

局所適応型輝度補正における パラメータ決定の自動化に関する研究

加藤直人^{1,a)} 池辺将之¹ 本久順一¹ 下山荘介²

概要: 本稿では局所ヒストグラム平坦化を基にしたダイナミックレンジ圧縮技術の自動制御手法を提案する。局所ヒストグラム平坦化ではフィルタカーネル毎のヒストグラムを用いて補正関数を生成する。フィルタカーネル内の輝度値に偏りが大きい場合、補正関数の勾配が急になり不自然なコントラスト強調を招く。我々は今までに、補正関数の変動域に対して上限値と下限値を設定し、変動域を制限する手法を提案してきた。本研究は、画像の情報を利用して上限値と下限値を自動的に決定することを目的とする。

特に今回の報告では、夜景画像を対象とし、その補正において影響が大きい上限値を決定した。夜景画像の補正指針として、主に、暗い領域を良好に認識できるように補正すること、光源等の比較的明るい領域を適切な明るさに補正することを考慮した。指針を基に上限値を手動で決定したところ、画像のヒストグラムとエッジ量が上限値の決定に寄与しているという知見を得た。提案手法では、この知見に基づいて上限値の自動化を行なった。主観評価を行ったところ、提案手法は既存手法に比べ、画像補正が適切であるという結果が得られた。

キーワード: ダイナミックレンジ圧縮, ヒストグラム平坦化, 夜景画像, エッジ, ヒストグラム

Study on Automatic Parameter Control for Local Adaptive Tone Mapping

NAOTO KATO^{1,a)} MASAYUKI IKEBE¹ JUNICHI MOTOHISA¹ SOUSUKE SHIMOYAMA²

Abstract: In this paper, we propose an automatic control method of parameters for local adaptive tone mapping based on Local Histogram Equalization (LHE). The tone mapping function is generated by a cumulative histogram in LHE. When luminance in the filter kernel has a large bias, gradient of mapping function is steep and the mapped image has unnatural artifacts. By setting upper and lower limits of fluctuation range of tone mapping function, our conventional method controls spatial contrast of the image. Our goal is setting upper and lower limits automatically. In this study, we focus on nightscape image and propose automatic control with upper limits. We have two main considerations about enhancement of nightscape image: remedying obscure regions, and adjusting bright regions like lights appropriately. Based on the considerations, we found knowledge that edge and histogram of the image have a relationship with upper limits. In subjective evaluation of the image quality, we confirmed that our method is better than conventional one.

Keywords: Dynamic Range Compression, Histogram equalization, Night scene, edge, histogram

¹ 北海道大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology,
Hokkaido University, Kita14, Nishi9, Kita-ku, Sapporo 060-
0814, Japan

² 大日本印刷 (株)
Dai Nippon Printing Corporation, Ichigayakaga1, Shinjuku
162-0062, Japan

a) kato@impulse.ist.hokudai.ac.jp

1. 背景・研究目的

近年、社会の情報化に伴って、大容量のデータを簡単に扱うことが可能となり、画像情報が頻繁にやり取りされるようになった。そのような社会情勢の中で、デジタルカメラがフィルムカメラに代わって広く普及し、現在ほとん



図 1 ガンマ補正
Fig. 1 Gamma correction

どの携帯電話にその機能が搭載されている。

デジタルカメラから入力される画像は、画像の濃淡や色の情報を数値化したデジタル画像で表現される。このデジタル画像を入力するための画像素子には Charge Coupled Device(CCD) や Complementary Metal Oxide Semiconductor(CMOS) イメージセンサが利用され、防犯カメラ等のさまざまな用途に向けた開発が進められている。

一定の露光時間でとらえることのできる識別可能な光信号の、最小値と最大値の幅のことをダイナミックレンジという。一般的にイメージセンサは、人の目に比べてダイナミックレンジが狭く、広いダイナミックレンジを持つ環境を撮影した場合、露光時間の長さによって問題が生じてくる。露光時間が短い場合、明るい領域では十分な光量を得られ、良好に認識することが可能となるが、暗い領域において光量が不十分なため黒潰れが起きてしまうことがある。逆に露光時間が長い場合、暗い領域において十分な光量を得られ良好に認識できるが、明るい領域では光量が飽和し白トビしてしまうケースがある。黒潰れや白トビなどの問題を解決する場合、例えば、複数の露光時間で撮影した画像を合成することで対応する [1], [2]。このような手法は、画像の撮影時における処理である。撮影後の画像に対する補正手法として、ガンマ補正手法が挙げられる。しかしながらガンマ補正では、画像全ての領域に同じ輝度変換関数を用いるため、局所的なコントラストが低下してしまう。例を図 1 に示す。

現段階において効果的な局所的画像補正手法として、我々は、局所適応処理に必要なパラメータを手動で設定するものを提案してきた [3]。以後この補正手法を本稿では局所適応型輝度補正と述べる。我々の今までの手法において、局所適応型輝度補正手法のパラメータを自動的に決定することが課題の一つであり、その解決が本研究の目的である。

2. 局所適応型輝度補正

今回用いた局所適応型輝度補正について説明する。

2.1 局所ヒストグラム平坦化

我々の手法は、局所ヒストグラム平坦化手法 (LHE : Local Histogram Equalization) を基にしており、対象画素における周囲の画素 (ウィンドウ内の画素) の統計量に応じて輝度範囲を割り当てて画素値を変換する。一画素ずつすべての画素を変換することにより画像全体を補正する。処理時間の短縮と滑らかな補正を行うためにヒストグラムを 4 つのビン (区間) に分ける。0 番目のビンの輝度範囲は $0 \sim 63$ となる。入力輝度値 : I_{in} , 出力輝度値 : I_{out} , ウィンドウサイズ N^2 , ウィンドウ内ヒストグラムにおける i 番目のビンの度数 : h_i , I_{in} を含むビン : b ($0 \sim 3$), i 番目のビンの輝度範囲の最小値 : C_i とする。累積ヒストグラム H_i を式 1, 累積ヒストグラムから算出した補正関数を式 2 に示す。

$$H_i = \sum_{k=0}^i h_k \quad (1)$$

$$I_{out}(x, y) = \begin{cases} 255 \frac{\alpha(I_{in}(x, y)+1)}{N^2} & b = 0 \\ 255 \frac{\alpha(C_{b+1}-I_{in}(x, y))+\beta}{N^2} & b > 0 \end{cases} \quad (2)$$

ただし

$$\begin{cases} \alpha = \frac{H_b}{C_{b+1}} & b = 0 \\ \alpha = \frac{H_b - H_{b-1}}{C_{b+1} - C_{b-1}}, \beta = H_{b-1} & b > 0 \end{cases}$$

$b = 3$ の場合には $C_{b+1} = 256$ とする。図 2 に累積ヒストグラムから算出した補正関数を示す。ブロックが累積ヒストグラム、ブロック内を結んでいる線が補正関数を表している。

2.2 ガンマ補正関数と重みづけ

累積ヒストグラム各ビンの境界を通るガンマ補正関数を作成する。 i 番目のビンの度数と $i+1$ 番目のビンの境界を j ($0 \sim 2$) とする。式は以下のように与えられる。

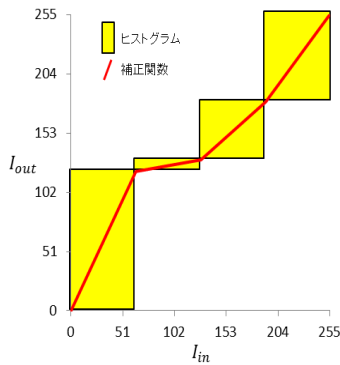


図 2 累積ヒストグラムより算出した補正関数.

Fig. 2 Mapping function derived from cumulative histogram

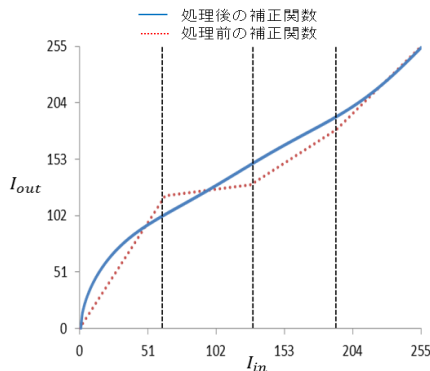


図 3 ガンマ関数を利用した補正関数

Fig. 3 Correction function using gamma function

$$I'_j(x, y) = I_{in}(x, y)^{\frac{1}{\gamma_j}} \quad (3)$$

$$\gamma_j = \frac{\log \frac{p_j}{255}}{\log \frac{q_j}{255}}$$

$$p_j = \frac{255 H_j}{N^2}$$

$$q_j = 255 \frac{j+1}{4}$$

次にそれぞれのビンの境界を通るようにガンマ補正関数を作成した後にガウス関数で重みづけをすることによって補正関数を得る. 重みづけの式は次のようになっている.

$$B_0 = \exp\left(-\frac{\left(\frac{I_{in}(x,y)}{255}\right)^2}{\sigma^2}\right)$$

$$B_2 = \exp\left(-\frac{\left(\frac{I_{in}(x,y)}{255} - 1\right)^2}{\sigma^2}\right) \quad (4)$$

$$B_1 = 1 - (B_0 + B_2)$$

σ はガウス関数の標準偏差で, 今回は経験的に $\sigma = 0.3$ とした. 式 (3) と式 (4) を合成する.

$$I_{out} = \sum_{j=0}^2 B_j I'_j(x, y) \quad (5)$$

図 3 に式 (5) を利用して算出した補正関数を示す.

2.3 補正関数の制御

2.2 節で作成した補正関数をそのまま利用して補正する

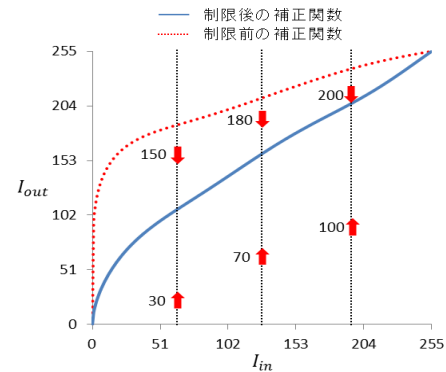


図 4 各境界で制限された補正関数

Fig. 4 Mapping function restricted by max and min values at each tone

と, ウィンドウを設定する領域によって補正関数が大きく異なり, 空間コントラストが過度に強調され, 補正後の画像が不自然になってしまうことがある. そのため 2.2 節で作成した補正関数の輝度範囲を制御するために, ビンの各境界に上限・下限値を設定し, その設定値の間を通るように補正関数を制限する. 各境界に設けた上限・下限値をそれぞれ max 値, min 値とする. min 値はオフセット, max 値と min 値の差は空間コントラストを表す. この制限により, 輝度階級ごとのオフセット・空間コントラストの調整が可能となり, 過度な空間コントラスト強調を解消することができる. 図 4 に各境界で補正関数を制限したグラフを示す.

3. 夜景画像のパラメータ決定

2.3 節で述べた各境界の max 値, min 値を基に決定方法について提案する.

3.1 パラメータ決定の流れ

実際の撮像では様々な風景画像が想定されるが, 本稿ではまずパラメータ決定自動化の第一歩として, 夜景画像を対象にしたパラメータの決定を行う. 夜景画像を対象とした理由は, 2 章で説明した局所適応型輝度補正が黒潰れ画像に有効で, 黒潰れが起きやすい画像の一つとして夜景画像があげられるためである. また, 夜景画像の補正結果は下限に比べて上限の影響を大きく受けるという知見をヒストグラム平坦化の特徴から得ており, 自動化に用いるパラメータを減らすことで問題はより単純化される. よって, 夜景画像の局所適応補正手法において, 各 max 値 (上限を設定している) のみを自動決定する.

夜景を撮影した場合, その場で実際に見た印象よりも暗く映ってしまうことが多い. 今回主観に基づき, 数十枚の夜景画像を次の 3 種類に分類することが可能であると考えた. 括弧内は補正の自動化に対する指針である.

- (1) 全体的に暗い画像.



図 5 3 種類の夜景画像

Fig. 5 Three kinds of image of a night view

- (全体的に明るく補正)
- (2) 被写体は暗いが、明るい領域が存在する画像。
(被写体は明るく、明るい領域は強調しすぎない)
- (3) 被写体自体が明るく、背景が暗い画像。
(被写体を強調しすぎない、背景を明るくしすぎない)

図 5 に 3 種類の夜景画像を示す。

パラメータを自動決定する前に次の作業を行った。まず、様々な条件の夜景画像を数十枚撮影する。その時のイメージを基に前章で述べた輝度補正を行い、画像を補正する。この際、パラメータ値は手動で調節した。その結果、夜景画像のエッジ・ヒストグラムと、制限パラメータが関連するという知見を得た。次に、エッジの存在する部分の輝度値の情報を得た。まず、画像の階調 (256 階調) を (0 ~ 25)(26 ~ 50) ... (226 ~ 255) と 10 ビンに分ける。エッジは、ガウシアンフィルタによる平滑化後の画像から取得する。ウィンドウサイズ 5×5 、ガウス関数の標準偏差 $\sigma = 1$ とした。

エッジ情報は、上下と左右の輝度値の差分をとることとで得る。この時、エッジ検出に条件を与える。差分をとる 2 画素が同じビンに存在している、かつ、差分の大きさに閾値を与え閾値以上である場合を検出する。今回は閾値を 5 とした。ガウシアンフィルタの式とエッジの差分を以下に示す。ただし、平滑化した後の画素: $G(x, y)$, $(2s + 1)^2 = 5 \times 5 = 25$, 横方向のエッジ: $E_{\text{cols}}(x, y)$, 横方向のエッジ: $E_{\text{rows}}(x, y)$ とする。

$$G(x, y) = \frac{1}{C} \sum_{l=-s}^s \sum_{k=-s}^s g(k, l) I_{\text{in}}(x + k, y + l) \quad (6)$$

$$C = (2s + 1)^2, g(k, l) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{k^2 + l^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$f_{\text{th}}(u) = \begin{cases} u & u \geq 5 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

$$E_{\text{cols}}(x, y) = f_{\text{th}}(G(x, y) - G(x - 1, y)) \quad (8)$$

$$E_{\text{rows}}(x, y) = f_{\text{th}}(G(x, y) - G(x, y - 1)) \quad (9)$$

例として、図 6 補正前後の (0 ~ 25) の輝度値のエッジを

示す。エッジの存在する部分の入力輝度値を調べる。この値を調べることでエッジがどの輝度値に分布していたかがわかる。 $E_{\text{count}}(I_{\text{in}})$ をエッジ量と定義する。以下に式を示す。

$$l_{\text{th}}(v) = \begin{cases} 0 & v = 0 \\ v & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

$$E_{\text{count}}(I_{\text{in}}) = \sum l_{\text{th}}(E_{\text{cols}}(x, y) + E_{\text{rows}}(x, y)) \quad (11)$$

エッジ量は、エッジの存在する画素についての輝度値ごとの総量である。

3.2 暗部 max 値の自動決定

暗部 max 値を、主に黒潰れしている物体を明るく補正することを意図として調節する。黒潰れしている物体が主な補正対象である画像の場合には、その物体を明るく補正する。一方、黒潰れした物体が補正対象でない場合には、明るく補正すると高輝度とのバランスが不自然になる。そのため、高輝度とのバランスを考慮し補正を行う。

全体 (輝度値 0~255) のエッジ量と暗部のエッジ量の割合に応じて、パラメータを決定する。暗部のエッジの割合が高い場合には暗部が主な補正対象と判断する。暗部の物体を明るく補正するために、補正関数の勾配を大きくする。暗部エッジの割合が低いときには、物体は主な補正対象ではないと判断する。低輝度値と高輝度値とのバランスを保つ必要があるため、補正関数の勾配を小さくし、処理前後での輝度値の変化を抑制する。

3.3 中間部 max 値の自動決定

中間部 max 値に対して、次の二項目を意図として調節する。一つ目はある程度良好に見えている領域の明るさを適切に補正すること。二つ目は暗い光源の明るさを適切に補正することである。全体的に暗い画像の場合には、暗部 max 値同様暗いところを明るく補正し、良好に認識できるようにする。明るい領域が存在する場合には全体的に明るく補正するが明るくしすぎないように配慮する。

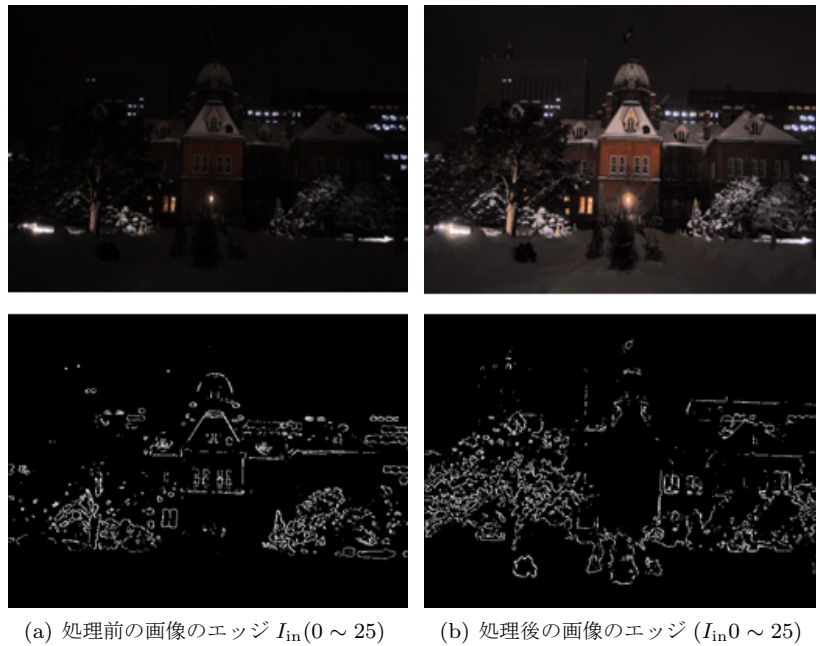


図 6 エッジ ($I_{in}(0 \sim 25)$)

Fig. 6 edge($I_{in}(0 \sim 25)$)

全体の輝度値の量と、中間部の輝度値の量の割合に応じてパラメータを決定する（画像の全体のヒストグラムに対する中間部のヒストグラムの割合で決定する）。中間部のヒストグラムの割合が多い場合には、中間部輝度値の画素が多く存在する。つまり明るい領域が存在すると判断し、強調しすぎない程度に明るく補正する。一方、中間部のヒストグラムの割合が少ない場合には、中間部輝度値の画素が少ない。つまり全体的に暗い画像と判断し、画像全体を明るく補正する。

3.4 明部 max 値

明部 max 値は明るい光源の補正に寄与する。光源内にテクスチャが存在する場合、そのコントラストを強調することを意図とし、明部 max 値を調節する。例えば、コンビニの看板のように、光源にテクスチャが含まれる場合にはコントラストを強調することによって看板の輪郭を明確にする。一方、街灯のように、光源にテクスチャが含まれない場合には、コントラストを低減させることによって空間的に一様な光に補正する。

高輝度値のエッジ量とヒストグラム形状に応じてパラメータを決定する。まず、高輝度値の画素量をヒストグラムにより判断する。画素が存在しない場合には、明部 max 値は補正に寄与しないので、パラメータを決定する必要がない。画素が存在する場合には、次に高輝度値のエッジが存在するかを判断する。エッジが存在する場合は、明るい光源にテクスチャが含まれると判断する。したがって、補正関数の勾配を大きくすることで、コントラストを強調する。一方、存在しない場合には、明るい光源にテクスチャ

が含まれないと判断する。したがって、補正関数の勾配を小さくし、コントラストを低減させる。

4. 評価

3章により作成した画像に対する画質の評価は次のように行った。今まで、局所適応型補正手法には経験的に得たパラメータ（固定値）を用いていた。値はそれぞれ暗部 max 値：0.45、中間部 max 値：0.70、明部 max 値：0.95、暗部 min 値：0.05、中間部 min 値：0.30、明部 min 値：0.55 であり、採用している輝度値の階調である 256 階調を 0～1 に正規化したものである。局所毎の補正関数はこの固定制限値の間で変動する。以下、この既存のパラメータで補正された画像を既存手法画像と呼ぶことにする。対して、3章で提案した手法を用いて補正した画像を提案手法画像と呼ぶことにする。この既存手法画像と提案手法画像を主観評価によって比較する。

評価方法は、夜景の補正画像（20 枚）に対して実際に目で見たイメージに近い方を選択してもらう。次に、目で見たイメージに近いと選択した補正画像に対して、満足度の評価を行う。この評価実験を、被験者 15 人に対して行った。結果は以下の通りである。

画像の比較に関して

- (1) 提案手法画像の方が満足：59%
- (2) 既存手法画像：25%
- (3) どちらも同じ 16%

と全体の約 75% が提案手法画像が既存手法画像以上であると評価した。次に

画像の満足度に関して



図 7 画像の比較

Fig. 7 Comparison of images

- (1) 既存のパラメータ値での補正 : 34%
 - (2) 提案したパラメータ値での補正 : 62%
- と補正に対する満足度は向上した。図 7 に元画像, 既存手法画像, 及び提案手法画像を示す。

5. まとめ

局所ヒストグラム平坦化を基にした, 局所適応型輝度補正手法において, 補正関数の制限を自動決定する手法を提案した。夜景画像の輝度補正に対し, 下限と比較して上限の影響を大きく受けることを考慮し, 各境界の max 値を画像のエッジとヒストグラムから判断して求めた。それぞれの max 値の判断方法は以下の通りである。

- 暗部 max 値 : 全画素におけるエッジ量と低輝度画素のエッジ量の割合。
- 中間部 max 値 : ヒストグラム全体に占める中間輝度画素の割合。
- 明部 max 値 : ヒストグラムに占める高輝度画素の存在と高輝度画素のエッジ量。

主観評価を行なったところ, 約 75% の被験者が「提案手法画像は既存手法画像以上である」と判断した。また満足度の評価では, 既存手法画像の満足度が 34 % であるのに対し, 提案手法画像は 62 % と向上した。

参考文献

- [1] 富士フィルムマイクロデバイス : 個体撮像装置, 特開 218343 (2003).
- [2] Sasaki, M., Mase, M., Kawahito, S. and Tadokoro, Y.: A wide dynamic range CMOS image sensor with multiple short-time exposures, *Sensors, 2004. Proceedings of IEEE*, pp. 967 - 972 vol.2 (online), DOI: 10.1109/IC-

SENS.2004.1426333 (2004).

- [3] Shimoyama, S., Igarashi, M., Ikebe, M. and Motohisa, J.: Local adaptive tone mapping with composite multiple gamma functions, *Image Processing (ICIP), 2009 16th IEEE International Conference on*, pp. 3153 -3156 (online), DOI: 10.1109/ICIP.2009.5414418 (2009).