

CMOS イメージセンサに適した機能的リセット方式の検討

池辺 将之 大住 勇治 金高 達也[†] 浅井 哲也[‡] 雨宮 好仁[‡]

大日本印刷株式会社 電子デバイス研究所 〒115-0044 東京都北区赤羽南 2-8-21

[†] 大日本 LSI デザイン株式会社 〒115-0044 東京都北区赤羽南 2-8-21

[‡] 北海道大学大学院工学研究科電子情報工学専攻 〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目

E-mail: (ikebe_m, oosumi_y)@mail.micro.dnp.co.jp, [†] kanetaka_t@mail.micro.dnp.co.jp,

[‡] {asai, amemiya}@sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp

あらまし CMOS イメージセンサのリセット方式を工夫することで、広ダイナミックレンジを実現する手法を検討した。まず、負帰還を用いたリセット方式により、出力用 MOSFET のしきい値バラツキをキャンセルできることを示す。次に各画素の飽和時間情報を予測・規格化し、個別にリセットタイミングを設定することで広ダイナミックレンジを実現する。飽和時間予測 1 回毎に、12dB ずつのダイナミックレンジ向上を行うことができた。また、各画素の飽和時間情報を記憶しておく過程で、輝度の統計量を容易に算出することが可能となった。この統計量を用いることで、定められた出力 bit 数に適切な画像変換アルゴリズムを設定できる。

キーワード CMOS イメージセンサ, リセット, 飽和時間, 輝度統計量, 画像変換

Evaluation of a Functional Initializing for a CMOS-Image Sensor

Masayuki IKEBE Yuji OOSUMI Tatsuya KANETAKA[†]

Tetsuya ASAI[‡] and Yoshihito AMEMIYA[‡]

Dai Nippon Printing Co., Ltd. 2-8-21 Akabane Minami, Kita-ku, Tokyo, 115-0044 Japan

[†] Dai Nippon LSI design Co., Ltd. 2-8-21 Akabane Minami, Kita-ku, Tokyo, 115-0044 Japan

[‡] Faculty of Electrical Engineering, Hokkaido University 8 Nishi, 13 Kita, Kita-ku, Sapporo, 060-8628 Japan

E-mail: (ikebe_m, oosumi_y)@mail.micro.dnp.co.jp, [†] kanetaka_t@mail.micro.dnp.co.jp,

[‡] {asai, amemiya}@sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp

Abstract We have investigated a new initializing method to widen the dynamic range of CMOS image sensor circuit. At first, we present that the variation of threshold voltage of output MOSFET can be canceled by using negative feedback to initialize. Secondly, we achieved the wide dynamic range by setting individual initializing timing based upon estimation and normalization of the saturating time of each pixel. As the result 12dB dynamic range gain is achieved at each saturation-time-estimation. And also the statistical data of brightness is easily calculated by using the recorded saturation time information of each pixel. Image processing which is to convert the original digit number to a certain number can be properly determined by using the recorded statistical

Keyword CMOS-Image Sensor, Initializing, Saturation Time, Statistical Data of Brightness, Image Processing

1. はじめに

近年、社会の情報化に伴い、広帯域通信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になり、負担の大きかった画像情報も頻繁にやりとりされるようになった。

画像情報の取得機器としては、デジタルカメラが大きな地位を占め、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 及び CMOS イメージセンサであり、携帯用、監視用、車載用など様々な用途向けに開発が進んでいる。

特に CMOS イメージセンサは、通常の CMOS プロセスを用いて周辺回路も同時に集積することが可能なので、様々な画像処理機能を盛り込むことができる。画質に関しては、素子のバラツキや熱雑音などによる固定パターンノイズが課題であったが、プロセスの改善や CDS (Correlated Double Sampling: 相関 2 重サン

プリング)等のノイズ除去手法が提案され、CCDと比較しても遜色の無いレベルに近づいてきた。

ただし、上記ノイズキャンセル手法は、非常に効果的である反面、信号及びリセット時出力の差分を取ることとなるので基本的に破壊読出しとなる。そのため、蓄積途中の中間画像情報を利用することは難しかった。中間画像情報を取得できれば、微小時間における輝度変化を読み取ることが可能となり、様々な応用[1]が期待できる。

本稿では、CMOSイメージセンサのリセット方式に着目し、リセット時に出力MOSFETのしきい値バラツキをキャンセルする手法を示す。この手法を用いることで非破壊の中間撮像を可能にし、機能的な画像処理へ応用する。今回は、中間画像を各画素の飽和時間予測に適用し、イメージセンサの広ダイナミックレンジ化を行った。詳細を以下に述べる。

2. CMOSイメージセンサ回路の動作

2.1. 一般的な画素回路の動作

ここでは、単位画素回路の動作およびノイズ除去手法について述べる。一般的な画素回路を図1に示す。一般的な画素回路(3 Tr. Active Pixel Sensor)では、まずRst信号によりnMOSFET:MrstをONして初期電荷をPDに充電する。PDに光が当たることで暗電流が増加し初期電荷を放電する。このときA点の電位が光強度に応じて変化し、それを出力用のnMOSFET:Ampで増幅し、Sel信号を与えることで外部に読み出すことができる。

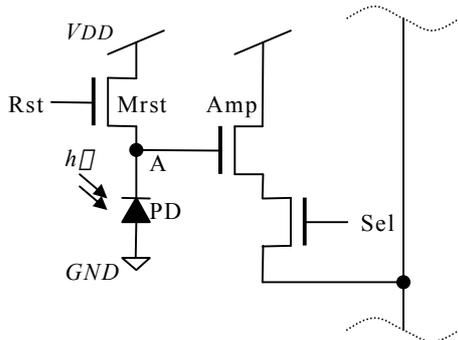


図1 一般的なCMOSイメージセンサの画素回路

しかし、出力MOSFETは製造上の問題により、しきい値にバラツキを生じてしまう。これが信号出力に現れ、固定パターンノイズの主な原因となっている。CDSでは、信号出力とリセット時出力の差分をとることで、しきい値バラツキを補正している。

2.2. 提案型回路の動作

単位画素回路を図2に示す。出力pMOSFET:M1と電流源用のpMOSFET:M2はソースフォロワを形成し、A点の電位に追従した出力を行っている。こ

で、MrstをONし、B点とリセット電位Vrstが等しくなるように負帰還を構成する(差動アンプの利得は60dB程度)。A点は $B=Vrst$ よりM1のしきい電圧分低い値に安定する。そのタイミングでMrstをOFFにすれば、リセット時の出力バラツキをキャンセルして一定値にすることができる。リセット後は、Vb2を0Vとして余分な消費電流を抑える。信号出力時は、差動アンプの入力をVrstからランプ電圧:Vrampに切替える。そして、出力信号をPWMとしてカウンタによりA/D変換を行う。

リセット時にしきい値バラツキを補償できるため、出力1/FのCDS回路を省略することが可能である。このことは、読出し時の信号比較用リセットを必要とせず、非破壊の中間撮像が可能であることを示している。

0.25μmプロセスパラメータを用いたHSPICEシミュレーションの結果を図3に示す。約0.2Vのしきい値バラツキをキャンセルし、B点において1.5mVの範囲内で初期状態を作り出せていることがわかる。

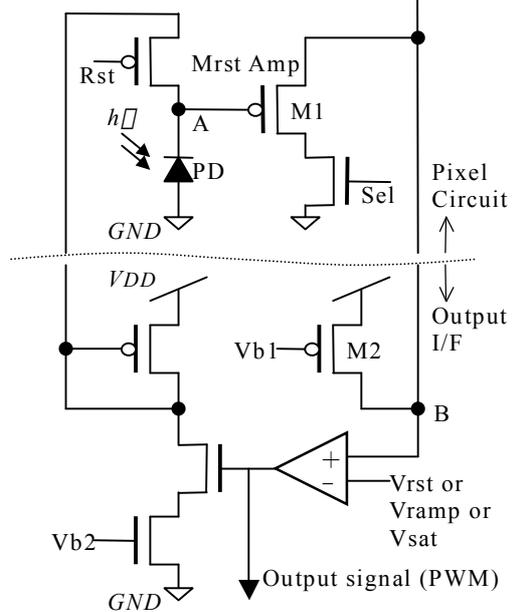


図2 提案型CMOSイメージセンサの画素回路

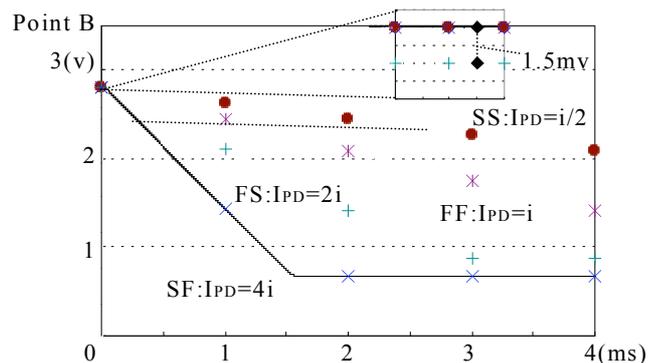


図3 画素回路のシミュレーション結果

3. イメージセンサの広ダイナミックレンジ化

3.1. 光強度への対応

一般的に CCD・CMOS イメージセンサは、露光時間の調節を行うことで様々な光強度の下での撮影に対応している。CCD は、蓄積電荷の掃き捨てにより再リセットを行い、CMOS イメージセンサは、リセット用 MOSFET を再度スイッチングすることで露光時間の調節を行っている。しかし、画素回路の出力レンジは一定なので、全画素に対し同一に露光時間を調節した場合、高輝度の画素では飽和による白とび（露光量多）や低輝度の画素では受光量不足による黒つぶれ（露光量少）を発生させる（図4）。

画素回路の出力レンジ以上の表現力を擬似的に実現することで上記の現象に対応できるが、そのためにはアルゴリズムや回路上の工夫を必要とする。

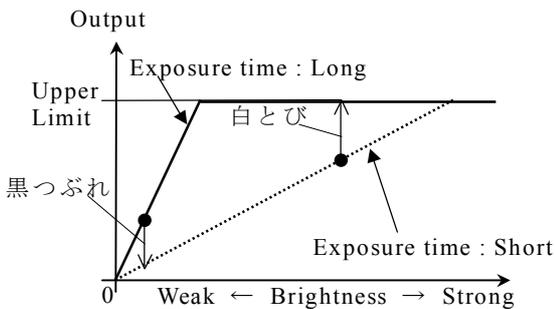


図4 露光時間調節による表現力の変化

3.2. 広ダイナミックレンジ化手法

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2つの画像を合成する、感度の違う撮像素子を集積する[2]、などで対応している。CMOS イメージセンサでは、対数変換回路を各画素に設置する[3]、抵抗ネットワークにより強い光信号を周囲に拡散する[4][5]、画素値が飽和するごとに個別にリセットする[6]、露光時間を個別に設定し露光終了後は出力時まで画素値を保持する[7]、などがある。

本稿では、非破壊中間撮像を活かして各画素の飽和予測を行い、再リセットタイミングを個別に設定して最適な露光時間を割り当てる。

3.3. 適応リセットによる露光時間の調節

リセットタイミングの設定について説明する。個々の画素回路は、決められたフレーム時間 T ごとに出力を行うものとする。信号の出力レンジを V とする。

まず、画素回路に対して最初のリセットを施す。回路のバラツキ誤差はこのリセットでキャンセルされる。 $T/2$ の時点で非破壊中間読出しを行う。この時、

信号出力 V 以上か（飽和）、 $V/2$ 以上かを検出する。検出には出力 I/F の差動アンプを用いる。 V 以上であれば $T/2$ で飽和すると予測して $3T/4$ で再リセット（露光時間 $T/4$ ）、 $V/2$ 以上であれば T で飽和すると予測して $T/2$ で即時再リセットを行う（露光時間 $T/2$ ）。条件に当てはまらない画素は、蓄積を続行する（露光時間 T ）。リセットタイミングを図5に示す。

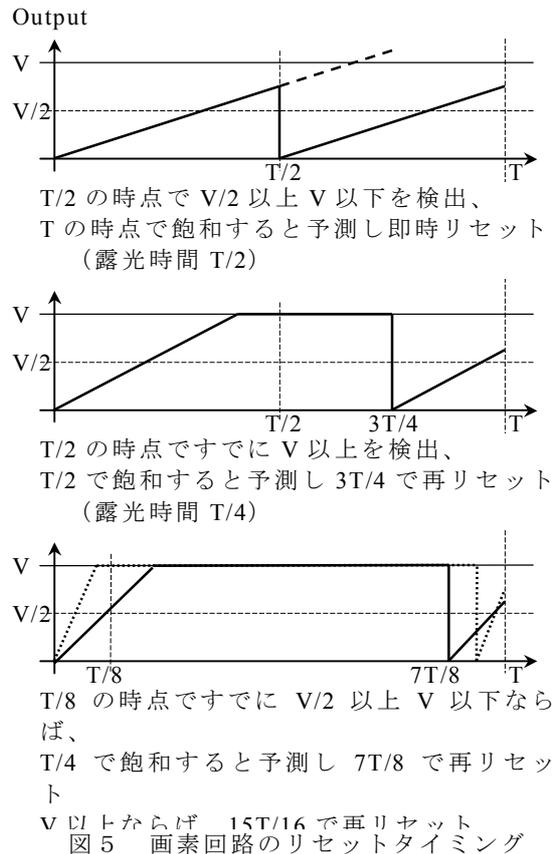


図5 画素回路のリセットタイミング

露光時間情報は、画素ごとに数 bit ずつの外部メモリに保存する。保存フォーマットは、露光時間 $T/4$: 2、 $T/2$: 1、 T : 0 とする。再リセットは露光時間情報に基づいて行う。

フレーム時間 T 終了後は、各画素値を A/D 変換して出力する（8bit 出力を想定）。露光時間を $T/2^n$ と設定しているので、画素の実データは露光時間情報と合わせて $8\text{bit} \times 2^n$ として表すことができる（[7]と同様の出力フォーマットとなる）。そのため、実データはビットシフト演算のみで取得できる。例として出力値 11001011、露光時間 $T/4$ では、実データは 2bit 左シフトして 1100101100 となる。

上記飽和予測及び再リセット動作で実データは 2bit 拡張される（12dB の広ダイナミックレンジ化）。中間撮像による予測回数を増やすことでさらに 2bit ずつ拡張することができる。最終的には、 $T/32$ の飽和予

測を行い $T/32$ 、 $T/64$ の露光時間を設定して計 6bit の拡張=36dB のダイナミックレンジ向上を行う。

3.4. 広ダイナミックレンジ画像の出力形式

広ダイナミックレンジ化された画像情報は、実際の画像表示形式に比べて bit 数が拡張されている。そこで、出力 bit 数に合わせた画像変換が必要になる(本研究では 8bit 最終出力を想定)。画像変換に際して、単純に bit 数の圧縮を行った場合、広ダイナミックレンジでの画像の特徴が失われてしまう可能性がある。そのため、画像の特性に合わせた変換を行わなければならない。本研究では、画像の特徴を輝度分布で表し、その分布に即した bit 圧縮手法を考える。

輝度分布を求めるには、画像全体の統計量を算出する必要がある。本来ならば、逐次的に演算を行って輝度レベルごとに画素数を算出する。しかし、その場合すべての画素値が確定しなければ統計量を求めることができず、bit 圧縮処理の前段に大きな時間的ロスを生じてしまう。そこで、露光時間情報から大まかな輝度統計量を求めて bit 圧縮を行うことを考えた。

画像全体の露光時間情報は $T/2$ 時間で求めることができる。そのため、輝度統計量からの画像変換用パラメータの算出は残りの $T/2$ 時間で行うことができる。輝度統計量として、露光時間 $T/2^n$ ごとの画素数を算出する。この処理は、飽和予測時の結果を外部メモリに格納する際、各露光時間に対応する有意画素をカウントすることで実現できる。

表現できる輝度値は、露光時間毎に図 6 のように示される。露光時間が $1/2^n$ になるごとに、 2^n 倍の輝度値を表現できる。ただし、各露光時間に対する実データの bit 数拡張はシフト演算のみなので、実際のレベル表現は 8bit のままである。そのため、露光時間 T : 256 レベル、他の時間では 128 レベルの表現となる(他の時間では、常に MSB=1 なので実質 7bit 表現)。画像変換のためのアルゴリズムは以下の通りである。

- (1) 統計量から露光時間毎の画素数の割合を求める。
ただし、露光時間 T の画素数は 2 倍の重みにする。
- (2) 画素数の割合から、レベルの圧縮率を算出する。
- (3) 圧縮率から各露光時間のオフセットを求める。
- (4) 圧縮率とオフセットから出力データを求める。

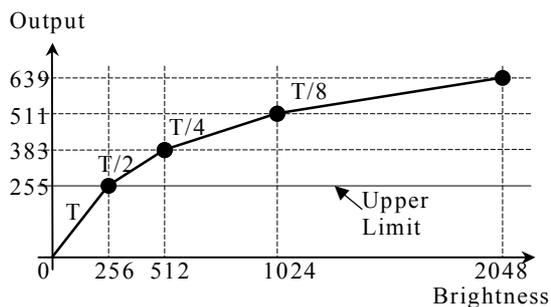


図 6 本方式による輝度値の表現

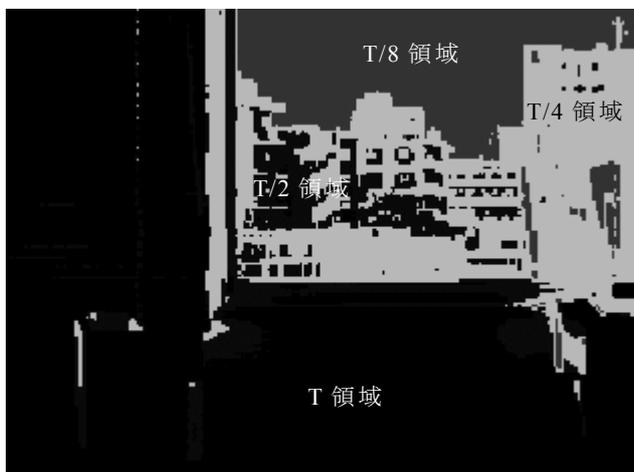
- (5) 例外として、ある露光時間にデータが集中した時、露光時間 T では、そのまま出力。それ以外は、128 レベルシフトした後に 2 倍にして出力する。

圧縮率の算出は時間に余裕があるため、加算器を逐次的に用いる簡易除算器で充分である(シフト演算・減算処理を逐次的に繰り返す)。

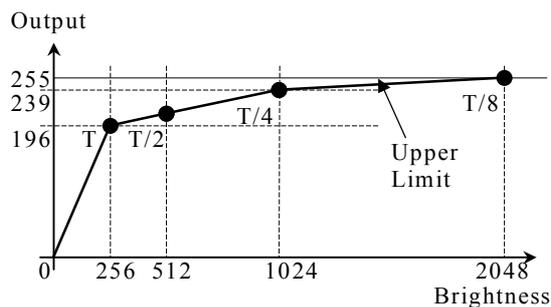
画像シミュレーションの結果を図 7 に示す。



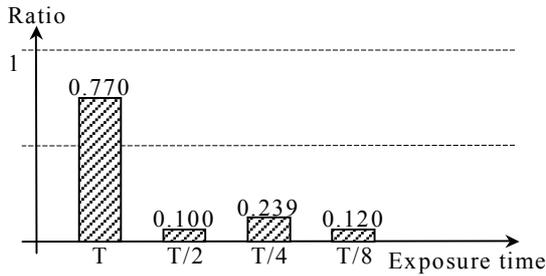
(a) 従来の撮像画像：晴天時室内から撮影



(b) 本方式による画像への露光時間割り当て



(c) 出力 bit 数に対する輝度値の圧縮



(d) 露光時間ごとの輝度圧縮比率



(e) 本方式による出力画像



(f) 線形圧縮による出力画像

図7 画像シミュレーションによる結果

今回は、実際の景観に基づいた広ダイナミックレンジのデータを作成してシミュレーションに使用した。結果から、従来の撮像では高輝度の画素が白とびしている様子がわかる。また、広ダイナミックレンジの表現に関して、線形変換では画像の特性を捉えきれず、

室内画像に黒つぶれが発生している様子を確認できる。本方式の画像変換では室内の輝度をほぼ保ちながら、外部の景観も表現できている。

4. システムの全体構成

システム全体をブロック図で示す(図8)。個別リセットが可能な撮像部・走査部・外部メモリ・A/D変換部・画像変換部からなる。A/D変換部は、飽和判定・負帰還リセットにも利用する。画素部を 256×256 構成とすると外部メモリは、露光時間記憶用の $3\text{bit} \times 256 \times 256 \div 200\text{kb}$ とA/D変換および飽和予測時のラインバッファとして $16\text{bit} \times 256 \div 4\text{kb}$ が必要となる。

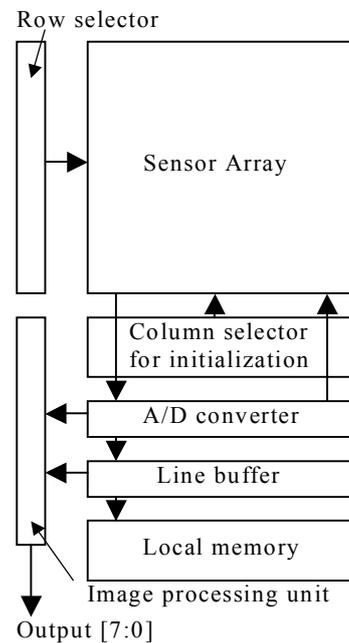


図8 システム全体のブロック図

30frame/secで行并列に駆動した場合のタイミングチャートを図9に示す。逐次的に1行ずつの処理を行うので、各行のリセット時刻は少しずつ遅れを生じる。そのため、3.3章で述べた再リセット処理および飽和検出タイミングは、ある特定の行のフレーム終了時間と一致する。よって、上記処理は行ごとのフレーム終了時の処理に集約されることとなる。N行における処理順序は次の通りである。

N行のフレーム時間が終了した後

- (1) N+4行目の選択再リセットを行う(露光時間 T/64)。
- (2) N+8行目の選択再リセットを行う(露光時間 T/32)。
- (3) N+16行目の選択再リセットを行う(露光時間 T/16)。
- (4) N+32行目の選択再リセットを行う(露光時間 T/8)。
- (5) N+64行目の選択再リセットを行う(露光時間 T/4)。
- (6) N+128行目の飽和予測を行い、即時選択再リセッ

トを行う（露光時間 $T/2$ ）。

(7) N 行目の読出し動作を行う。

(8) $N+192$ 行目の飽和予測を行う。

(9) $N+240$ 行目の飽和予測を行う。

(10) N 行目のフレームリセットを行う。

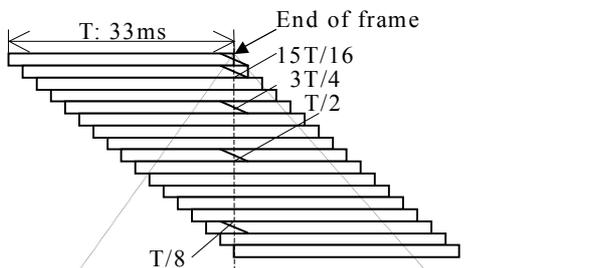
$N+1$ 行のフレーム処理開始へ

上記処理順序は、フレーム時間 $T: 33\text{ms}$ に対する個々の露光時間および飽和予測タイミングの誤差が、できるだけ小さくなるように定めたものである。内部クロックを 100MHz にすると、(7)の処理は 8bit 精度 256 レベル表現で $10\text{ns} \times 256 = 2.56 \mu\text{s}$ の時間を必要とする。(6)(8)(9)の飽和予測フラグのカウンタは 256 列分必要なので、同様に $10\text{ns} \times 256 = 2.56 \mu\text{s}$ 必要となる。しかし、ラインバッファの切替えによるパイプライン動作と $N+1$ 行目のフレーム処理開始時までの時間的余裕により、遅れ時間無しで動作させることができる。

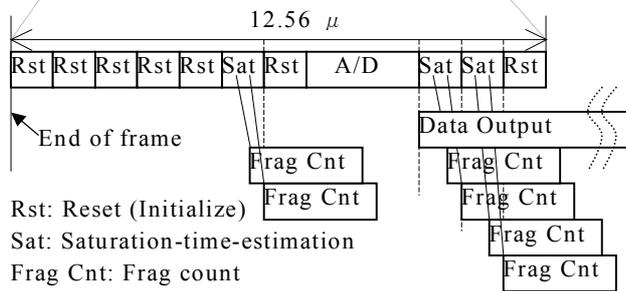
最終的に(1)~(10)までの処理に必要な時間は、差動アンプの動作速度も考慮して、各リセットに $1 \mu\text{s}$ 、各飽和予測に $1 \mu\text{s}$ とすると

$$1 \mu\text{s} \times 7 + 1 \mu\text{s} \times 3 + 2.56 \mu\text{s} = 12.56 \mu\text{s}$$

となる（ただし、飽和予測のカウンタが $+1.56 \mu\text{s}$ 引き続き行われている）。



(a) 逐次処理によるタイミングの一



(b) フレーム終了時の処理タイミン

図9 システムのタイミングチャート

5. むすび

CMOS イメージセンサのリセット方式に着目し、リセットの時点でしきい値バラツキをキャンセルする画素回路を設計し、回路シミュレーションで動作を確認

した。

本回路構成により CDS 回路を省略して、かつ、非破壊の中間撮像を可能にした。また、中間撮像を画素回路の飽和予測に用いて適切な露光時間を設定、広ダイナミックレンジ化するシステムを設計した。1回の飽和予測で 12dB のダイナミックレンジ拡張が可能なことを示した。

さらに、画像の特性に合わせて、出力 bit 数を圧縮するアルゴリズムを開発しその有効性を確認した。

今後、提案した回路構成・システムを用いた CMOS イメージセンサのチップ試作・評価を行う予定である。

文 献

- [1] D. Handoko, 川人祥二, 田所嘉昭, 松澤昭, “高速非破壊中間画像 CMOS イメージセンサの設計と試作,” 映像メディア学会誌, Vol.55, No.2, pp.264-270, Feb.2001.
- [2] 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
- [3] ミノルタカメラ(株), “固体撮像装置,”特開平 5-129579
- [4] 宇井博貴, 有馬裕, 村尾文秀, 小守伸史, 久間和生, “感度自動調節機能を有する人工網膜 LSI,” 電気学会論文誌 E, vol.120-E, No.5, pp.197-203, May.2000.
- [5] 高崎, 大谷, 山田, 西尾, 古川, 米津, “広ダイナミックレンジを有するエッジ検出機構の電子回路化—視細胞・水平細胞での明暗順応機能に学ぶ—,”第 11 回日本神経回路学会大会,2001.
- [6] 安田隆哉, 浜本隆之, 相澤清晴, “広ダイナミックレンジ撮像のための適応蓄積時間イメージセンサの設計・試作,”映情学技法, vol.26, No.41, pp.5-8, June.2002.
- [7] 今村俊文, 山本美子, 岩田穆, 津任章, 森江隆, “適応型 CMOS イメージセンサ,”信学技法, ICD2002-84, Sept.2002.