変調光検波方式イメージセンサにおける変調光撮像画質の改善

Improvements in Image Quality Captured by an Image Sensor that Detects a Modulation Light Signal

山本 幸司[†], 大屋 雄[†], 正会員 香川 景一郎[†],
正会員 太田 淳[†], 布下 正宏[†], 渡辺 國寛^{††}
Koji Yamamoto[†], Yu Ohya[†], Keiichiro Kagawa^{††},
Jun Ohta^{††}, Masahiro Nunoshita[†] and Kunihiro Watanabe[†]

Abstract The improvements in the image output characteristics of an image sensor with a function for detecting a modulated light signal is described. Three effects that degrade the characteristics were identified by examining the output characteristics in detail: "parasitic N-diff effect", "diffusion carrier effect" and "residual charge effect". Two kinds of improvements in modifying operation timing and employing in transverse overflow drain structure in a pixel were introduced in a new version of a CMOS image sensor based on the examination. An image sensor with 64×64 pixels based on the improvements was fabricated using 0.6 μm CMOS technology. The gray scale characteristics of the sensor improved during a demonstration.

キーワード: CMOSイメージセンサ, ビジョンチップ, 変調光, 画像処理, 拡散キャリア

1. ま え が き

画像センシングの分野では、対象物体をいかに認識できるかが重要である。一般の画像認識では、イメージセンサを用いて撮像し、ソフトウェアによる画像処理によって、対象物体の識別を行っている。しかし、通常のイメージセンサでは、照明条件によっては対象物体の認識が困難な状況が発生する場合がある。強度変調した照明光源を用いて対象物体を照明し、その変調光成分のみを検出することができれば、照明条件によらずに、変調光を照射した対象物体を撮像できる。そこで我々は、変調光成分のみを撮像できるイメージセンサ(変調光検波方式イメージセンサ)を提案し、基本特性の実証を行ってきた¹⁾²⁾。この変調光検波方式イメージセンサでは、①強度変調をかけた変調光源を照明光源として用いることで、背景光の影響を除去して変調光を照射した対象物体のみを撮像することができる。これにより、照明条件に影響されずに対象物体の認識ができるため、ITS (Intelligent Transport Systems) やFA (Factory

Automation) 等さまざまな画像認識の分野での応用が考えられる。また、②変調光源自体をマーカーとして用いれば、マーカーのみの抽出が容易に行える。そこで、モーションキャプチャ等のマーカー位置検出への応用も提案している³⁾。

これまでに、変調光成分のみを検出するイメージセンサとしては、時間相関法⁴⁾やマルチタップCCD⁵⁾、他にもTime of flight法による距離測定を目的として幾つかの方式が提案されている^{6)~8)}。これに対し我々の提案するセンサは、変調光成分のみの検出により、背景光の影響を除去して変調光成分のみの撮像を目的としている。これまでに、この方式に基づき試作した変調光検波方式イメージセンサによって、変調光成分のみの撮像を実証している²⁾。

本論文では、まず、提案する振り分け転送方式に基づく変調光検波方式イメージセンサの画像特性を詳細に評価した結果について述べる。次に、この評価結果に基づき画素TEG (Test Element Group) を試作し、画像特性における問題点、画素構造と駆動方式を改良した変調光検波方式イメージセンサの試作・評価について述べる。

2. 変調光検波方式イメージセンサの基本特性

2.1 画素回路の構成および動作原理

我々が提案している振り分け転送方式による変調光撮像イメージセンサの画素回路構成・動作原理について述べる。図1(a)~図1(c)は、画素回路図とポテンシャルを用いた動作原理図である。図1(a)に示すように、画素回路は通常のPG (Photo Gate) 方式イメージセンサを二つ、PGを

2003年2月4日受付, 2003年5月30日再受付, 2003年7月11日採録

[†] 奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学研究科

(〒630-0101 奈良県生駒市高山町8916-5, TEL 0743-72-6054)

^{††} マイクロシグナル株式会社

(〒619-0237 京都府相楽郡精華町光台1-7けいはんなプラザラボ棟7F,
TEL 0774-95-5201)

[†] Nara Institute of Science and Technology

(8916-5, Takayama, Ikoma, Nara, 630-0192, Japan)

^{††} Microsignal Co. Ltd.

(1-7 Hikaridai, Seika-Cho, Souraku-Gun, Kyoto, 619-0237, Japan)

図2 チップ写真と撮像実験系

Microphotograph of fabricated chip and set-up of image capturing.

図1 画素回路図と動作原理

Pixel circuit and operation principle.

(a) Charge accumulation, (b) Charge transfer into FD1, (c) Charge transfer into FD2

共通にして組合せた単純な構造となっている。つまり、受光部であるPG一つに対し、信号電荷蓄積部であるFD (Floating Diffusion) を二つ有する。PG直下に蓄積された光電荷は、転送ゲートであるTX (Transfer Gate) 1またはTX2を駆動させることにより、FD1またはFD2へと振り分けて転送され別々に蓄積される。

変調光成分のみを検出するには、変調光源のパルス変調のON/OFFの周期に同期して画素回路を駆動することで行う。まず、変調光強度がON時には、PG直下には(背景光+変調光)成分の光電荷が蓄積される(図1(a))、この電荷はTX1をON、PGをOFFにして階段状のポテンシャルを形成することでFD1側へと転送し蓄積する(図1(b))。次に、変調光強度がOFF時には、PGには背景光成分のみの光電荷が蓄積される(図1(a))。今度はTX2をONにしてFD2側へと転送・蓄積する(図1(c))。この一連の動作を変調光の強度変調のON/OFFに同期して数回繰り返すことにより、

FD1側には(背景光+変調光)成分の信号電荷が蓄積され、FD2側には背景光成分のみの信号電荷が別々に加算蓄積される。それぞれのFDからの出力OUT1, OUT2の差分を外部回路でとることにより、変調光成分のみに対応した差分出力を得ることができる。

2.2 変調光検波方式イメージセンサによる撮像結果

図2に、試作した 64×64 画素の変調光検波方式イメージセンサのチップ写真と撮像実験系を示す。イメージセンサの試作には、 $0.6 \mu\text{m}$ CMOS2-poly 3-metalプロセスを用いた。画素サイズは $42 \mu\text{m} \times 42 \mu\text{m}$ 、開口率は13.6%、チップサイズは $4.2\text{mm} \times 4.8\text{mm}$ である。(背景光+変調光)成分出力と背景光成分出力に対応する2本のセンサ出力は、各々電流-電圧変換アンプで電圧信号に変換後、AD変換を行いPCに取り込んだ。PC上でソフトウェアによるリセットばらつき除去によって、固定パターン雑音の抑制を行っている。

図3(a)、図3(b)に変調光撮像結果を示す。撮像条件として、転送回数は4回、蓄積時間は 1.28ms である。図3(a)は、背景光(1500Lux)下で、顔の左目付近のみを変調光源(変調周波数: 2.5kHz , 3500Lux)によって照明して撮像した場合である。(背景光+変調光)成分による通常画像では、背景光により顔全体が見えているが、差分出力から得られた変調光成分のみ画像では、背景光成分を除去し、変調光を照射した部分のみが撮像できているのが確認できる。また、図3(b)はLEDアレイ(LED一つのパワー: $140 \mu\text{W}$)の一部を 2.5kHz で変調させて撮像した場合である。この場合、変調光撮像画像に示すように、変調されたLEDのみを撮像することができているのがわかる。

2.3 マーカ検出への応用

図3(b)に示したように、変調光源自体を撮像した場合、背景成分を除去して変調光源のみを容易に抽出することができる。そこで、この特性を生かしたマーカ検出技術への応用が考えられる。マーカ検出技術は、対象物体にマーカを取り付け、マーカの位置座標を検出し対象物体の位置を求めるもので、光学方式のモーションキャプチャ等に用いられている。一般的には特定波長の光源を用い、特定波長のみを撮像することでマーカ位置の検出を行う。しかし、

(背景光+変調光) 成分   変調光成分
(a) 対象物体を変調光源で照射

(背景光+変調光) 成分   変調光成分
(b) LEDアレイの一部を変調

図3 変調光撮像画像

Captured images only by the modulated light.

(a) Object illuminated by modulated light, (b) Modulated LEDs

この手法では、屋外や強いスポットライト光等がある環境下ではマーカの検出が困難になると考えられる。一方、変調光源マーカと変調光検波方式イメージセンサを用いる手法では、照明条件に依存することなくマーカ検出を行うことができる。

図4(a)、図4(b)は、2.5kHzで変調したLED (70 μ W) をマーカとして犬の置物に取り付け、背景光 (1,000Lux) 下で撮像した動画のキャプチャ画像である。図4(a)は(背景光+変調光)成分による画像、図4(b)は変調光成分撮像画像である。転送回数は4回、蓄積時間は1.23msである。図4(b)に示すように、背景光の影響を除去してマーカのみを抽出できているのがわかる。

3. 画素TEGによる出力特性の検討

前節での撮像結果より、提案している振り分け転送方式の有効性を示すことができた。しかし、出力特性を詳細に検討すると、低照度側での出力特性の劣化や飽和特性の劣化が観測された。これらの出力特性劣化の原因を明らかにするため、画素TEGを試作し詳細な特性評価を行った。

3.1 出力波形

まず、画素TEG単体からの出力波形について検討を行った。図5(a)、図5(b)に画素回路からの出力波形を示す。測定には波長660nmのLEDを光源として用い、これをDC駆動することで背景光源とし、パルス駆動することで変調光源とした。また、振り分け転送回数は8回である。図5(a)は背景光を照射した場合の出力波形である。この場合、背景光成分はFD1、FD2ともに同量の電荷が転送・加算蓄積されるため、二つの出力OUT1、OUT2は一致している。こ

図4 マーカ検出例

Demonstration of marker detection.

(a) Images produced by both background and modulation light,
(b) Images produced only by modulation light

(a) 背景光照射時

(b) 変調光照射時

図5 画素TEGの出力波形

Oscilloscope traces of outputs.

(a) Under background illumination, (b) Under modulation illumination

図6 変調光量依存性

Subtraction output voltage as a function of a modulated light intensity.

のため、外部回路でとった差分出力 ($OUT1 - OUT2$) はゼロとなっている。一方、2.5kHzの変調光で照射した場合の出力波形を図5 (b) に示す。変調光成分は、FD1側にのみ転送・加算蓄積されていくため、OUT1のみが変化し二つの出力には差が生じる。この差分出力が変調光成分に対応した出力となっている。

これらの結果より、変調光成分が片側のみに振り分けて加算蓄積されることを確認した。しかし、図5 (b) に示すように、変調光のみを照射した場合でも、信号電荷を転送していないFD2側の出力であるOUT2も変化している。これは、PGに蓄積されなかった電荷がFD2側へも拡散しているためだと考えられる。この「拡散キャリア」については後で詳しく述べる。

3.2 光量依存性

図6のグラフは背景光量をパラメータとし、変調光量に対する差分出力電圧の変化をプロットしたものである。測定条件として、変調光源の波長は660nm、変調光源のパルス周波数は2.5kHz、振り分け転送回数は4回である。まず、背景光がない場合では、変調光量に対して差分出力電圧がほぼ線形的に変化していき、変調光量が増加すると出力が飽和している。また、背景光がある場合でも同様の変化をしている。背景光がある分だけ飽和するのが早まるものの、出力特性は背景光量にほぼ影響を受けていないのがわかる。これらの結果より、本方式による基本動作の確認をすることができる。しかし、背景光がない場合、変調光の低照度側では出力がゼロとなっている問題点がある。これは、後で述べる「寄生のN-DIFF」の影響により、少量の電荷は上手く転送されていないためだと考えられる。また、変調光量が飽和光量に達した後、出力電圧が減少しており正常な飽和特性が得られなかった。これは、先に述べた「拡散キャリア」と「残留電荷」による影響と考えられ、後で詳細に対策について述べる。

4. 出力特性の改善

試作した画素TEGの出力特性を詳細に検討すると、先に述べたように、①低照度側で出力がでない、②転送ゲートがOFFの側のFD電位が減少するため、変調光量が飽和

図7 ポテンシャル形状

Potential profiles.

光量に達した後も、通常の飽和特性を示さずに出力が減少していくという二つの問題点があった。これらの問題のため、変調光撮像では、正常な階調を持った画像を得ることができていなかった。これらの原因としては、①は、「寄生のN-DIFF」による影響、②は、「拡散キャリア」と「残留電荷」の影響によるものと考えられる。以下にこれらの三つの影響について検討し改善を行った結果を述べる。

4.1 寄生のN-DIFFの影響

今回試作に用いたような標準プロセスでは、通常のPG方式イメージセンサに用いられるような2層のポリシリコンゲート間のオーバーラップができないため、PG、TXのゲート間にソース/ドレインを形成するためのn+拡散層が寄生的に形成されてしまう。ここでは、このn+拡散層のことを「寄生N-DIFF」と呼ぶ。この寄生N-DIFFは電荷転送路中に形成されるため、電荷転送に悪影響を与えてしまうと考えられる。そこで、この寄生N-DIFFの影響を調べるため、デバイスシミュレータにより電荷転送時のポテンシャル形状の解析を行った。その結果、図7に示すように、寄生N-DIFFによってポテンシャルのポケットが形成されているのがわかる。これにより、少量の電荷はここにトラップされてしまうのでFDへ転送されず、低照度側では出力電圧がゼロになってしまうと考えられる。

この影響を低減するため、まず、寄生N-DIFF面積を最小限に抑えるレイアウト構成にした。また、寄生N-DIFFによるポテンシャルポケットの影響を低減するため、寄生N-DIFFにリセットTr (N-DIFFリセット) を取り付けけた回路を試作した(図8)。このN-DIFFリセットによって電荷を注入し、ポテンシャルポケットを埋めることができると考えられる。この結果、図9に示すように、低照度側でも出力を確認することができ、少量電荷でも転送されているのがわかる。

4.2 拡散キャリアの影響

変調光成分を転送していない側のFDは、変化しないはずにもかかわらず、電位が減少してしまう問題があった。こ

図8 N-DIFFリセットを有する画素回路図
Pixel circuit with N-DIFF reset.

図9 寄生N-DIFFリセットの効果
Parasitic N-DIFF reset.

これは、拡散キャリアの影響と考えられる。変調光を照射した場合、変調光成分の信号電荷は、PGに蓄積してFD1側のみに転送するのだが、PGに蓄積されなかった電荷が拡散キャリアになってしまう。このため、変調光成分を転送している側のFD1が飽和した後も、変調光成分による拡散キャリアによってまだ飽和していないFD2側の電位が減少していくため、差分出力が通常の飽和特性を示さず減少していく。

振り分け転送方式による変調光検波方式では、通常のイメージセンサに比べ、FDが拡散キャリアの影響を大きく受ける。通常のイメージセンサでは、FDリセット直後に信号電荷を読出すのだが、本方式では、FDリセット後に加算蓄積するため、蓄積中に拡散キャリアの影響を受けるからである。そこで、拡散キャリアの影響を抑制するため、図10に示すように、FD周囲にオーバフロードレインと同様の役割をする、拡散層を配置した画素を試作し評価を行った。図11は拡散キャリア量を調べるため、TXをOFFの状態です光を入射した場合の出力電圧の変化を測定した結果である。拡散キャリア遮断のオーバフロードレインとして、NTUB層、N-DIFF層を配置した画素と、オーバフロードレインなしの画素を測定した。この結果から、NTUB層を導入した場合、出力電圧の変化がほとんどみられず、拡散キャリアの影響を抑制できることがわかった。

4.3 残留電荷の影響

NTUB層によるオーバフロードレイン導入により、拡散キャリアの影響を抑制できたが、まだ飽和後の出力減少が確認された。これは残留電荷の影響と考えられる。変調光成分を蓄積するFD1が飽和した後も、変調光成分の電荷を転送しようとする、FD1に転送しきれなかった電荷が

図10 NTUBを有する画素レイアウト
Pixel layout with the NTUB overflow drain.

図11 拡散キャリアの影響
Diffusion carrier effect.

図12 残留電荷の影響
Residual charge effect.

PGに残留してしまい、その残留電荷が次の転送時にFD2へと転送されてしまう。このため、拡散キャリアの影響と同様に、差分出力電圧が飽和後に減少してしまう。

この残留電荷の影響を抑制するため、FD1への電荷転送後にPGに残留した電荷が、FD2側に転送される前に、PGを一度リセット (ON/OFF) して残留電荷を掃きだし動作を行った。図12はこのPGリセットによる残留電荷掃きだし動作の有無と、先に述べた拡散キャリア除去用のNTUB

図14 残留電荷除去の効果

Removing residual charges.

Images produced without sweep-out of residual charges by (a) background and modulation lights, (b) background light, and (c) modulation light, Images produced with sweep-out of residual charges by (d) background and modulation lights, (e) background light, and (f) modulation light

表1 試作した64×64イメージセンサの仕様
Characteristics of the image sensor with 64×64 pixels.

Process technology	0.6 μm CMOS 2poly-3metal
Chip size	5.58 × 5.58 mm ²
Pixel Size	42 × 42 μm^2
PG size	349.2 μm^2
Fill factor	19.8%
Conversion gain	6.02 $\mu\text{V}/\text{e}^-$
Output dynamic range	42 dB
Power supply voltage	5 V
Fixed Pattern Noise	6.0% → 0.17% (Software processing)

図13 チップ写真

Microphotograph of fabricated chip.

層の有無による、変調光量依存性(背景光一定)の測定結果である。この結果、PGリセットによる残留電荷除去と、NTUBによる拡散キャリア除去を組合せることで、飽和後の出力電圧減少を抑制できることがわかった。

4.4 出力特性を改善した変調光検波方式イメージセンサ
画素TEGにより、「寄生のN-DIFF」,「拡散キャリア」,「残留電荷」の影響の低減を確認したので、この画素回路を用いて64×64画素の変調光検波方式イメージセンサを試作し評価した。表1に試作したチップの諸元、図13にチップ写真を示す。

先に述べた残留電荷除去は、駆動タイミングを変更する

ことで対応した。まず、PGリセットによる残留電荷掃きだし動作で、画像がどのように変化するのか評価を行った。

図14(a)～図14(f)は、グレースケールチャートの一部を変調光で照射して撮像した結果である。飽和後の出力特性を確認するため、白レベルが飽和するように撮像を行った。図14(a)、図14(b)はそれぞれ、残留電荷掃きだし動作なしでの(変調光+背景光)成分、背景光成分のみの画像で、図14(c)は差分出力による変調光成分のみの画像である。同様に図14(d)、図14(e)、図14(f)は、残留電荷掃きだし

(a) (背景光+変調光)成分

(b) 変調光成分

図15 変調光撮像画像

Captured images only by the modulated light.

(a) Image produced by background and modulation lights,

(b) Image produced by modulation light

動作ありの場合でのそれぞれの出力による画像である。図14(b)からわかるように、残留電荷を除去しなければ、背景光成分側にも変調光成分が洩れており、このため、差分出力による変調光成分画像(図14(c))で正常な階調がでないのが確認できる。しかし、図14(f)に示すように、残留電荷掃きだし動作を行うことで、背景光成分側へ変調光成分の電荷が漏れるのを防ぎ、正常な階調が得られているのがわかる。また、図15にこのイメージセンサでの変調光撮像結果を示す。撮像条件としては、犬の置物に背景光(8,000lx)を照射し、招き猫のみに変調光(5,000lx)を照射している。また、変調光周波数は500Hz、振り分け転送回数は8回、蓄積時間(片側1回分)は987.5 μ sとした。図15に示すように、変調光成分画像でもグレースケールが現れており、良好な変調光撮像画像が得られ、出力特性改善の効果が確認できる。

5. む す び

背景光の影響を抑制し、変調光成分のみを撮像可能な変調光検波方式イメージセンサの出力特性において、低照度側での出力特性の劣化と飽和特性の劣化があることを見出した。画素TEGを用いてこれらの現象の解析を行い、「寄生N-DIFF」、「拡散キャリア」、「残留電荷」の三つの影響によって、正常な階調をもった変調光画像が得られていないことがわかった。それぞれの影響について検討し、改善策を施した64 $\times$ 64画素の変調光検波方式イメージセンサを試作し、変調光成分の撮像での画像特性の向上を確認した。今後はノイズ除去や高画素化等、画質の向上を行っていく。

〔文 献〕

- 1) 平井隆夫, 太田淳, 布下正宏, 杉下正蔵, 渡辺國寛: “変調光検波方式イメージセンサ”, 映像学年次大, 25-2, p.367 (2001)

- 2) J. Ohta, K. Yamamoto, T. Hirai, K. Kagawa, M. Nunoshita, M. Yamada, Y. Yamasaki, S. Sugishita and K. Watanabe: “An Image Sensor with an In-pixel Demodulation Function for Detecting the Intensity of a Modulated Light Signal”, IEEE Trans. Electron Devices, 50, 1, pp.166-172 (2003)
- 3) K. Yamamoto, K. Kagawa, J. Ohta, M. Nunoshita, Y. Yamasaki, M. Yamada, S. Sugishita and K. Watanabe: “Application of a Frequency-demodulation Image Sensor to Motion Capturing”, ODF2002 FA08, pp.91-92 (2002)
- 4) S. Ando and A. Kimachi: “Time-domain Correlation Image Sensor: First CMOS Realization of Demodulator Pixel Array”, IEEE Workshop CCD & APS, pp.33-36 (1999)
- 5) T. Spring, P. Seitz, O. Vietze and F. Heitger: “The Lock-in CCD -Two-dimensional Synchronous Detection of Light”, IEEE J. Quantum Electron, 31, 1705 (1995)
- 6) B. Buxbaum, R. Schwarte and T. Ringbeck: “PMD-PLL: Receiver Structure for Incoherent Communication and Ranging System”, SPIE Conference on Optical Wireless Communications II, SPIE, 3850, pp.116-127 (1999)
- 7) R. Lange, P. Seitz, A. Biber and S. Lauxtermann: “Demodulation Pixels in CCD and CMOS Technologies for Time-of-Flight Ranging”, Proceedings of SPIE, 3965, pp.177-188 (2000)
- 8) Ryohei Miyagawa and Takeo Kanade: “CCD-based Range-finding Sensor”, IEEE Trans. Electron Devices, 44, 10, pp.1648-1652 (1997)

やまもと こうじ
山本 幸司 2001年, 大阪市立大学工学部卒業。現在, 奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科博士前期課程在学中。変調光検波方式イメージセンサの研究に従事。

おおや ゆう
大屋 雄 2002年, 京都大学理学部卒業。現在, 奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科博士前期課程在学中。ビジョンチップの研究に従事。

かがわ けいいちろう
香川 景一郎 2001年, 大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了。光コンピューティングの研究に従事。同年, 奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科助手。現在, ビジョンチップおよびその応用システムの研究に従事。博士(工学)。正会員。

おた じゅん
太田 淳 1983年, 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年, 三菱電機(株)入社。1992年~1993年, コロラド大学客員研究員。1998年, 奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科助教授。ビジョンチップおよびフォトニクスデバイスの研究に従事。博士(工学)。正会員。

ぬのした まさひろ
布下 正宏 1967年, 大阪大学大学院基礎工学研究科修士課程修了。同年, 三菱電機(株)に入社。光機能デバイス, 半導体デバイス, 表示デバイスの研究開発と事業化に従事。1998年, 奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科教授。工学博士。

わたなべ くにひろ
渡辺 國寛 1979年, 電気通信大学卒業。現在, マイクロシグナル(株)代表取締役。