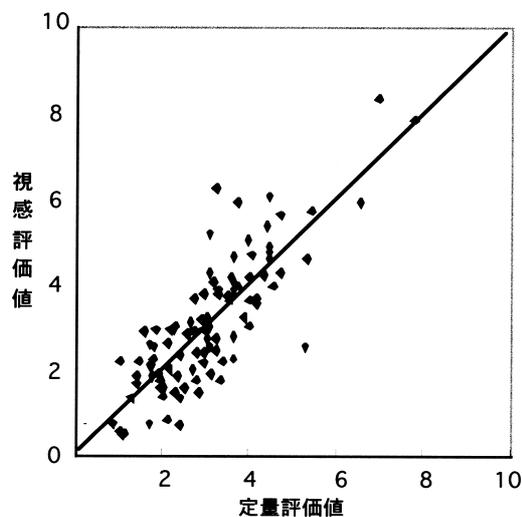


Fig. 5 The correlation chart between subjective judgements and evaluation indexes (for training charts)

Table 1 Components and their weightings of the evaluating function

特徴量	重み (1次項)	重み (2次項)
ΔL^* 標準偏差	51.31	-25.15
ΔL^* 最大値-最小値	1.91	-1.17
ΔL^* 面積	-0.05	6.94E-05
ΔE^* 最大値	9.22	-0.72
ΔE^* 最大値-最小値	-12.76	2.81
ΔE^* 平均値	-6.04	6.62
ΔE^* 変化量の標準偏差	0.53	0.05

次に、得られた評価用関数の性能を評価するために、検定サンプルに対してこの評価用関数を適用した結果を Fig. 6 に示す。検定サンプルでも同様に視感評価値と定量評価値が比例軸の周辺に分布しており、両者の相関係数は 0.78 となった。以上の結果から、視覚実験実験によって相関係数が約 0.8 となる評価用関数を導出できた。

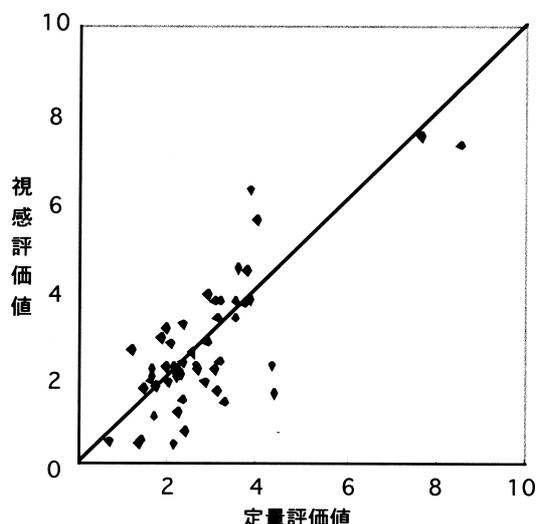


Fig. 6 The correlation chart between subjective judgements and evaluation indexes (for test charts)

4 階調性評価ツールの作成

提案手法を用いて短時間に階調性評価が可能な階調性評価ツールを作成した。本ツールは、Adobe Systems 社の画像処理ソフトウェア Photoshop 上で動作するプラグインモジュールである。フラットベッドスキャナを用いてグラデーション画像を画像データ化し、Photoshop 上で本ツールを起動してグラデーション画像データの階調性を評価する。Fig. 7 に、本ツールを用いて階調性評価を行っている様子を示す。

このツールによって、プリント出力の階調性を決まった手順に沿って手軽に短時間で定量化できるようになった。例えば、前述のスキャナを用いた場合、6分程度で1つのグラデーション画像を評価することができるが、そのうちの30秒程度がプラグインによる処理時間である。

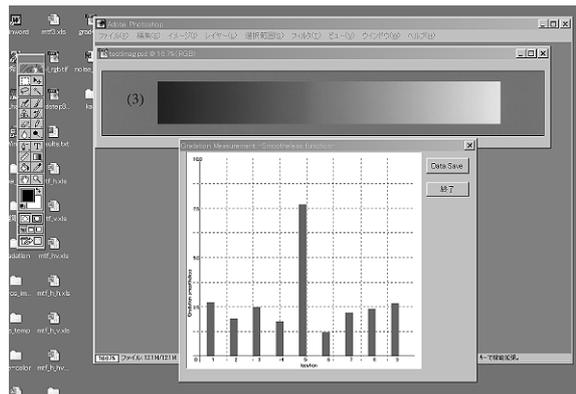


Fig. 7 Evaluation using Photoshop plug-in

5 まとめと今後の課題

本稿では、視感に対応した階調性の定量化方法を提案し、グレイのグラデーション画像をサンプルパターンとした視覚評価実験結果を示した。この結果、視感との相関係数が 0.8 程度である評価用関数を抽出することができた。また、これに基づいて階調性評価ツールを Photoshop のプラグインモジュールの形式で作成し、スキャナと本プラグインを用いることで、決まった手順に従って短時間に階調性を評価できるようになった。

しかし我々は、今までの経験から任意の画像データを高精度に評価するために必要な、視感評価値と定量評価値の相関係数は 0.9 以上と考えており、今回抽出した評価用関数はそのレベルに達していない。今後、精度向上、様々なグラデーションパターンに対する実用性の検証、カラーパターンへの拡張を行いたい。

●参考文献

- 1) 大野信, 内藤明, 犬井正男, 日本写真学会誌, 64, 161(2001).
- 2) 藤野真, 日本写真学会誌, 60, 348(1997).
- 3) T. Olson, Seventh Color Imaging Conference: Color science, systems, and Applications, 57(1999).
- 4) 青山耕三, 榎本洋道, 洪博哲, 日本写真学会誌, 57, 392(1994).
- 5) 納谷嘉信, “産業色彩学”, 朝倉書店, 東京, 1990, p.33.
- 6) 関口修利, 第10回色彩工学コンファレンス予稿集, 89(1993).
- 7) A.S.Patel, J. Opt. Soc. Am., 56, 684(1966).