勾配ノルムに基づくヒストグラム均等化

Gradient Norm-Based Histogram Equalization

正会員 井上 光 平[†], 原 健 二[†], 浦 浜 喜 一[†]Kohei Inoue[†], Kenji Hara[†] and Kiichi Urahama[†]

Abstract We propose a method for enhancing the contrast of grayscale images by equalizing their weighted histograms on the basis of the gradient norm, and we quantitatively evaluate the effectiveness of the proposed method.

キーワード: コントラスト強調, ヒストグラム均等化, 勾配ノルム

1. ま え が き

カメラで画像を撮影する際には, コントラストの良好な画像を取得することが望ましいが, 撮影条件によっては, それが困難な場合もある. そこで, 画像を取得した後にコントラストを改善するための方法が提案されている. 例えば, γ 補正やヒストグラム均等化 (histogram equalization: HE) などがよく知られているが¹⁾, 離散コサイン変換やウェーブレット変換を用いる方法²⁾なども提案されている. さらに, alpha rooting 法³⁾や HDR 画像におけるトーンマッピング⁴⁾なども関連する技術であるといえる. Arun らは, alpha rooting 法と対数変換, べき乗則変換とを組合せたコントラスト強調法を提案している⁵⁾. このように, 画像のコントラスト改善法には様々なものがあるが, 本論文では, 特に, HE 法の改良を目的とする. HE の拡張手法として, 斉藤は濃度勾配ヒストグラムを用いる HE 法 (differential gray-level method: DGM) を提案し, 濃度線形変換法, HE 法, ヒストグラム正規分布化法との比較により, DGM の有効性を示している⁵⁾. 東らは, 濃度微分特徴量ヒストグラムに基づく HE 法を提案し, 主観的評価と客観的評価の両方で, DGM よりもよい結果を得ている⁶⁾. また最近, Ooi らは, HE 法による不自然なコントラスト強調を抑える方法として, 平均画素値を保存するような HE 法 (bi-histogram equalization with a plateau limit: BHEPL) を提案した⁷⁾. 本論文では, 画素値の変化の小さい領域における過度のコントラスト強調を抑える方法として, 勾配ノルムを重みとする HE 法 (gradient norm-based HE: GNHE)

を提案し, BHEPL⁷⁾よりも高画質のコントラスト強調画像が得られることを実験で確認する. 提案手法は, DGM⁵⁾, 東らの手法⁶⁾, BHEPL⁷⁾などのように, HE 法の拡張手法の一つとして位置付けることができる.

2. 提 案 手 法

m 行 n 列の画素の配列からなるグレースケール画像を $f = [f_{ij}]$, $i = 1, \dots, m$; $j = 1, \dots, n$ とする. $f_{ij} \in \{0, \dots, 255\}$ は画素 (i, j) の値である. まず, 画素 (i, j) における画素値の垂直方向の差分を

$$dv_{ij} = \begin{cases} dv_{ij}^B & \text{if } |dv_{ij}^B| \geq |dv_{ij}^F| \\ dv_{ij}^F & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

で定義する. ここで

$$dv_{ij}^B = \begin{cases} f_{ij} - f_{i-1,j} & \text{if } i-1 \geq 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$dv_{ij}^F = \begin{cases} f_{i+1,j} - f_{ij} & \text{if } i+1 \leq m \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

である. 同様に, 水平方向の画素値の差分を

$$dh_{ij} = \begin{cases} dh_{ij}^B & \text{if } |dh_{ij}^B| \geq |dh_{ij}^F| \\ dh_{ij}^F & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

で定義する. ここで

$$dh_{ij}^B = \begin{cases} f_{ij} - f_{i,j-1} & \text{if } j-1 \geq 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$dh_{ij}^F = \begin{cases} f_{i,j+1} - f_{ij} & \text{if } j+1 \leq n \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

である. 次に, 画素 (i, j) における画素値の勾配ノルムを

$$w_{ij} = \sqrt{dv_{ij}^2 + dh_{ij}^2} \quad (7)$$

とする. このようにすると, 画像の端でも勾配ノルムを計

2013 年 1 月 11 日受付, 2013 年 2 月 28 日再受付, 2013 年 3 月 13 日採録

[†]九州大学 大学院芸術工学研究院 コミュニケーションデザイン科学部門
(〒 815-8540 福岡市南区塩原 4-9-1, TEL 092-553-4512)

[†]Department of Communication Design Science, Faculty of Design,
Kyushu University

(4-9-1, Shiobaru, Minami-ku, Fukuoka-shi, 815-8540 Japan)

図 1 簡単な例: (a) 元画像, (b) HE の結果, (c) $w = [w_{ij}]$, (d) GNHE の結果

A simple example: (a) original image, (b) result of HE, (c) $w = [w_{ij}]$, and (d) result of GNHE.

図 2 ヒストグラム h とその累積 H : (a) 重みなし, (b) (a) を累積したもの, (c) 重み付き, (d) (c) を累積したもの
Histograms and their cumulums: (a) unweighted, (b) the cumulation of (a), (c) weighted, and (d) the cumulation of (c).

算でき、エッジの両側で対称な勾配ノルムが得られる。本論文では、この w_{ij} をヒストグラムへの投票の重みとする重み付き HE 法 (gradient norm-based HE: GNHE) を提案する。すなわちヒストグラムを $h = [h_k]$, $k = 0, \dots, 255$ とし、階調値 k の度数を

$$h_k = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n w_{ij} \delta_{k, f_{ij}} \quad (8)$$

とし ($\delta_{k, f_{ij}}$ はクロネッカーのデルタであり、 $k = f_{ij}$ ならば $\delta_{k, f_{ij}} = 1$ となり、その他は $\delta_{k, f_{ij}} = 0$ となる), これを累積したものを $H = [H_k]$, $H_k = \sum_{l=0}^k h_l$ とし、コントラスト強調画像を $g = [g_{ij}]$, $g_{ij} = 255(H_{f_{ij}} - H_0)/(H_{255} - H_0)$ とする。

3. 実験例

最初に、図 1 に示す簡単な例を用いて、従来の HE と GNHE の違いを説明する。図 1(a) の画像は、左右が黒 ($f_{ij} = 0$) と白 ($f_{ij} = 255$) の領域に分かれており、黒

領域の中心には $f_{ij} = 10$ の矩形領域 R_L があり、白領域の中心には $f_{ij} = 205$ の矩形領域 R_R がある。 R_L は、周囲の黒領域との画素値の差が小さいため視認しにくい。この画像に HE を施すと、図 1(b) に示すように R_L が明瞭になる。ここでは Paint Shop Pro (Ver. 7.04) のヒストグラム機能 (平均化) を用いた。このように HE では、視認できないほどの画素値の差も強調されることがあり、これが擬似輪郭を生じたり、平均画素値を大きく変化させるような不自然なコントラスト強調を引き起こす原因になる。このような好ましくない強調を抑えるために、GNHE では画素値の勾配ノルムを利用する。図 1(c) に勾配ノルム $w = [w_{ij}]$ を画像化したものを示す。この画像では、中央の白と黒の境界における勾配ノルムが最も大きく、その次に右側の R_R の境界における勾配ノルムが大きい。左側の R_L の境界における勾配ノルムは R_R のそれに比べて小さい。この w を重みとして HE を行った結果を図 1(d) に示す。図 1(b) と比較すると、黒領域と R_L の間の過度のコントラスト強調が抑えられている。このような結果になる理由を、図 2 に示すグラフを用いて説明する。図 2(a) は、図 1(a) の画像の重みなしヒストグラム (すなわち、(8) 式で $w_{ij} = 1$ としたもの) を表しており、縦軸は h_k であり、横軸は k である。このグラフには四つのピークがあり、それらは左から順に、黒領域、矩形領域 R_L , 矩形領域 R_R , 白領域に対応している。このグラフを累積すると、図 2(b) のような階段状のグラフが得られる。この階段状のグラフの段差の大きさは、コントラスト強調の度合いを表しており、例えば、左端の短い水平線分は、黒領域と R_L の間のコントラストが低いことを表しており、それに続く垂直の線分は、これら 2 領域間のコントラストが垂直線分の長さに応じた度合いで強調されることを表している。この段差の大きさは、 R_L の面積が広いほど大きくなり、黒領域と R_L のコントラストの高低とは無関係である。図 1(a) の画像の場合、 R_L の面積がある程度広いため、それに応じて図 1(b) では、黒領域と R_L のコントラストが強調されている。一方、図 2(c) に示す重み付きヒストグラムでは、(7) 式の勾配ノルムを重みとするため、黒領域と R_L の境界における勾配ノルムが小さいことから、左から 2 番目のピークが相対的に小さくなり、その結果、図 2(d) に示すように、左端の段差は小さくなり、黒領域と R_L の間のコントラスト強調は抑えられる。

次に、実際のグレースケール画像のコントラスト強調の結果を図 3 に示す。図 3(a) は元の画像であり、図 3(b), (c) はそれぞれ HE, GNHE の結果である。図 3(b) ではカメラマンの顔に擬似輪郭が生じたり、空の領域における横線状のノイズが強調されたりしているが、図 3(c) ではそのような不自然なコントラスト強調が抑えられている。図 4 に元画像 (図 3(a)) の h と H を示す。図 4(a), (b) はそれぞれ重みなしの h , H であり、図 4(c), (d) はそれぞれ重み付きの h , H である。図 4(d) は図 4(c) よりも滑らかであ

図3 グレースケール画像のコントラスト強調: (a) 元画像, (b) HEの結果, (c) GNHEの結果

Contrast enhancement of a grayscale image: (a) original image, (b) the result of HE, and (c) the result of GNHE.

図4 元画像(図3(a))のヒストグラム h とその累積 H : (a) 重みなし, (b) (a)を累積したもの, (c) 重み付き, (d) (c)を累積したもの

Histograms and their cumulums of Fig. 3(a): (a) un-weighted, (b) the cumulation of (a), (c) weighted, and (d) the cumulation of (c).

り, GNHEでは不自然なコントラスト強調が抑えられることを示している. また, GNHEによるコントラスト強調画像(図3(c))の h と H を図5に示す. 図5(a), (b)はそれぞれ重みなしの h , H であり, 図5(c), (d)はそれぞれ重み付きの h , H である. 図5(d)は図5(c)よりも直線的であり, GNHEによって重み付きヒストグラムが均等化されていることを示している.

他の画像での結果を図6に示す. 上段は元画像であり, 中段はBHEPL⁷⁾の結果であり, 下段はGNHEの結果である. 両手法で不自然さの少ないコントラスト強調ができており, Jobsonらの画質評価指標⁸⁾による定量的評価の結果を図7に示す. 横軸のアルファベットは図6の列に付けたものに対応し, 縦軸は評価値を表す. この値が大きいほど画質がよいとされる. GNHEによる値がBHEPL⁷⁾による値を上回っており, 提案手法による画質の改善が確認された.

図6(d)-(f)の部分拡大画像を図8(a)-(c)に示す. 図8の上から1段目は入力画像である. 2段目はHE法の結果であり, 図6には示していないが, 比較のために追加している. 3, 4段目はそれぞれBHEPL⁷⁾とGNHEの結果である. まず, 図8(a)では, HE法(2段)によってノイズが強調されているが, BHEPL⁷⁾(3段)ではHE法(2段)ほどノイズ

図5 GNHEによるコントラスト強調画像(図3(c))のヒストグラム h とその累積 H : (a) 重みなし, (b) (a)を累積したもの, (c) 重み付き, (d) (c)を累積したもの

Histograms and their cumulums of Fig. 3(c): (a) un-weighted, (b) the cumulation of (a), (c) weighted, and (d) the cumulation of (c).

図7 Jobsonの方法⁸⁾による図6の画像の定量的評価
Quantitative evaluation of the images in Fig. 6 by Jobson's method⁸⁾.

は強調されていない. GNHE(4段)では, BHEPL⁷⁾(3段)よりもノイズの強調が目立つがHE法(2段)ほど強くはなく, 壁の明暗の差はBHEPL⁷⁾(3段)よりも明瞭になっている. 図8(b)では, BHEPL⁷⁾(3段)がノイズの強調を抑えたコントラスト強調ができており, GNHE(4段)はHE法(2段)と同程度にノイズを強調している. 図8(c)では, HE法(2段)によるノイズの強調が目立ち, BHEPL⁷⁾(3段)が最もノイズの強調が抑えられており, GNHE(4段)はそれらの中間にある. このようにGNHEでは, BHEPL⁷⁾よりも平坦な部分におけるノイズを強調する傾向がある. これは, 個々のノイズが小さくても平坦な部分が広いと, 平坦な部分の階調値のヒストグラムの度数が大きくなるためであると考えられる. また, 図6(d)の(下段)では, 手前の白い部分が白飛びしていることから, 元画像のエッジ部が特定の明度域に集中していると, それ以外の明度域でのコントラストが結果的に潰れてしまうこともあると考えられる. これらのことから, GNHEは, 平坦な部分にノイズがほとんどない画像, 平坦な部分の面積が狭い画像, エッジ部が広い明度域に分布する画像のコントラスト強調に適していると考えられる.

図 6 他の結果: (上段) 元画像, (中段) BHEPL⁷⁾の結果, (下段) GNHE の結果
Other results: (top) original images, (middle) the results of BHEPL⁷⁾, and (bottom) the results of GNHE.

図 8 部分拡大画像: (1 段) 元画像, (2 段) HE 法の結果, (3 段) BHEPL⁷⁾の結果, (4 段) GNHE の結果; (a) 図 6(d) の左奥の壁, (b) 図 6(e) の下部の中央付近, (c) 図 6(f) の右上の暗部

Zoomed parts: (1st row) original images, (2nd row) the results of HE, (3rd row) the results of BHEPL⁷⁾, and (4th row) the results of GNHE; (a) the left back wall in Fig. 6(d), (b) the lower part around the center of Fig. 6(e), and (c) the upper-right dark part in Fig. 6(f).

4. む す び

勾配ノルムを重みとするヒストグラム均等化を提案し、従来手法よりも高画質のコントラスト強調画像が得られる

ことを実験で確認した。カラー画像への拡張が今後の課題である。

【文 献】

- 1) R. C. Gonzales and R. E. Woods: Digital Image Processing (3rd Edition), Prentice Hall (2007)
- 2) R. Chouhan, C. P. Kumar, R. Kumar, and R. K. Jha: "Contrast Enhancement of Dark Images using Stochastic Resonance in Wavelet Domain", IJMLC, **2**, 5, pp. 711-715 (2012)
- 3) Arun R., M. S. Nair, R. Vrinthavani, and R. Tatavarti: "An alpha rooting based hybrid technique for image enhancement", Engineering Letters, **19**, 3, pp. 159-168 (2011)
- 4) G. Qiu, J. Guan, J. Duan, and M. Chen: "Tone Mapping for HDR Image using Optimization - A New Closed Form Solution", Proc. ICPR, pp. 996-999 (2006)
- 5) 齊藤文彦: "濃度勾配ヒストグラムによる画像のコントラスト改善", 電気学論, C, **126**, 2, pp. 228-236 (2006)
- 6) 東佑馬, 齊藤文彦: "濃度微分特徴量ヒストグラムに基づく画像のコントラスト改善", 電気学論, C, **127**, 5, pp. 705-711 (2008)
- 7) C. H. Ooi, N. S. P. Kong, and H. Ibrahim: "Bi-histogram equalization with a plateau limit for digital image enhancement", IEEE Trans. Consumer Electronics, **55**, 4, pp. 2072-2080 (2009)
- 8) D. J. Jobson, Z. Rahman, and G. A. Woodell: "The statistics of visual representation", in Visual Information Processing (2002)

井上 光平 1996 年, 九州芸術工科大学画像設計学科卒業。2000 年, 同大学大学院博士後期課程修了。現在, 九州大学大学院芸術工学研究院助教。パターン認識, 画像処理, コンピュータビジョンに関する研究に従事。正会員。

原 健二 1989 年, 京都大学大学院工学研究科修士課程修了。同年, 武田薬品工業(株)入社。1991 年, 福岡県工業技術センター入所。2001 年, 東京大学生産技術研究所協力研究員。現在, 九州大学大学院芸術工学研究院准教授。博士(工学)。コンピュータビジョン, 画像処理に関する研究に従事。

浦浜 喜一 1980 年, 九州大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年, 同大学助手。1989 年, 九州工業大学助教授。現在, 九州大学大学院芸術工学研究院教授。パターン認識, 画像情報処理の研究に従事。