

縮小するCMOS画素のダイナミックレンジを回復する新たな技術

ダニエル・ヴァン・ブレアコム、クリストフ・バセット、ラミ・ヤッシン

CMOS検出器は解像力の向上のために画素サイズの縮小を押し進めている。それにともなって、撮像素子の性能を維持する、もしくは増強するための高ダイナミックレンジ(HDR)技術が必要とされている。

携帯電話のカメラを使って明るい窓の前に立つ人物の室内写真を撮影したことがあるならば、CMOSイメージセンサのダイナミックレンジが狭いことを経験しているに違いない。明るい屋外シーンを解像可能にすると、窓の前に立つ人物はほぼ完全に黒くなり、人物を十分に露光すると、屋外シーンは完全に飽和して白くなる。シーンのダイナミックレンジがイメージセンサのダイナミックレンジを超えると、シーンの細部はひどく不明になり、不満足な画質になる。

CMOSイメージセンサのダイナミックレンジを広げ、高ダイナミックレンジ(HDR)撮像素子を実現可能にすることは、その重要性がさまざまな応用で増大している。標準的な撮影シーンの明るさが数桁も変化する自動車センサの

場合はHDR動作が必須になる。より小さな画素でも撮像性能を維持できる手法への関心も高まっている。CMOSイメージセンサの設計者は画素サイズを積極的に縮小して解像力を増強し、ダイのサイズを小型化している。しかし、画素サイズが小さくなると、画素自体のダイナミックレンジが影響を受ける。幸いなことに、HDR技術を使うと、センサの設計者は失われたダイナミックレンジを回復し、撮像素子の性能を維持し、あるいは増強することも可能になる。

ダイナミックレンジ

イメージセンサのダイナミックレンジは、センサの最大出力信号をノイズフロアで割算した値で定義され、デシベル(dB)で表示される。この値は入力に参照され、一般に画素フォトダイオ

ードの等価電子数として与えられる。例えば、1万電子の「十分な」電荷蓄積容量と3e-(電子)の入力参照雑音をもつイメージセンサのダイナミックレンジは、その他のセンサ信号列の最大信号スイングを限定する回路がないと仮定すれば、70dBになる。

民生用CMOSイメージセンサの場合、70dBのダイナミックレンジはかなり標準的な値だが、自然のシーンはダイナミックレンジが100dBを超える。画素のダイナミックレンジは「十分な」電荷蓄積容量をさらに増やすことで拡大できるが、CMOSプロセスは画素の小型化にともなって低電圧側へ移行しており、このことは「十分な」電荷蓄積容量をもつ画素を小型化する方向とは逆の動きになる。

雑音低減も選択肢になるが、信号列の雑音低減には限界があり、とくにビデオ速度の高解像センサの読み取り速度が増加すると、その限界は顕著になる。また、印加電圧が一定のときには、「十分な」電荷蓄積容量の増加と入力参照雑音の減少とが相互に反対の働きをする。このことは「十分な」電荷蓄積容量が大きいほど、フォトダイオードの電子から画素の出力電圧スイングへの変換を意味する画素の変換利得が減少することにより生じる。雑音を画素入力に参照させるには、信号列の電圧雑音の変換利得による割算が必要になる。つまり、「十分な」電荷蓄積容量が大きいと、入力参照信号列も増加し、ダイナミックレンジはまったく改善されないことを意味している。

表1 各種の高ダイナミックレンジ(HDR)技術の利点と欠点

HDR技術	利点	欠点
非線形画素	簡単な画素	較正が必要 色補正が難しい プロセス/電圧/温度(PVT)変動
ラテラルオーバーフロー キャパシタ(LOFIC)	線形応答	画素の大型化 充填率の減少 列当たり2回の読み取り
多重露光	画素修正が不要	高速読み取りが必要 フレームメモリが必要 モーションアーチファクト
条件付きリセット	フレーム当たり1回読み取り	モーションアーチファクト 条件付きリセット回路とメモリのコスト
画素内コンバーティ	画素内のアナログ-デジタル変換	充填率の減少 フレームメモリが必要 処理の複雑さ

HDRセンサの設計法

画素の「十分な」電荷蓄積容量の増加または雑音の低減を用いる直接的な方法には限界がある。したがって、広いダイナミックレンジのシーンを撮影するセンサは、いくつかの代替法を採用している(表1)。これらの方法は二つのグループ、つまり画素の露光時間の変調による技術と画素の変換利得の変調による技術とに分けることができる。

非線形変換利得変調技術は、光に対する線形応答ではなく、対数関数の応答を示す画素を使用する。この技術は大量の較正作業が必要になり、プロセス、電圧および温度(PVT)の変化に対して非常に敏感になることが欠点になる。また、非線形出力の場合は色補正がセンサ出力の全域において非常に難しくなることも欠点になる。

線形性を維持する二つのアプローチは、それぞれの画素にラテラルオーバーフロー積分キャパシタ(LOFIC)と二つのフォトダイオード(感度が異なる)を使用する^{(1), (2)}。このような設計の画素では2回の読み取り、つまり低い光量に対する読み取りと高い光量に対する読み取りが行われる。

これらの技術はいずれも、従来の画素設計の大幅な修正が必要になるが、その結果として、感度と暗電流の性能が劣化する。変換利得の代わりに積分時間を変調すると、画素の修正が軽減される。

この方法の最も簡単な例は、従来の画素設計の修正を必要としない多重露光法の利用に見られる⁽³⁾。この場合の画像アレイは一つのフレームの積分時間を何回も変えて読み取りが行われる。読み取られた多重画像は、外部フレームメモリを用いて処理され、最終のHDR画像に融合される。単一露光の場合に比べると、信号列は露光回数に応じて非常に高速に走行する。

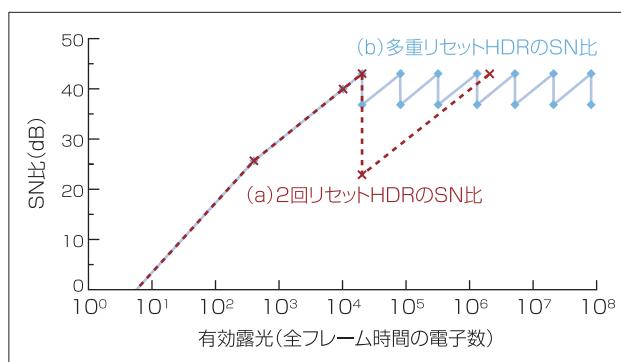


図1 20Kの「十分な」電荷蓄積容量と5電子の入力参照雑音をもつセンサにおける信号対雑音(SN)比の崩壊を積分時間が2回の場合(a)と積分時間が8回の場合(b)との比較で示している。(資料提供: フォルツアシリコン社)

画素積分時間が画素ごとに個別に制御できること、多重フレームの読み取りが不要になる。それぞれの画素出力は積分時に検査され、画素は飽和状態にどれほど近いかに応じて、条件付き初期化が行われる。必要となる各画素の積分時間を記憶するメモリが必要になる。

変調積分時間技術の場合はモーションアーチファクトが一つの欠点になる。このアーチファクトは積分が異なる時間で行われ、シーン内部の動きの異なる部分が取得されることから生じる。

最後に、画素にはコンパレータとして動作する回路が組込まれ、画素からの出力はアナログ信号ではなくデジタル信号になる。この技術は非常に広い帯域幅と最終画像を再構成するメモリが必要であり、画素の感度は電子回路を付加することで減少する。

信号対雑音

これらのHDRによるアプローチの重要な特性は、露光時間の間または変換利得の変化するときのブレイクポイントにおいて、信号対雑音(SN)比が崩壊することだ。HDRでないセンサの光量レベルが低いときの出力雑音は、センサの雑音フロアに支配される。しかし、光量レベルが高いときの出力雑音は計測する光のショット雑音に支配される。

多重積雲時間の結果が单一HDR画像へ融合されると、複合画像のSN比は

不連続になる(図1)。この不連続性は一つの積分時間と次の積分時間との間に現われる。SN比の崩壊があまりにも激しいと、アーチファクトが最終画像に現われる。使用する露光の回数と比率はブレイクポイントにおいて許容されるSN比から決まり、その結果としてダイナミックレンジが広がる。

トーンマッピング

HDRセンサを用いて捕捉または合成された画像は、原画像に含まれる情報を利用してレンダリングされる。広く利用されているディスプレイ、プロジェクタ、プリンタなどはコントラスト比に限界があり、このことが最終画像の細部に影響を与える。デバイスのダイナミックレンジを合せるには、画像の細部を保存しながら全体のコントラストを低下させるトーンマッピングアルゴリズムによる画像処理が行われる。

線形変換やガンマ補正などの大域階トーンマッピングアルゴリズムは、画像コンテンツに関係なく、同一の変換を用いて画像をフィルタリングする。このような処理では画像は色あせ、明るい部分、暗い部分の両方において、細部の識別が難しくなる。

コンテンツをより重視するアプローチを用いると、画像変換を部分的に適用し、隣接する画素との違いに応じた画素マッピングを行うことによって、シーン



図2 多重画像から融合されたHDR画像を示している。上から5番目までは従来の単一露光による画像であり、最後はフォルツアシリコン社が試作したHDRセンサと実時間トーンマッピングシステムによるトーンマッピングHDR画像である。(資料提供:フォルツアシリコン社)

のハイライトを消去することができる。その最も簡単な方法は、細部を画像から分離し、画像に大域トーンマッピングを適用した後に、未修正の細部を組入れる。一般に、細部の抽出は低域通過フィルタ(ガウス)を用いて画像をぼかし、その後にぼけた画像を原画像から減算する(通常は対数ドメインで行われる)⁽⁴⁾。

トーンマッピングの性能にとって重要な手順は画像の細部の抽出であり、そこでは低域通過フィルタの選択が最大の影響を及ぼす。簡単なガウス核関数を適用すると、鋭いコントラストの領域は滑らかになり(明るい背景の前にある暗い物体またはその反対など)、エッジに沿ってハローが生成される。他の方法では、エッジ保存フィルタを利用することによって、計算の増大を代償にしてこの問題の解決を試みている。この方法は画像コンテンツに基づいて各画素のガウスフィルタ核関数を個別に修正し、望ましくないアーチファクトの出現を抑制する⁽⁵⁾。こうした方法は、異なる特色(バイラテラル、トライラテラル)を持ち、様々な問題に対応できるために好まれてきた。

最終結果の品質は定量化が難しく、主観的パラメータを計測する判定基準が設定されていない。コントラストは計算できるが、重要な性能の判定基準はシーンがどれほど自然に見えるかということにある(図2)。人間の眼より

も広いダイナミックレンジをもつ画像を取得できるセンサを使うと、そのトーンマッピング画像は観察者にとって正しい画像にはならない場合がある。どのような画像が「良い」と判定され、どのような判定基準を使用すべきかは最終用途によって決まる。

複合アルゴリズムは後処理して取得する画像にはうまく適用できるが、小型自立型ハードウェアシステムへの統合は難しい。標準的なハードウェアシステムは、デジタル信号プロセッサを独立したチップとして、あるいは市販のフィールドプログラマブルゲートアレイ(FPGA)のコアとして使用して、トーンマッピングに必要な浮動小数点演算子とルックアップテーブルを操作する。センサの内部に画像処理を統合したシステムでは、より簡素化した手段が必要になる。その一つのアプローチはローパスのガウス核をシンプルなフィルタ基に置きかえることだ。画像認識修復法は隣接する画素間のユークリッド距離に基づいて行うことができる。非常に広い乗数は中間の積を四捨五入することで除外される。この方法はシリコン系の消費電力の少ない高効率回路を構成できるが、代わりに精度の低下が発生し、アーチファクトが再導入されるリスクもある。利用可能なハードウェア資源と所望する最終結果とのバランスをとることが、このトレードオフになる。

参考文献

- (1) N. Akahane et al., *IEEE J. Solid-State Circuits* 41, 6, 851-858 (June 2006).
- (2) Y. Wang et al., "A High Dynamic Range CMOS APS Image Sensor," 2001 IEEE Workshop on Charge-Coupled Devices and Advanced Image Sensors (June 2001).
- (3) J. Solhusvik et al., "A 1280×960 3.75 μm pixel CMOS imager with Triple Exposure HDR," 2009 Intl. Image Sensor Workshop (June 2009).
- (4) E. Reinhard et al., *High Dynamic Range Imaging*, San Francisco, Elsevier (2006).
- (5) F. Durand and J. Dorsey, *Proc. 29th Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 257-266 (2002).

著者紹介

ダニエル・ヴァン・ブレアコム(Daniel Van Blerkom)は米フォルツアシリコン社(Forza Silicon)の共同創業者兼CTO、クリストフ・バセット(Christophe Basset)は同社の研究主幹、ラミ・ヤッシン(Rami Yassine)は同社の主幹設計技師。e-mail: dvb@forzasilicon.com