広ダイナミックレンジ圧縮における連続性補正・空間補正手法の検討

Evaluation of Continuous- and Spatial-Correction for High-Dynamic-Range Compression

齊藤 啓太[†], 下山 莊介[†], 池辺 将之[†]

Keita Saito[†], Sousuke Shimoyama[†] and Masayuki Ikebe[†]

Abstract We performed high-dynamic-range image reduction method with continuous luminance properties by combining images with long and short exposure times. We then used a spatial filter to make a palameter that retains the outline contrast and applied it to a compressed image with a high dynamic range. The retention mask, which consists of a combination of the spatial filter and the original image, retains the low- and high-illumination sections of the outline. Therefore, unlike with the conventional artificial retinal processing algorithm, we can retain contrast without outline reinforcement. We achieved image reduction method of high dynamic range with continuous luminance properties without loss of contrast.

キーワード: イメージセンサ, 長/短時間露光画像合成, 連続性, 網膜, 空間フィルタ, コントラスト

1. ま え が き

近年, 社会の情報化にともなって広帯域通信の分野が急速に発展している. 比較的大きなデータ量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するようになり, 現在ほとんどの携帯電話にその機能が搭載されている. デジタルカメラの心臓部は, CCD または CMOS イメージセンサであり, 携帯・監視モニタ・車載用機器など各種の用途に向けた開発が進んでいる. 特に CMOS イメージセンサは, CCD に比べて安価で消費電力が少なく, 周辺 CMOS 回路を同時に集積することが容易であり, 同一チップ上に様々な画像処理機能を盛り込むことができるため様々な応用が期待されている. また, 素子バラツキによる固定パターンノイズや熱雑音も回路的な工夫により CCD に遜色の無い画像が得られるようになってきた. ただし, イメージセンサは, 人の目や銀塩フィルムに比べて, 一度に捉えることのできる光の範囲 DR(Dynamic Range: ダイナミックレンジ) が狭いため, 広いダイナミックレンジ (HDR) を持つ環境を撮影した場合に, 画像に白トビや黒つぶれが生じて

しまう. そのため, 次の技術課題として, 広ダイナミックレンジ撮像における, 様々な撮像手法が大学間および各社によって開発されている.

広ダイナミックレンジ化への対応として, CCD では露光時間を調節した二つの画像を合成する, 感度の違う撮像素子を集積する⁵⁾などで対応している. CMOS イメージセンサでは, 複数の露光時間を合成する⁶⁾, 対数変換回路を各画素に設置する⁷⁾, 条件付きリセットで画素の露光時間調節を行う⁸⁾⁹⁾, 画素の回路構成を切り替える¹⁰⁾, FD 容量を変調し飽和特性を変更する¹¹⁾¹²⁾などがある. 一般的な出力方式としては, 露光時間の異なる複数枚の画像を用いて合成処理を行う手法が挙げられる. しかし, 合成する境界にムラ・コントラストの低下等の不具合が生じる問題があり, さらなる技術改善が求められている. 本稿では, 露光時間の異なる複数枚の画像を用いて, 輝度値が連続的になるように画像合成することで, ムラを低減する手法を提案する. さらに, 空間的に補正をかけることで, 輪郭部のコントラストを保持し, より鮮明な画像を得る方法についても併せて提案する.

本稿では, 始めに 1 章で本研究の背景と目的を述べ, 各章の概要を示す. 次に 2 章で, 複数枚の画像を用いた画像の HDR 圧縮手法について説明する. 3 章で空間フィルタを用いたコントラスト調節法と複数枚画像による合成画像生成への適用について説明する. 4 章では, 2 章・3 章で述べた手法に基づくシミュレーション結果について述べる.

2006 年 8 月 4 日受付, 2006 年 11 月 27 日再受付, 2007 年 1 月 15 日採録

[†] 北海道大学 大学院 情報科学研究科

(〒 060-0814 札幌市北区北 14 条西 9 丁目, TEL:011-706-7689)

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University

(Kita 14, Nishi 9, Kita-ku, Sapporo, 060-0814 Japan)

2. 長短時間露光画像合成による連続的 HDR 圧縮

2.1 連続的な画像合成手法

画像合成の手法について説明する．本手法では，露光時間が異なる n 枚の YCbCr 形式に変換された画像を用いる．合成する写真の枚数や露光時間比は任意でも良い．ただし，説明の都合上限定する．露光時間を $1/m^0, 1/m^1, 1/m^2, \dots, 1/m^k, \dots, 1/m^{n-1}$ とし， m ：正数とする． m は露光比に対応する．YCbCr 形式の画像を用いた理由は，露光時間によって大きく変化する輝度値 Y を他の色差成分 Cb/Cr 値と分離することができ，RGB 形式を用いた場合より色変化に影響が出にくいからである．また，この形式は，現在主流のフォーマットである JPEG 画像にも採用されており，処理後のデータ圧縮にも都合が良い．

本手法は，画像を重み付き加算して HDR 化する方法を改良したものである．従来より用いられる飽和領域を短時間露光画像により置き換える手法では，境界面にムラ等不整合が生じる問題がある．また，画像を加算する手法では，低照度領域に関しては，雑音の影響を強く受けてしまうため，画質が劣化するという問題が生じる．そこで提案法では，画像を加算する際に，長時間露光画像（明画像）の輝度値をフィルタとして用いることで，暗部分に明画像を重点的に割り当て，画質劣化を防ぐことを試みる．提案するフィルタの効果により“輝度値の置き換え法”に近い画像を得ながらも輝度曲線の接続点は連続であり，低照度部雑音の影響を抑え，自然な画像を得ることができる．以下，詳細を述べる．

2.2 Y 値の設定

フローチャートに従って説明する（図 1）．フローチャートでは露光時間が $1/m^k$ の画像を $I(1/m^k)$ と示す．例として $m = 2$ の場合を説明する．合成は $k = 1, 2, \dots, n-1$ の順で行う．はじめに，最長時間露光画像 $I(1/2^0)$ を配列 A に，画像 $I(1/2^k)$ を配列 B に格納する．配列 A は順次画像を合成していくためのテンポラリバッファであり，初期値は $I(1/2^0)$ になる．次に，配列 A と配列 B の差分配列（ $= Diff$ ）と，配列 A を k 乗した配列 $Mask$ を計算する（図 2a）．なお，図 2 の横軸は入力光量を，縦軸は出力値を示し， $Ssat.$ は出力の飽和値（以降より“1”に規格化）を示す．配列 $Diff$ を示す式 (1) は，式 (2) のように変形する．

$$Diff = A - B \quad (1)$$

$$\frac{A+B}{2} = A - \frac{Diff}{2} \quad (2)$$

画像を加算して HDR 化する手法は，式 (2) の左辺で示される．そのため，配列 $Diff$ は式 (2) の関係より，明画像 A から値を減算する要素と見ることができる．また，明画像の輝度値を画像配列に乗すると，その画像配列の状態にかかわらず，明画像の白とびしている領域（領域 P とする）の値は変化しないが，白とびしていない領域（領域 Q とす

図 1 HDR 圧縮処理のフローチャート
Flowchart of HDR compression.

(a) $Diff$ および $Mask$ の処理

(b) 配列 C の処理

(c) HDR 圧縮出力

(d) HDR 圧縮の不連続点

図 2 HDR 圧縮処理の内部動作
Processing of the HDR compression.

る) の値は減衰する．そこで，明画像の輝度値自体を累乗することで，減衰量を調節しフィルタとして用いることにする．配列 $Diff$ は，配列 $Mask$ との乗算によって，明画像の暗部分に関して作用する割合を軽減させることができる（図 2b）．配列 $Mask$ は，暗画像領域（短時間露光画像）を明

るい領域に重点的に割り当てるためのフィルタとみなすことができる。なお、 k 乗することでフィルタ曲線の傾斜を強調するのは、暗画像になるにつれて暗部分の雑音が大きくなるためである。傾斜の強調により、短時間露光画像の暗部成分の割合をより減少させ、画質の保持を行う。また、合成輝度曲線の形状を考慮する際、上述の強調が適切であるとの結果を得た。

次に、パラメータ α (後述) を用いて、配列 $C = \alpha \times Diff \times Mask$ と配列 A の差分をとると、図 2c のような出力を得ることができる。上記出力は、低照度部で明画像が重点的に割り当てられ、かつ画像の結合部では明/暗画像が加算されながらダイナミックレンジの拡張が行われている。出力画像を配列 A に格納し、再度配列 B に $I(1/2^2)$, $I(1/2^3) \dots I(1/2^{n-1})$ を入れて、画像合成を継続して最終的な出力画像を得る。

以下に、パラメータ α について説明する。配列 A - 配列 C を計算する際、場合によっては、図 2d のように輝度曲線に不連続点が生じる可能性がある。輝度曲線の不連続点は、画像の不自然さを引き起こすため、連続的な特性をとることが望ましい。そこで、領域 P と領域 Q の、輝度曲線の連続性を保持するように方程式を解く。領域 PQ 間の微分係数が一致することを条件として求めると、 α の関係式が得られる。

$$\alpha = \frac{m}{m \cdot k + m - k} \quad (3)$$

式 (3) より、 α を決定することで、領域 P と領域 Q の輝度曲線は、いかなる場合も連続に合成される。例として、露光時間が $1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16$ である 5 枚の画像を合成した際の画像の輝度曲線を示す (図 3a)。

本手法は、非線形変換された画像にも有効である。図 3b のようにガンマ処理された露光時間の異なる複数枚画像でも適切な重み付けと連続的な合成が可能となる。

2.3 Cb, Cr 値の設定

白とび部の色差は一定で、ほぼ 0 の値を保っている。したがって、画像合成により輝度値が低下するとグレーが割り当てられる。そのため、白とび部に関しては、暗画像の色差を支配的に割り当てる。ただし、すべての領域の色差を暗画像中心に処理すると、明領域の彩度が上昇するため、合成輝度に応じて色差の割合を変化させる。その他の領域に関しては、明画像の色差を多く割り当てる。この場合においても、合成画像の色バランスを考慮し、暗画像の色差も適切に混合する。入力画像の輝度値が色差分配に大きな影響を与える。合成前および合成画像の輝度値を乗じた M を色差分配の最終パラメータとする。これは、その他領域における合成画像の輝度値に関して、明画像部の割り合いが減少しているためである。

$$M = (A - C) \cdot Y_{bright} \quad (4)$$

$$Cx = C_{bright} \cdot (1 - M) + C_{dark} \cdot M \quad (5)$$

(a) HDR 圧縮処理の輝度特性

(b) 非線形画像への適用

図 3 HDR 圧縮処理の連続輝度特性
Continuous luminosity characteristics of the HDR compression.

Y_{bright} は、明画像の輝度値である。 C_{bright} および C_{dark} はそれぞれ、明/暗画像の色差である。式 (5) により、明/暗画像の色差を分配した合成画像の色差 Cx を得る。色差分配が合成する画像の特性により適切に変化し、任意の画像に対して適切な色差を保つことができる。

3. 空間フィルタを用いたコントラスト補正

3.1 網膜処理とコントラスト補正

2 章で処理された画像に、空間フィルタを基にした輝度値演算を行うことで、コントラストを制御する。本手法では、まず原画像と空間フィルタで平滑化された画像を併用し、輪郭成分のコントラストを変化させた中間出力を得る。次に中間出力をパラメータとして、輪郭部分のコントラストを保持しながら、低/高照度部の輝度値を補正する。

平滑化画像による輪郭成分の強調手法として、人間の網膜を参考にした処理が挙げられる。人間の外網膜は、大きく視細胞、水平細胞、双極細胞の三つに分けられる。視細胞で受光した画像情報は、水平細胞で平滑化され、双極細胞で視細胞と水平細胞の差分出力が得られる。差分出力は、主に輪郭成分から成り、この情報から輪郭部分の強調を行う。

我々の目的は、輪郭成分の強調ではなく、コントラストの保持である。そのため、2 章の広ダイナミックレンジ圧縮による輝度特性に対してコントラストを保持するために、輪郭の低照度側のみ、高照度側のみ処理に着目した。

3.2 空間フィルタによる補正パラメータ

図 4a のような従来の網膜処理に類似したアルゴリズムでは、輪郭成分に平滑化した値を加算しており、低照度部の輝度値はさらに低下し、高照度部は逆に上昇する。このように現画像の輪郭成分は不必要に強調されることで、コントラストが不自然となってしまう (リングング雑音と呼ぶ)。

本手法では、輪郭成分における低照度側 (暗い領域) のみ、高照度側 (明るい領域) のみを分離したパラメータを用いる。例として、ある閾値未満の輝度領域の輪郭成分では、

(a) 網膜処理の特性

(b) 本手法の特性

図 4 空間補正処理の特性
Characteristics of spatial compensation.

平滑化後の輝度値よりも高い輝度値を持つ部分はそのままの値を保持する。また、平滑化後の輝度値よりも低い輝度値を持つ部分は、フィルタリングした値で置き換える。逆に、ある閾値以上の輝度領域の輪郭成分では、平滑化後の輝度値よりも低い輝度値を持つ部分はそのままの値を保持する。また、平滑化後の輝度値よりも高い輝度値を持つ部分は、フィルタリングした値で置き換える (図 4b)。

3.3 空間補正の実処理

以下、フローチャート 2 に従って、説明する (図 5)。明/暗画像を用いて HDR 圧縮された出力を配列 Y とする。この配列 Y を空間フィルタを通して平滑化したものを配列 Fil とする。配列 $Y - Fil$ から、3.2 章の手法により、配列 $Mask2$ を生成する。図では、低照度側処理用の $Mask2$ 生成を示している。高照度側処理用は逆属性である。この配

図 5 空間補正処理のフローチャート
Flowchart of spatial compensation.

列 $Mask2$ と明画像の差分をとる。配列 $Mask2$ は、低照度における輪郭の黒レベルを低下させ、かつ高照度における輪郭の白レベルを保持する。つまり、低/高照度部での輪郭成分のコントラストが保持されたまま、ダイナミックレンジ圧縮が行われる。

3 章で述べてきた空間フィルタによる補正は、単体で通常画像 (HDR 化無し) の画像にも適用可能である。その場合は、最初に対数関数・ガンマ関数等で低照度部の持ち上げを行い、補正を行う。2 章での複数の露光時間画像の合成関数は、対数特性に近く低照度部の持ち上げ関数に相当する。

4. シミュレーション

画像処理のシミュレーションには Matlab を用いた。hdr format¹³⁾ で保存された広ダイナミックレンジ値を持つ画像から、擬似的に露光時間の異なる画像を複数枚作り出し、これを処理画像として用いた。今回のシミュレーションでは 3 枚～4 枚の長短露光時間画像を用いた。露光時間については、 $m = 4, 8$ とした。空間フィルタは 17×17 の移動平均フィルタとし、これを用いてコントラストを補正するパラメータを作成した。2, 3 章におけるフローチャートに沿ってシミュレーションを行った。結果を図 6, 図 7, 図 9 に示す。図 6a の画像は、線形圧縮画像である。この画像の風景は DR の制約のため、空が白とびしてしまう。図 6b では、空の領域が適切に表現されており、希望通りの HDR 圧縮が行われていることがわかる。図 7a,b は、空間補正を行った画像である。複数枚の画像を合成すると、DR が圧縮されるため、低照度部や高照度部のコントラストが低下する。本手法により、空の領域/木々のコントラストが確保され、より鮮明な画像を作り出すことができた。より多くの画像を合成することで、画質の向上を望めるが、3 枚の入力画像でも 4 枚の合成画像と比較し、遜色のない画像を得ることができた。

本手法の有用性を検討するため、既存の手法との比較を行った。比較対象とする手法として、多くのアルゴリズムが提案されている Retinex¹⁴⁾ を用いた。Retinex 理論は人間の視覚特性に基づき、色・輝度の恒常性を考慮した手法で、カラー画像の画質改善やダイナミックレンジ圧縮に有効である。Retinex 理論では入力画像が照明光と反射率の積で

表され、この反射率によって色が知覚されるとした。入力画像を I 、照明光を L 、反射率を R として式 (6) を得る。

$$I = L \cdot R \quad (6)$$

入力画像から照明光を分離することで反射率画像を補正画像として得ることができる。ここで照明光 L は入力画像にコンボリューションフィルタをかけたものとして考える。式 (6) に対数をとって変形したものを式 (7) に示す。

$$\text{Log}R = \text{Log}I - \text{Log}(I \otimes F) \quad (7)$$

Retinex では SSR(Single Scale Retinex) と MSR(Multi Scale Retinex) と呼ばれるモデルがあり、SSR は一つの画素 $p(x, y)$ に対してその周辺画素をガウスフィルタ $F(x, y)$ で近似し、式 (8) のように新たな画素を決定する。

$$S(x, y) = \text{Log}p(x, y) - \text{Log}(F(x, y) \otimes p(x, y)) \quad (8)$$

MSR は SSR で用いる単一のフィルタに対して、異なる複数のフィルタを用い、得られた値を重み付け加算することで出力を得る。今回は MSR の一つである retinex-mccann99¹⁵⁾ を採用し、得た出力画像を図 8 に示す。3 章で述べた網膜処理と処理特性が近いので、輪郭部分のリングングによって小石が明るくなり過ぎる、空を背にした枝部分が暗くなり過ぎる等の不自然な点が見られた。本研究の手法による出力画像では、コントラストを保持した状態でダイナミックレンジ圧縮が行われ不自然な輪郭が改善されている。また Retinex の画像で彩度の表現力が低いのに対し、本手法では全体的に彩度の再現性が良く、空のコントラストも保持した圧縮となっている。

他の手法として Retinex 法と同一の概念を用いた ACE 法¹⁶⁾ が提案されている。輪郭部のリングングを帯域の異なる ϵ フィルタで改善した手法である。我々は、ACE 法で用いられた輪郭部でのフィルタの切り替えを行わず、同一のフィルタによる処理を実現した。また、リングング雑音に関しても、3 章で述べたように明/暗部における片側の輪郭強調を抑制することで、良好な画像を取得した。

5. む す び

露光量の異なる複数枚の画像を用いて、連続的な輝度値をもつ合成画像を作成できた。暗い領域では、長時間露光画像が割り当たり、白とびの境界領域では、長/短時間露光画像が加算される。対数特性に近く、ノイズに影響されにくい、ムラの少ない画像を得ることができた。本手法は乗算/加算のみで行うことが可能である。

また、空間フィルタを用いて、低/高照度領域用それぞれの空間補正に用いるパラメータを生成した。そのため、画像領域ごとに適切なコントラストの制御を行うことで、より良好な広ダイナミックレンジ圧縮が表現可能となった。今後の予定としては、本手法のハードウェア化/検証を行う予定である。

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 平成 16 年度 産業技術助成事業「画質・高解像度を維持したインテリジェントイメージセンサの開発」プロジェクトの一環として行われたものです。ここに謝意を表します。

(a) 線形圧縮画像

(b) 連続的 HDR 圧縮 ($m = 8, 3$ 枚合成)

図 6 連続的 HDR 圧縮のシミュレーション
Simulation results of HDR compression.

(a) HDR 圧縮+空間補正 ($m = 8, 3$ 枚合成)

図 8 Retinex による出力画像
Simulation results of Retinex.

(b) HDR 圧縮+空間補正 ($m = 4, 4$ 枚合成)

図 7 空間補正処理のシミュレーション
Simulation results of spatial compensation.

(a) 線形圧縮画像

(b) HDR 圧縮+空間補正 ($m = 8, 3$ 枚合成)

図 9 別画像の提案手法シミュレーション
Another results of proposed method.

〔文 献〕

- 1) D. Handoko, S. Kawahito, Y. Tadokoro, and A. Matsuzawa : "A CMOS image sensor with non-destructive intermediate readout mode, for adaptive iterative search motion vector estimation" IEEE Workshop CCD and Advanced Image Sensors, pp. 52-55 (June 2001)
- 2) 山口隆, 成澤聡介, 北見大岳, 猪木原信幸, 浜本隆之 : "蓄積中間画像を利用して動き推定処理を行うデジタルスマートイメージセンサ", 映像学技報, **27**, 59, pp. 1-4 (Oct. 2003)
- 3) 猪木原信幸, 若松武, 浜本隆之, 相澤清晴 : "蓄積中間画像を用いた A/D 変換機能を有するイメージセンサ", 映像学技報, **26**, 42, pp. 59-62 (June 2002)
- 4) B. Pain, et al., : "Reset Noise Suppression in Two-Dimensional CMOS Photodiode Pixels through Column-based Feedback-Reset", in IEDM Dig. Tech. Papers, pp. 809-812 (2002)
- 5) 富士フイルムマイクロデバイス (株) : "固体撮像装置", 特開 2003 - 218343
- 6) M. Sasaki, M. Mase, S. Kawahito, and Y. Tadokoro., : "A Wide Dynamic Range CMOS Image sensor with Multiple Short-Time Exposures", Proc. of IEEE Sensors 2004, pp. 967-973 (2004)
- 7) ミノルタカメラ (株) : "固体撮像装置", 特開平 5 - 129579
- 8) O.Yadid-Pecht., : "Widening the dynamic range of pictures", Proc. SPIE 1656, pp. 374-382 (1992)
- 9) T.Yasuda, T.Hamamoto, K.Aizawa., : "Adaptive-integration-time image sensor with real time reconstruction function", IEEE trans. on Electron Devices, **50**, 1, pp. 111-120 (Jan. 2003)
- 10) R.Oi, K.Aizawa., : "Programmable sensitivity image sensor with multicapacitance CMOS pixels", IEEE Workshop CCD and Advanced Image sensors (May 2003)
- 11) S. Decker, et al., : "256x256 CMOS Imaging Array with Wide Dynamic Range Pixels and Column- Parallel Digital Output", in ISSCC Dig. Tech. Papers, pp. 176-177 (1998)
- 12) 池辺将之, 齊藤啓太 : "負帰還リセットによる蓄積容量偏重型 CMOS イメージセンサ", 映像学誌, **60**, 3, pp. 384-389 (2006)
- 13) Paul E. Debevec and Jitendra Malik., : "Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs", in SIGGRAPH 97, August (1997).
- 14) Land, Edwin, "The Retinex Theory of Color Vision", Scientific American, 237, 108 - 128, 1977.
- 15) McCann, John, "Lessons Learned from Mondrians Applied to Real Images and Color Gamuts", Proc. IS&T/SID Seventh Color Imaging Conference, pp. 1-8, 1999.
- 16) 上田和彦, 緒形昌美, 土屋隆史, 窪園猛 : "広ダイナミックレンジカメラ用階調変換処理の開発", 映像学誌, **56**, 3, pp. 469-475 (2002)

さいとう けいた
斎藤 啓太 2006 年, 北海道大学工学部情報エレクトロニクス系卒業。2006 年, 北海道大学 大学院電子情報工学専攻入学。現在, 修士課程 1 年広ダイナミックレンジ撮像システムの研究に従事。

しもやま そうすけ
下山 荘介 2006 年, 東京理科大学理工学部電気工学科卒業。2006 年, 北海道大学 大学院電子情報工学専攻入学。現在, 修士課程 1 年。広ダイナミックレンジ圧縮システムの研究に従事。

いけべ まさゆき
池辺 将之 2000 年, 北海道大学大学院電子情報工学専攻博士課程修了。2000 年, 大日本印刷株式会社半導体製品研究所。2004 年, 北海道大学助教授。信号処理アルゴリズムとその集積回路化の研究, および CMOS イメージセンサの高機能化の研究に従事。工学博士。