広ダイナミックレンジカメラ用階調変換処理の開発

A Level-Conversion Method for Wide-Dynamic-Range Camera System

正会員 上田 和彦[†], 正会員 緒形 昌美[†], 土屋 隆史[†], 窪園 猛[†]

Kazuhiko Ueda[†], Masami Ogata[†], Takashi Tsuchiya[†] and Takeshi Kubozono[†]

Abstract A level-conversion method for wide-dynamic-range camera system called advanced contrast enhancement (ACE) has been developed. The wide-dynamic-range data is separated from the image's illumination and texture components, then the components are processed accordingly. Component separation is based on the human-vision mechanism and is done using hierarchical non-linear filtering. Experiments showed that ACE generates images with higher contrast and wider dynamic-range. Implementation of ACE in a general purpose camera system confirmed its effectiveness.

キーワード: ダイナミックレンジ, カメラ, 圧縮, 照明光, コントラスト, ϵ フィルタ

1. はじめに

CCD 撮像素子を用いた画像システムの大きな問題点のひとつとして、ダイナミックレンジ（以下、DRと略す）の不足が挙げられる。例えば、図1の上段に示す画像は、DRの広いシーンを通常DRのカメラで撮像したものであり、シャドウ部基準露出となっているため明部が再現されていない。同図中段は、同シーンを上段の1/16の感度で撮像したものであり、明部は再現されるものの暗部が再現されていない。

広DRな撮像を実現する方法として、素子の基本性能の向上、広DR撮像に向く専用素子の開発、あるいは従来素子の使用の工夫等が夫々開発・実用化されている。素子の基本性能の向上としては、光電変換・蓄積部面積を大きくして、DR拡張する方法や初段アンプやCDS回路の工夫で低ノイズ化し、低レベル側にDRを拡張する方法等が検討されている。専用素子としては、対数変換型の光電変換器を用いた撮像素子¹⁾や、画素内にコンパレータを設け光電信号が基準レベル越える時間を素子出力とする方法²⁾等の開発が進んでいる。また、従来素子の使用の工夫としては、露光時間や入射光量を部分的に制限することにより、光電変換部の感度を変化させ高レベル側にDR拡張する方法があり、例えば、光電変換部表面に減光フィルタアレイを周期的に配置する方法などが提案されている。特に、プログレッシブスキャンCCD撮像素子を用いて、露光時間

の異なる2枚のインターレース画像を獲得し、この2枚の画像を合成して広DRな撮像画像を獲得する方法（以下、2重露光方式と呼ぶ）は比較的容易に広DRな撮像画像を獲得する方法として実用化されている³⁾。

ところで、撮像された画像を伝送・蓄積・表示する装置のDRは有限であり、たとえ広DRな画像が獲得できてもその情報のすべてを取り扱うのは難しい。図1下段は前記2重露光方式で撮像されることにより、16倍にDR拡大された画像を表示したものであるが、信号処理および印刷のDRが充分でないため獲得した情報が十分に再現されておらず、1/16の感度で撮像した画像（同図中段）と比べほとんど効果が認められない。このように、広DRな画像システムを実現するには、広DRな撮像手段だけでなく、広DRな画像データを有用な情報を残しながら好ましくレベル変換し、画像の伝送・蓄積・表示装置のDRと整合をとる手段が必要となる。以下、この処理を階調再生と呼ぶ。

階調再生法として従来より対数変換、固定のガンマ補正あるいは画面全体のダイナミックレンジに応じて画面毎に適切にガンマパラメータを制御する方法⁴⁾、Histogram Equalization（以下、HEと略す）等が知られている。しかし、これらはいずれも入力信号に対して単調増加なレベル変換であるため、広DR撮像された画像のように非常に広いDRを有する画像の各部に対して夫々高いコントラストを保って階調再生することは原理的に困難である。

広DR撮像画像用の階調再生処理として、従来の手法で階調再生された信号に微分波形を加えクレイク・オブライエン効果を誘発させることにより、コントラスト感を上げる方法、予め任意に4分割した領域に対し夫々独立にHEを施すことにより、4領域間での単調増加の制約をなくしコントラスト改善を図る方法等が監視カメラ用のアルゴリ

2001年8月2日受付, 2001年10月17日再受付, 2001年11月6日採録
†ソニー株式会社 S&S アーキテクチャセンターデジタルシステム開発室
(〒141-0001 品川区北品川 6-7-35, TEL 03-5448-3800)

†Digital System Development Div., S&S Architecture Center, Sony corporation
(6-7-35, Kitashinagawa, Shinagawa-ku, Tokyo 141-0001, Japan)

ズムとして提案・実用化されている⁶⁾。しかしながら、前者では強く補正をかけると境界部の違和感が増すため、十分なコントラスト感強調効果を上げることができない場合もあり、後者では構図によってはコントラスト改善効果が得られない場合もあった。そのため、汎用の広 DR カメラの階調再生処理としては必ずしも十分な性能ではなかった。

上述の問題を改善するために、我々は被写体の構造を考慮した新しい階調再生法：Advanced-Contrast-Enhance 法（以下、ACE法と略す）を開発し、ACE 法を汎用カメラシステム LSI として試作しその効果を確認した。ACE 法は、被写体毎の局所的なコントラストを保持したまま、画像全体の DR を圧縮する処理であり、各被写体に照射されていると思われる照明光の空間分布とその強さ（以下、照明成分と呼ぶ）を撮像画像信号から高い空間精度で抽出し、撮像画像信号から照明成分を除去または圧縮することにより好ましい階調再生を行う。ACE 法では従来法に比べ高いコントラストをもつ高画質な広 DR 画像を再生できる。

本論文では、2章で ACE 法の基本となる考え方を示す。3章ではその考え方をもとに新たに開発した ACE 法のアルゴリズムおよび信号処理方法について述べ、3.4節では ACE 法および他方式の処理結果を示し比較する。また、4章では ACE 法をもとにして試作された汎用カメラ用広 DR 信号処理 LSI について述べる。

2. 基本方針

図2上段に模式的に示すシーンを観察する場合を考える。同図中の左上側は屋外の強い照明下の被写体であり、それ以外は屋内の弱い照明下の被写体である。同図中 A で示した部分はペンギンの白い部分であり、B で示した部分はホルスタイン牛の黒い部分である。同一照明光下で両者を撮像した場合は、白部 A より黒部 B の方が撮像信号レベルあるいは絶対輝度レベルが低いが、広 DR 撮像が必要となるような各被写体の照明条件に大きな差がある場合は、必ずしも白部 A の撮像信号レベルのほうが黒部 B のそれより高いとは限らない。例えば、黒部 B の反射率が十分に小さくない場合に白部 A に比べ、非常に強い照明光が照射されれば、同図下段に示すように、白部 A より黒部 B のレベルの方が高くなることもある。

上記のような大小関係の逆転が起こった場合であっても我々が常に“白”、“黒”と判断できるのは、我々の視覚システムの中に各被写体に関する反射率、あるいはコントラストの知識と照合して絶対輝度レベルに対して何らかの補正をすることにより明るさの恒常性を保つ機構、あるいは、網膜上の刺激値から照明光の強さの成分を排除し、被写体の反射率成分のみを抽出する機構があるためだと考えられる。そして、上記の機構により各部のコントラスト（同図 (C)、(D)）は、実際の輝度レベルの大小とは関係なく適切に保たれると考えられる。

図1 撮像画像の比較：1). 通常 DR 撮像（高感度）. 2). 通常 DR 撮像（低感度）. 3). 広 DR 撮像（階調再生処理なし）

Comparison of camera images. — 1). normal DR (high-gain). 2). normal DR (low-gain). 3). wide DR with no level compression.

このように、撮像画像信号から各被写体に照射されている照明光の分布と、その強さ（照明成分）が近似的に検出できれば、広 DR 撮像画像から照明成分の影響を低減することにより、上記に近い階調再生を行うことが可能であると考えられる。しかし、例えば、画像中の局所領域の輝度レベルが低い場合、その部分の被写体反射率が低い（黒い）のか照明光が弱い（暗い）のかを判別することができないように、被写体の輝度レベルから照明強度を拘束条件なしに推定するのは困難である。本開発では、被写体各部の輝度レベルから照明強度への変換に際し、各被写体あるいは同一の照明で照らされる領域内の平均反射率は一定であるという仮定をした。すなわち、各被写体あるいは同一照明領域内の平均反射率が一定だとすれば、各領域毎の絶対輝度レベルの平均値とその分布を照明成分と見ることができ、もし照明成分が空間的に精度良く求まれば、撮像画像を照明成分で適切に補正することにより、上記被写体の固有の反射率やコントラストに近い情報が復元され好ましい階調再生が行える。

同種の考え方として複数の線形 BPF 出力を用いて照明光の影響を低減する方法（マルチスケールレティネクス処理⁴⁾。以下、MSR処理と呼ぶ）が研究されている。この方

図 2 階調再生処理の原理図
Processing principle.

図 3 ACE 法 の 概 念 ブ ロ ッ ク 図
Theoretical block diagram of ACE.

法ではコントラストは確保できるが、各帯域成分に被写体（照明成分）の境界部のトランジェント特性が十分に再現されないため、図 7 右側に示すような特性劣化が発生する。

以上のように、広 DR 撮像画像を好ましい画像に階調再生するには、被写体の反射率に近い情報と好ましく圧縮された照明成分が必要であり、そのためには照明成分を高い空間精度で検出することが必要となる。

3. 広ダイナミックレンジ信号の階調再生処理

3.1 好コントラスト化処理

被写体の反射率を $D(x, y)$ 、各照明光領域の強さを $I(x, y)$ 、撮像側から見た照明光のあたり方を $S(x, y)$ とすると、撮像画像 $L_{org}(x, y)$ は以下のように表される。

$$L_{org}(x, y) = D(x, y) \cdot S(x, y) \cdot I(x, y) \quad (1)$$

2章で述べたように、鑑賞に好ましく広 DR 画像を階調再生した画像 $L_{ace}(x, y)$ は照明光の影響のない画像（反射率画像）と照明光を圧縮する変換 $\Gamma[\cdot]$ により以下のように表される。

$$L_{ace}(x, y) = D(x, y) \cdot S(x, y) \cdot \Gamma[I(x, y)] \quad (2)$$

式 1, 2 より、

$$L_{ace}(x, y) = L_{org}(x, y) \cdot \frac{\Gamma[I(x, y)]}{I(x, y)} \quad (3)$$

の処理が行えれば、広 DR 撮像された画像に対して好ましく階調再生を行うことができる。

上記をもとに今回我々が開発した ACE 法の概念図を図 3 に示す。広 DR 撮像データから 3.2 節で述べる処理により、高精度に照明成分が抽出され、照明成分から反射率成分 $D(x, y) \cdot S(x, y)$ が分離される。そして、分離された照明成分に圧縮処理を施し反射率成分と再合成する。

3.2 照明成分の抽出

式 1 の両辺を対数変換すると、

$$\log(L_{org}(x, y)) = \log(D(x, y) \cdot S(x, y)) + \log(I(x, y)) \quad (4)$$

したがって、式 2 の右辺第 1 項を除去できれば照明領域の強さ $I(x, y)$ を抽出することができる。このようなフィルタ処理を $E[\cdot]$ とすると、照明光抽出の演算は、

$$I(x, y) = \log^{-1}(E[\log(L_{org}(x, y))]) \quad (5)$$

と書ける。

照明光に関して経験的に以下のことが知られている。

- (1) 照明光の変化よりコントラスト変化の方が高周波。
⇒ 大局的变化は照明変化であることが多い。
- (2) 極端に高い/低い反射率の被写体は少ない。
⇒ 大きなレベル変化は照明変化の可能性が高い。
- (3) 異なる被写体には異なる照明が当たる場合がある。
⇒ 境界部ではレベル不連続になる場合もある。

これらをもとに入力画像から照明成分を高精度に抽出する。この照明光抽出処理は、基本的には大振幅の急峻なエッジを保った極狭帯域の平滑化処理と考えられる。

本研究では、上記平滑化処理にいわゆる ε フィルタ⁸⁾を用いた。このフィルタ出力 $W(x, y)$ は入力信号を $X(x, y)$ 、タップ係数を $T(i, j)$ 、注目画素 $X(x - i, y - j)$ と中心画素 $X(x, y)$ の差分絶対値の閾値を ε とすると、

$$W(x, y) = \sum_{i=-k}^k \sum_{j=-l}^l T(i, j) \cdot Y(x - i, y - j) \quad (6)$$

$$\diamond \text{ if } |(X(x - i, y - j) - X(x, y))| \leq \varepsilon$$

$$Y(x - i, y - j) = X(x - i, y - j)$$

$$\diamond \text{ if } |(X(x - i, y - j) - X(x, y))| > \varepsilon$$

$$Y(x - i, y - j) = X(x, y)$$

となる非線形フィルタであり、注目画素 $X(x - i, y - j)$ と中心画素 $X(x, y)$ の差分絶対値が ε を越える場合は、注目画素を中心画素で置き換えてフィルタ処理される。本処理では、全体処理量の低減および各帯域での平滑特性に自由度を持たせるために、多重解像度の ε フィルタで構成した。なお、同様の効果を得る別の手段としてメディアンフィルタも知られているが、今回の用途ではフィルタの範囲が非常に広範囲であり、ソーティングが膨大になるため使用するのには難しいと考えられる。

図 4 に照明光抽出処理のブロック図を示す。式 4 で示し

図 4 照明成分の抽出回路
Illumination components detector.

図 5 各階層信号の統合処理部
Synthesizer block

ように、入力信号は対数変換器 (A) で対数変換されたのち多重解像度 ϵ フィルタ処理がなされる。各階層の信号は、統合回路 (F) で夫々統合され、逆対数変換器 (G) でリニア信号に変換されて照明成分が抽出される。

急峻なエッジ部に対する再現性を確保するため、統合処理部では下式のように下層 (狭帯域) ϵ フィルタの境界部での Slew-rate 低下と空間精度低下を上層 ϵ フィルタ信号を用いて補正する。

$$W_w(x, y) = \alpha W_h(x, y) + (1 - \alpha) W_l(x, y) \quad (7)$$

$$\alpha = \Phi[\Delta(W_l(x, y))]$$

ここで、 $W_h(x, y)$ は上層のフィルタ出力、 $W_l(x, y)$ は下層のフィルタ出力、 $\Delta[\]$ は Sobel フィルタのように一次微分絶対値を出力する関数、 $\Phi[\]$ は入力信号を 0~1 に規格化する関数、 $W_w(x, y)$ はエッジ補正出力である。図 5 には統合処理部のブロック部および波形図を示す。下層フィルタ出力の 1 次微分信号を制御信号として用い、平坦部では下層フィルタ出力が優先され、輪郭部では上層フィルタ出力が優先される。このように照明成分の急峻な境界部が正しく再現できるため、式 3 に示した階調再生処理を行っても境界部にリンギング状のエラーを発生しにくい。

3.3 ACE 法の特徴

ACE 法の第 1 の特徴として、コントラストが高く保たれることが挙げられる。図 6 に示すように、従来の単調増

図 6 方式比較
Comparison

図 7 境界特性の比較 左: 入力信号 中央: ACE による階調再生 右: MSR 処理による階調再生
Range Compression Error. — *Left: input image
*Center: Compressed image(ACE) *Right: Compressed image(conventional method)

加型のレベル圧縮処理 (対数変換、ガンマ補正、HE 等) が入力信号レベルの大小関係に拘束されるのに対し、ACE 法は照明成分の除去または圧縮という処理であるため、入力画像の大小関係に拘束されず、異なる照明領域間では入出力の大小関係が逆転することもある。そのため、少ない DR に有用な情報を押し込むことができ、画像全体として高いコントラスト感が得られる。なお、前述の MSR 処理あるいは 4 分割 HE 処理でも入出力の大小関係の逆転を起こすことができ高コントラスト化が期待できる。しかしながら、MSR 処理では被写体境界部のリンギング状のエラーが発生し、4 分割 HE 処理では構図によっては分割領域境界部分で DC 変動が発生する。そして、これらがコントラスト改善量を制限する要因となる。ACE 法では上記のようなコントラスト改善効果を制限する要因がないため、両手法より高いコントラスト改善効果を得ることができる。

第 2 の特徴として動作の安定性が挙げられる。ACE 法入力画像から画面全体に空間フィルタリングで抽出した照明成分を用いた補正であり、HE における度数累計、あるいは 4 分割処理の検出窓のような位置に依存する処理がないため、被写体や大きさや構図の影響を受けない。このため、被写体の大きさが変化しても同等の階調再生効果が得られ、ズーミングやパンニングを行っても安定した階調再生動画像が得られる。

3.4 実験結果

図 1 の下段に示した広 DR 撮像データに対し、従来の階調再生処理および ACE 処理を施し比較する。図 8 は UNIX 等で用いられる画像処理ソフト "xv" を用いて HE 処理を施した結果である。暗部/明部とも再現できてはいるも

図 8 結果 1: 従来の HE
Result 1 (conventional HE)

図 10 結果 3: ACE 法
Result 3 (ACE)

図 9 結果 2: 従来の MSR
Result 2 (conventional MSR)

の、本シーンのようにレベル度数分布に極端な集中がない画像ではコントラスト改善効果は少ない。図 9 は、後述する ACE 処理と同等の検出帯域および圧縮パラメータを用いて、MSR 処理を施した結果である。再現性およびコントラストは良いが、照明領域の切り替わり部分の特性が充分でないため、例えば、建物と空の境界部にリング状のエラーが目立つ。図 10 に示すのは、ACE 処理の結果である。7 タップの ε フィルタを 4 階層（間引き率 2:1）用い ε 値は各階層共通である。照明成分の圧縮には $\gamma = 0.2$ のガンマ補正を用いた。階調再現性およびコントラストが良好であり、照明境界部でのエラー発生も認められない。図 11 に ACE 法の別の実験結果を示す。パラメータは前項と同じである。同図上側 2 段は長/短露光信号であり、これらをもとに照明領域を抽出し、式 3 右辺第 2 項に示す補正ゲインの形で表したものが 3 段目の画像である。照明領域として十分な平滑特性と、急峻な境界特性を実現しているのがわかる。同図 4 段目は補正信号をもとに広 DR 階調再生を行った結果であり、この場合も高いコントラストを保持しながら階調再生されているのがわかる。

4. L S I 化

試作した広 DR 汎用カメラシステムの全体ブロック図を図 12 に示す。破線で示す部分が ACE 法を応用した広 DR 信号処理 LSI（以下、 $WD-LSI$ と呼ぶ）である。WD-LSI 出力は通常 DR の CCD 素子出力と同じフォーマットになるように工夫がなされているため、従来のカメラ信号処理システムと組合せて、容易に広 DR カメラが実現できる。

図 11 結果 4 1). 長時間露光画像 2). 短時間露光画像
3). 補正ゲイン 4). ACE 処理

Results 4 — 1). long exposure image. 2). short exposure image. 3). gain image. 4). ACE image.

WD-LSI では、前述した 2 重露光方式³⁾の広 DR 撮像信号（38 万画素相当）が入力されることを前提にした。2 重露光方式とは、図 13 に示すようにプログレッシブスキャン CCD の垂直レジスタに蓄積時間の異なる 2 種類の信号電荷を交互に読出し、その信号電荷を倍速で出力・時間伸

図 12 広 DR カメラシステムのブロック図
Wide-DR camera system schematic block diagram.

図 13 2 重露光を用いた広 DR 撮像
Wide DR imaging using double exposure.

長することにより、1 フィールドに感度の異なる 2 種類の信号（長/短時間露光信号）を得る撮像法である。

図 14 に WD-LSI の主要信号処理部の処理を示す。長/短時間露光信号は合成回路 (1) にて広 DR 化され 16bit 単調増加の広 DR 撮像信号に変換される。上記信号は撮像素子上の色フィルタによる変調色信号が重畳された信号（以下、*raw-data* と呼ぶ）であり、ACE での非線型処理で色特性が変化する可能性がある。そのため、(2) にて線形なマトリクス演算を行い擬似的な Y/C 信号に変換され、Y 信号に対してのみ前記 ACE 処理が施される。なお本 LSI では、回路規模削減のために一部リニア領域での処理に置き換え、図 3 中に示す破線部をテーブル化した。照明成分抽出処理を 2 階層構成とし、ダウンサンプリング比は 8:1 とし、各階層の ε フィルタは水平・垂直方向の分離処理とした。一方、C 信号は ACE 処理を施された Y 信号と対応をとるために、gain 信号を用いて補正がなされる。階調再生された Y/C 信号は (5) にて上記マトリクス演算の逆演算が行われ raw-data に再変換される。そして 10bit の raw-data として出力される。図 15 下段に ACE 法を用いた試作システムの撮像結果を、同図上段、中段は長時間露光信号と短時間露光信号を示す。ACE 法では高輝度部/低輝度部ともに充分なコントラストが得られることがわかる。

5. ま と め

広 DR な画像システムを実現する場合、広 DR な画像データに含まれる有用な情報を残しながら、好ましくレベル変換（階調再生）する技術は広 DR に撮像する技術と同程度に重要である。

図 14 広 DR カメラ用信号処理 LSI のブロック図
Wide DR camera LSI block diagram.

図 15 結果 5
Result 5 (ACE)

そのため、我々は広 DR 撮像画像を被写体毎の局所的なコントラストを保持したまま、画像全体の DR を圧縮する方法—ACE 法を開発した。本方式は広 DR 撮像画像から照明成分を高精度に抽出し、照明成分のみを除去または圧縮することにより好ましい階調再生を行う処理であり、照明成分の抽出は対数領域で多階層の ε フィルタ処理を行うことで実現した。ACE 法は、従来法に比べ高いコントラスト感を実現できるとともに、構図やシーン変動の影響を受けにくく被写体の境界部にエラーを発生しにくい。従来手法に比べ高画質な広 DR 画像を再生できる。また、ACE 法を広 DR 汎用カメラ用信号処理 LSI として試作し効果を確認した。

今後は、各種パラメータの最適化を図るとともに、各種

アプリケーションにおける最適な階調再生特性とその制御法の検討を進めていきたい。

最後に、本開発の機会を与えていただいたソニー株式会社セミコンダクタネットワークカンパニー/越智顧問(元メディアプロセッシング研究所長), 試作に協力頂いたイメージングデバイスカンパニー/森課長, 中田係長はじめ関係各位に感謝致します。

〔文 献〕

- 1) 高田 他: "対数変換 CCD ラインセンサ", テレビ誌, 49, 2, pp.169-175(1995)
- 2) Yoshimura et al: A 48kframes/s CMOS image sensor for real-time 3-D sensing and motion detection, ISSCC digest of technical papers, pp.94-95(2001)
- 3) 菰淵 他: "広ダイナミックレンジ Hyper-D-CCD", 画電学誌, 25, 4, pp.397-406(1996)
- 4) S.N.Pattanaik et al: A multiscale Model of adaptation and spatial vision for realistic image display, SIGGRAPH98 proc., 287-298(1998)
- 5) 阪上 他: "ニューロガンマ処理によるビデオカメラのダイナミックレンジ拡大", テレビ誌, 50, 2, pp.288-294(1996)
- 6) 森村 他: "広ダイナミックレンジ画像合成処理技術", 映情学誌, 51, 2, pp.92-98(1997)
- 7) Ogata et al: Dynamic range compression based on illumination compensation, IEEE 2001 International Conference on Consumer Electronics Proceedings, pp.282-283(2001)
- 8) 梅本 他: "非線形適応デジタルフィルタによる画像信号に加わった周期性雑音の除去", 制御学論, 30, 8, pp.936-942(1994)

うえだ かずひこ
上田 和彦

1982年, 横浜国立大学工学部情報工学科卒業。同年, 日本ビクター(株)に入社。固体撮像素子の信号処理方式および画像処理システムの研究開発に従事。1991年, ソニー(株)入社。以来, 画像信号処理, 高画質化技術, コンピュータビジョンの研究開発に従事。正会員。

おがさわら まさみ
緒形 昌美

1983年, 東京工業大学情報工学科卒業。1985年, 同大学大学院総合理工学研究科修士課程修了。同年ソニー(株)入社。以来, コンピュータビジョン, 高画質化技術, 画像圧縮技術の研究開発に従事。正会員。

つちや たかし
土屋 隆史

1992年, 東京工業大学大学院制御工学専攻終了。同年, ソニー(株)入社。業務用カメラの開発, 設計, 画像処理アルゴリズムの研究, 開発に従事。

くぼそのの たけし
窪園 猛

1992年, 東京工業大学理工学研究科修士課程修了。同年ソニー(株)入社。生産技術設計部門を経て, 1996年より画像処理技術の研究開発部門に勤務し, 現在に至る。撮像システム, 計測システム, 画質改善システム等の開発に従事。