CMD 撮像素子を用いた広ダイナミックレンジ撮像方式

Dynamic Range Expansion using a CMD Imager

正会員 島本 洋[†], 正会員 三谷 公二[†], 正会員 藤田 欣裕[†],
正会員 菅原 正幸[†], 正会員 安藤 文彦[†], 正会員 岡野 文男[†],
正会員 湯山 一郎[†]

Hiroshi Shimamoto[†], Koji Mitani[†], Yoshihiro Fujita[†], Masayuki Sugawara[†],
Fumihiko Ando[†], Fumio Okano[†] and Ichiro Yuyama[†]

Abstract Charge-modulation-device (CMD) image sensors feature non-destructive readout and high-speed operation. By using the source-reset method in the CMD reset operations, it is possible to control the reset of the pixel-accumulated charge from outside the sensor. Making use of these features, we propose a subject-adaptive-type wide-dynamic-range imaging system that increases the dynamic range of the CMD by activating the electronic shutter only for areas having strong incident light. This prevents the sensor from becoming saturated. The advantage of this system is that there is no need to modify the conventional CMD structure to increase the dynamic range—only a simple circuit need be added outside the sensor. Experiment on this system was performed using such CMDs as line and two-dimensional sensors, and the dynamic range was increased twice as much.

キーワード：広ダイナミックレンジ, CMD 撮像素子, ソースリセット法, 増幅形撮像素子, 非破壊読み出し, 被写体適応

1. ま え が き

逆光や室内から見た窓辺など光量差の大きい被写体をテレビカメラで撮像すると、撮像素子のダイナミックレンジの限界からハイライト入射部が飽和してしまうなど、撮像領域全体の被写体を充分な階調で撮像することができない。しかしながら、撮像素子の性能向上によるダイナミックレンジの大幅な拡大には限界がある。そのため、撮像システムとして広ダイナミックレンジ化を図っていく技術がこれまでにいくつか検討されている。例えば、第1の手法としては撮像素子自体の構造を変更するものがある¹⁾²⁾。この場合、素子外部または素子内部での信号処理によりダイナミックレンジ拡大が期待できるが、撮像素子構造の変更が必要となるほか、その構成も複雑なものとなる。第2の手法としては、複数の撮像素子を用いたり同一の撮像素子から多数回の読み出しを行うことにより露光量の異なる複数の映像信号を得、合成処理を行うものがある³⁾⁴⁾。この場合、従来の撮像素子をそのまま利用することが可能であるが、複数の撮像素子を用いるために多板化が困難であっ

たり、フレームレートの低下などが生じる。

本論文では、増幅形撮像素子であるCMD(Charge Modulation Device)⁵⁾を用い、さらに画素毎に素子外部から蓄積電荷をリセットするソースリセット法⁶⁾⁷⁾を用いることにより、ダイナミックレンジ拡大を可能とする新たな撮像方式について提案する。本撮像方式の目的は、より明るい入射光に対し撮像素子が飽和しないようにして信号を取り出すことによってダイナミックレンジの拡大を図ることであり、また、そのダイナミックレンジ拡大を撮像素子内部の構造を変更することなく外部に簡易な回路を付加することにより実現することである。本撮像方式について、ラインセンサおよび2次元センサを用いて実験を行い、その効果を確認すると共に、雑音特性について解析を行った。

2. ダイナミックレンジ拡大方式

撮像素子受光面の一部に強度の光入射がある場合、当該領域のフォトダイオード蓄積電荷容量が飽和してしまうことにより、撮像カメラが表現できるダイナミックレンジが制限される。この一部の強露光量領域の蓄積電荷飽和を避けるためにレンズ絞りや電子シャッタを用いると、撮像領域全体の蓄積電荷量が抑えられてしまい、通常露光量領域も蓄積電荷量が少なくなり、信号出力のS/N特性が不利になってしまう。

1995年3月30日, 1995年電子情報通信学会総大会で発表
2000年2月24日受付, 2000年8月28日再受付, 2000年10月12日採録

[†] NHK放送技術研究所

(〒157-8510 東京都世田谷区砧1-10-11, TEL 03-5494-2278)

[†] NHK Science and Technical Research Laboratories

(1-10-11, Kinuta, Setagaya-ku, Tokyo 157-8510, Japan)

本撮像方式では、撮像素子受光面のうち強露光量領域を検知し、当該画素のみ選択的に電子シャッタ動作を行うことにより蓄積電荷の飽和を防ぎ、通常露光量領域とともに強露光量領域も蓄積電荷を飽和させることなく読出すことにより、ダイナミックレンジを拡大する。

強露光量領域を検知するためには、蓄積期間中に高速で各画素の蓄積電荷を読出す。本撮像方式では撮像素子として非破壊読出しや高速動作が可能な特長を有する増幅形撮像素子を用い、これを高速駆動させることにより、蓄積期間中に複数回の非破壊読出し動作を行い、蓄積期間途中での各画素の蓄積電荷量を読出す。このとき、読出し動作は非破壊で行われるため、各画素の蓄積電荷量には影響を与えない。

強露光量領域画素の蓄積電荷を選択的にリセットするための電子シャッタ動作には、ソースリセット法を行う。本撮像方式では、撮像素子としてCMDを用いる。CMDは増幅形撮像素子としての特長を有するほか、ソースリセット法を用いることにより任意の画素に対し読出し動作中に1画素単位でその蓄積電荷をリセットすることが可能な特長を有する。ソースリセット法については3章で詳説する。

次に、本撮像方式におけるダイナミックレンジ拡大動作を、1画素に注目し、その露光時間経過に対する蓄積電荷量の変化を模式的に示した図1を用いて説明する。

強入射光量画素の場合、短時間で蓄積電荷量が増加する。そのままフィールド周期等正規の蓄積期間(図1の時間 t_2)まで蓄積を継続すると、蓄積電荷量が過剰となり飽和してしまう。そこで、撮像素子を高速で駆動し、蓄積期間途中(図1の時間 t_1)における蓄積電荷量を非破壊動作で読出す。読出した信号の出力強度を調べ、その強度が過剰であった場合、例えば正規の蓄積期間内に飽和することが

	信号出力の分類	信号出力の処理
(a)	強入射光量のため蓄積期間途中の読出し時出力がリセット閾値を超過し、蓄積電荷が期間途中でリセットされた画素の出力	リセットにより短縮した蓄積時間から算出した利得を乗じ補正して出力
(b)	蓄積期間途中の読出し時出力がリセット閾値を超過しなかった画素の出力	そのまま出力

図1 1画素の蓄積電荷の時間変化
Accumulation of reset and non-reset pixel.

予想される強度であった場合、ソースリセット法を用いて当該画素の蓄積電荷をリセットする。リセットされた画素はその後再び蓄積を開始し、正規の蓄積期間(時間 t_2)において読出される。このように、強入射光量画素も飽和せずに信号を読出すことが可能となる。蓄積期間途中でリセット動作(電子シャッタ動作)を行った画素からの読出し信号は蓄積時間が短縮し出力が減少しているので、電子シャッタ時間から算出した利得を乗じて補正し、出力する。蓄積期間中の蓄積電荷量の検知を複数回行った場合、より強い入射光量にも対応できると共に、被写体の動きが大きい場合等、露光時間経過による蓄積電荷量の変化が一定でない場合でも、比較的正確に露光量の検知および信号出力の補正を行うことが可能となる。

入射光量が過剰でない画素の場合、蓄積期間途中(時間 t_1)における読出し動作時にリセット動作は行われない。この場合、読出し動作は非破壊で行われており、画素の蓄積電荷は読出し動作の影響を受けず、そのまま蓄積が継続される。

本撮像方式のダイナミックレンジ拡大動作は、撮像素子の外部に読出し信号量の検知およびリセット動作のための簡易な電気回路を付加することにより実現できる。撮像素子からの信号出力を実時間で処理し、読出す画素毎にリセット動作を撮像素子にフィードバックすることにより、被写体に適応して行う。その結果、撮像素子の構造を変更することなくダイナミックレンジを拡大することが可能となる。

3. ソースリセット法による素子外部からの1画素リセット⁷⁾

CMDは1画素1トランジスタで構成され、ゲート直下で光電変換および蓄積を行い、ゲートに蓄積された電荷によりドレイン・ソース間の電流を変調する増幅形撮像素子である。各画素からの信号電流は、水平シフトレジスタによって順次スイッチされるトランジスタを通して信号読出し線へ出力される。各画素のゲート電極はライン毎に共通につながれており、通常のリセット動作ではゲート電位を制御することによりライン毎に一斉に行われる。図2に

図2 CMD撮像素子の構成図
Schematic diagram of CMD imager.

図 3 CMD トランジスタの電極バイアス
Voltage profile in the gate reset and the source reset.

CMD 撮像素子の構成図を示す。

このとき、CMD の動作はトランジスタの相対的な電位関係が重要であり、特にリセット動作に関しては、ゲート電位を上げる代わりにソース電位を下げ、ドレイン・ソース間の基板方向への障壁をなくすことで、蓄積された正孔を基板側へ吐き出すことができる。このリセット方法を従来のゲート電位を制御するゲートリセット法に対してソースリセット法と呼ぶ。図 3 にゲートリセット法とソースリセット法の電極バイアスの相対的な電位関係を示す。

各 CMD トランジスタのソースラインは、読出しスイッチを通して素子出力端子に接続されている。そこで、この出力端子に外部からリセット電位を加えられるような回路を付加することにより、読出ししている最中の画素のリセット動作を素子外部から制御することができる。ソースリセットはゲート電位が読出しレベルのトランジスタに対してリセット動作を行う。そのため、ソースラインが各列で共通配線となる 2 次元センサにおいても、ソースラインにリセット電位が加えられたとき、非選択垂直線の画素はゲート電位が蓄積レベルであるためリセット動作とならず、選択垂直線の読出し中の 1 画素のみがリセット動作となる。

4. ダイナミックレンジ拡大駆動実験

4.1 実験回路

図 4 にダイナミックレンジ拡大駆動実験回路図を示す。撮像素子からの読出し線には、スイッチ用トランジスタを介しリセット電位を与える定電圧源が付加されている。撮像素子からの読出し出力は電流電圧変換され、比較器で任意に設定したリセット閾値と 1 画素毎に順次比較される。読出し出力が閾値を超過する場合、比較器の出力がオンとなりリセットパルスによりスイッチが導通し、リセット電位が読出し線に加えられ、読出し中の画素の蓄積電荷がリセットされる。

図 5 に比較器の動作タイミングを示す。撮像素子内の水平シフトレジスタにパルス $\phi H1$, $\phi H2$ を与えることにより各画素からの読出し信号が順次出力される。 $\phi H2$ のタイミングで読出された信号出力は、その読出し期間中にリセット閾値と比較され、比較結果がラッチされる。比較結果がオンのときはリセットパルスにより読出し中の画素の蓄積電荷はリセットされ、比較結果がオンでないときはリ

図 4 実験回路
Schematic diagram of the dynamic range expansion circuit.

図 5 比較器の動作波形
Signal, latch, and output waveform of the comparator.

セットされない。どの画素がリセットされたかを記憶しておくため、比較器の出力はシフトレジスタ (FIFO メモリ) に保存する。蓄積期間後の読出し時には、シフトレジスタからの出力に応じ、蓄積期間途中でリセットされた画素については電子シャッタの時間に応じた利得を乗じて出力し、通常蓄積の画素は利得を等倍として出力する。

4.2 ラインセンサを用いた実験

画素サイズ $10.2 \mu\text{m} \times 10.4 \mu\text{m}$ で水平方向に 100 画素を持つ CMD ラインセンサを用い、ダイナミックレンジ拡大駆動実験を行った。蓄積期間を $500 \mu\text{s}$ とし、読出し周波数 1 MHz で駆動した。今回の実験ではダイナミックレンジを 2 倍拡大することを想定し、蓄積期間の半分の時点で読出し走査を 1 回、そして蓄積期間後にもう 1 回行っている。駆動タイミングおよび出力信号の模式図を図 6 に示す。

ラインセンサの水平方向にランプ状に輝度変化する光を入射したときの実験結果を図 7 に示す。ダイナミックレンジを拡大しない駆動では入射光が大きい部分で出力信号が飽和してしまうが (a)、本手法を用いることにより、強露光量領域の出力信号が飽和することなく出力されていることがわかる (b)。

なお、蓄積期間後の読出し時には全画素強制的にソース

図 6 ラインセンサの駆動タイミングおよび出力信号模式

図

Operation sequence of CMD line sensor.

(a) Without
Dynamic range
expansion

(b) With
Dynamic range
expansion

図 7 ラインセンサ実験結果

Result of dynamic range expansion of CMD line sensor.

図 8 FPN 抑圧回路

FPN suppression circuit.

(a) FPN抑圧前

(b) FPN抑圧後

図 9 CMD 撮像素子の FPN 抑圧効果

Effect of FPN suppression.

リセットを行い、蓄積電荷を全画素順次廃棄する。このとき、各画素毎に読出し信号とリセット直後の蓄積電荷のない信号出力の差分を取ることで、画素毎に固有の固定パターン雑音(Fixed Pattern Noise; FPN)を抑圧することができる⁷⁾。図 8 に FPN 抑圧回路を、また図 9 に FPN 抑圧の様子を示す。

4.3 雑音測定

リセットされた画素は、電子シャッタによる蓄積時間の短縮をアンプによる信号増幅により補正するため雑音が増加する。そこで、雑音特性を解析するためにラインセンサの雑音測定を行った。雑音の測定はオシロスコープで観測し、雑音電圧の p-p 値を読取った。雑音には固定パターン雑音とランダム雑音があるが、固定パターン雑音については 4.2 節に述べた FPN 抑圧回路によってオシロスコープでは測定できない程度に抑圧されており、ここではラン

ダム雑音について解析を行う。

ランダム雑音には、リセット雑音、読出し走査雑音、光ショット雑音、暗電流雑音、検出雑音等がある。リセット雑音とはフォトダイオードなどの容量をスイッチを介して充電するとき生ずる熱雑音であるが、CMD ではリセット動作は電界によるドリフト機構で行われるため発生しない⁸⁾。読出し走査雑音とは、MOS 形撮像素子において各画素から出力線へ読出すための水平および垂直選択スイッチにより発生するスイッチング雑音であるが、増幅形撮像素子の場合、画素毎に増幅器を有しており、出力信号量に対するスイッチング雑音量の相対的な影響は少なく、ここでは考えないこととする。光ショット雑音は入射光そのものに含まれている光量子雑音であり、その雑音量は入射光量に依存し光電変換により発生した蓄積電荷量の 1/2 乗に比例して増加する。暗電流雑音はフォトダイオードにおけ

る熱励起によって発生し、その雑音量は蓄積時間に依存し蓄積時間の1/2乗に比例して増加する。検出雑音は撮像素子の出力容量とフィードバック形電流電圧変換アンプ間で発生し、撮像素子の出力容量やアンプの等価雑音抵抗などに依存するが⁹⁾、入射光量や蓄積時間には依存しない。ランダム雑音の総合的な値は、これら各要因による雑音量の2乗平均となる。

撮像素子からダイナミックレンジ拡大回路を経て出力された信号について、その雑音を測定し、入射光量の撮像素面照度毎にグラフにプロットしたものを図10に示す。図10の測定値グラフ(b)は、通常駆動の場合の測定結果である。雑音量が途中から減っているのは、画素の蓄積電荷量が飽和し光ショット雑音の影響がなくなったためと思われる。なお、このとき飽和した画素からの読出し信号は各画素毎の飽和蓄積量の違いによる固定パターン雑音が生じるが、測定はオシロスコープ上でランダム雑音成分のみを観察している。図10の測定値グラフ(a)は、蓄積期間途中において強制的にリセットした後アンプで増幅した場合である。このとき各画素の蓄積時間は通常駆動に比べて半分となり、かつ出力信号はアンプにより2倍に増幅されている。

図10の測定値グラフ(a)、(b)を見ると、共に入射光量依存が見られるが、グラフの傾きが光ショット雑音の傾き(入射光量の1/2乗に比例)に比べて小さい。これは雑音に入射光量に依存しない成分が含まれているためと思われる。通常駆動の蓄積電荷が飽和する直前付近(図10の照度 E_t での出力)における、入射光量に依存する雑音(光ショット雑音)と入射光量に依存しない雑音(暗電流雑音および検出雑音)の比を図10から算出(付録1)すると、非入射光量依存性雑音が光ショット雑音のおよそ0.93倍となり、光ショット雑音とほぼ同程度含まれていることがわかる。

つぎに、非光量依存性の雑音について解析する。非入射

図10 ダイナミックレンジ拡大による雑音特性
Noise characteristics with dynamic range expansion.

光量依存性雑音のうち暗電流雑音は蓄積時間に依存するが、検出雑音は蓄積時間に依存しないため、リセットおよびアンプ増幅した場合に2つの雑音量の増え方は異なる。非光量依存性雑音の成分がすべて検出雑音であるならば、増幅により雑音量は2倍に増加するはずである。他方、雑音成分がすべて暗電流雑音であるならば、同じく増幅により2倍に増加するが、リセットにより蓄積時間が半分となるのでその $1/\sqrt{2}$ 倍となり、結局 $\sqrt{2}$ 倍に増加するはずである。図10において(a)と(b)を比較すると、リセットの有無による雑音量の差は約1.8倍となっている。これは、暗電流雑音と検出雑音が混ざりあっているためと思われる。暗電流雑音成分と検出雑音成分の比を、図10より算出(付録2)すると、検出雑音は暗電流雑音のおよそ1.3倍と求められた。

4.4 2次元センサを用いた実験

有効画素数31万画素(636×488)、画素サイズ $10.2 \mu\text{m} \times 10.4 \mu\text{m}$ のNTSC用1/2インチCMD撮像素子を用い、2倍のダイナミックレンジ拡大実験を行った。2次元撮像素子において本撮像方式によりダイナミックレンジを2倍に拡大するためには、フィールド周期の倍速で撮像素子を駆動すればよい。今回はソースリセットによる1画素リセットを確実にを行うためと回路およびモニタ系の簡素化のため倍速では駆動せず、通常レートで駆動した。そのためインタレース走査において同一フィールドの画素を2回繰り返して読出している。第1フィールドでは読出しおよび選択的画素リセットを行い、第2フィールドでは読出し

図11 2次元センサの駆動タイミングチャート
Operation sequence of CMD image sensor.

図12 2次元センサ実験結果(グレースケールチャート)
Reproduced picture (grayscale chart) and the waveform.

信号を画素毎にアンプゲインを切り替えて出力する。したがって、NTSC モニタ上への出力は第1フィールドはブランク、第2フィールドは映像を出力し、30 フィールド/s のビデオレートとして出力した。駆動タイミングチャートを図11に示す。駆動周波数は14.3 MHz(2 線読出しのため水平走査回路は7.16 MHz)で、1 画素期間中のリセット期間は35 ns とした。

グレースケールチャートを撮像した結果と、その1ライン分のオシロスコープ波形を図12に示す。強露光量領域の出力信号が飽和せずに出力されていることがわかる。

5. 本撮像方式の応用と課題

5.1 高速電子シャッタへの応用

本撮像方式により大幅にダイナミックレンジを拡大するためには、より短い電子シャッタ期間を得ればよい。しかしながら、撮像素子駆動の大幅な高速化は困難である。これを解決するため、撮像素子の垂直走査回路を2重化し、

図13 高速電子シャッタに対応したCMD撮像素子の例
CMD imager with dual vertical shift registers.

図14 高速電子シャッタに対応したCMD撮像素子の駆動タイミングチャート例

Operation sequence of CMD imager with dual vertical shift registers.

水平走査回路のみ倍速で駆動し、2つの垂直走査線を切り替えて読出すことにより、1フィールド期間内に蓄積期間の異なる画素信号を2種類読出せる撮像素子⁹⁾を用いることが可能である。撮像素子の構成を図13に示す。

この撮像素子において、例えば一方の垂直走査線は電子シャッタのための選択的画素リセットに用い、他方は蓄積期間後の読出しとフィールド蓄積電荷のリセットに用いることにより、通常のフィールドレートで走査しても2つの走査線の走査開始時間の差がそのまま電子シャッタ期間とすることが可能となる。駆動タイミングチャートの例を図14に示す。

5.2 動画対応の課題

本手法では電荷蓄積期間中に画素ごとにリセット動作を行うため、なんらかの電子シャッタ動作を併用した他、ダイナミックレンジ拡大方式と同様、動画を撮像したときに画面上の部分的な蓄積ぼけの量が異なり、映像が不自然となることが考えられる。また本手法では、蓄積期間中の入射光量が一定であると仮定した方式であり、電子シャッタ動作や異なるタイミングで得られる画像を合成処理する、他のダイナミックレンジ拡大方式と同様、入射光量の変化に対しダイナミックレンジ拡大の補正処理が正確に行えなくなってくる。

これらの点については、妨害について評価し、その程度が大きければ解決手法を考える必要がある。

6. むすび

CMD撮像素子を用い、増幅形撮像素子の特長である非破壊読出しと高速駆動による複数回読出しを行い、またソースリセット法を用い1画素毎に選択的に蓄積電荷のリセット動作を行うことにより、撮像素子固有の特性を超えてダイナミックレンジを拡大する新しい撮像方式を提案した。ラインセンサおよび2次元センサを用いて実験を行い、その効果を確認すると共に、ラインセンサについてその雑音特性を解析した。その結果、ダイナミックレンジ拡大のために蓄積電荷のリセット動作を決定するリセット閾値付近の入射光量において、非光量依存性雑音が光ショット雑音と同程度含まれ、その中でも検出雑音が暗電流雑音の約1.3倍と最も支配的であることがわかった。

検出雑音を少なくするためには、電流電圧変換アンプに等価雑音抵抗ができるだけ低いトランジスタを用いることが望ましい。しかしながら本手法は、より明るい入射光に対してダイナミックレンジを拡大する方式であり、ダイナミックレンジ拡大動作によりS/Nがそれ以上劣化するものではない。また、ランダム雑音の視感度特性は画面輝度が高いほど雑音検知限が低くなる¹⁰⁾ため、実際上の影響は少なくなると思われる。

今後の課題としては、ひとつには蓄積期間中に入射光量に変化する、動画への対応がある。またもうひとつの課題は、蓄積時間の異なる信号を合成するため、そのつなぎ目

で S/N が不連続となってしまうことである。これは電子シャッタを利用する他の多くのダイナミックレンジ拡大方式にも共通の課題であり、今後、人間の視覚特性なども含めて検討していく必要がある。

最後に、本研究を進めるにあたり CMD 撮像素子をご提供いただきましたオリンパス光学工業株式会社 野本哲夫様、中村力様、宮原秀治様に深く感謝いたします。

〔文 献〕

- 1) 菰淵: “広ダイナミックレンジ撮像技術”, 第7回画像入力技術シンポジウム講演予稿集, pp. 85-92 (1995)
- 2) T. Hamamoto, et al.: “128×64 Pixels Adaptive-Integration-Time Image Sensor”, IEEE CCD Workshop, p. 72 (1999)
- 3) 山田ほか: “車載用カメラのダイナミックレンジ拡大方式”, 信学論, J 78-D-II, 10, pp. 1439-1449 (1995)
- 4) 稲垣ほか: “広ダイナミックレンジカメラ”, 画像センシングシンポジウム, pp. 151-154 (1996)
- 5) 中村ほか: “10 μ m 画素 CMD イメージャ”, テレビ大全, 4-4 (1987)
- 6) T. Nomoto, et al.: “Carrier Reset Operation in Charge Modulation Device”, Jpn J. Appl. Phys., 32, pp. 3754-3759 (1993)
- 7) 三谷ほか: “CMD 撮像素子の FPN 抑圧駆動法”, テレビ誌, 49, 2, pp. 196-203 (1995)
- 8) 中村ほか: “CMD 撮像素子一高解像度化への取り組み”, テレビ学技報, 19, 25, pp. 13-18 (1995)
- 9) 五味: “固体撮像素子”, 特開平7-38815 (1995)
- 10) 安藤ほか: “ランダム雑音の視感度特性からみた固体撮像デバイスの設計”, テレビ学技報, 9, 44, pp. 37-42 (1986)

〈付録 1〉

画素への入射光量に依存する雑音成分を N_p , 依存しない成分を N_{np} とすると, その総雑音量 N_t は

$$N_t = \sqrt{N_p^2 + N_{np}^2}$$

となる。ここで N_{np} は図 10 におけるダーク時の雑音量 N_{dark} とみなせるため, 上式より N_p は

$$N_p = \sqrt{N_t^2 - N_{np}^2} = \sqrt{N_t^2 - N_{dark}^2}$$

となる。 N_t と N_{dark} は測定値より得られ, その結果 N_p と N_{np} の比は

$$\frac{N_{np}}{N_p} \cong 0.93$$

と求められる。

〈付録 2〉

暗電流雑音 N_d , 検出雑音 N_a を

$$N_d = \alpha T^{1/2}$$

$$N_a = \beta$$

(ただし, T : 蓄積時間, α, β : 定数)

とすると, リセットによる蓄積時間半減およびアンプによる 2 倍増幅により, それぞれの雑音量は

$$N_d' = 2\alpha \left(\frac{T}{2}\right)^{1/2} = \sqrt{2} \alpha T^{1/2} = \sqrt{2} N_d$$

$$N_a' = 2\beta = 2N_a$$

となる。総合的な雑音量 N_{t2} (通常駆動), N_{t2}' (リセットおよび増幅あり) の比は

$$\frac{N_{t2}'}{N_{t2}} = \frac{\sqrt{N_d'^2 + N_a'^2}}{\sqrt{N_d^2 + N_a^2}} = \sqrt{\frac{2N_d^2 + 4N_a^2}{N_d^2 + N_a^2}}$$

これが図 10 より約 1.8 と等しいので

$$\frac{N_a'}{N_a} \cong 1.3$$

と求められる。

しまもと ひろし
島本 洋 1991 年, 東京工業大学大学院総合理工学研究科修士課程修了。同年, NHK に入局。金沢放送局を経て, 1993 年より, 同放送技術研究所に勤務。固体撮像カメラの研究に従事。正会員。

みつた こうじ
三谷 公二 1987 年, 京都大学大学院修士課程修了。同年, NHK に入局。現在, 同放送技術研究所に勤務。画像処理, カメラシステムの研究に従事。工学博士。正会員。

ふじた よしひろ
藤田 欣裕 1976 年, 東京大学工学部電気工学科卒業。同年, NHK に入局。同放送技術研究所にて固体撮像技術, ハイビジョンカメラ, 超高精細カメラなどの研究に従事。1998 年より, 同技術局開発センター(番組技術)。現在, 同放送技術研究所(研究企画)担当部長。工学博士。正会員。

すがわら まさひろ
菅原 正幸 1983 年, 東北大学大学院工学研究科修士課程修了。同年, NHK に入局。神戸放送局を経て, 1987 年から同放送技術研究所にて, 固体撮像素子と固体撮像素子を使用したハイビジョンカメラなどの研究に従事。現在は, 超高精細撮像技術の研究にあたる。正会員。

あんどう ふみお
安藤 文彦 1969 年, 慶応義塾大学工学部電気工学科卒業。同年, NHK に入局。青森放送局を経て, 1972 年, 放送技術研究所に勤務。超高感度撮像管, 半導体の研究を行い, 超高感度カメラ(MCP-CCD), 増幅形固体撮像素子 AMI, 6 倍速高速度カメラ等を開発。現在, 超高感度固体撮像素子の研究開発に従事。工学博士。正会員。

おかの ふみお
岡野 文男 1978 年, 東北大学大学院修士課程修了。同年, NHK に入局。1981 年より, 同放送技術研究所に勤務。ハイビジョンカメラ, テレビジョンシステム, 立体テレビジョンの研究に従事。工学博士。正会員。

ゆ やま いちろう
湯山 一郎 1970 年, 東京大学電気工学科卒業。同年, NHK に入局。1975 年より, 同放送技術研究所にて, ハイビジョンのシステム設計, 信号処理, 画像符号化, EDTV, 立体テレビの開発研究に従事。現在, NHK-ES 情報家電研究室長として, 放送における情報家電の研究を推進。工学博士。正会員。