

広ダイナミックレンジ画像の高コントラスト化画像処理

線形/対数型 CMOS イメージセンサー対応ダイナミックレンジ圧縮

Contrast Improvement for a Linear/Log CMOS Image Sensor

佐藤 一睦*
Sato, Kazuchika

片桐 哲也*
Katagiri, Tetsuya

掃部 幸一*
Kamon, Koichi

芹田 保明*
Serita, Yasuaki

要旨

線形/対数型イメージセンサーで撮影された画像は、線形領域は通常のイメージセンサーと同様にコントラストが良好であり、さらに対数領域を持つので非常にダイナミックレンジが広いという特徴を持つ。しかし、通常の画像処理では対数領域で低コントラストとなってしまう。そこで、ダイナミックレンジ圧縮技術を適用して、高コントラスト化する画像処理について紹介する。

画像を照明光成分と反射率成分に分け、照明光成分をダイナミックレンジ圧縮することで実現する。照明光成分の抽出には、まず、平滑化とダウンサンプリングを繰り返して多重解像度化する。次に、低解像度側の画像をアップサンプリングしエッジ部を高解像度側の画像のエッジに置換えることを繰り返すことでエッジ維持された平滑化画像を得て照明光成分とする。照明光成分の圧縮の際に、線形領域をできるだけ圧縮しないようにすることで、線形/対数型イメージセンサーの特徴を損なわないようにする。

さらに、高画質を要求する用途のために微小なエッジの不具合を補正する方法も簡単に紹介する。

Abstract

Although linear/log image sensors provide high contrast with their linear characteristic and wide dynamic range with their logarithmic characteristic, conventional image data processing results in low contrast in the logarithmic area. This paper describes a dynamic range compression technique that improves contrast with linear/log image sensors. An image consists of reflectance and illumination, and the compression of the dynamic range of illumination achieves a high contrast image. In the technique presented, illumination is extracted from an image by edge-preserving smoothing. Smoothing and downsampling an image several times provides multi-resolution images. The lower resolution images are upsampled and their edge areas are replaced by those of the higher resolution images. This upsampling and replacement is repeated until the original image resolution is reached. In illumination compression, lower compression of the linear area makes full use of the characteristics of a linear/log image sensor. In addition to the technique presented, an effective method of correcting small edge artifacts for higher quality images is briefly described.

* コニカミノルタテクノロジーセンター(株) デバイス技術研究所
イメージングデバイス開発室

1 はじめに

輝度差の大きいシーンでも黒つぶれや白とびなく撮影可能な広ダイナミックレンジイメージセンサーは各種用途で望まれている。たとえば、車載用ではトンネルの出入り口や対向車のヘッドライトが直接画角に入るような場合でも画面全体が確認できるよう撮影可能であり、監視用では屋内と屋外を同時に監視する場合や強い光源が直接画角内に入る場合でも問題なく撮影できる。また、一般のデジタルカメラやビデオカメラ、カメラ付携帯電話などにおいても、逆光シーンでフラッシュなしで撮影可能であり、人物に露出を合わせても背景が視認できる、など利点は多い。

これらの用途に使用可能な CMOS イメージセンサーが当部署で開発され報告されている¹⁾。このセンサーは、低輝度部は線形特性で輝度が高くなると自動的に対数特性に切り替わる光電変換特性、すなわち線形/対数型光電変換特性（以下、線形/対数特性）を持つように駆動することが可能である。線形/対数特性は、低輝度部すなわち線形特性領域は通常のイメージセンサーと同じく高コントラストな画像が得られ、高輝度部が対数特性となるため非常にダイナミックレンジが広いという特徴を持つ。しかしながら、通常の画像処理でモニター用画像やプリント用画像を作成すると、対数特性の高輝度部が低コントラストとなり、視認性に乏しい画像になってしまう。

そこで、ダイナミックレンジ圧縮技術を適用し、対数特性の高輝度部、および画面全体を高コントラスト化する画像処理を開発したので紹介する。線形/対数特性の特徴を損なわない工夫も盛り込まれている。また、高画質用途向けとして微小なエッジ不具合に対する補正方法も簡単に紹介する。

2 線形/対数型 CMOS イメージセンサー

2.1 光電変換特性

Fig. 1 に試作した線形/対数型 CMOS イメージセンサーの光電変換特性を示す。横軸は対数スケールで入射光強度（デバイス面照度）、縦軸はセンサー出力である。点線は線形駆動した場合であり、実線は線形/対数駆動した場合である。線形/対数駆動では入射光強度が $15lx$ 以下では

線形特性を示し、それより大きい領域で対数特性となっている。線形駆動の場合に入射光強度20lx強で出力が飽和しているのに対し、線形/対数駆動では3000lx以上まで対数特性を維持できているので、2桁以上ダイナミックレンジが拡大されていることがわかる。

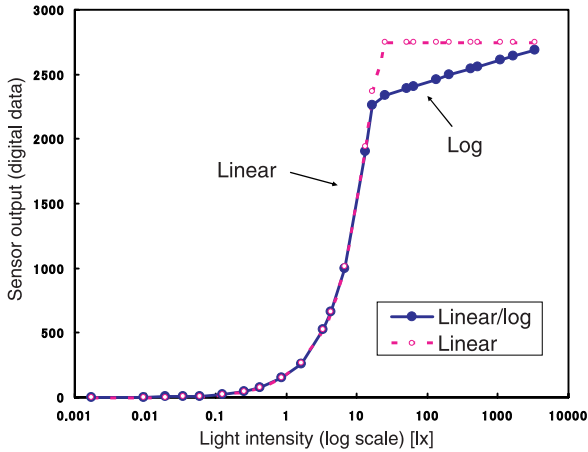


Fig.1 Photosensitive conversion characteristics of a linear/log CMOS image sensor

2. 2 線形/対数特性の利点

線形/対数特性の場合、線形特性領域は通常のイメージセンサーと同じなので、高コントラストである。デジタルカメラやビデオカメラなどで撮りたいもの、主被写体が明確な場合、適正露光レベルが線形特性領域になるよう露光制御をしてやれば、主被写体は高コントラストで撮影できる。逆光の場合には、広ダイナミックレンジなので背景も白飛びせず同時に撮影できる。

2. 3 広ダイナミックレンジの課題

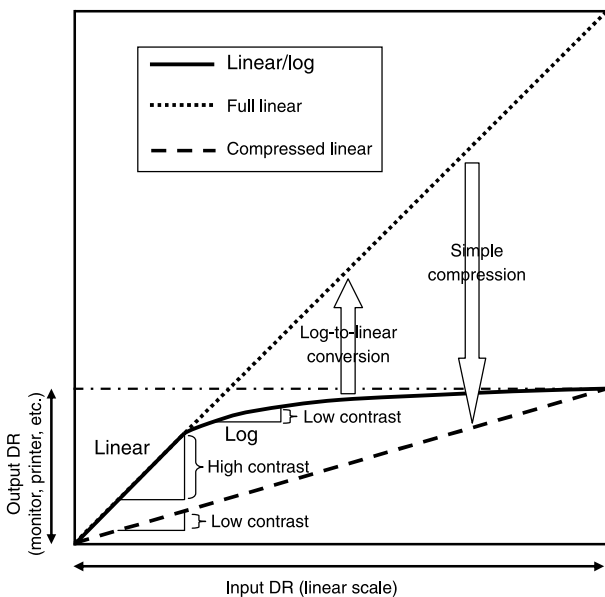


Fig.2 Dynamic range (DR): output vs. input

しかし、Fig. 1 からわかるように、対数特性領域は線形特性領域の100倍以上の入射光範囲を持つにもかかわらず、出力は線形特性領域の数分の1に圧縮されているため、低コントラストである。

このまま、通常処理を行いモニターやプリントなどの出力手段に出力すると、主被写体は高コントラストで、全体としては広ダイナミックレンジであるが、高輝度領域（対数特性領域）は低コントラストな画像となる（Fig. 2 LINEAR/LOG）。また、対数特性領域を線形特性に変換すると非常に広い出力ダイナミックレンジが必要になり、そのままではダイナミックレンジの狭い出力手段へは出力できない（Fig. 2 full linear）。線形変換画像を出力手段のダイナミックレンジに合わせて単純に圧縮すると、画像全体が低コントラストになってしまう（Fig. 2 compressed linear）。

そこで、広ダイナミックレンジ画像を高コントラストでモニターやプリントへ出力できる画像処理が必要となる。

3 ダイナミックレンジ圧縮

3. 1 概要

広ダイナミックレンジ画像をそれより狭いダイナミックレンジ画像へ高コントラストで変換する技術は、ダイナミックレンジ圧縮技術とよばれる。ダイナミックレンジ圧縮技術の中で、Retinex理論²⁾を基本とした研究や開発が多数報告されている^{3, 4, 5)}。Retinex理論によると、目に入る光は物体の反射率と照明光の積で決まるが、目の知覚は反射率に強い相関を示す。すなわち、広ダイナミックレンジ画像において、照明光成分のダイナミックレンジだけを狭くすれば、目の知覚と相関の強い反射率成分は維持され、高コントラストでダイナミックレンジの狭くなった（圧縮された）画像が得られる。

広ダイナミックレンジ画像を I 、その反射率成分 D 、

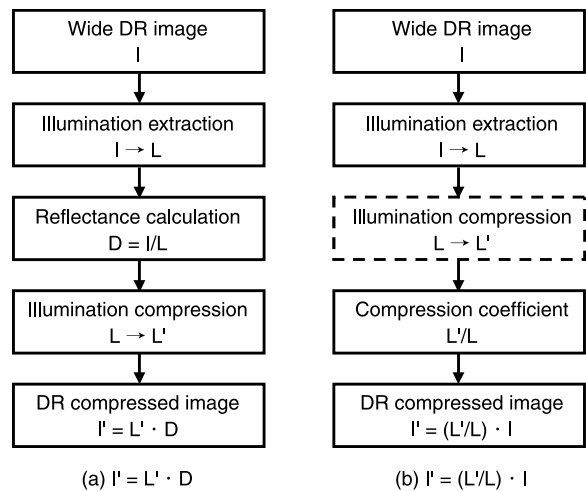


Fig.3 Dynamic range (DR) compression on retinex theory

I : wide dynamic range image; L : illumination; D : reflectance; L' : compressed illumination; I' : DR compressed image

照明光成分をL, 圧縮後の照明光成分をL', ダイナミックレンジ圧縮後の画像をI'とすると

$$I = L \cdot D \quad (1)$$

$$I' = L' \cdot D \quad (2)$$

式(1)(2)より

$$I' = (L'/L) \cdot I \quad (3)$$

が成立する。図に示すとFig. 3となる。Fig. 3 (a)は式(2)を表し, (b)は式(3)を表している。(b)にしたがえば, 反射率成分Dを求めることなくダイナミックレンジ圧縮が可能である。

3. 2 照明光成分抽出

3. 2. 1 ハロー効果

画像から照明光成分と反射率成分を正確に分離するのは困難だが, 通常ダイナミックレンジ圧縮では周波数で分離することが多い。照明光成分は緩やかに変化している場合が多く反射率成分に比べて低周波であるとして, ローパスフィルタ (以下, LPF) で照明光成分を抽出する。

このとき, LPFのサイズが小さいと, たとえば2次元デジタルフィルタで 3×3 や 5×5 のサイズでは, 抽出した照明光成分に反射率成分が残留し, 照明光成分を圧縮する際に反射率成分も圧縮されて, コントラストが低下する。したがって, かなり大きなサイズのLPFが必要となる。ガウシアンLPFの半径で適当な値は, 80画素³⁾や, 画像サイズ (横または縦) の2%⁵⁾が最適との報告もある。VGA横640画素の2%とすると13画素となり, 半径の2倍までのガウシアンLPFとしても2次元デジタルフィルタでのサイズは 50×50 と大きなものとなる。



Fig.4 Halo-effect artifact

大きなサイズのガウシアンLPFなどの単純に重み付け平均するLPFでは, 照明光成分が急激に変化するような

エッジ付近でハロー効果とよばれる不具合が発生する。

Fig. 4に極端なハロー効果の例を示す。マネキンの周辺が白い縁取りがされたようになっている。

これは, 抽出された照明光成分が真の照明光成分と異なることに起因し, 特にエッジ付近で顕著に現れる。Fig. 5は1次元の信号波形を用いてダイナミックレンジ圧縮のプロセスを簡単に示した図である。(a)の画像Iの真の照明光成分は(e)の上段に示すようにエッジは保存されて他は平滑化されたものだが, Iを単純なLPFに通すと(b)の上段のようにエッジの劣化した照明光成分Lが抽出される。このときLとIから反射率成分Dを求めると(b)の下段のようになりエッジ付近で異常を示す。Lを圧縮してL'を作り(c), Dとの積を求めるとダイナミックレンジ圧縮された画像I'となるが, (d)に示すようにハロー効果が発生する。

したがって, ハロー効果の発生を抑圧するには, 照明光成分の抽出に, できるだけエッジ情報を残すようなLPF, すなわちエッジ保存型LPFが必要となる。

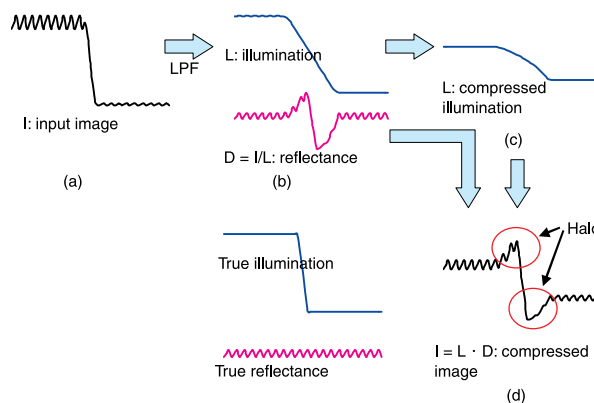


Fig.5 Dynamic range compression (halo effect)

3. 2. 2 エッジ保存型LPF

エッジ保存型LPFとしてbilateralフィルタを照明光成分抽出に適用したものが報告されている⁵⁾。bilateralフィルタは, 空間方向のガウシアンLPFと画素値方向のガウシアンLPFを組み合わせ着目画素と画素値の差の大きな画素の重み付けが小さくなるようなフィルタであるが, 照明光成分抽出に適用する場合, 前項で述べたようにLPFのサイズが大きいため非常に計算量が多く処理時間がかかる。

そこでわれわれは, LPFとダウンサンプリングを繰り返して多重解像度化し, エッジを上層の高解像度側に置換えながらアップサンプリングする方法でエッジ保存型LPFを構成した。多重解像度化することで, 比較的小さいサイズのLPFで大きなぼけを得ることが可能であり, 計算量は後述のように少なくてすむ。Fig. 6に構成を示す。この構成をここでは仮に階層LPF (hierarchical LPF) と呼ぶことにする。

入力は線形/対数特性の画像を対数特性に変換した $\log(I)$

である。対数とすることで反射率成分が輝度レベル（照明成分）に依存しなくなり、LPFでの抑圧効果が大きくなる。LPFは7×7の2次元デジタルフィルタとした。LPF後1/2のダウンサンプリングを行うことで第1階層の画像を得る。第1階層の画像にLPF，ダウンサンプリングで第2階層の画像を得る。これを繰り返すほけの大きな画像を得る。たとえば第4階層の画像は縦横1/8に縮小された画像に7×7のLPFを通したものだから元画像に56×56のLPFを通した画像に匹敵するほけが得られる。実際には途中の階層でもLPFを通っているほけはもっと大きい。計算量は、画素数mとすると56×56のLPFは3136m回の乗算が必要なのに対し、階層LPFでは4/3×7×7×m=65.34m回未満で済む。

下層の画像をアップサンプリングした画像 J_L からエッジ検出フィルタを通し画素ごとにエッジ強度 e を算出する。エッジ検出フィルタは3×3のprewittフィルタとした。このエッジ強度 e により J_L とひとつ上層の画像 J_H の混合比 k を制御して新たな画像 J_L' を式(4)で合成する。

$$J_L' = (1-k) \cdot J_L + k \cdot J_H \quad (4)$$

ただし, $k=0.0 (e \leq e_1), k=f(e) (e_1 < e < e_2), k=1.0 (e \geq e_2)$

e_1, e_2 は混合を制御する閾値で、 f は単調増加関数である。この合成によりエッジ部は元の情報をより多く含んでいる画像 J_H の比率が高くなる。これを元画像のサイズまで繰り返すことでエッジ保存されたほけ画像 $\log(L)$ ，すなわち照明光成分が得られる。

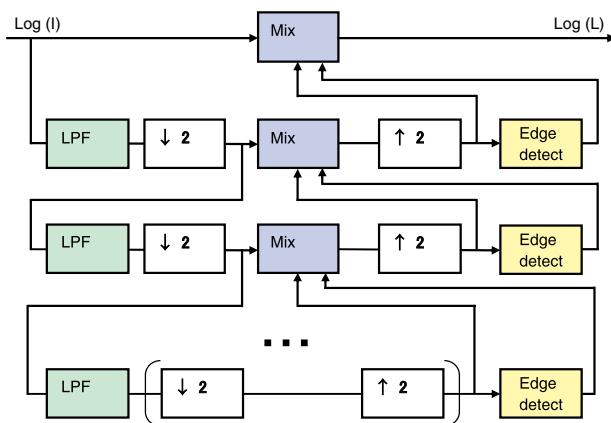


Fig.6 Illumination extraction by hierarchical LPF

3. 3 圧縮特性

得られた照明光成分 $\log(L)$ を線形変換した照明光成分 L に対してダイナミックレンジ圧縮を施し、圧縮された照明光成分 L' を得る。

第2. 2節で述べたように、適正露光レベル（主被写体）が線形特性領域になるよう露光制御している場合、線形特性領域をできるだけ圧縮しないよう考慮して圧縮

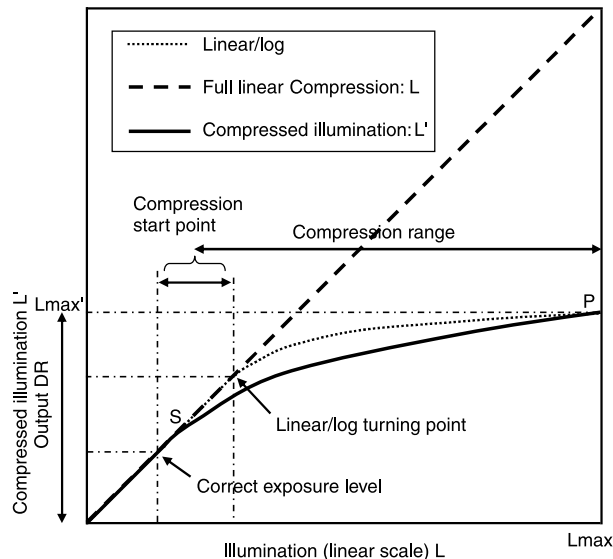


Fig. 7 Compression curve of illumination

特性を決めると、照明光成分も含めて主被写体を忠実に再現できるので、線形/対数型イメージセンサーの特徴を損なわずにダイナミックレンジ圧縮を実現できる。具体的にはFig. 7に示すように、圧縮開始点 S を線形特性領域内で適正露光レベルより上に設定し、 S 以下のレベルは元画像をそのまま出力するようにする。圧縮終了点 P は、照明光成分 L の最大値 L_{max} のとき圧縮照明光成分 L' の最大値 L_{max}' となる点である。圧縮特性は、画像でよく用いられるガンマ特性（べき乗関数）として式(5)となる。 $L-L'$ 座標で $S(s, s)$, $P(L_{max}, L_{max}')$ として、

$$L' = L \quad (L \leq s)$$

$$L' = q \cdot L^r \quad (L > s) \quad (5)$$

ただし, $r = \log(s/L_{max}') / \log(s/L_{max})$, $q = s^{1-r}$

式(5)で L から L' を求め、式(3)に適用すれば、高コントラストのダイナミックレンジ圧縮画像が得られる。

3. 4 処理結果

デジタルカメラで撮影した露光時間の異なる2枚の画

Table 1 Specifications of contrast improvement processing

Hierarchical LPF	
LPF	7x7 weighted average
Downsampling	2:1
Number of steps	4
Edge detector	3x3 Prewitt
e_1	33
e_2	1310
Compression Eq. (5)	
s	1105
L_{max}'	4095 (12 bits)
L_{max}	43801 (Fig. 8, photos on left)
	16,383 (Fig. 8, photos on right)
Output conversion	12 bits to 8 bits, gamma = 1/1.8
Processing time	11 seconds (6MPixels, 1.6GHz CPU)



Fig.8 Images obtained through contrast improvement processing. Input images are linear/log images converted from linear high-dynamic range images synthesized from short- and long-exposure time images. Top: short- and long-exposure time images. Middle: images from conventional image data processing of input images. Bottom: images from our contrast improvement

像から、12ビットの線形/対数特性の画像を合成し、処理した。処理のパラメータをTable 1、処理画像をFig. 8に示す。

Fig. 8 上段は、露光時間の異なる2枚の合成前の画像である。Fig. 8 の中段は、合成した線形/対数特性の入力画像をダイナミックレンジ圧縮せず通常処理した画像（以下、線形/対数画像）であり、下段は同じ入力画像を今回の開発技術でダイナミックレンジ圧縮を施し高コントラスト化処理した画像（以下、高コントラスト化画像）である。左の画像は、デジタルカメラやビデオカメラを想定した逆光シーンである。マネキン（主被写体）は、線形/対数画像と高コントラスト化画像ともほぼ適正露光レベルで再現されているが、建物の壁（背景）は線形/対数画像では非常に低コントラストなのに対し高コントラスト化画像では鮮明に再現されているのがわかる。また、右の画像は車載用でのトンネルの出口や監視用での屋内屋外同時監視を想定したシーンであり、暗い廊下から明るい屋外を撮影したものである。左と同じように明るい

部分のコントラストが改善しているのがわかる。両画像ともハローはほとんど認められず良好な画像再現をしている。本文末尾のFig.10には、試作した線形/対数型CMOSイメージセンサーで撮影した画像を示す。合成した画像と同じように明るい部分が高コントラスト化されており、実センサー画像に対する処理の効果も確認できた。（背景に縦筋等のノイズが見えるが、センサーが試作品のためである。）

4 高画質対応

4.1 擬似エッジと微小ハロー

以上の処理で、ほぼ良好な高コントラスト化処理ができた。しかし、シーンによっては、画像を拡大するとエッジ部に微小な不具合が確認される場合がある。ほとんどの場合許容可能だが、一眼レフ等さらに高画質を要求される場合は問題となる可能性がある。

不具合は、棒状の物体のエッジの乱れ（擬似エッジと

よぶ) とステップ状の物体のエッジに発生する微小ハローである。これらの出方は、階層LPFにおけるエッジの混合を制御する閾値パラメータ e_1, e_2 を変えると変化する。

Fig. 9 (a)(b)に e_1, e_2 を変えたときの擬似エッジと微小ハローを示す。

擬似エッジと微小ハローはパラメータ e_1, e_2 に関して相反しており、 e_1, e_2 を小さくすると擬似エッジが発生しやすく、逆に大きくすると微小ハローが発生しやすくなる。Table 1 の e_1, e_2 の値はどちらも発生しにくい値に設定しているが、シーンによっては発生する可能性がある。その場合、 e_1, e_2 を変更すると減少するが、場合によっては、他の場所に逆の現象が発生する可能性がある。この場合、パラメータ e_1, e_2 の変更だけでは対応できない。

4. 2 補正方法

前節で述べた課題に対応するための補正方法を紹介する。

前節で述べたように擬似エッジと微小ハローはお互いに相反しており、パラメータ e_1, e_2 でどちらかを抑えようとするともう一方が目立つようになる。そこで、 e_1, e_2 を変えて、微小ハローを抑制した画像と擬似エッジを抑制した画像を作成し、擬似エッジ抑制画像のハロー発生部を微小ハロー抑制画像で補正することで対応する。微小ハローは、輝度差の大きなステップ上の物体のエッジに発生するので、擬似エッジ抑制画像(ハローあり)のエッジを検出しハロー発生部とし、この部分をハロー抑制画像に置き換える。注意点は、このハロー発生部のエッジを検出するときに棒状の物体に発生する擬似エッジ部を検出しないようにすることである。縦横1/20程度の単純平均で縮小後エッジ検出すると、棒状の物体は平均化されてほとんどなくなり、輝度差の大きいステップ上の物体のエッジだけを検出することができる。

補正結果をFig. 9 (c)に示す。擬似エッジ、微小ハローともに改善されているのがわかる。

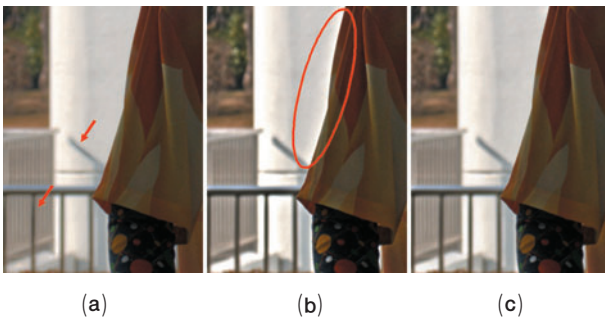


Fig.9 Artificial edges and small halo artifact: (a) artificial edges ($e_1 = 8, e_2 = 328$); (b) small halo artifact ($e_1 = 66, e_2 = 2620$); (c) after correction

5 まとめ

線形/対数型イメージセンサーに対応した高コントラスト化画像処理について紹介した。センサーとセットで様々な用途に応用できると考える。今後は、さらなる高画質化と、ハードウェア実装による動画対応を検討していきたい。なお、階層LPFは線形/対数特性を前提にしたものではないので、様々な広ダイナミックレンジ画像に適用が可能であることを付け加えておく。

最後に、論文調査、トレース等で多大な協力をいただきましたシステム技術研究所イメージシステム開発室の高清さん、ならびに御助言・御支援いただきました方々に深く感謝いたします。



Fig.10 Images from our contrast improvement processing; input image is taken with test sample of linear/log CMOS image sensor. Top: image from conventional image data processing. Bottom: image from our contrast improvement processing

●参考文献

- 1) 角本兼一, 矢野壯, 楠田将之, 掃部幸一, 田中良弘, KONICA MINOLTA Tech. Rep., Vol. 1, 45 (2004)
- 2) E.H.Land, J.J.McCann, "Lightness and retinex theory", Journal of the Optical Society of America, **61** (1), 1 (1971)
- 3) D.J.Jobson, G.A.Woodell, "Properties of a Center/Surround Retinex: Part 2. Surround Design", NASA Technical Memorandum, 110188, (1995)
- 4) Z.Rahman, D.J.Jobson, G.A.Woodell, "A Multiscale Retinex for Color Rendition and Dynamic Range Compression", SPIE International Symposium on Optical Science, Engineering and Instrumentation, Applications of Digital Image Processing XIX, Proceedings SPIE 2825, Andrew G. Tescher, ed. (1996)
- 5) Fredo Durand, Julie Dorsey, "Fast Bilateral Filtering for the Display of High-Dynamic-Range Images", SIGGRAPH (2002)