CCDの低雑音駆動方法

Low Noise Driving Method for CCD Imaging Devices

正会員 小沢直樹[†]Naoki Ozawa[†]

Abstract A low noise driving method for CCD imaging devices is developed. In the method, a reset pulse is controlled according to the signal level of the CCD. By an evaluation employing a CCD of VGA size, it has become apparent that signal charge acquired from more than 100 pixels can be read continuously without reset pulses at a scene of 1/64 luminance and that low frequency noise which is conspicuous in a reproduced picture can be reduced remarkably.

キーワード：CCD, CDS, リセットパルス, 低雑音

1. ま え が き

多画素のCCDを用いたデジタルカメラでは、 S/N の改善が望まれる暗い被写体条件、あるいはフレーム読出し期間の短縮が必要なモニタ表示の場合には、数画素の信号電荷を混合して、一度で読出す画素混合読出しが効果的である。例えば、4画素の信号を混合して読出せば、出力アンプの雑音に対する信号の大きさが4倍になるので、 S/N は12dB向上する。

しかし単板カラーカメラの場合は、画素混合読出しを行いながらカラーの信号を得るには、同じ色の画素信号が混合されるよう、特殊な構造のCCDを用いる必要がある¹⁾。また、画素混合によって画像のサンプリング数が減少するので、再生画像の限界解像度が低下する。さらに、画素混合読出しでは、CCDの出力信号を飽和させずに取り扱える画素信号が通常の数分の一となるので、対応できる被写体が暗いものに限定される。

一方、CCDのリセットパルスを分周して、水平方向のみで画素混合読出しを行う方法が提案されている²⁾。このとき、出力信号には水平転送動作によって段階的に画素信号が加算されるので、画素信号が加算されるごとに出力信号を取出し、それらの差信号から各画素信号を再生することが可能である³⁾。こうした方法によれば、特殊な構造を持たない通常のCCDを用いて、画素混合読出しを行いながらカラー信号を得ることができる。これに加えて、こうした

動作では、一般的な画素混合読出しでは得られない、低周波の雑音を低減する効果が得られる³⁾。

本論文では、CCDの出力信号レベルを所定の設定値と比較し、その結果に応じてリセットパルスの印加を制御する駆動方法を提案する⁴⁾。この方法によれば、暗い被写体では、水平方向の画素混合読出しによって低周波の雑音を低減しながら、明るい被写体での出力信号の飽和による画素信号のエラーを防ぐことが可能である。

2. リセットパルスの制御による低雑音駆動方法

2.1 低雑音駆動方法の動作

リセットパルスの印加を制御する低雑音駆動方法（以後提案方法）を実現する構成図を図1に示す。また、動作のタイミングチャートを図2に示す。

図1に示す提案方法の構成では、CCDの出力信号をコンパレータで所定の設定値と比較し、その結果に基づいてCCDへのリセットパルスの印加を制御する。設定値は、例えば、画素信号が飽和したときに得られる出力信号の1/2に対応する大きさとすればよい。

ここで、画像における周囲の画素信号間のある程度の相関を期待すれば、現在の出力信号が設定値よりも小さければ、次の画素信号も設定値以下である可能性が高い。そこでリセットパルスの印加を休止して、現在の信号に次の画素信号を加算して読出す。このとき画素信号は、画素信号が加算された後の信号と1クロック周期前の信号との差から再生する。一方、CCDの出力信号が設定値より大きいときには、次の画素信号の加算で出力信号が飽和する可能性が高いので、リセットパルスを印加する。このとき、画素信号は通常のCDS処理によって再生する。

すなわち、水平CCDの最終電極パルスが図2 (a) に示すも

2009年7月24日、情報センシング研究会で発表

2009年7月31日受付、2009年9月16日再受付、2009年11月6日採録

[†] 有限会社ビーテック

(〒190-0023 立川市柴崎町3-14-7, TEL 042-528-3677)

[†] B Tech, Ltd.

(MARONHAIMU205, 3-14-7 Shibasakicho, Tachikawa, Tokyo, 1900-0023, Japan)

図1 提案する低雑音駆動方法の構成
Block diagram of the proposed low noise driving method.

図2 提案する低雑音駆動方法のタイミング図
Timing chart of the proposed low noise driving method.

のであり、図2 (c) に示すようにt0からt1の期間にCCDにリセットパルスが加えられたものとする。このとき図2 (d) に示すCCDの出力信号では、t1にリセットノイズが確定する。これに、最終電極パルスがローになるt2に画素信号aが加算される。このとき得られるCCDの出力信号が設定値よりも小さければ、図2 (b) に示すリセットパルスのt3からt4のオン期間はゲートで阻止されてCCDには加えられない。さらに、最終電極パルスがローになるt5, t8で画素信号b, cが加えられ、画素信号cが加算されるt8でCCDの出力信号が設定値より大きくなるなら、次のリセットパルスのオン期間であるt9からt10のパルスがCCDに加えられてリセット動作が実行される。

このとき、リセット動作が実行された直後に得られる画素信号aの生成は、画素信号が加算された直後にあたる部分を (f) に示すPsでサンプリングした信号から、リセット

ノイズが確定した直後にあたる部分を (g) に示すPnでサンプリングした信号を減算する、通常のCDS処理によって行う。これに対して、リセットが行われずに加算された画素信号の生成は、Psでサンプリングした信号と、それをPsの1周期期間遅延させた信号との減算で行う。すなわち、t14でサンプリングした信号とt12でサンプリングした信号との減算で画素信号bを生成し、t16でサンプリングした信号とt14でサンプリングした信号との減算で画素信号cを生成する。どちらの減算で得た信号を選択するかは、コンパレータの出力信号を1周期期間遅延させた信号によればよい。

2.2 雑音の解析

ここでは、再生した画素信号に混入する、CCDの出力アンプで発生するアンプ雑音について解析する。

(1) 通常のCDS処理時の画素信号の雑音

CCDの出力アンプで発生するアンプ雑音を $f_n(t)$ としたとき、Ps, Pnでサンプリングされた信号に混入するアンプ雑音 $f_{n_s}(t)$, $f_{n_n}(t)$ は、それぞれ次の式(1), 式(2)となる。この結果、通常のCDS処理で再生された画素信号に混入するアンプ雑音をあらわす関数 $f_{n_cds1}(t)$ は式(3)となる。ただし、 T_0 は水平CCDの駆動パルスの周期、 $d\tau$ はPsとPnの時間差である。

$$f_{n_s}(t) = f_n(t) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - n \cdot T_0) \quad (1)$$

$$f_{n_n}(t) = f_n(t) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - n \cdot T_0 + d\tau) \quad (2)$$

$$f_{n_cds1}(t) = \{f_n(t) - f_n(t - d\tau)\} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - n \cdot T_0) \quad (3)$$

式(3)の右辺の前半は時間差 $d\tau$ で取出した2信号間の差信号を求める式であり、 $d\tau$ をCDS処理における一般的な近似値 $T_0/2$ とおくと、その周波数応答は図3 (a) に示す特

図3 通常のCDS処理によるアンプ雑音

Magnitude spectrum of amplifier noise reproduced by CDS.

(a) Frequency response of the difference signal ($T_0/2$), (b) Base-band component and harmonics component of $f_{n_cds1}(t)$, (c) Magnitude spectrum of $f_{n_cds1}(t)$.

性となる．ここでアンプ雑音を $1/f$ 雑音として周波数 $1/T_0$ での大きさを1とすると，アンプ雑音の周波数成分は図3(a)に点線で示すものとなるが⁵⁾，図3(a)の特性を乗算した結果は図3(a)の特性とおおむね一致する．したがって，CDS処理後の信号に混入するアンプ雑音のベースバンド成分と高調波成分は図3(b)となる．各成分は，ベースバンド成分と2次の高調波成分が振幅2のsinの波形で，1次の高調波成分と3次の高調波成分が振幅2のcosの波形であるが，

$$\sin^2 x + \cos^2 x = 1$$

となることから，相関のない雑音を加算する際のパワー加算によると，高調波成分を含めたアンプ雑音の周波数成分は，図3(c)に示すように大きさが $2\sqrt{2}$ で有効帯域内において平坦なものとなる．

(2) リセットパルス休止時の画素信号の雑音

一方，リセットパルスを休止し，1クロック周期前の信号との差信号から得た画素信号に混入するアンプ雑音は次のとおりである．

リセットパルスを休止したときの画素信号の再生において，画素信号の加算された部分をサンプリングした信号に混入するアンプ雑音をあらわす関数 $f_{n_s}(t)$ は式(1)のとお

図4 リセットパルス休止時のアンプ雑音

Magnitude spectrum of amplifier noise reproduced without reset pulse.

(a) Frequency response of the difference signal (T_0), (b) Base-band component and harmonics component of $f_{n_cds2}(t)$, (c) Magnitude spectrum of $f_{n_cds2}(t)$.

りであり，1クロック周期前にサンプリングした信号に混入するアンプ雑音をあらわす関数 $f_{n_sd}(t)$ は次の式(4)となる．この結果，1クロック周期前の信号との差信号から得た画素信号に混入するアンプ雑音をあらわす関数 $f_{n_cds2}(t)$ は式(5)となる．

$$f_{n_sd}(t) = f_n(t - T_0) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - n \cdot T_0) \quad (4)$$

$$f_{n_cds2}(t) = \{f_n(t) - f_n(t - T_0)\} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - n \cdot T_0) \quad (5)$$

式(5)の右辺の前半は，時間差 T_0 で取出した2信号間の差信号を求める式であり，その周波数応答は図4(a)に示す特性となる．この結果，再生した画素信号に混入するアンプ雑音のベースバンド成分と高調波成分は図4(b)となり，ベースバンド成分と高調波成分が同じ周波数応答であるから，高調波成分を含めたアンプ雑音の周波数成分は図4(c)に示すように，周波数0の直流付近で0となるsinの特性となる．

(3) 雑音の比較

図3(c)と図4(c)の比較から，リセットパルスを休止して1クロック周期前の信号との差で得た画素信号の割合が大きくなるほど，雑音の低周波成分を小さくできる．この

とき、図3(a)と図4(a)は横軸を縮小した関係であるから、ナイキスト周波数までの周波数成分を積算した雑音の大きさは図3(c)と図4(c)で等しく、雑音のナイキスト周波数付近の成分は、リセットパルスを休止したときのほうが通常のCDS処理の場合よりも増加する。しかし、再生画上では低周波の雑音ほど目に付きやすいので、雑音の低周波成分が小さいほど再生画の低雑音化には有利である。また、一般的に画像信号には、ナイキスト周波数周辺を減衰させるローパスフィルタを適用するので、ナイキスト周波数付近の雑音が大きい図4(c)は、ローパスフィルタによる減衰の割合が大きくなる。

3. CCDを用いた実測結果

提案する低雑音駆動方法でVGA(水平640画素、垂直480画素、1/3インチ)のCCDを駆動し、以下に述べる結果を得た。

3.1 リセットパルス間に読出す画素数

提案方法でCCDを駆動したとき、リセットパルスが休止している間にどれだけの画素信号が読出されているかを計測した結果を図5に示す。計測時の被写体は図7に再生画を示すもので、明るい部分と暗い部分が適当に混在するように留意した。

図5は、横軸にリセットパルスが休止している間に読出される画素数をあらわし、縦軸に計測範囲におけるその回数を示した。計測は、画像中央の水平512画素、垂直256画素の範囲内で行った。計測時の被写体の信号レベルは、画面内の明るい部分が画素の飽和信号レベルの1/2であるときを標準信号レベルをとしたとき、その1/16、1/32、1/64に設定した。

また、CCDの出力信号と比較する設定値は、画素の飽和信号レベルの1/2とした。使用したCCDの出力アンプは、画素の飽和信号レベルの1.6倍でも飽和しないことを確認したので、設定値を画素の飽和信号レベルの1/2とすれば、次の画素信号が加算されて出力アンプが飽和することはない。

図5によると、標準信号レベルの1/16の被写体では連続して読出す画素数が10~20である頻度が高いのに対し、1/64の被写体では100~200の頻度が高いことがわかる。なお、レンズを閉じたときは、計測範囲内でリセットされることなく、すべての画素信号が読出されている。この結果から、提案した方法によれば、暗い被写体では100画素以上の信号電荷をリセットパルスなしで読出す動作が実現されており、周波数0付近の低周波雑音が大幅に低減されている可能性のあることがわかる。

3.2 雑音の周波数成分

つぎに、前節での計測に用いた各信号レベルの被写体における雑音の周波数成分を実測した。無信号時の雑音の周波数成分を実測した例は多く見られるが⁵⁾、被写体を撮像した状態で雑音の周波数成分を実測した例はない。ここでは次のような方法で雑音の実測を行った。

図5 リセットパルス制御時の画素の読出し
Readout operation of pixel signal by proposed method.

図6 実測による雑音の周波数成分
Magnitude spectrum of amplifier noise acquired by an evaluation employing a CCD.

まず、各信号レベルの被写体あたり256フレームの静止画像データを取得する。これらの画像データを各画素ごとに平均して雑音のない画像データを求め、これを各画像データから減算して雑音のみのデータを生成する。雑音のみのデータから水平ラインの中央付近512画素における雑音を取出して、離散cos、離散sin変換で周波数係数を求める。これを各フレームあたり、256水平ライン分求めて2乗平均し、さらに256フレームにわたって2乗平均して雑音の周波数成分を算出した。

結果を図6に示す。図の横軸はリニアな周波数で、ナイキスト周波数までを表示した。縦軸は雑音の相対比較のみ行うものとして相対値表示とした。レンズを閉じたときの周波数成分は図3、図4の解析結果とよく一致しており、リセットパルスを制御することで周波数0付近の雑音が0近くまで減少している。また、ナイキスト周波数付近の雑音は通常のCDS処理のものより提案方法によるもののほうが大きいことも解析結果と一致している。被写体の信号レベルが大きいほど、提案方法による周波数0付近の雑音の低減は小さくなり、標準の1/16の被写体では、雑音の低減量が通常のCDSの場合の3dB程度である。図6に示す結果から、提案方法によれば、被写体の信号レベルが小さいときには低周波の雑音の大幅な低減が達成されていることがわかる。

なお、信号レベルを大きくするほど雑音が大きくなる傾向が現れているが、通常のCDSでも同様の傾向が見られる

(a) CCDの出力信号

(b) 提案方法

(c) 通常のCDS処理

図7 再生画像

Represented pictures.

(a) Output signal of CCD, (d) Proposed method, (c) Conventional CDS

ことから、信号のショット雑音ではないかと推測している。

3.3 再生画像

前節までの実測に使用した画像データの再生画像を図7に示す。なお、被写体は標準信号レベルの1/64のものである。

図7(a)は提案方法で駆動して、画素信号を再生せずにCCDの出力信号をそのまま表示したものである。画面の水平ライン上を左から右に向かう方向で、明るい部分が暗く変化しているところでリセットパルスが加わっている。画像は水平512画素のものだが、リセットパルスの間隔が100画素を越える部分が多く見られる。

図7(b)は提案方法による再生画像、図7(c)は比較のための通常のCDS処理による再生画像である。両者の比較から、提案方法による再生画像では、被写体の暗い部分での雑音が低減されていることがわかる。提案方法の動作から、被写体が全体の平均として明るい場合でも、暗い部分があればそこでは低周波の雑音を低減するように動作するので、結果的にダイナミックレンジを拡大する方向に作用する。

なお、ここでは再生画像を示さないが、明るい被写体でも出力信号の飽和による画素信号の再生にエラーは起こらないことを確認している。実測に用いたCCDでは、出力部の飽和信号レベルが画素の飽和信号レベルの1.6倍であることから、出力信号と比較する設定値を画素の飽和信号レベルの1/2としているが、同様に出力部の飽和信号レベルが画素の飽和信号レベルを超える分を設定値とすれば、次の画素信号が加算されて出力アンプが飽和することはなく、リセットを休止することによる弊害は起こらない。

4. む す び

CCDの出力信号を所定の設定値と比較し、その結果に応じてリセットパルスの印加を制御する低雑音駆動方法を提案した。VGAのCCDを用いた動作実験では、信号レベルの小さい被写体では、リセットせずに連続100画素以上を读出す動作を実現できた。この結果、直流付近の低周波雑音が大幅に低減され、再生画面上では大幅な雑音低減効果が得られることを確認した。

以上のことから、提案方法はコンパレータとリセットパルスの制御ゲートを追加する程度の簡単な回路変更で、再生画像の大幅な高画像化が達成できる有効な方法であることがわかった。

〔文 献〕

- 1) 三沢, 久保, 乾谷, 池田, 藤沢, 山田: “30fpsVGA相当動画読出し対応330万画素CCDイメージセンサとその応用”, 映情学技報, 26, 26, pp.65-70 (2002)
- 2) 松長: “電荷転送装置の駆動方法”, 特公昭62-2658
- 3) 小沢: “リセットパルスの分周による画素混合読出しの雑音評価”, 映情学技報, 31, 21, pp.1-4 (2007)
- 4) 小沢: “CCDの低雑音駆動方法”, 映情学技報, 33, 30, pp.1-4 (2009)
- 5) 松長, 遠藤: “CCDイメージセンサの雑音抑圧方法”, 東芝レビュー, 43, 7, pp.565-568 (1988)

お ぎ わ な お き
小 沢 直 樹 1974年、慶應義塾大学工学部電気工学科卒業。同年、日立製作所に入社、中央研究所勤務。1992年、日立電子に転属。1996年、有限会社ビーテック設立。画像装置・単板カラーカメラの高画質化の研究、DSPなどのIP開発に従事。正会員。