

《新連載》

講座：画像入力デバイスの基礎 [全6回]

開講にあたって

久保田 節 [編集幹事]



画像入力に欠かせないデバイスであるイメージセンサは、主にテレビジョンの発展に伴い、進歩を遂げてきました。今では、その用途はテレビジョンに留まらず、民生用カメラ、セキュリティ、医療など幅広い分野へと広がりを見せています。さらに今後は、今月号の特別寄稿「光り輝く日本のイメージセンサ技術とその応用の今後の取組」にも書かれているように、イメージセンサとシステム技術が融合して、新たな応用分野の開拓も進んでいくものと思われます。

画像入力用デバイスとして、もう一つ重要なものにレンズなどの光学デバイスがあります。イメージセンサの性能がいくら向上しても、光の入り口や通り道である光学デバイスの性能が悪ければ意味がなくなってしまいます。また、4Kや8Kといった次世代放送サービスに向けて、画素の微細化や多画素化が今後ますます進むことが予想され、光学デバイスの性能に対する要求も一層高まると考えられます。

今月から6回シリーズで始まるこの講座では、これら画像入力に不可欠な二つの大きな要素デバイスを中心に、わかりやすく解説していただきます。

まず第1回では、画像入力の原点とも言える光を電気信号に変える光電変換のしくみについてわかりやすく解説いただいた後、第2回と第3回で代表的なイメージセンサであるCCD、CMOS撮像デバイスについて、それぞれで説明いただきます。そして第4回と第5回では、レンズやカラーカメラには欠かせないプリズムや色フィルタについて解説いただきます。最後の第6回では、最近脚光を浴びてきている3次元の画像入力について教えていただきます。

これら全6回の講座を通して、画像入力デバイスに関する基礎を身に付けていただければ幸いです。

なお、本講座の企画は、太田淳企画担当理事、徳田崇、山下隼人両編集幹事ならびに私久保田が担当しました。

予定目次（全6回）

1月号	(第1回)光電変換の基礎	江上典文(近畿大)
2月号	(第2回)CCD撮像デバイスの基礎	寺西信一(兵庫県立大)
3月号	(第3回)CMOS撮像デバイスの基礎	黒田隆男
4月号	(第4回)画像入力用光学デバイスの基礎(1)～レンズ～	河合 滋(オプト・イーカレッジ)
5月号	(第5回)画像入力用光学デバイスの基礎(2)～プリズム、色フィルタ～	竹村裕夫(オクト映像研究所)
6月号	(第6回)3次元画像入力デバイスの基礎	浜本隆之(東京理科大)

光電変換の基礎

正会員 江上 典文[†]

1. まえがき

現在、カメラは私たちの生活になくてはならない存在になっている。個人用としては、携帯電話やモバイル端末に付加された小型カメラ、デジタルスチルカメラ、ビデオカメラが盛んに利用されている。また、安心・安全の観点から、多くの場所に防犯カメラが設置され、車にも多種のカメラが搭載されている。さらに、病気の診断や治療にはX線カメラや内視鏡カメラが多く用いられている。このように日常生活で目にするところ以外でも、産業や学術、バイオ、アミューズメントなど、さまざまな分野で多種多様なカメラが活躍している。

イメージセンサは、このようなカメラの中に搭載されている電子デバイスで、カメラに入射した光の情報を電気信号に変換するという重要な役割を担っている。

本稿では、可視光を対象に、イメージセンサの最も基本的な機能である、光を電気に変換するしくみについて解説する。

2. 画像を構成するために必要な情報

カメラに被写体からの光が入射すると、入射した光は光学レンズによってイメージセンサ上に光の像として投射され、電気信号に変換される。この電気信号から画像を構成する際に必要となるのは、イメージセンサのどの位置に、どのような波長の光(被写体の色情報)が、どのような強さ(被写体の輝度情報)で入射したかという情報である。また、動画の場合には、どのような時間間隔で光の像が電気信号に変換されたかという情報も必要となる。

通常、イメージセンサの表面は、図1に示すように、画素とよばれる独立した小さな領域に仕切られている。投射された光の像は細かく分割され、各画素で光電変換されるため、どのような順序で各画素から電気信号を読み出すかを決めておくことで、位置情報を取得することができる。ま

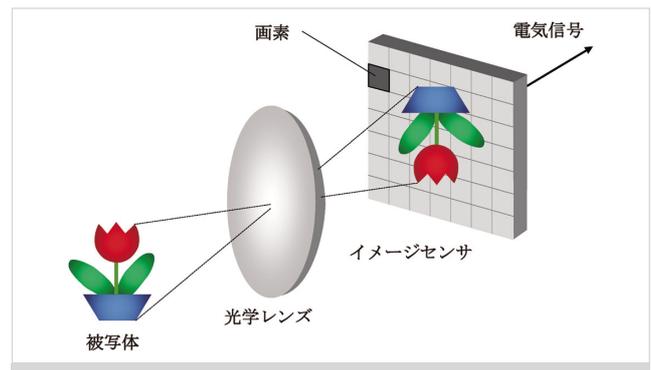


図1 撮像の概念

た、光の像を電気信号に変換する時間間隔も事前に決めておくことで、動画を構成することができる。

3. 光電変換

光電変換とは、光を電気に変換するという意味であるが、より正確には、入射した光のエネルギーで、物質や、物質を構成する原子に束縛されている電荷を解き放つということである。束縛を解かれて自由になった電荷は、電界などによって容易に移動させることができるため、電荷の流れ、すなわち電流として増幅することや外部に取出すことが可能となる。

光電変換は、その動作原理から、外部光電効果¹⁾²⁾と内部光電効果の2種類に分類される。また、内部光電効果は、さらに光導電効果³⁾と光起電力効果^{4)~6)}に分けられる。

3.1 外部光電効果

外部光電効果とは、金属や半導体の表面に光を照射すると、光の持つエネルギーによって、金属内や半導体内の電子が外界(真空空間)に飛び出す現象である。

金属を例にとると、図2に示すように、導体である金属ではフェルミ準位(電子の占有確率が1/2となるエネルギーレベル)まで電子が満たされている。そのため、電子が真空空間に出るには、電子は真空準位(真空空間に存在する、運動エネルギーを持たない電子の最低エネルギーレベル)とフェルミ準位の差(仕事関数)を超えるエネルギーを入射した光から獲得しなければならない。

光のエネルギーは、光を粒子(フォトン)と考えると、一

[†] 近畿大学 産業理工学部 電気通信工学科

"Fundamentals of Image Input Device Technologies (1): Photoelectric Conversion" by Norifumi Egami (Faculty of Humanity-Oriented Science and Engineering, Kinki University, Fukuoka)

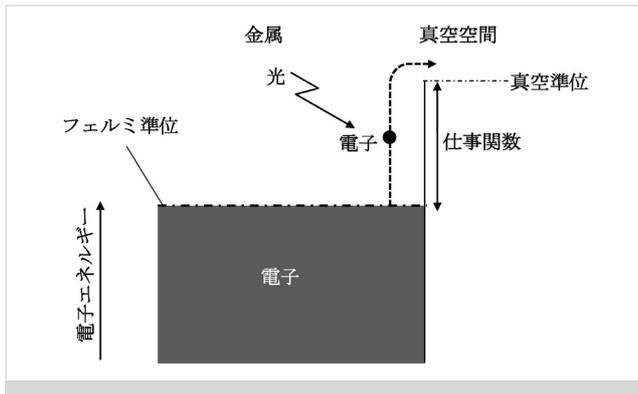


図2 金属のエネルギーバンド

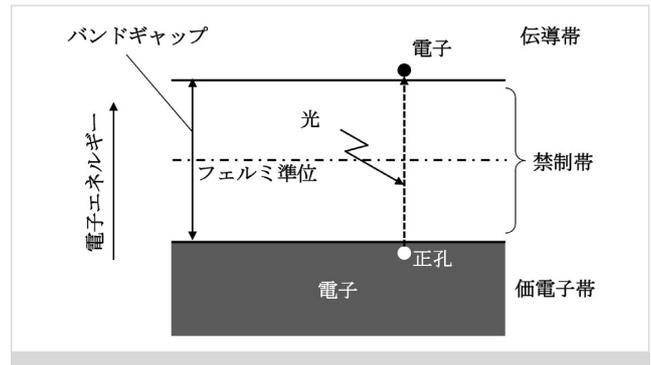


図3 半導体のエネルギーバンド

つの光子が持つエネルギー E_p は以下に示す式(1)で表される。

$$E_p = hc/\lambda \text{ (J)} \quad (1)$$

ここで、 h はプランク定数、 c は光速、 λ は光の波長である。

また、 E_p をeV(電子ボルト)、光の波長 λ をnmの単位にとると、式(1)は式(2)に変換される。

$$E_p \approx 1240/\lambda \text{ (eV)} \quad (2)$$

金属が光を吸収すると、電子は上記 E_p に相当するエネルギーを得るため、電子が真空空間に放出されるには E_p が仕事関数より大きいことが必要条件となる。ただし、電子が仕事関数より大きいエネルギーで励起されても、すべての電子が真空空間に飛び出すわけではない。励起された電子はさまざまな方向に運動するため、光から得たエネルギーを失うまでの間に金属の表面に到達した電子のみが真空空間に放出される。そのため、外部光電効果に寄与する電子は、物質表面の極近傍に存在する電子に限定される。

この外部光電効果は、微弱な光を2次電子増倍によって大きな光電流に変換する光電子増倍管の光電変換部に利用されている。

3.2 内部光電効果

3.2.1 光導電効果

光導電効果とは、両端に電極を設けて電圧を印加した半導体に光を照射すると、半導体の抵抗が下がり、半導体中を流れる電流が増加する現象である。

半導体では、図3に示すように、電子が存在することのできない禁制帯のエネルギー幅(バンドギャップ)以上のエネルギーを持つ光が入射すると、価電子帯の電子が伝導帯に励起される。また、価電子帯には電子の抜けた孔である正孔が生成される。この伝導帯に励起された電子と価電子帯の正孔はドリフトや拡散によって容易に移動することからキャリアとよばれる。電圧の印加された半導体内にキャリアが生成されると、キャリアは電界に沿って移動し、電流となる。そのため、半導体中を流れる電流は、光が照射されていない状態に比べて、増加する。

この光導電効果は、固体イメージセンサが登場する前にイメージセンサの主流であった光導電型撮像管の光電変換

膜に利用されていた。

3.2.2 光起電力効果

光起電力効果とは、半導体のpn接合や、半導体と金属のショットキー接合など、整流作用を持つ半導体に、バンドギャップ以上のエネルギーを持つ光を照射したときに起電力が発生する現象である。

この光起電力効果は、現在、多くのカメラに搭載されている固体イメージセンサの光電変換に利用されているもので、4章でより詳しく説明する。

この章では、光電変換の分類とそれらが発現する要件などについて述べたが、光電変換を利用するうえで留意すべき点を以下に示す。

- (1) 光電変換で広義の意味でのキャリアを生成するには、物質の仕事関数やバンドギャップ以上のエネルギーを持つ光を照射しなければならない。言い換えると、あるエネルギーを持つ光でキャリアを生成するには、光のエネルギーより小さな仕事関数やバンドギャップを持つ物質を用いる必要がある。
- (2) 光の持つエネルギーは、式(1)または式(2)であらわされ、光の波長 λ のみに依存する。
- (3) 上記(1)が満たされているときには、生成されるキャリアの数は、照射される光の強弱、すなわち入射光量に比例する。

イメージセンサの光電変換では被写体の輝度情報を得るために上記(3)を利用しているが、そのためには前提となる(1)を満たす必要がある。可視光(波長 λ の範囲を380nm~780nmと仮定)を例にとると、波長 λ が長くなるほど光の持つエネルギーは低くなることから、可視光が持つ最も低いエネルギーは約1.6eV($\lambda=780$ nm)となる。そのため、可視光の全波長域で光電変換を可能とするには、仕事関数やバンドギャップがこの値以下の物質を用いる必要がある。

4. 光起電力効果を利用した光電変換素子

現在、可視光用固体イメージセンサの光電変換には光起電力効果が利用されている。ここでは、本効果を利用した光電変換素子の例としてpn接合フォトダイオードを取り上げ、その構造や動作などについて述べる。



pn 接合フォトダイオードの基板には主にシリコンが用いられている。シリコンのバンドギャップは約1.1eVで、可視光全域を光電変換することができる。また、シリコン原子の最外殻電子は4個で、5個の最外殻電子を持つリンなどの不純物（ドナー）がドーピングされると、電子が1個過剰となり、*n*型シリコンになる。この*n*型シリコンでは、過剰な電子は室温程度の熱エネルギーで原子の束縛から解放されるため、多数キャリアは電子となるが、過剰な電子が抜けたイオン化ドナーは正に帯電していることから、熱平衡状態では*n*型シリコンは電気的に中性となる。これとは逆に、3個の最外殻電子を持つホウ素を不純物（アクセプタ）としてドーピングすると、電子が1個不足し、*p*型シリコンになる。この*p*型シリコンでは正孔が多数キャリアとなるが、電子を受け入れたイオン化アクセプタは負に帯電しているため、熱平衡状態では*n*型シリコンと同様、電気的に中性となる。

上記*n*型シリコンと*p*型シリコンを接合したものが*pn*接合である。*pn*接合では、*n*型シリコンの電子と*p*型シリコンの正孔が拡散によって、それぞれ相手方へ進入し、再結合することから、空乏層とよばれるキャリアの存在しない領域が接合部分につくられる。空乏層には、正のイオン化ドナーと負のイオン化アクセプタのみが存在し、キャリアの拡散を妨げる電界が形成される。この電界によるドリフトと、拡散がバランスした状態で、キャリアの移動は止まり、平衡状態となる。

この*pn*接合を用いた光電変換素子が*pn*接合フォトダイオードである。その模式的断面を図4に示す。*pn*接合フォトダイオードは、*p*型シリコンの一部に、*p*型シリコンよ

り不純物の濃度を高めた*n*⁺領域を形成することで作製される。また、これとは逆に、*n*型シリコンの一部に*p*⁺領域を形成することでも作製される。前者は入射した光によって生成された電子をキャリアとして利用する場合に、また、後者は正孔を利用する場合に用いられる。

この*pn*接合フォトダイオードをイメージセンサの光電変換に用いる場合には、逆方向バイアス状態で使用される。例えば、図4(a)に示す、*p*型シリコンの一部に*n*⁺領域を形成した*pn*接合フォトダイオードでは、*p*型シリコンを接地し、*n*⁺領域に正の電圧を印加した後、*n*⁺領域を電気的に切り離した状態で使用される。逆方向バイアス電圧が印加されると、図5に示すように、バイアス電圧を印加しない場合に比べて、接合部分につくられる空乏層が拡大する。この空乏層にバンドギャップより大きなエネルギーを持つ光が入射すると、図6に示すように、価電子帯の電子が伝導帯に励起され、2種類のキャリア、電子と正孔が生成さ

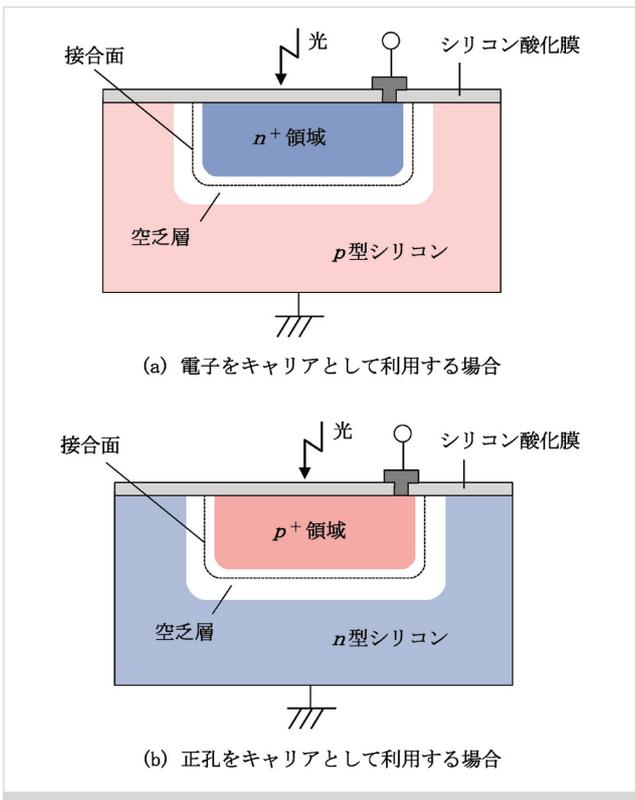


図4 *pn*接合フォトダイオードの模式的断面

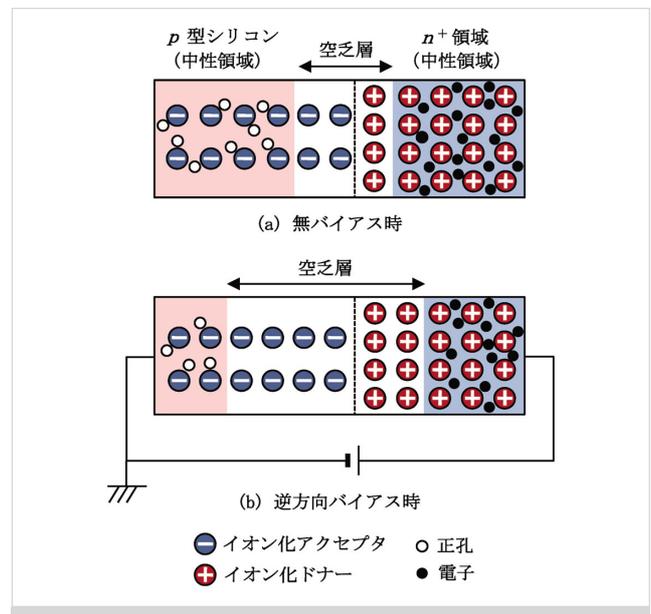


図5 *pn*接合における空乏層の広がり

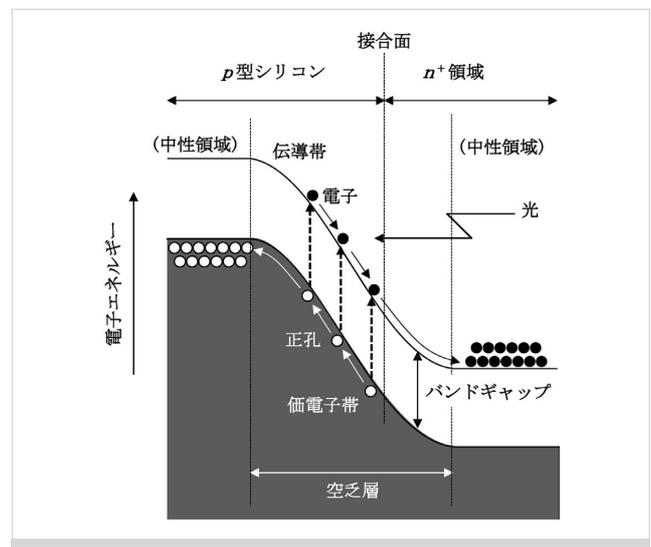


図6 *pn*接合におけるエネルギーバンド

れる。電子は、空乏層に存在する電界によって、 n^+ 領域の中性領域に移動し、蓄積される。一方、正孔は p 型シリコンの中性領域に移動し、素子の外部に排出される。また、 p 型シリコンや n^+ 領域の中性領域で光が吸収された場合には、空乏層と同様、電子と正孔が生成されるが、これらのキャリアが信号に寄与する割合は小さい。これは、 p 型シリコンの中性領域で光が吸収された場合を例にとると、光によって発生したキャリアのうち、電子は拡散によって空乏層側に移動するが、多くの電子は p 型シリコン中性領域の多数キャリアである正孔と再結合し、空乏層にたどり着いた電子のみがドリフトによって n^+ 領域に移動し、信号となるためである。このように、 pn 接合フォトダイオードでは空乏層での光電変換が信号に寄与する割合が大きいため、ダイオードを逆方向バイアス状態にすることで空乏層を拡大し、光電変換の有効利用を図っている。

上記 pn 接合フォトダイオードでは、キャリアは一定時間(動画像の場合は画像と次の画像を提示する時間間隔に相当)、生成、蓄積された後、外部回路に読出される。また、このとき、外部回路に流れる電流は光電流と暗電流の和になる。光電流は、入射光によって生成されたキャリアによる電流で、入射光量に比例する。一方、暗電流は入射光とは無関係な電流である。この暗電流は画質劣化の要因となることから、その発生を抑制することができるフォトダイオード(埋込みフォトダイオード)⁷⁾も開発、実用化されている。図7に、電子をキャリアとして利用する埋込みフォトダイオードの模式的断面を示す。 pn 接合フォトダイオードと異なる点は、 p 型シリコンの一部に形成された n 領域の上部(光入射側)に、高濃度な p^+ 層が設けられていることである。通常の pn 接合フォトダイオードでは、シリコンとシリコン酸化膜の界面に界面準位とよばれる電子が存在できる準位がある。そのため、界面近傍の電子が熱エネルギーを得ると、この界面準位を介して、電子が価電子帯から伝導帯に励起され、暗電流となる。一方、埋込みフォトダイオードでは、高濃度な p^+ 層を挟むことで、界面近傍の電子密度を低く抑え込み、この暗電流の発生を抑制している。この埋込みフォトダイオードは、現在、高画質を実現できるフォトダイオードとして多くのイメージセンサに採用されている。

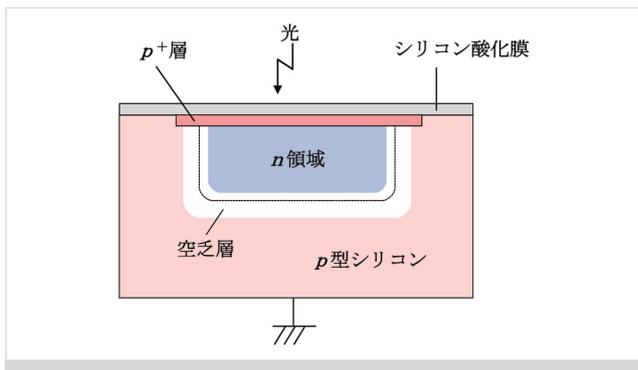


図7 埋込みフォトダイオードの模式的断面

5. 光の波長情報の取得 ～色再現～

ここでは、被写体の色情報を得るために、イメージセンサやカメラでは入射した光の波長をどのようにして識別しているかについて述べる。

原理的には、イメージセンサの各画素に、どのような波長の光が、どのような強さで入射しているかがわかり、これをディスプレイで再現できれば、被写体の色と輝度とを忠実に再現することができる。しかし、このような方法の実現には、多大な技術的困難などを伴うことから、被写体の色再現については光の三原色という原理を利用している。この原理は、可視光の長波長域に位置する光(人間は赤色に感じる；赤色光)、中波長域に位置する光(緑色光)、短波長域に位置する光(青色光)を基準(原色)に取り、それらを加法混合することで、人間が光によって感じる色のほとんどを再現することができるというものである。このことは、入射した光から赤、緑、青に相当する波長成分の光を抽出し、その強弱を電気信号に変換することで、被写体の色と輝度とを再現できることを示している。原色の取り方や入出力デバイスの性能などによって再現できる色の範囲は限定されるが、人間が見てほとんど違和感がない程度に被写体の色を再現することができる。

上記光の三原色に対応した電気信号を得るには、三板式、単板式とよばれる二つの方法がある。前者の三板式は、光学レンズを通して入射した光をプリズムで赤、緑、青に相当する波長成分に分離し、それぞれの光の輝度を三つのイメージセンサで電気信号に変換する方法である。また、後者の単板式は、図8に示すように、一つのイメージセンサの前面に、赤、緑、青のいずれかの光のみを通す3種類のカラーフィルタを離散的に配置することで、光の三原色に対応した電気信号を得る方法である。三板式では、原理上、単板式に比べて、より高画質なカラー画像を得ることができるが、プリズムが必要でカメラが大きく、重くなるため、一般的なカメラには主に単板式が採用されている。

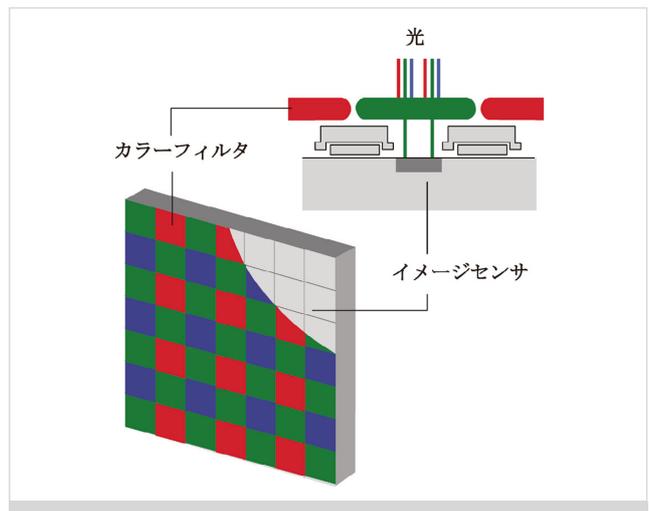


図8 カラーフィルタの一例(ベイヤー配列)

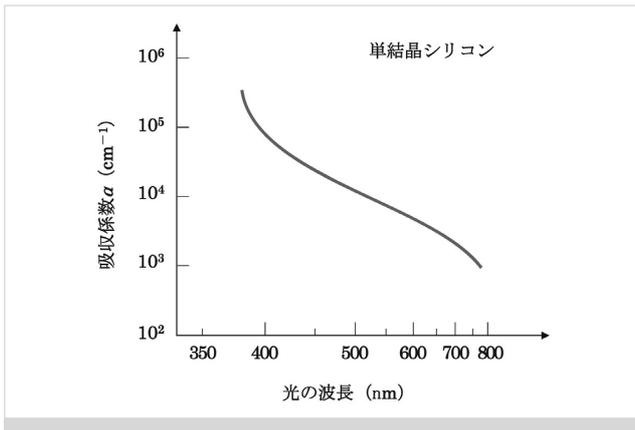


図9 吸収係数の入射光波長依存性

このように、入射した光を光の三原色に波長分離することで、被写体の色をほぼ再現することができるが、その際、留意しなければならない点がある。それは、イメージセンサの光電変換では入射した光が物質に吸収されて、光の強度に対応した数のキャリアが生成されることを利用しているが、この光の吸収が物質や入射する光のエネルギーによって異なることである。

半導体を含む物質に光が入射すると、物質表面から深さ x cm の位置での光強度 I は以下に示す式 (3) で表される。

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (3)$$

ここで、 I_0 は物質表面 ($x=0$) での光強度、 α は光の吸収係数である。

式 (3) は、 α が大きいほど光は物質の表面近くで吸収され、 α が小さいと光が物質に深く侵入してもなかなか吸収されないことを示している。この吸収係数 α の値は物質や、入射する光のエネルギー、すなわち光の波長 λ に依存する。

現在、可視光用固体イメージセンサの光電変換材料に用いられているシリコンでは、図9⁸⁾⁹⁾に示すように、吸収係数は、入射する光の波長 λ に強く依存し、 λ が短くなるほど α は大きく、また、 λ が長くなるほど α は小さくなる。赤色光 (波長 $\lambda=700$ nm)、緑色光 ($\lambda=530$ nm)、青色光 ($\lambda=450$ nm) がシリコンに入射したとき、それぞれの光が侵入する深さと光強度 (I/I_0) との関係を図10に示す。入射した光の強度が50%となる、すなわち入射した光の半分が吸収される深さは、赤色光では約3.2 μm 、緑色光では約0.8 μm 、青色光では約0.3 μm となり、赤色光と青色光では光が吸収される深さが一桁異なることがわかる。このことは、イメージセンサの光電変換部を設計するうえで悩ましい問題となるが、通常は、光が最も深く侵入する赤色光に合わせて光電変換部は設計される。

6. むすび

本稿では、可視光を対象に、イメージセンサの最も基本的な機能である光電変換のしくみについて述べた。

光電変換そのものは物理的な現象であるが、この現象をい

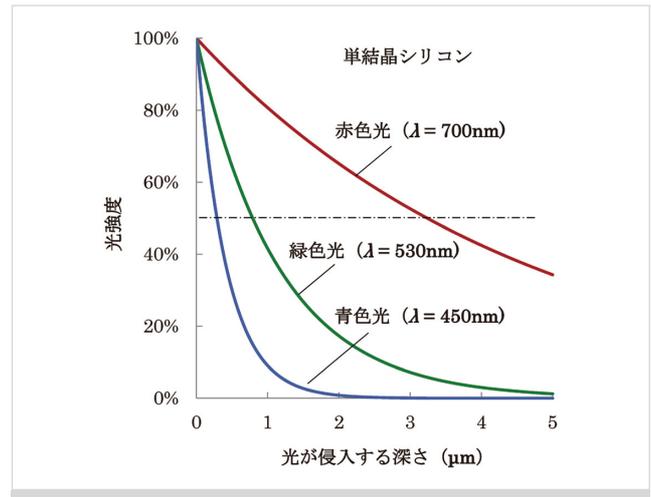


図10 光強度と光が侵入する深さとの関係

かにしてイメージセンサに取り込むか、また、性能をより高めるにはどのような構造が最適かなどの観点から、これまで研究開発が進められ、今もその努力が続けられている。

現在、可視光用イメージセンサではシリコンを用いた光電変換素子が圧倒的な優勢を誇っており、当面、この状況は続くと思われるが、一方で、新たな試みとして、有機材料を用いた光電変換やイメージセンサの研究開発なども進められており、将来が期待される。(2013年10月24日受付)

〔文 献〕

- 1) H.R. Hertz: "Ueber einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die elektrische Entladung", Annalen der Physik, 267, 8, pp.983-1000 (1887)
- 2) A. Einstein: "Ueber einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt", Annalen der Physik, 322, 6, pp.132-148 (1905)
- 3) W. Smith: "Effect of Light on Selenium during the Passage of an Electric Current", Nature, 7, p.303 (1873)
- 4) M.E. Becquerel: "Memoire sur les Effects Electriques Produits sous l'Influence des Rayons Solaires", Comptes Rendus Hebdomadaires des Seances de L'Academie des Sciences, 9, pp.561-567 (1839)
- 5) W.G. Adams and R.E. Day: "On the Action of Light on Selenium", Proc. Royal Soc., A25, pp.113-117 (1876)
- 6) V.L. Bergman: "Uber eine Neue Selen-Sperrschicht Photozelle", Physikalische Zeitschrift, 32, pp.286-289 (1931)
- 7) 寺西, 河野, 織田, 石原: "p+np-構造フォトダイオードを用いたIL-CCDの残像特性", テレビ全大, pp.45-46 (1981)
- 8) W.C. Dash and R. Newman: "Intrinsic Optical Absorption in Single-Crystal Germanium and Silicon at 77° K and 300° K", Physical Review, 99, 4, pp.1151-1155 (1955)
- 9) G.E. Jellison, Jr. and F.A. Modine: "Optical Absorption of Silicon between 1.6 and 4.7 eV at elevated temperatures", Appl. Phys. Lett., 41, 2, 15, pp.180-182 (1982)



江上 典文

1980年、九州工業大学工学研究科電気工学専攻修了。同年、NHK入局。徳島放送局を経て、1983年より、放送技術研究所に勤務し、冷陰極HARP撮像板、固体撮像デバイスの研究開発に従事。2013年より、近畿大学産業理工学部電気通信工学科教授。博士(工学)、正会員。

CCD 撮像デバイスの基礎

正会員 寺西 信一†

1. まえがき

電荷結合素子 (Charge Coupled Device: CCD) とは半導体デバイスの一種であり、適当なシーケンスの駆動パルス群を印加することによって、電荷パケットを移動させることができる。電荷パケット内の電荷量はアナログ量であり、時間軸ではサンプリングされ、パルスで駆動されるのでデジタル的でもある。

CCDの応用は、イメージセンサ(撮像素子)の他に、メモリー、遅延線、信号処理が提案されていたが、イメージセンサ応用のみが大きく発展した。小型化、軽量化、高性能化、低価格化を実現し、ムービー、コンパクトデジタルカメラ、放送用カメラ、監視カメラなどの普及に大いに寄与した。

1970年にBell研究所のBoyleとSmithはCCDの概念を発表し¹⁾、その功績により2009年ノーベル賞を受賞した。CCDの発表の直後に基本構成に関する提案が矢継ぎ早に行われたことは驚くべきことである。すなわち、1971年に駆動パルスが簡単な2相駆動CCD²⁾、1972年に転送効率が良い埋込チャンネル型CCD³⁾、1973年にホールドされた信号が出力できる浮遊拡散層法出力⁴⁾、1974年に出力部のノイズを大幅に低減する相関二重サンプリング法⁵⁾が提案された。CCDへの大きな期待とMOS集積回路技術の躍進期に入っていたことが背景にあった。

1980年代初に日本で、残像、暗電流を低減する埋込フォトダイオード(埋込PD, Pinned Photodiode)⁶⁾、ブルーミングを防止する縦型オーバーフロードレイン(VOD)構造⁷⁾などの実用化に必須の技術が開発された。その結果、1980年代中頃からCCDイメージセンサが量産化されるようになった。

この講座では、CCDの原理・構造を述べ、続いてCCDイメージセンサについて説明する。CMOSイメージセンサに取って代わられた原因についても考察する。

2. CCDの原理

CCDにおける電荷転送は、図1に示すバケツリレーによる水の移送に喩えられる。バケツ中の水量は、パケット中の信号電荷量を表し、バケツの位置は、駆動パルスで制御される半導体中に形成される電位井戸を示している。

CCDでは、この電位井戸として、図2に示すMOS (Metal Oxide Semiconductor) 容量を用いる(今後、信号電荷として電子を用いるNチャネル型で説明する)。P型シリコン基板表面にゲート絶縁膜を介してポリシリコンのゲート電極が設けられている。ゲート電圧 V_g を正にすると、シリコン中の電位が曲げられ、シリコン界面に深さ ψ_{ch} の電位井戸が形成される。信号電子はこの電位井戸に蓄積される。

酸化膜/シリコン界面には電子をトラップする界面準位が多数ある。トラップされた電子が放出されるまでに時間を要するので、電荷転送に取り残しが生じる。このような転送効率不良を改善するために、図2の表面チャンネル型に対して、図3の埋込チャンネル型CCDが考案された³⁾。P型シリコン基

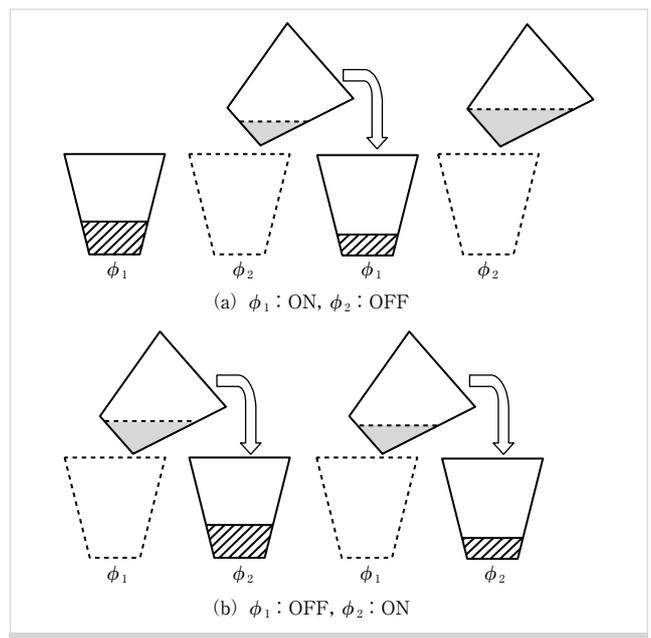


図1 バケツと水を用いたCCDの概念図

†兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所/静岡大学 電子工学研究所
"Fundamentals of Image Input Device Technologies (2): Introduction of CCD Image Sensors" by Nobukazu Teranishi (Advanced Science and Technology for Industry, University of Hyogo, Hyogo/Research Institute of Electronics, Shizuoka University, Shizuoka)

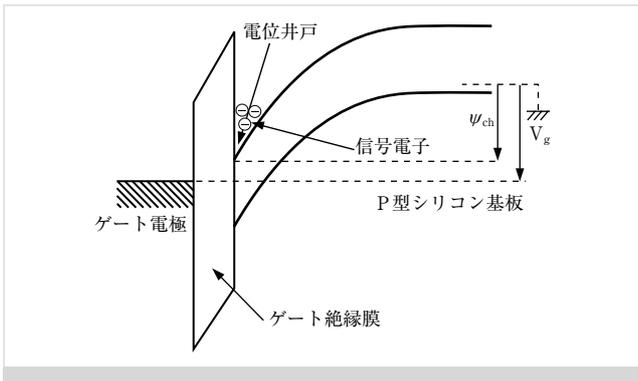


図2 表面チャンネル型CCDの電位図

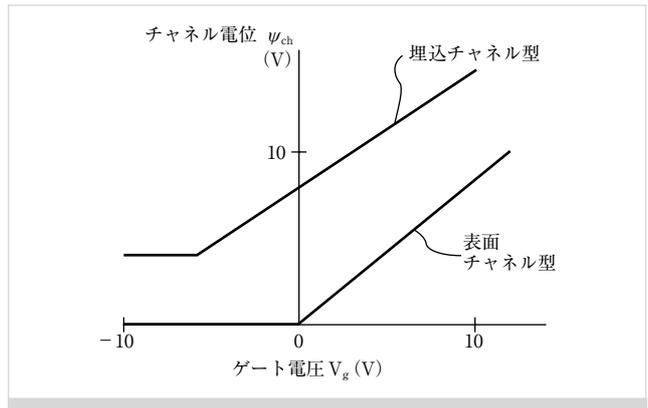


図4 チャンネル電位のゲート電圧依存性

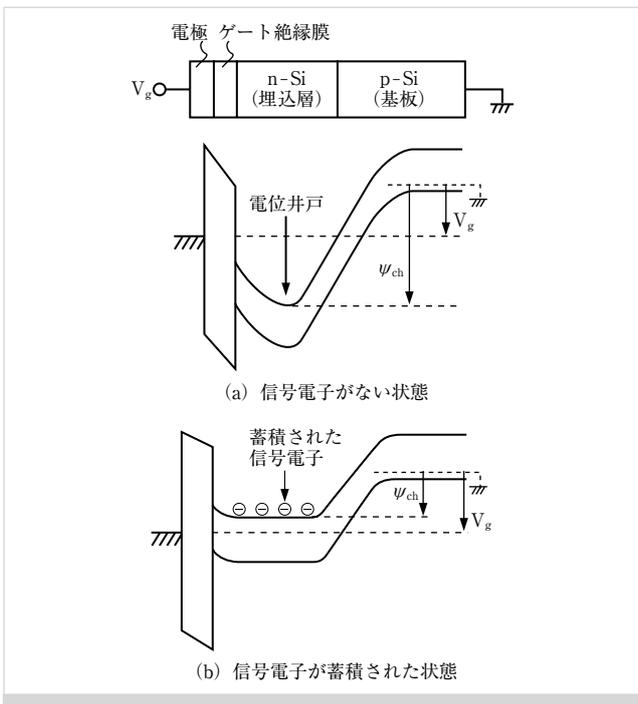


図3 埋込チャンネル型CCDの電位図

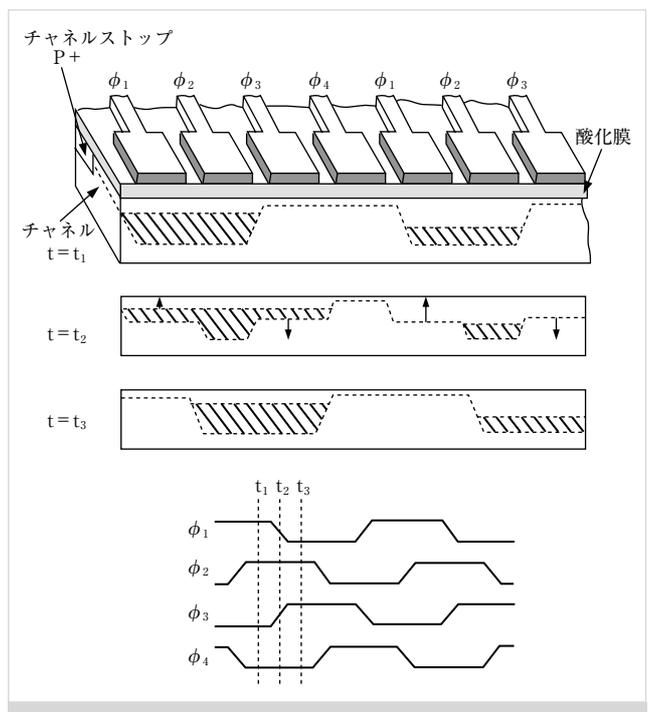


図5 4相駆動CCDの模式図、電位図、駆動パルスのチャート

板の界面付近にN型埋込層が形成されているために、電位井戸の最も深い場所はシリコン内部となる(図3(a))。信号電子は、図3(b)に示すように、シリコン内部に蓄積され、界面準位にトラップされず、転送効率が大幅に改善される。このため、埋込チャンネル型が広く用いられている。

電位井戸の深さ ψ_{ch} はゲート電圧 V_g によって制御でき、その依存性を図4に示す。不純物濃度、埋込層の深さ、ゲート絶縁膜の膜厚によって決まる。

CCDでは多数のMOS容量が一行に並べられている。隣接したMOS容量は空乏領域が重なる。信号電子は最も深い電位井戸に蓄積される。最も深い電位井戸を順次移動させていくことによって、信号電子を転送させていく。

図5の4相駆動型CCDを用いて、より具体的に信号電子の転送を説明する。駆動パルスは ϕ_1 から ϕ_4 まで4種あり、

MOS容量のゲート電極には、4個毎に同一駆動パルスが印加される。4種の駆動パルスは位相が 90° ずらしてある。 t_1 において、 ϕ_1 と ϕ_2 は高い電位(ON)に、 ϕ_3 と ϕ_4 は低い電位(OFF)にある。信号電子は ϕ_1 と ϕ_2 に蓄積され、 ϕ_3 と ϕ_4 は電子パッケージ間の障壁(バリア)になっている。 t_2 では、 ϕ_1 はONからOFFへ、 ϕ_3 はOFFからONへ変化する。 ϕ_1 の電位井戸が浅くなる時に、 ϕ_4 はバリアを形成しているので、 ϕ_1 に蓄積されていた信号電子は ϕ_2 と ϕ_3 の方向へ移動していく。 t_3 では、 ϕ_2 と ϕ_3 に信号電子は蓄積される。MOS容量1個分信号電子は転送されたことになる。同様の動作が駆動パルスの変化に合わせて繰り返され、電荷転送が進行する。

CCDには必要とする駆動パルスの数で、4相駆動型の他に、3相駆動型¹⁾、2相駆動型²⁾、単相駆動型⁶⁾などがある。



2相駆動型は、180°位相が異なる2個のパルスで駆動でき、高速性に優れており、取扱電子量の大きい4相駆動型とともに広く使用されている。

CCDからの信号電子を検出し、デバイス外部へ取出す方法としては、浮遊拡散層法⁷⁾が最も利用されている。最終MOS容量に隣接して、検出容量となるN型拡散層(浮遊拡散層)が設けられている。浮遊拡散層に信号電子が転送されてくると、浮遊拡散層の電圧が小さくなる。この電圧変化を浮遊拡散層に接続されたソースフォロアンプで信号電圧として出力する。その後、浮遊拡散層電圧はリセットされ、次の信号電子を待つことになる。信号電子1個による出力電圧を変換ゲイン C_G ($\mu\text{V}/\text{電子}$)と呼び、浮遊拡散層容量 C_{fd} が小さいほど大きな値(高ゲイン)になる。また、低雑音化のために、リセット時と信号出力時との出力電圧差を信号として用い、リセットノイズを解消する相関二重サンプリング法⁵⁾が広く用いられている。

CCDでは電荷の状態で信号を転送するために、転送効率が良ければ、雑音は発生しないことになり、低雑音が特徴と言える。

3. CCDイメージセンサ

ビデオカメラ、デジタルスチルカメラ、監視カメラ、放送用カメラなど広い応用範囲で使用されたインタライン転送型CCDイメージセンサ(ITCCD)について説明する。

図6は模式平面図、図7は画素(セル)の断面図である。画素は2次元に配列されている。各画素にはpn接合フォトダイオード(PD)と4相駆動埋込チャンネル型の垂直CCD(VCCD)、PDからVCCDへの電子転送を制御するトランスファゲート(TG)、および、分離領域からなる。VCCDの終端には2相駆動埋込チャンネル型の水平CCD(HCCD)が設けられている。HCCDの終端には浮遊拡散層型の出力部が形成されている。PDは入射光により、信号電子を発生させ、かつ、蓄積期間に信号電子を蓄積する。VCCDとHCCDとは電子転送(走査)を行う。

一定の蓄積期間後、TGがONし、信号電子がPDからVCCDの対応する各MOS容量に移される。TGがOFFすると、PDでは次の信号電子の蓄積が始まる。これらの動作はすべての画素で同時に行われる。VCCDに移された信号電子は1列ずつHCCDに転送される。HCCDでは信号電子を順次高速に出力部へ転送する。出力部では信号電子量に応じた信号電圧を低インピーダンスで外部へ供給する。

以下、ITCCDに使用されている注目すべき技術を三つ紹介する。

第1は、埋込PD⁶⁾である。図7において、N型PDのドーピング濃度を小さくし、完全に空乏化したときのPDの電位をTGチャンネル電位より小さくするように設計していること、N型PDの上部にP⁺型のピンニング層が設けられていることが特徴である。信号電子転送の最終段階においても

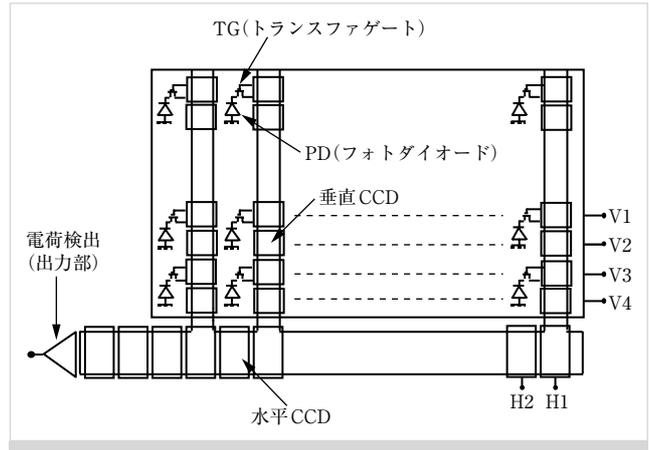


図6 インタライン転送方式CCDイメージセンサ(ITCCD)の模式平面図

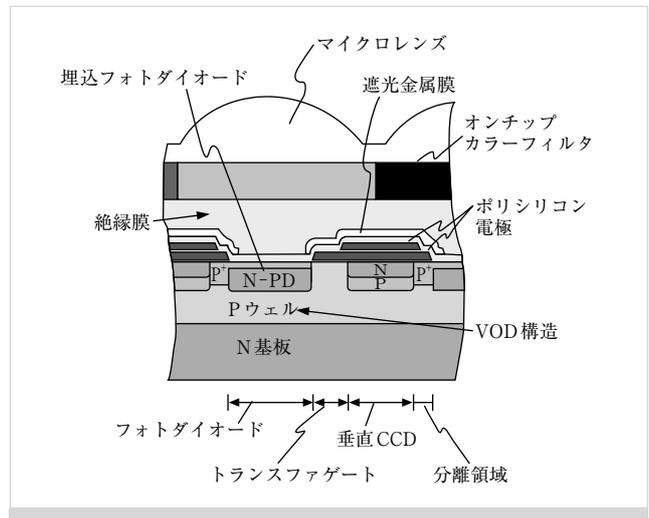


図7 ITCCDの画素断面図

PDとTGとの間に十分な電位差があり、転送がスムーズに行われ、残像は発生しない。転送後N型PDには電子が1個も残らないので不確実性がなく、無ノイズになる。P⁺型ピンニング層のお蔭で、生成消滅中心が多数存在するSi-SiO₂界面が空乏化しないために、暗電流・白傷が大幅に低減される。さらには、N型PDはP⁺型ピンニング層と新たなPN接合を形成するために容量が大きくなり、飽和信号量が大きくなる。

第2はブルーミングを抑制するための縦形オーバーフロードレイン(VOD)構造⁷⁾である。ブルーミングとは、光量が多い時に信号電子量がPDの飽和量を越え、VCCDに溢れ出し、再生画面上で白い縦筋となる現象である。図7に示すように、VCCD下は濃いP型領域が形成されているのに対して、PD下は薄いP型ウェルのみである。接地のP型ウェルに対して、N型基板に逆バイアスを印加し、PD下のP型ウェルを空乏化させる。図8の電位分布に示すように、過剰電子はN型基板へ溢れていき、VCCDや周囲の

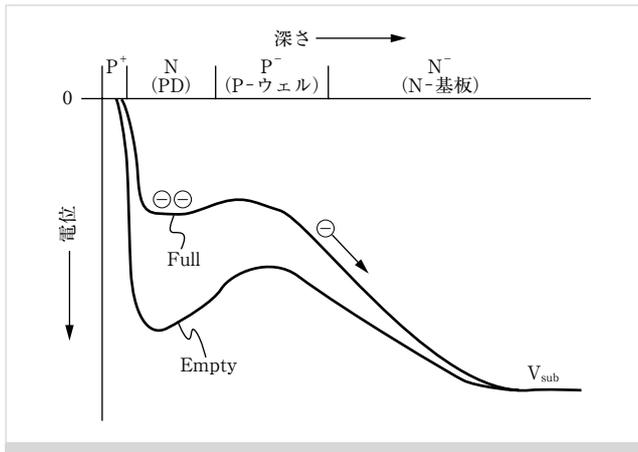


図8 縦型オーバフロードレイン(VOD)構造の深さ方向電位図

PDに漏れ込むことは防止される。

第3は、各画素上に形成されたマイクロレンズである⁸⁾。PDの開口率は20～30%と小さいが、マイクロレンズによって実質的な開口率の向上を図ることができる。マイクロレンズは、レジストを熱フローによってレンズ状に変形させ、レジストや無機物(SiNなど)に転写して形成される。

この他にも多くの技術が開発され、1982年から現在までに画素面積は1/200の1.2 μ m角に縮小された。

4. CCDがCMOSイメージセンサ(CIS)に負けた理由

現在、CISはCCDイメージセンサの20倍以上の数量が生産されている。最後にこの理由を考える。

第1に、CISが4トランジスタ方式を採用するようになったことである。4トランジスタ方式では、各画素が1画素のCCDであり、かつ、ソースフォロアアンプが画素数分あるので帯域が小さくてすむために、CCDより低雑音が実現できるようになった。

第2に、CISは高速データレートが実現できたことである。CISでは列毎にADC(Analogue Digital Converter)が設けられ、まさに“列並列”で高速化が実現された。CCDでは、

HCCDでシリアル化され、1個の出力部から出力される。HCCDと出力部が高速化のネックである。HDTV1080/60Pが実現できなかったことが特に課題であった。

第3に、CISでは、デジタル出力化や画像処理回路のオンチップ化が行われ、使い易さを実現したことである。

(2013年11月13日受付)

〔文 献〕

CCDの教科書としては、C.H. Séquin and M.F. Tompsett: "Charge Transfer Devices", Academic Press, New York (1975), 邦訳: 武石喜幸, 香山晋(監訳): "電荷転送デバイス", 近代科学社(1978)。イメージセンサの教科書としては、寺西信一監修: "画像入力とカメラ", オーム社(2012)。

- 1) W.S. Boyle and G.E. Smith: "Charge-Coupled Semiconductor Devices", Bell Syst. Tech. J., 49, pp.587-593 (1970)
- 2) R.H. Krambeck, R.H. Walden and K.A. Pickar: "Implanted-Barrier Two-Phase Charge-Coupled Device", Applied Physics Letters, 19, 12, pp.520-522 (1971)
- 3) R.H. Walden, R.H. Krambeck, R.J. Strain, J. McKenna, N.L. Schryer and G.E. Smith: "The Buried Channel Charge Coupled Device", Bell Syst. Tech. J., 51, pp.1635-1640 (1972)
- 4) W.F. Kosonocky and J.E. Carnes: "Two-Phase Charge-Coupled Devices with Overlapping Polysilicon and Aluminum Gates", RCA Review, 34, pp.164-202 (1973)
- 5) M.H. White, D.R. Lampe, F.C. Blaha and I.A. Mack: "Characterization of Surface Channel CCD Image Arrays at Low Light Levels", IEEE Journal of Solid-State Circuit, sc-9, 1, pp.1-13 (1974)
- 6) 寺西信一, 河野明啓, 織田英嗣, 新井浩一, 石原保雄: "p+np-構造フォトダイオードを用いたIL-CCDの残像特性", テレビジョン学会1981年全国大会, pp.45-46 (1981)
- 7) Y. Ishihara, E. Oda, H. Tanigawa, N. Teranishi, E. Takeuchi, I. Akiyama, K. Arai, M. Nishimura and T. Kamata: "Interline CCD Image Sensor with an Anti-Blooming Structure", IEEE, ISSCC 1982, pp.168-169 (1982)
- 8) Y. Ishihara and K. Tanigaki: "A High Photosensitivity IL-CCD Image Sensor with Monolithic Resin Lens Array", IEEE IEDM, pp.497-500 (1983)



寺西 信一 1978年～2000年、日本電気(株)にて、2000年～2013年、パナソニック(株)にて、2013年より、兵庫県立大学と静岡大学にて、イメージセンサの開発、ビジネスに従事。情報センシング研究会主査、IISS(International Image Sensors Society)会長を務める。IEEEフェロー。フェロー認定会員。

CMOS 撮像デバイスの基礎

正会員 黒田 隆 男

1. まえがき

撮像デバイスは画像情報を捉えるセンサである。画像情報は(光強度、位置、波長、時間)で構成されており、ほとんどすべてのイメージセンサが行っていることは、[位置、波長、時間]の情報がデジタル化された座標点として撮像システムに作り込まれ、その座標点に注ぐ光の量の計測¹⁾と見なせる。そのためにセンサに必須な機能¹⁾は、各座標点への光量を計測する機能と、各光量情報がどの座標点のものであるかを同定する機能である。この同定機能を実現する手段と光量計測をどの段階で行うかでセンサの方式が決まる。光量計測は入射光を吸収して発生した信号電荷を集積する工程と、その量を計量する二段階に分けて行われている。

CMOSセンサは、X-Yアドレス方式で座標点を同定し、各画素では、信号電荷集積だけでなく電荷量の計量までを行う。本稿の主題はCMOSセンサであるが、理解をより深めるために同じX-Yアドレス方式であるMOSセンサから話を始める。

2. MOSセンサ

MOSセンサ²⁾は、日立によって世界初の固体単板カラーカメラ用として量産³⁾され、技術史また産業史としても学ぶべきことが実に多い⁴⁾。原理は、図1(a)⁵⁾に示すように、フォトダイオード(PD)で入射光によって発生し集積された信号電荷は、垂直走査回路からの行選択パルスによって垂直スイッチMOSFETをON状態にすることで金属配線の垂直信号線(VSL)に読出され、さらに水平走査回路からの列選択パルスで水平スイッチMOSFETをON状態にして、水平信号線からビデオ電圧電源(V_v)に流れる。この電流による出力抵抗での電圧降下がプリアンプで検出されてこの画素の出力電圧となる。このようにCCDのような電荷転送ではなく、スイッチと金属配線によって定電圧電源に読出される。

このときPDとVSLの電位はV_vに設定されるが、正確にV_vとはならずばらついて、kTC雑音¹⁾と呼ばれる雑音になる。ここで、VSLの容量を3pFと仮定すると、400√C(pF)で表される概算のkTC雑音電子数は700電子となり、雑音電子数が数個にすぎないCCDと比べて非常に多いこと

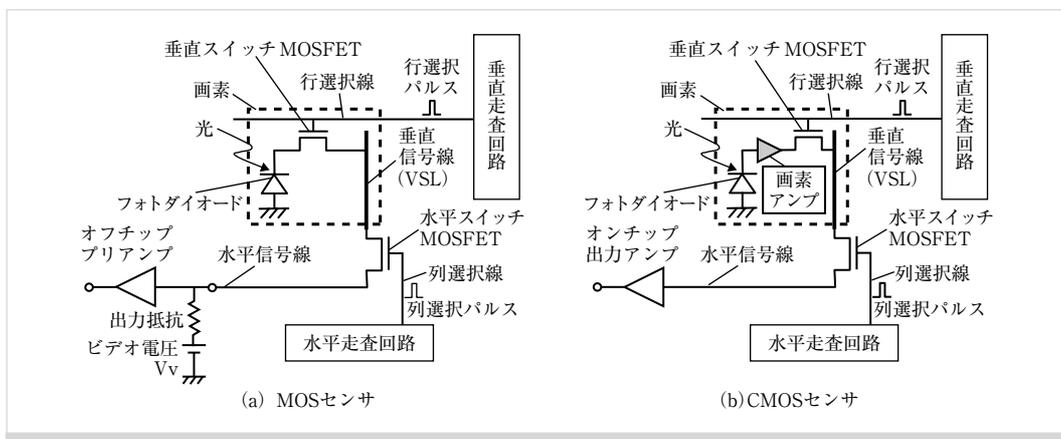


図1 動作原理図

* 本稿の著作権は著者に帰属致します。

"Fundamentals of Image Input Device Technologies (3): Introduction to CMOS Image Sensors" by Takao Kuroda (Osaka)



がわかる。圧倒的に先行したMOSセンサであったが、感度としてのS/Nの劣勢によって1990年頃に表舞台から姿を消した。

3. CMOSセンサの原理

MOSセンサは、垂直信号線で大きな雑音に加わるのならば、その前に低付加雑音で信号を増幅すれば、以降の雑音の影響を増幅率の逆数倍に抑えられるという考え方が基本である。そのために、図1(b)に示すように、画素内で“信号電荷量”を画素アンプで増幅¹⁾する。原型は1968年に提案⁶⁾されたが、日本ではNHKの安藤たちによって孤軍奮闘的に開発⁷⁾が進められ、国際的にCMOSセンサの第一号とされている⁸⁾。

増幅アンプとしては、図2に画素とともに示すソースフォロワアンプ(SFA)が一般的に使われる。画素はSFAの増幅トランジスタ(Tr)、そのゲート入力に接続されたPD、PDの電位をリセットするリセットトランジスタ(RST)、増幅TrとのペアでSFAを構成する負荷Trとを導通状態にする行選択Trで形成される。増幅Trの閾値電圧をVth、SFAの電圧ゲインをGv、増幅Trのゲート入力電位をVinとすると、SFAの出力である増幅Trのソース端子の出力電圧Voutは次式¹⁾で表せる。なお、信号電荷は電子とする。

$$V_{out} = (V_{in} - V_{th}) \cdot G_v \quad (1)$$

アンプという名前であるが、SFAの電圧ゲインは1以下(0.7~0.9程度)であり、高い入力インピーダンスと低い出力インピーダンスをもつバッファアンプである。

ここで、SFAの入力側と出力側の容量をそれぞれ、Cin、Cout、入射光で発生した信号電荷量をQsig、Coutに蓄えられる電荷量をQoutとし、議論を簡単にするためにVth=0、Gv=1とすると、式(1)はVout=Vinとなり、Qsig/Cin=Qout/Coutとなる。ここで、電荷量の増幅率をGQ=Gout/Qinで定義するとGQ=Cout/Cinとなる。すなわち、出力容量の入力容量に対する比で電荷量が増倍される。この比は10²~10⁴程度であり、それを10³とすると、以降の段階で1,000電子の雑音が付加されたとしても信号電荷量がすでに1,000倍に増幅されているので、元々の信号電荷量にとっては実質的に電子1個だけの雑音に加わるのと同じことになり、CCDと同等以上のS/Nが得られるようになる。

リセットされた、すなわち信号がないときのPDの電位を電源電圧Vddとして式(1)を信号電荷量Qsigで表すと、

$$V_{out} = (V_{dd} - V_{th} - Q_{sig}/C_{in}) \cdot G_v \quad (2)$$

となり、図3に示すように、光量が0の時は(Vdd-Vth)・Gvで、光量の増加とともに傾きが-Gv/Cinの直線になる。

この式には、各画素の増幅Trの固有の閾値Vthが現れている。これはTrごとに異なる値で、同一チップ内で10~100mV程度のばらつきがある。図3の破線は、実線の出力線の画素とは異なる画素の出力で、Vthの差だけ上下にずれ

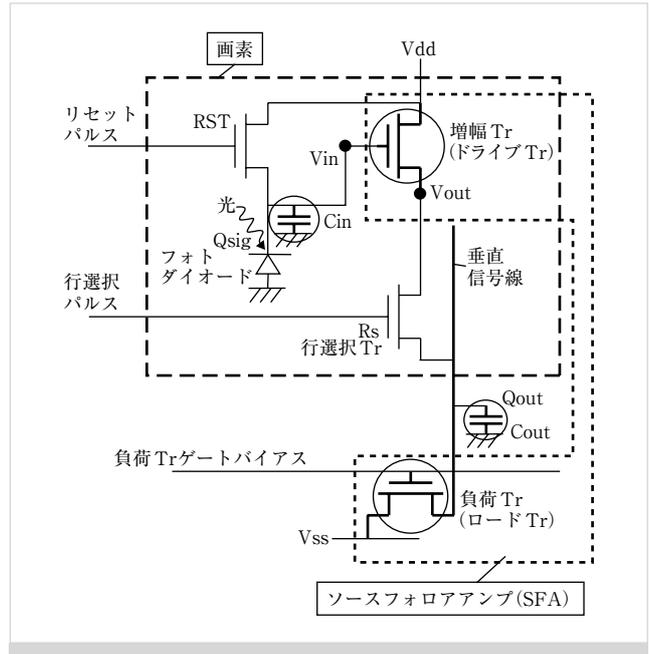


図2 CMOSセンサの画素構成(3 Tr構成)

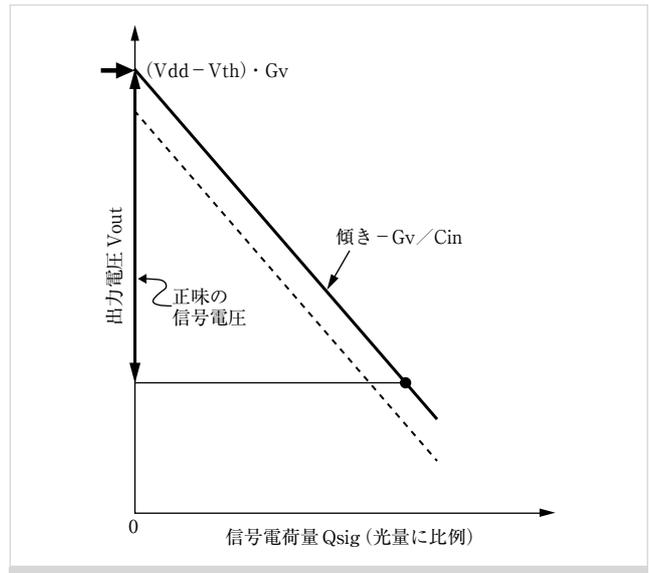


図3 出力電圧の信号電荷量依存性

る。画素の数だけ出力線が存在する。よって同じ光量(同じQsig)であっても、各画素の出力がばらついた固定パターン雑音(FPN)となる。飽和出力電圧が数百mV程度なので、出力をそのまま使うとS/Nが低いために、通常の用途では実用に耐えず、それが実用化を阻んできた一面もある。

幸いこれはオフセットばらつきなので、画素ごとに信号電荷があるときの出力とないときの出力の差を取ればキャンセルできることは、式(2)からも明らかである。

これを実現する主な回路例を図4に示す。図4(a)は、信号電荷があるときとないときの出力電圧をそれぞれ容量Cs

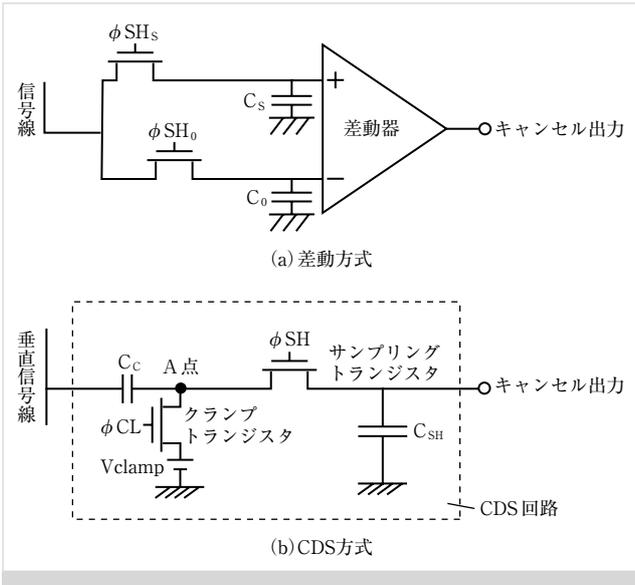


図4 オフセットばらつきキャンセル方式

と C_0 にサンプリングで保存して同時化し、差動回路で差分を得る作動方式⁹⁾である。回路規模的に各列に形成することは困難なため、通常はセンサの出力部に共通の差動回路として形成されるか、オフチップの差動回路が用いられる。しかし、信号電荷のある時とない時の2系統の信号を読み出すので、通常の10~30 MHz程度の信号出力の2倍の周波数で出力する必要があり、雑音帯域的には不利である。

図4 (b) に、CCDの出力のリセット雑音の除去用途に開発され、CMOSセンサのFPN除去にも展開¹⁰⁾された相関二重サンプリング回路(CDS)¹¹⁾を示す。動作は、差分を取りたい二つの信号のうちの一つ目の信号電圧が入力されているときに、クランプTrにクランプパルス ϕ_{CL} を印加して、A点の電位を強制的にクランプ電圧 V_{clamp} に設定してからクランプTrをoffにする。次いで二つ目の信号電圧が入力されると、カップリングコンデンサ C_c があるので、交流成分すなわち変化分だけがA点に届く。A点の電位は(固定電圧 V_{clamp} + 変化分)となるので、それをサンプリングTrにサンプリングパルス ϕ_{SH} を印加して、サンプリング容量 C_{SH} で保持する。このようにして二つの信号の差分が得られる。CDS方式はオンチップで列ごとに設けることができる回路規模なので、列内で差分信号を得ることができる。また、この処理は列並列で行われるので数百kHz程度の狭帯域のため、雑音面でもメリットがある。

4. 4トランジスタ画素構成CMOSセンサ

上では、画素に三つのトランジスタを有する3トランジスタ(3Tr)画素で説明したが、CCDを凌駕するようになった高画質用途で使われているのは4トランジスタ(4Tr)画素である。構成を図5に示すように、4Tr画素では、3Tr画素のPDと増幅Trの間に独立した拡散容量(Floating

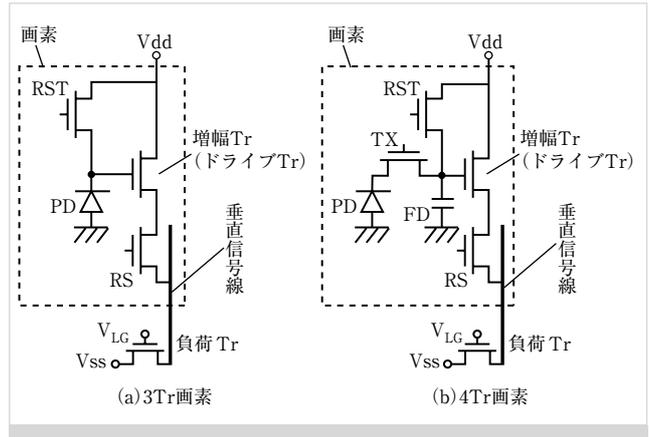


図5 画素構成比較

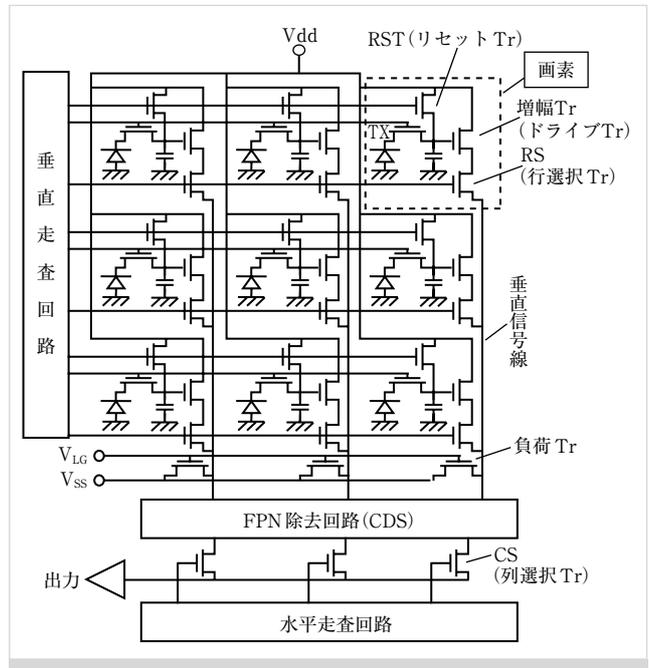


図6 4Tr画素CMOSセンサ素子構成図

Diffusion: FD) とPDに集積された信号電荷のFDへの転送を制御する読出しトランジスタTXが設けられている。

図6に素子構成図、図7(a)に断面構造機能模式図、図7(b)にその電位分布による動作模式図を示す。図7(b)の①は、露光が終了した段階で、PDには信号電荷 Q_{sig} が集積されており、FDには露光期間中に蓄積された雑音電荷がある。②で選択された行の画素のリセットトランジスタにリセットパルス ϕ_R が印加され、FDの雑音電荷が排出されるとともにFDが電位 V_{dd} にリセットされる。さらに行選択トランジスタRSに行選択パルスが印加されて、SFAが導通状態になり、リセットされたFD電位が③でSFAから出力される。④で選択された行の画素のTXに垂直走査回路から読出しパルスが印加され、PDの信号電荷がFDに

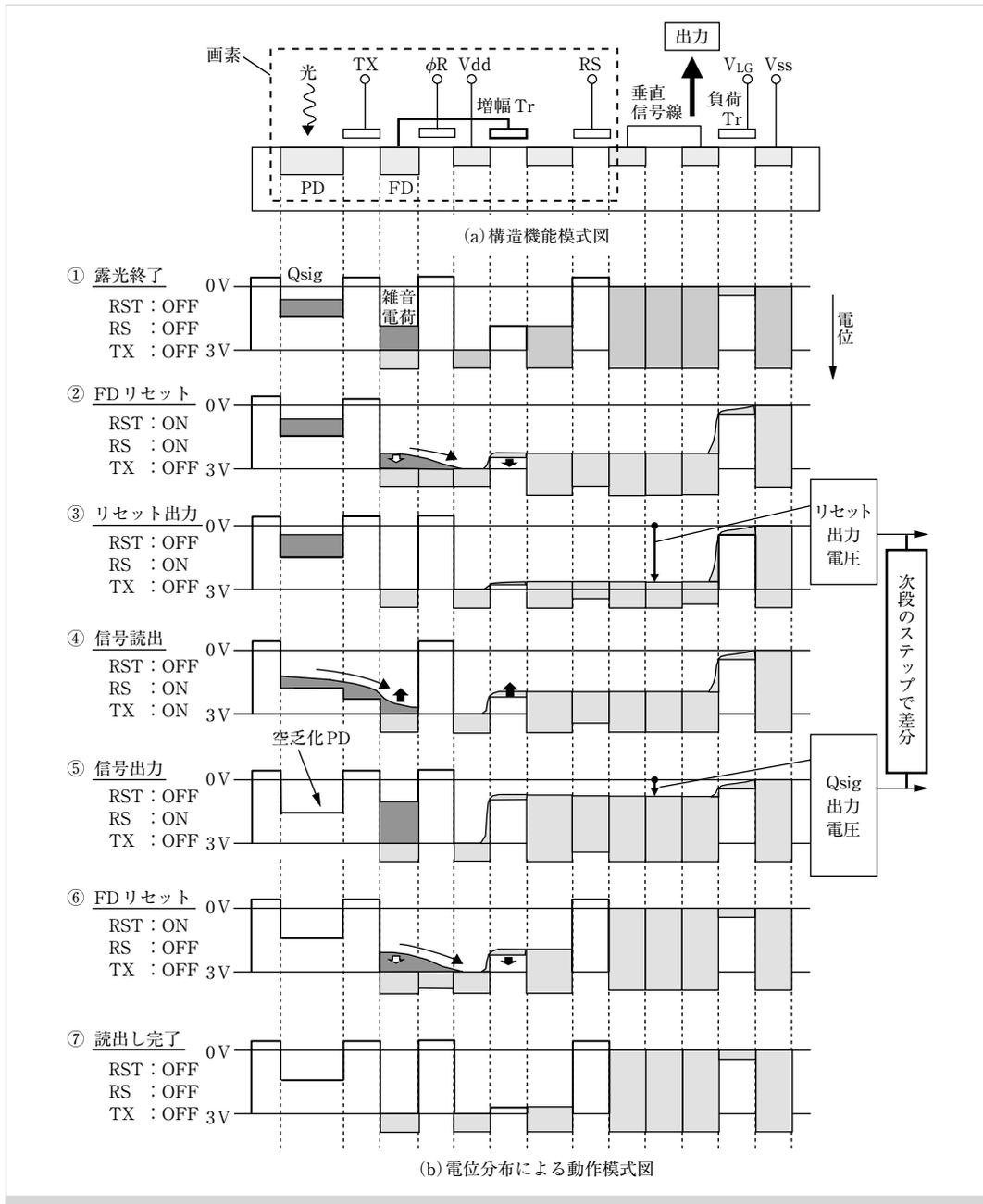


図7 4 Tr画素CMOSセンサ素子の1画素出力の動作模式図

転送されてFDの電位が低下する。⑤で信号電荷が入ったFDの電位がSFAから出力され、次のステップでリセット出力と信号出力の差分がCDS回路で得られる。最後に⑥でFD内の信号電荷Qsigをリセットして、⑦で読出し動作を完了する。

このように4 Tr画素センサでは、リセットされたFD電位が先に出力され、その同じリセット状態のFDに信号電荷が転送された状態の電位が出力される。この二つの電位に含まれるリセット雑音(kTC雑音¹⁾の一種)は同一なので、CDS動作で増幅TrのVthばらつきに起因する固定パターン雑音だけでなく、FD部のリセット雑音も除去することができる。

それに対して、3 Tr画素では先に信号電荷の電位が出力されて、それとは異なるリセット動作によるリセット電位が出力されるので、二つの出力のリセット雑音が異なり、相関性がない¹⁾ので、リセット雑音は除去されず、Vthばらつき起因のFPNの除去のみが可能である。

また、4 Tr画素では、3 Tr画素のようにPDに金属配線コンタクトを直接取る必要がないので、PDの表面を高濃度のp⁺層で覆う埋込みフォトダイオード¹²⁾を採用して、低暗電流の完全転送PDを構成できるのも大きなメリットである。ただし、こうしたCCDの画素プロセス技術を用いることは、当初喧伝されていた安価なCMOSロジック用プロセス技術では製造できなくなったことを意味している。

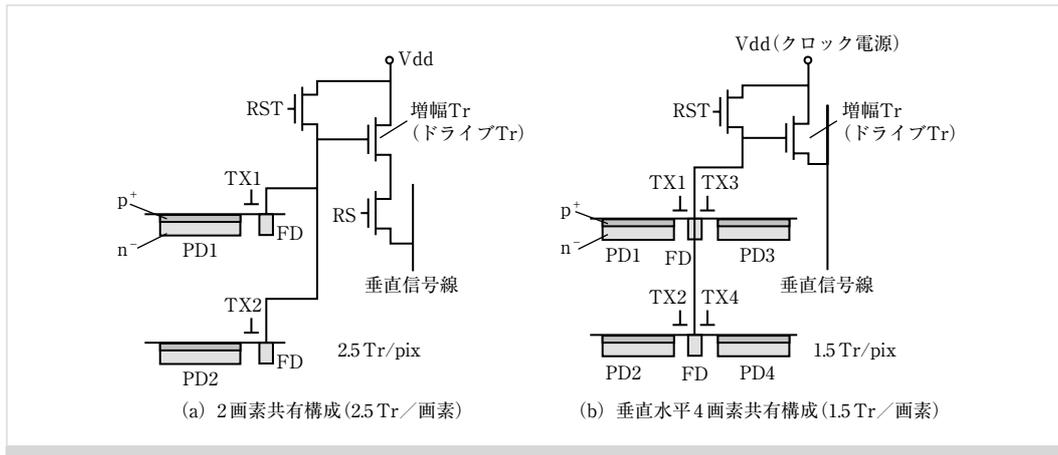


図8 画素共有構成の例

5. 画素共有技術

すでに述べたように、実用的な画質のCMOSセンサでは1画素に四つのトランジスタが必要であり、CCDやMOSセンサに比べて画素微細化には不利であり、このため0.35 μm プロセス程度の微細 Tr 技術が実現するまで CMOS センサは登場できなかったといえる。しかし、図8 (a) に示すように、リセット Tr、増幅 Tr および行選択 Tr を複数の画素で共有する画素共有技術¹³⁾が提案された。本例では2画素で5 Tr なので、2.5 Tr/画素となる。さらに図8 (b) に示すように、四つの画素で共有し、行選択 Tr を廃することによって1.5 Tr/画素となる例もある。動作は電源をクロックで与えて、選択しない画素のFDを飽和状態より低い電位に設定することによって、実質的に非選択状態とする。こうした努力によって、CMOSセンサは画素微細化でもCCDを凌駕してきている。

6. アナログ出力センサのカラム増幅型ノイズキャンセラ

CMOSセンサは、画素で信号電荷を増倍することでS/Nを大幅に向上させたが、さらに、CDS回路以降の雑音の影響を低減するための手法として提案されたのが、列ごとに増幅器を形成する方式で、図9に示すのは、増幅とCDSの両方の機能を有する方式¹⁴⁾である。まず、画素のFDがリセットされた状態でカラムアンプノイズキャンセラの ϕ_1 と ϕ_2 をON状態にして、カラムアンプの入力部をクランプする。次に ϕ_2 をOFFにしてから画素のTXに転送パルスを印加してPDの信号電荷をFDに読出すと、カラムアンプノイズキャンセラの出力に増幅された差分信号が得られる。このときのアンプ増幅率Gは $G=C1/C2$ で与えられる。増幅率が高い方が雑音低減効果が大きい、飽和しないように入力信号レベルに応じてC2の大きさを適応的に選択する。カラムアンプは各列で並列処理されるため、数百kHzの帯域でよいので、画素のソースフォロワアンプ

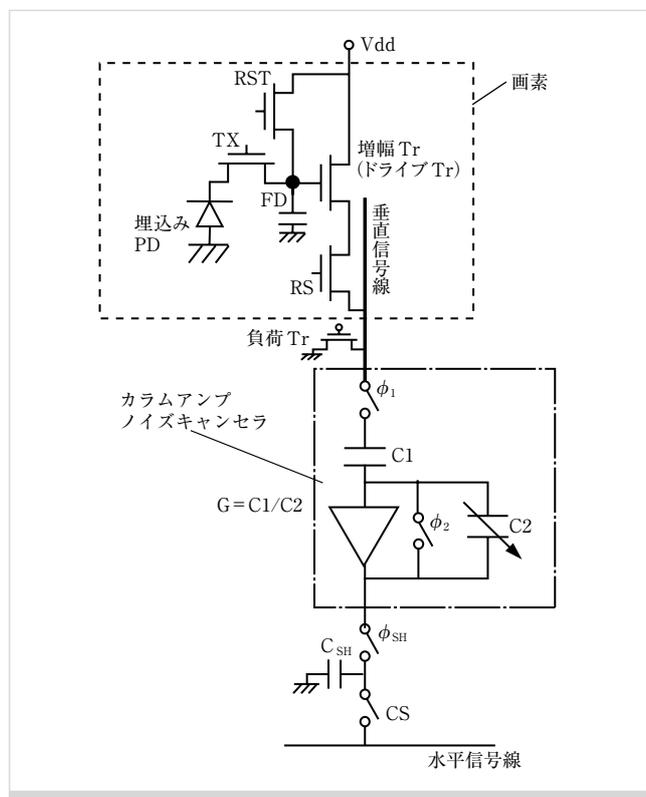


図9 増幅型ノイズキャンセラ (カラムアンプ方式)

の熱雑音などの前段までの広帯域雑音の高域成分を軽減するとともに、カラムアンプ自身とノイズキャンセラの雑音を低減することができる。

7. デジタル出力センサのカラムレベルAD変換器

イメージセンサは、システムに組み込まれた座標点に降り注ぐ光量を計測しており、現状の光量に応じて発生した信号電荷の計量はアナログ量である。しかし、さまざまな信号処理や相互運用性にはデジタル信号が遙かに優れており、



いずれかの段階でデジタル化される。このデジタル化は、CCDではセンサ出力以降で行われていたが、CMOSセンサでは機能回路を搭載できる特長を活かして、センサ内で行う素子が大勢を占めるようになった。デジタル化する段階は、素子出力、カラム、画素の各レベルがあるが、ここでは代表的なカラムレベルでデジタル化するシングルスロープスロープ積分型AD変換器を用いた例^{15) 16)}を紹介する。図10にブロック図を、図11に動作タイミング図を示す。動作は、まず画素のFDがリセットされた段階で、

カップリングコンデンサを介して画素出力が接続された比較器の入力と出力をアナログクランプTrで接続し、リセットレベルの信号をクランプする。これはCDSのクランプ動作と同じで、比較器の入力としてのリセットレベルのばらつきが除去されるため、次に述べるリセットレベルのAD変換時間の短縮に有効である。ランプ波のレベルが画素出力に一致して比較器出力が反転するまでクロック数をカウントすることによって、リセット信号のAD変換が行われる。リセット信号のカウントは、アップ/ダウン切替え信号でダウンカウントされる。つぎに、PDから信号電荷がFDに読み出されて、画素出力にはデータ信号が出力される。ここでリセット信号と同様にAD変換されるが、データ信号はリセット信号とは逆にアップカウントされる。これによって、図11のカウンタ出力が示すように、最終的にはデータ信号からリセット信号を差し引いたデジタル信号が得られる。このようにデジタル領域で差分を取るの、デジタルCDSとよばれる。こうして得られたデジタルデータは、各カウンタに設けられたラッチ回路に転送され、次行のAD変換とパイプライン処理によって水平データが転送される。

このように、CDS回路のばらつきによらない高精度の雑音除去とともに並列処理のAD変換のため、狭帯域なので雑音特性的にも有利である。また、高速クロックによるAD変換によって、28Mと大きな画素数でも180fpsの高フレームレートを可能とした。デジタル分解能は12ビット、デジタルCDSによって列FPNは0.5電子とされる。シングルスロープ型は、回路構成が簡単なため微細画素ピッチのセンサに対応しやすく消費電力も低い、分解能を上げると変換時間がかかるため、さらなる高速性と高分解能の両立は難しいという面がある。こうした事情に対応するために、他にも逐次変換型ADC¹⁷⁾、サイクリック型ADC¹⁸⁾、 $\Delta\Sigma$ 型ADC¹⁹⁾など、他の方式のADC¹⁾を用いたセンサも開発されている。

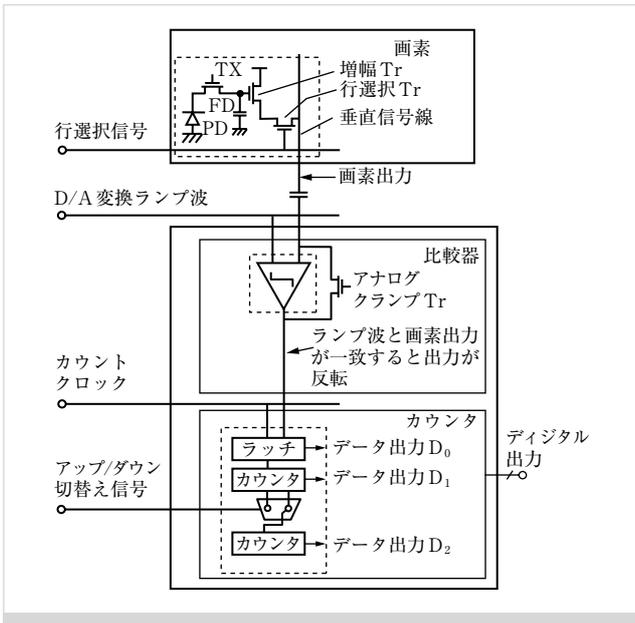


図10 シングルスロープ積分型列並列AD変換器方式センサのブロック図

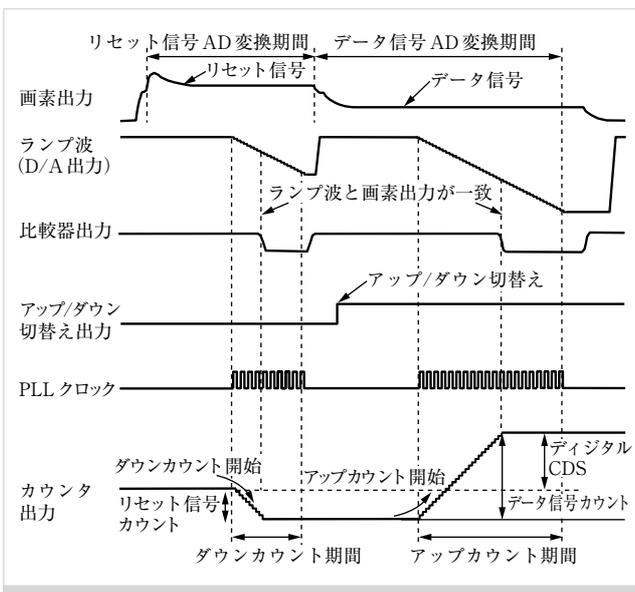


図11 シングルスロープ積分型列並列AD変換方式センサのデジタルCDSのタイミング図

8. CMOSセンサの電子シャッター

電子シャッターは、露光時間長とそれによる露光量調整機能としてセンサには必須になっている。CCDではすべての画素の露光タイミングが等しい。CMOSセンサはX-Yアドレス方式のために、図12(c)のように露光タイミングが行ごとに順次ずれる。その結果、図12(a)の扇風機が回転中に静止画撮像すると図12(b)のような画像が得られる。こうした状況を避けるために、多くのデジタルカメラでは光学シャッターで露光制御をしているが、CCDと同様のフレームメモリー機能を持たせたCMOSセンサの開発も進められている。

9. まとめ・今後の展望

2000年代前半に携帯電話にCMOSセンサが搭載された頃

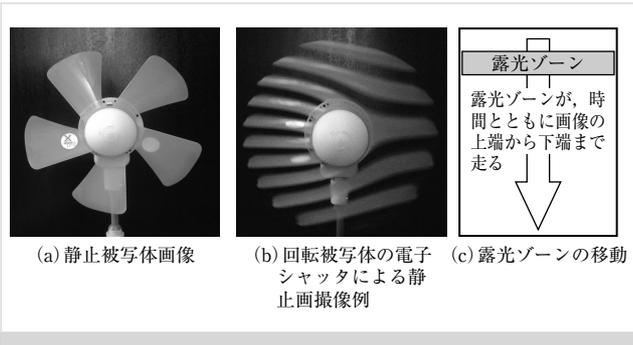


図12 CMOSセンサによる回転被写体の静止画撮像例

は、低画質の評価が定着した感があった。しかし、画素での信号電荷量の増倍によって、高 S/N を志向するCMOSセンサが、完全転送の高 S/N を活かすべく高 S/N のPDを追求したCCDと同じ道程を辿ることは技術的必然¹⁾であった。

紙幅の関係で触れなかったが、裏面照射型(BSI)²⁰⁾が高感度技術の決定版とする見方があったようで、少なからぬ企業が追随した。しかし、原理に基づいたしかるべき技術開発をすれば¹⁾、表面照射型(FSI)で同等以上の光学特性(感度・入射角依存性等)が得られることが実証²¹⁾、実用化されている。このようにBSIは当初謳われた光学特性の優位性(画素微細化を含む)が維持されておらず、むしろ費用対効果の面から不利である。白黒カメラ用センサに有利な技術が単板カラーシステムにもそのまま有効とは限らない例¹⁾の一つである。BSIには固有の技術課題と重い製造ラインが伴うため、関係者には相応の覚悟が必要である。こうした中で提案された積層型²²⁾は、必ずしもBSIの固有技術とは言えないものの、BSIとの親和性から有力なカバー手段になると期待¹⁾される。

現在は4Tr画素構成が主流であるが、埋込みPDの原理からわかるように、画素の最大信号電子数はPDのn型不純物原子の数²³⁾であり、画素の微細化とともに減少する。この課題や必ずしも理想的な感光材料とは言えないシリコン¹⁾からの脱却を目指した3Tr画素への挑戦^{24)~26)}も進められている。

今後も洞察力と努力による知恵の出現が期待される。

(2013年11月29日受付)

【文 献】

CMOSセンサの教科書としては、映像情報メディア学会基幹技術シリーズの相澤清晴・浜本隆之編著「CMOSイメージセンサ」コロナ社(2012)。センサに必要な半導体物理から各方式のイメージセンサとシステムまでを一貫した視点で俯瞰詳述したセンサ全体の教科書としては、文献1)。

- 1) 黒田隆男：“イメージセンサの本質と基礎”，コロナ社(2012)
- 2) G.P. Weckler: "A silicon photodevice to operate in a photon flux integration mode", IEDM, 10-5 (Oct. 1965)
- 3) 増田美智雄ほか：“MOS形単板カラーカメラ”，テレビ学技報，4，41，TEBC69-1，pp1-6 (Feb. 1981)
- 4) 黒田隆男：“イメージセンサの世界における日本～日本が果たしてきた役割と歴史から学ぶこと～”，映情学誌，65，3，pp336-341 (2011)，

https://www.jstage.jst.go.jp/article/itej/65/3/65_3_336/_pdf (2013年11月現在)

- 5) 竹本一八男：“MOS型素子”，テレビ誌，40，11，pp1067-1072 (1986)
- 6) P. Noble: "Self-scanned silicon image detector arrays", Tran. Electron Devices, ED-15, pp202-209 (1968)
- 7) 安藤文彦ほか：“各受光素子ごとに増幅器をもった撮像装置”，信学全大，1159 (1981)
- 8) A. Theuwissen: "50 years of Solid-State Image Sensors at ISSCC", ISSCC Dig. Tech. Papers, S26 (2003)
- 9) N. Tanaka, et al: "A 310 k Pixel Bipolar Imager (BASIS)", ISSCC Dig. Tech. Papers, pp96-97 (1989)
- 10) J. Hynecek: "A New Device Architecture Suitable for High-Resolution and High-Performance Image Sensors", TRANS. ON ELECTRON DEVICES, 35, No.5, pp646-652 (1988)
- 11) M. White, et al: "Characterization of surface channel CCD image arrays at low light levels", J. SSC, 9, 1, pp1-12 (1974)
- 12) 寺西信一ほか：“インタライン転送方式CCDイメージセンサの残像現象”，テレビ学技報TEDB69-5, pp25 (Feb. 1981)
- 13) M. Mori, et al: "A 1/4in 2M Pixel CMOS Image Sensor with 1.75 Transistor/Pixel", ISSCC pp80-81 (Feb. 2004)
- 14) S. Kawahito, et al: "A Column-Based Pixel-Gain-Adaptive CMOS Image Sensor for Low-Light-Level Imaging", ISSCC, 12.7, pp224-225 (2003)
- 15) S. Yoshihara, et al: "A 1/1.8-inch 6.4MPixel 60 frames/s CMOS Image Sensor with Seamless Mode Change", ISSCC, 27.1, pp1984-1993 (2006)
- 16) Y. Nitta, et al: "High-Speed Digital Double Sampling with Analog CDS on Column Parallel ADC Architecture for Low-Noise Active Pixel Sensor", ISSCC, pp2024-2031 (2006)
- 17) S. Matsuo, et al: "A Very Low Column FPN and Row Temporal Noise 8.9 M-Pixel", 60 fps CMOS Image Sensor with 14bit Column Parallel SA-ADC, Symposium on VLSI Circuits, pp138-139 (2008)
- 18) J. Park, et al: "A High-Speed Low-Noise CMOS Image Sensor with 13-b Column-Parallel Single-Ended Cyclic ADCs", TRANS ELECTRON DEVICES, 56, 11, pp2414-2422 (2009)
- 19) Y. Chae, et al: "A 2.1 M Pixels, 120 Frame/s CMOS Image Sensor with Column-Parallel 16 ADC Architecture", J. Solid State Circuits, 46, 1, pp236-247 (2011)
- 20) S. Iwabuchi, et al: "A Back-Illuminated High-Sensitivity Small-Pixel Color CMOS Image Sensor with Flexible Layout of Metal Wiring", ISSCC, 16.8, pp.1171-1178 (2006)
- 21) H. Watanabe, et al: "A 1.4 μ m front-side illuminated image sensor with novel light guiding structure consisting of stacked lightpipes", IEDM, pp179-182 (2011)
- 22) S. Sukegawa, et al: "A 1/4-inch 8Mpixel Back-Illuminated Stacked CMOS Image Sensor", ISSCC, pp484-486 (2013)
- 23) T. Kuroda: "Essential Principles of Image Sensors", CRC Press/Taylor & Francis (2014上梓予定)
- 24) S. Isono, et al: "A 0.9 μ m Pixel Size Image Sensor Realized by Introducing Organic Photoconductive Film into the BEOL Process", International Interconnect Technology Conference, paper ID 3030 (June 2013)
- 25) M. Mori, et al: "Thin Organic Photoconductive Film Image Sensors with Extremely High Saturation of 8500 Electrons/ μ m²", 2013 SYMPOSIUM ON VLSI TECHNOLOGY, 2-4, pp22-24 (June 2013)
- 26) M. Ishii, et al: "An Ultra-Low Noise Photoconductive Film Image Sensor with a High-Speed Column Feedback Amplifier Noise Canceller", 2013 Symposium on VLSI Circuits, 2-3, pp8-9 (June 2013)



くろだ たかお
黒田 隆男 1978年、大坂大学大学院基礎工学研究科博士課程物理系物性修了。同年、松下電器産業(株)入社。電子研究所にて、CCD等のイメージセンサの研究開発に参画開始。2006年、パナソニック・セミコンダクター社イメージセンサビジネスユニット・アドバイザ。2006年～2008年、ISSCC IMMD subcommittee member。当会フェロー認定会員。

画像入力用光学デバイスの基礎 I

～レンズ～

河合 滋†

1. まえがき

昨今の高画質のビデオカメラで話題になるのは撮像素子であるが、結像するためのレンズにも限界の性能が要求されている。レンズの結像を悪くする要因は、収差と回折に分けることができる。これらをまとめて光学伝達関数(OTF: Optical Transfer Function)で表現することができる。回折の大きさは、レンズの口径に反比例するため、その影響を小さくするには、レンズを大きくする必要がある。また、レンズの口径を大きくすることにより、収差を小さくすることもできる。一方、レンズを大きくすれば、重量やコストの点でデメリットになることは言うまでもない。

本稿では、結像を中心に、主にビデオカメラに用いられている写真レンズの基礎について述べる。

2. レンズの結像

光学系の中の光線の屈折や反射を扱う学問を幾何光学、光を波として扱う学問を波動光学と呼び、収差は幾何光学、回折は波動光学によって記述することができる。

2.1 幾何光学的な結像

幾何光学的な結像は、フェルマ(Fermat)の原理によって説明することができる。これは、光は光路長(距離に屈折率を乗じた物理量)が最短となる道筋を進むという、幾何光学の根幹をなす原理である。光が空気中からレンズに入る時、光の進む速度が変わるため、フェルマの原理によって曲がることになる。これを屈折の法則と呼ぶ。光学系における光の伝搬は、局所的に見れば、光が直進する部分と屈折・反射する部分に分けることができる。これらを順次計算することを光線追跡と呼び、これにより光学系の中を光線がどのように進むのか知ることができる。

幾何光学によって説明できる収差は、分散(波長によって屈折率が異なること)による色収差と、レンズの表面形状による単色収差に分けることができる。

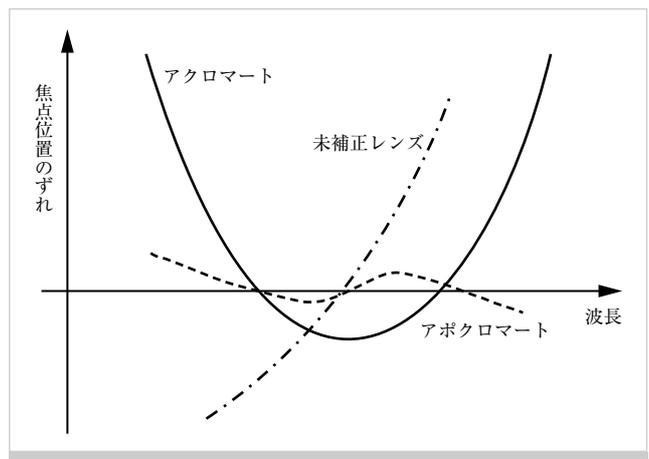


図1 色消しレンズの焦点位置のずれ

2.1.1 色収差

例えば、白色(すべての波長の光が混ざっている状態)の平行光がレンズに入射すると、分散によって、短波長の光が手前に集光することになる。すなわち、短波長の光における焦点距離が短くなる。これを(軸上)色収差と呼ぶ。通常、可視光の中心波長とされる黄色のHe-d線(587.6 nm)における焦点距離を設計値に合わせる。

色収差を低減したレンズを総称して色消しレンズと呼ぶ。例えば、屈折率とアッベ数(平均分散)が異なる凸レンズと凹レンズを貼り合わせることによって低減させることができる。これをアクロマート(Achromat)と呼ぶ。こうすると、図1に示すように、色消しをしないと波長が長くなるにしたがって焦点距離が単純に長くなるのに対し、任意の2波長で焦点距離を設計値に合わせることができる。通常、長波長の代表である赤色のH-C線(656.3 nm)と短波長の代表である青緑色のH-F線(486.1 nm)における焦点距離とする。

さらに、着目している波長領域での部分分散比(低屈折率側の分散と高屈折率側の分散の比)を等しくすると、図に示すように3波長で焦点距離を設計値に合わせることができるが、通常の光学材料では部分分散比は波長に比例するため、それらを等しくすることができない(正常部分分散特性)。蛍石やED(Extraordinary Dispersion)ガラスに

†株式会社オプト・イーカレッジ

"Fundamentals of Image Input Device Technologies (4): Fundamentals of Image Input Optical Device Technologies I: Lens" by Shigeru Kawai (Opto eCollege Corporation, Tokyo)



代表される、異常部分分散特性をもった材料を使うと、このような色消しが実現され、このようなレンズをアポクロマト (Apochromat) と呼ぶ。アポクロマトの色収差は非常に小さく、実用上、無収差ということができる。

2.1.2 単色収差

大きな単色収差は5つ(球面収差、非点収差、像面湾曲、歪曲、コマ)に分類することができ、19世紀半ばにそれらを研究したドイツの数学者の名前を取って、ザイデル (Seidel) 収差と呼ばれている。これらの収差を直感的に理解するために、図2に単レンズ(屈折面が球面である単一のレンズ)に平行光を入射した場合の光路図を示す。

軸上に集まる光に着目すると、レンズの周辺から屈折した光が手前に集光していることがわかる。これを球面収差 (Spherical Aberration) と呼ぶ。屈折面や反射面が球面であるために生じるもので、軸上で発生する唯一の収差である。

軸外の結像は、光軸(光学系の中心軸)と主光線(光線束の中心軸)の関係から、2つに分けることができる。図3に示すように、光軸と主光線を含む面をメリジオナル(タンジェンシャル、子午平)面、それと直交する面をサジタル(球欠平)面と呼ぶ。メリジオナル面における光線の伝搬は、この面が光軸と主光線を含んでいることから、光軸と主光線が一致するサジタル面よりも重要である。

図2において、軸外で集まる光は、軸から離れるにしたがって集光位置がレンズに近づいていることがわかる。これを像面湾曲 (Field of Curvature) と呼ぶ。この光路図は、メリジオナル面を見ていることになるが、ザイデル収差の中に非点収差 (Astigmatism) と呼ばれるものがある。図4に示すように、この収差により、光は、メリジオナル面とサジタル面で異なる位置に集まるため、それぞれの面で線状に集光する。図2の光路図では、これらの光線が混在している。サジタル面よりもメリジオナル面の湾曲が大きく、像面湾曲は、それらが平均化されたものである。

もう一度図2に戻り、軸外の光線の集光の様子を見ると、球面収差のように一点に集まらず、さらに光線が軸の外側に向かってばらけているのがわかる。これをコマ (Coma) と呼ぶ。碁盤の目に配列された点像を結像した時の像は、図5 (a) のようになり、彗星が軸の外側に向かって尾を引いているように見えることから、コマと呼ばれている。内側に尾を引いている場合もあり、尾の向きによって、外向性または内向性と呼ばれる。

図2の光路図により、5つのザイデル収差の内の4つの性質を理解することができるが、残りの歪曲 (Distortion) だけは、わからない。歪曲は、横倍率(物体に対する像面での像倍率)が像面上の軸からの距離に比例する収差である。図6は、歪曲をもった光学系により、碁盤の目のパターンを結像した例である。横倍率が高くなる場合と低くなる場合があり、それぞれ、糸巻型および樽型と呼ばれている。

これらの収差は、それぞれ特徴があり、レンズの開口の大

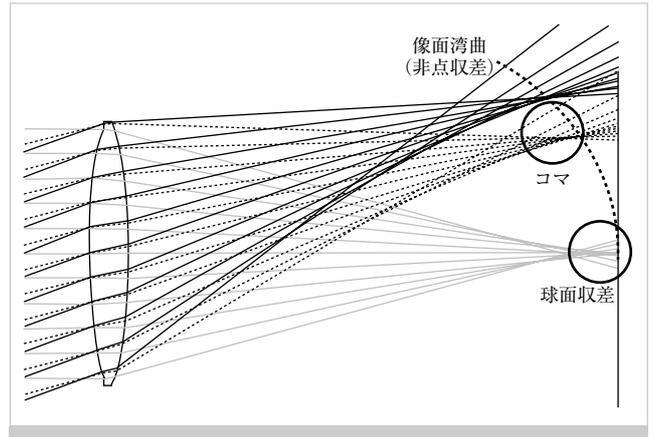


図2 単色収差の例

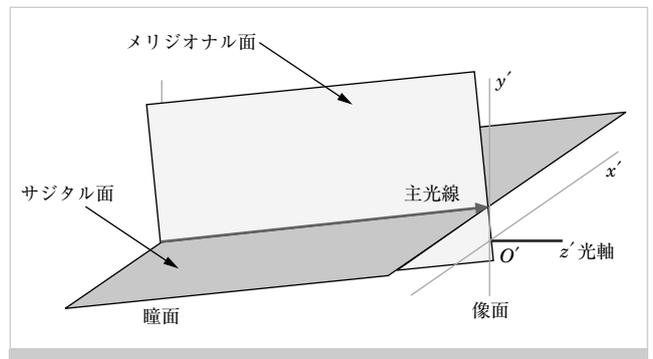


図3 メリジオナル面とサジタル面

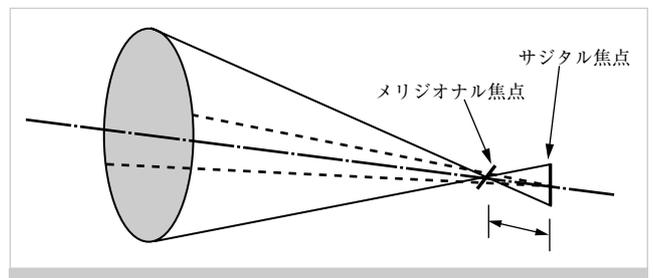


図4 非点収差

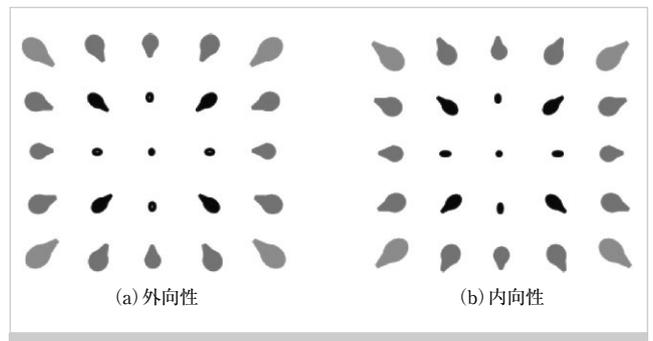


図5 コマ

きさと主光線の軸に対する角度に依存する。光学系を通過した波面は、図7に示すように、レンズ面の極座標を (r, θ) 、

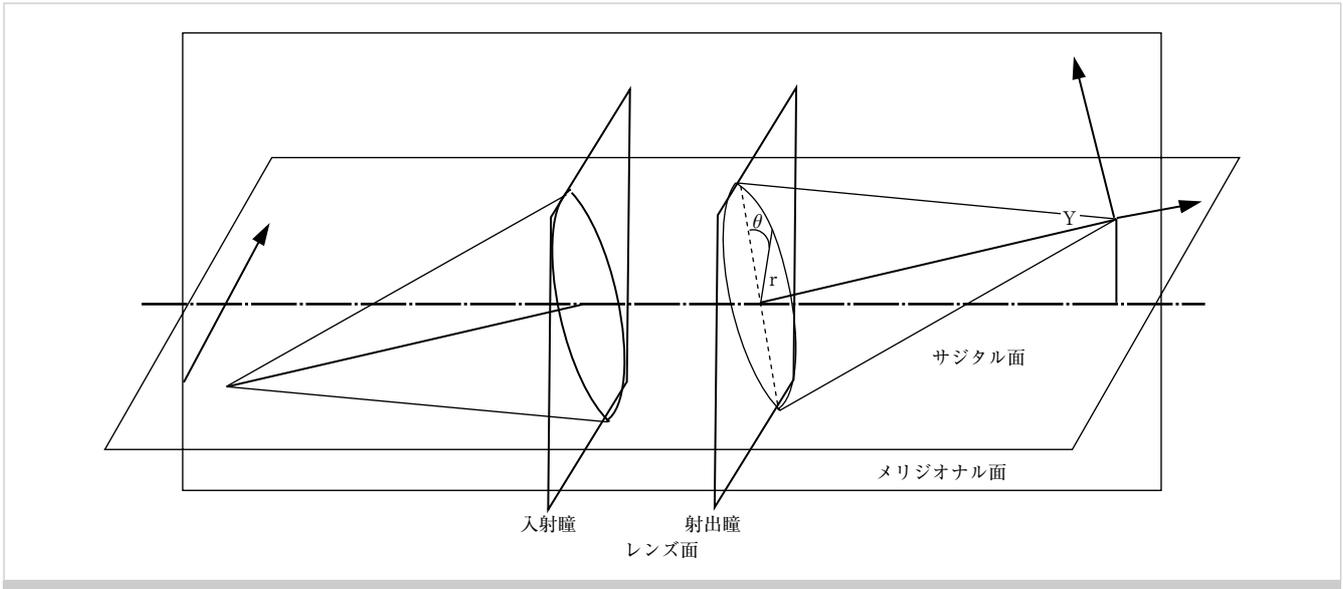


図7 波面収差

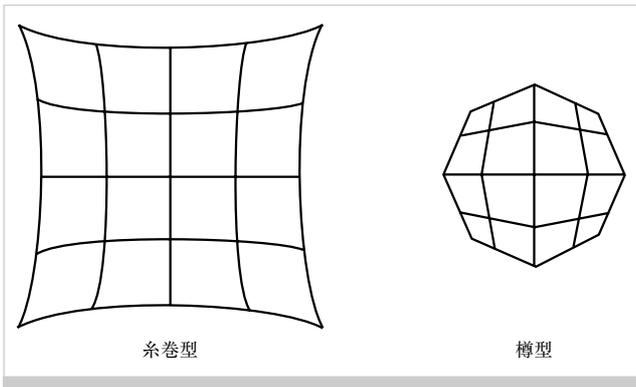


図6 歪曲

理想的な主光線が像面を横切る光軸からの距離を Y とすると、次式で表すことができる。

$$W(r, \theta, Y) = c_1 r^4 + (c_2 \cos^2 \theta + c_3) Y^2 r^2 + c_4 Y^3 r \cos \theta + c_5 Y r^3 \cos \theta \quad (1)$$

レンズを通過した後の波面は、点に集光させるため、収束球面波になっていることが望ましいが、実際は、そこからずれている。式(1)で表される W は、実際の波面と球面波のずれを光路長で表した物理量で、波面収差と呼ばれている。この値がゼロになると無収差ということになる。 c_1 から c_5 までの係数が、それぞれ、球面収差、非点収差、像面湾曲、歪曲、コマに相当する。ここで注意したい変数は、 r と Y であり、それぞれ、レンズの開口の大きさと主光線の傾きを表していることになる。表1は、ザイデルの各収差の特徴をまとめたものである。それらの係数の次数を見ると、例えば、球面収差は主光線の傾きに依存せず、軸上でも存在する唯一の収差であることや、歪曲は開口の大きさに依存しないので、絞りによる効果はない、ことなどが

表1 ザイデル収差の特徴

種類	光線の様子
球面収差	
非点収差	
像面湾曲	
歪曲	
コマ	

わかる。

2.2 波動光学的な結像

光学系の中を伝搬するさまざまな光線を追跡して、像面上の通過点を求めたものをスポットダイヤグラムと呼ぶ。



この図から多くの情報が得られる。点光源の理想的な像は点であるから、これを空間的なデルタ関数と考えれば、スポットダイヤグラムは、点像からの劣化の様子を表していることになる。したがって、これをフーリエ変換すると空間的な伝達関数が得られる。これをOTFと呼ぶ。

OTFは、通常の伝達関数と同じように周波数領域での系の劣化の様子を表していることになるが、光学系の座標は空間軸であるから、空間的な周波数ということになる。これを空間周波数と呼ぶ。時間周波数が時間周期の逆数であるのと同じで、空間周波数は空間周期の逆数である。ここで言う空間周期とは、周期的な格子を考えてもらえばよい。格子のピッチをミリメートルで表せば、その逆数である本/mmが空間周波数の単位となる。この光学伝達関数の振幅部分を変調伝達関数(MTF: Modulation Transfer Function)と呼ぶ。このMTFは、ある空間周波数における光学系の解像度を表している。インコヒーレント光の場合、MTFは空間周波数に比例して劣化するが、実際には、複雑な曲線になることが多い。これをMTF曲線と呼び、これにより、その光学系の解像度を知ることができる。MTFは、さまざまなピッチの格子を撮像し、それらのコントラストを測定することによって求めることができる。

次式で表される関数を瞳関数と呼ぶ。

$$P(x,y) = |P(x,y)|e^{i\phi(x,y)} \quad (2)$$

ここで、 $|P(x,y)|$ はレンズの開口の大きさ、 $\phi(x,y)$ は収差を表し、式(1)の波面収差 W とは、光の波長 λ として $\phi=2\pi W/\lambda$ の関係がある。瞳関数をフーリエ変換することにより、回折の影響を考慮した波動光学的な結像を計算することができる。例えば、無収差のレンズの集光ビームの拡がり、は、レンズの焦点距離を f 、口径を D として、 $1.22\lambda f/D$ で表される。

3. ズームレンズ

写真レンズには、固定焦点のものと同変焦点のもの(ズームレンズ)があるが、映像用のレンズは、ほとんどがズームレンズである。ズームレンズでは、像面の位置を保ったまま、焦点距離を連続的に変化させることができる。焦点距離を変化させた時に像面の位置も変化するレンズは、可変焦点レンズと呼ばれている。像面の位置を保つ方法として、光学補正式と機械補正式があるが、写真レンズでは機械補正式が一般的である。

一般的な機械補正式は、カムによってレンズ群を不規則に移動させて焦点距離を変化させる方法である。レンズ群の数によって、大きく、2群、3群、4群に分類される。各レンズ群の変化が不規則であるために複雑なカムを必要とするが、近年の金属加工技術の進歩により、容易に実現されるようになった。主なズームレンズの構成を図8に示す。

2群ズームレンズは、前群凹レンズと後群凸レンズのレ

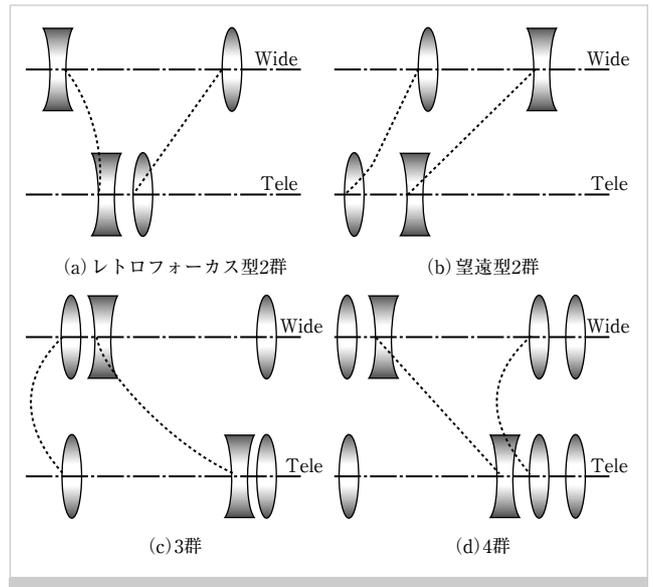


図8 ズームレンズの構成

トロフォーカス型(広角用)と、前群凸レンズと後群凹レンズの望遠型に分類される。2つのレンズ群の間隔を狭くすることによって横倍率を高くしているが、これに伴って後群のレンズから像面までの距離も変化するので、2つのレンズ群を移動させる必要がある。

3群ズームレンズは、凸凹凸構成のレンズから構成される。2群の場合と異なり、レンズの移動のさせ方はさまざま、第1群のレンズを動かすだけのものからすべてのレンズを動かすものまでである。高倍率レンズや望遠レンズに用いられている。

4群ズームレンズは、第1群がピント合わせのための焦点系、第2群が焦点距離を変える変倍系、第3群が焦点距離の変動によるピント位置のずれを補正する補正系、第4群が像を形成するための結像系である。第1群から第3群までは、焦点距離を変えるためのレンズで、結像は第4群だけで行われる。また、第1群と第4群が移動しないため、焦点距離を変えてもレンズの長さは変わらない。大口径望遠レンズなどに用いられている。

4. 収差の補正

収差を補正するには、一般に、光線が通過するレンズの数を増やし、トータルの屈折の回数を多くする。古くから、収差の小さい典型的なレンズ配列が知られており、これを基本として設計者が腕を振るうことになる。近年の光学設計ソフトウェアの進歩により、収差の詳細を理解しなくても、あるレベルまでは自動設計できるようになっている。さらに、昨今の技術進歩により、収差補正の方法が変わりつつある。

4.1 画像処理による補正

あらかじめレンズの特性がわかっているならば、収差を含ん



図9 画像処理による歪曲の補正

だ撮像画像を処理して、それを補正することが可能となってきている。前章で説明した収差の各項の振る舞いは複雑であるが、この中で、歪曲と倍率色収差(一点から出た白色光が像面において色が分かれること)は、像面内で生じる収差である。したがって、撮像した1枚の写真からこれらの補正が可能となる。

画角(撮像面内に撮影できる範囲)を広くするために歪曲を補正しないレンズを魚眼(フィッシュアイ)レンズと呼ぶ。このレンズを用いると、対角線で180°以上の画角が得られる。図9は、この魚眼レンズで撮った写真を画像処理し、歪曲を補正したものである。これは非常に極端な例であるが、このように歪曲は画像処理で補正できるようになっており、倍率色収差とともに、そのような画像処理エンジンがカメラに内蔵されつつある。このことにより、光学設計において他の収差を低減することに集中できるようになる。今後、像面を縦方向にずらした複数枚の画像から、軸上にまたがる収差を補正できるようになることも考えられる。

4.2 非球面レンズ

これまで述べてきたレンズは球面レンズであるが、近年、モールドレンズ(型を作り、射出成型によって作るレンズ)の普及により、非球面レンズが一般的になりつつある。一般に、非球面レンズを用いると、球面レンズに比べ、少ない枚数のレンズで収差を補正できる。例えば、反射鏡の場合、図10に示すように、球面を放物面にすることにより、球面収差を完全に除去することができる。

球面を除くすべての曲面が非球面ということになるが、実際には、放物面、楕円面、双曲面などの2次曲面をベースにして、必要な場合に、高次の項を付加する。このような非球面を頂点が原点となる円筒座標系(z, r)で書き表すと、次のようになる。

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (k+1)c^2r^2}} + c_1r^2 + c_2r^4 + \dots \quad (3)$$

付加するべき高次の項は、光学系が軸対称であるから、偶数次だけになり、せいぜい r の10次の項までを考えて設

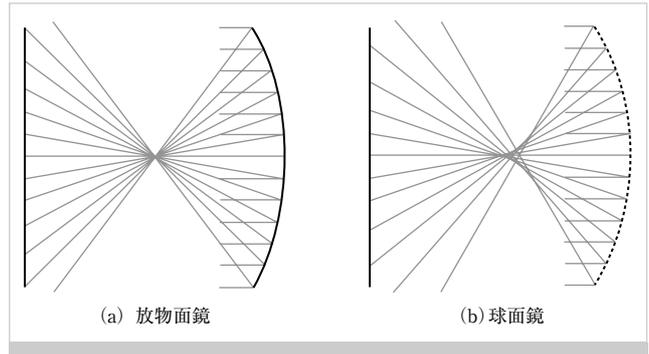


図10 反射鏡の球面収差

表2 円錐係数と離心率の関係

2次曲線	2次曲面	円錐係数	離心率
円	球面	0	0
楕円	楕円面	$> -1, < 0$ (z軸が長軸)	$> 0, < 1$
		> 0 (r軸が長軸)	
放物線	放物面	-1	1
双曲線	双曲面	< -1	> 1

計する。式(3)において、 c は球面の曲率に相当する量で、 k は円錐定数と呼ばれている。表2に示すように、 k は離心率と関係のある物理量で、 $k < -1$ の時に双曲面、 $k = -1$ の時に放物面、 $k > -1$ の時に楕円面、 $k = 0$ の時に球面となる。

5. むすび

レンズの歴史は古く、その特性は充分知り尽くされていると言えるが、周辺技術の進歩とともに、少しずつ進化を遂げている。また、携帯電話の普及とともに、すべての人がカメラを持つ時代が到来している。これまで培われてきた日本の光学技術を今後どのように展開するのか、現在、重要な局面を迎えていると言える。(2014年1月6日受付)

[文献]

- 河合滋：“レンズの基本としくみ”，ナツメ社(2012)
- 河合滋：“光学設計のための基礎知識”，オプトロニクス社(2005)
- 河合滋：“レンズ辞典&事典”，オプトロニクス社(2009)
- 河合滋：“光技術者のための基礎数学”，オプトロニクス社(2014)



河合 滋 1983年、筑波大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年、日本電気(株)光エレクトロニクス研究所入社。職業能力開発総合大学校通信システム工学科教授を経て、2012年より、(株)オプト・イーカレッジ代表取締役。尚美学園大学非常勤講師、一般社団法人国際光技術者検定協会理事。工学博士。

画像入力用光学デバイスの基礎Ⅱ

～プリズム，色フィルタを中心として～

正会員 竹村 裕夫†

1. まえがき

ここでは、撮像レンズを通った光が結像面に置かれたイメージセンサの感光面に入射するまでに設けられる光学デバイスについて記述する。

本講座の第2回、第3回で記述されてきたように、現在のイメージセンサは数多くの新技術が盛り込まれた結果、高性能、高機能な形で実用化されてきた。しかしながら、光の利用効率、波長選択特性の点で充分でなく、さらに、画素が離散的に配置されていることから生じる偽信号の発生という課題があった。最近ではイメージセンサの画素数が増加され、画像処理技術の進展により、コンピューショナルフォトグラフィという新しい技術が注目されてきた。これらを改善する光学デバイスには色分解プリズム、カラーフィルタアレイ、光学LPF、マイクロレンズなどがあり、カメラの性能向上に大きな役割を果たしてきた。

2. 色分解プリズム

画像入力に用いられるイメージセンサは色を識別する能力がないために、カラー情報を得るためには色分解プリズムや色フィルタアレイを用いる必要がある。

色分解プリズムは図1に示すような構成で用いられる。このプリズムは1960年のPhilip社による発明¹⁾で、フィリップスタイプとも呼ばれる。多層干渉膜(ダイクロイックフィルタ)と全反射を特定の角度を保った状態で、組合せることにより、コンパクトで、入射光量をほとんど損失なくRGB3色画像に効率よく分割でき、偏光が小さく、同一サイズの3色画像が得られるなど、数々の特徴がある優れものである。このため、放送局用のカラーカメラを始め、性能を重視するカメラに数多く使われてきた。

さらに、CCDやCMOSイメージセンサが使われるようになると、ミクロンオーダーで、正確に位置合わせをした上で、

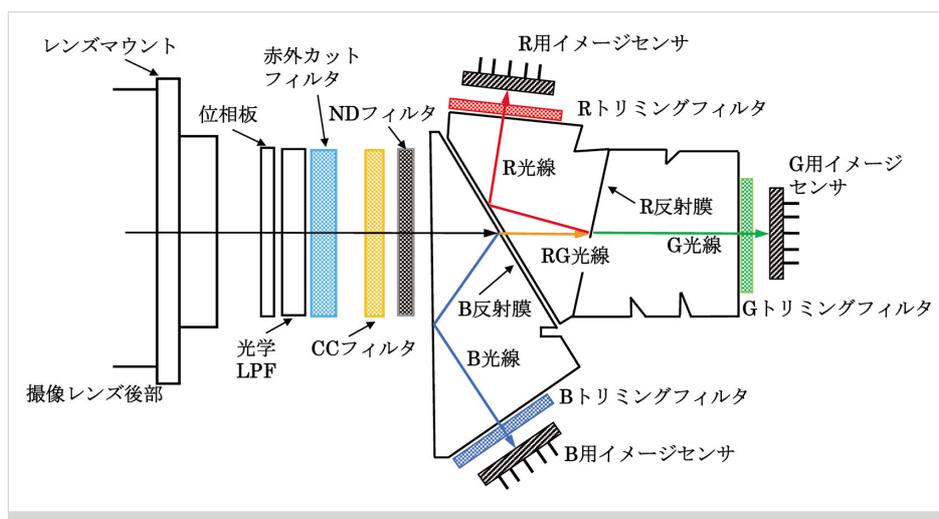


図1 色分解光学系の基本構成

† 株式会社オクト映像研究所

"Fundamentals of Image Input Device Technologies (5): Fundamentals of Image Input Optical Device Technologies II: Prism and color filter array" by Yasuo Takemura (Oct Imaging Laboratory, Co., Ltd. Tokyo)

表1 HDTVカメラ用プリズムの主な規格(文献2)より作成)

項目	1インチ用	2/3インチ用	
撮像面画面	13.95 mm×7.84 mm 対角16.00 mm	9.59 mm×5.39 mm 対角11.00 mm	
フランジバック長G-ch*1	68.00±0.01 mm*2	48.00±0.01 mm	
撮像面オフセット	R-G +30 μm B-G +10 μm	+10 μm +5 μm	
標準ガラス長	69.0±0.5 mm	46.2±0.5 mm	
ガラス	プリズムガラス	LaK14相当 50±4 mm	BaF52相当 33±4 mm
	その他のガラス*3	BK7相当 19.0±4 mm	BK7相当 13.2±4 mm

*1 バヨネットのフランジ面からの空気換算の値
*2 目標値
*3 フィルタやイメージセンサカバーガラスなど

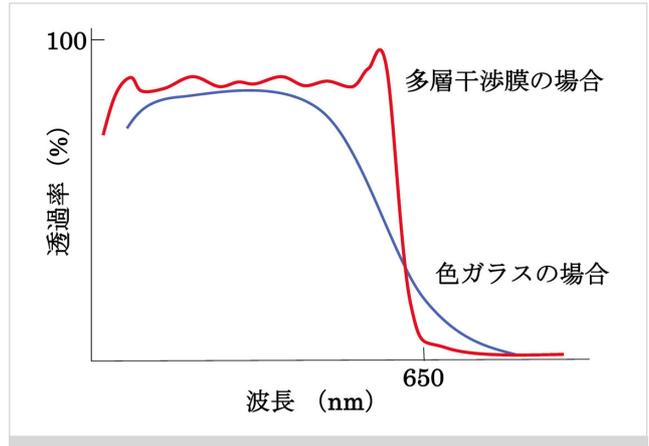


図3 近赤外カットフィルタの特性例

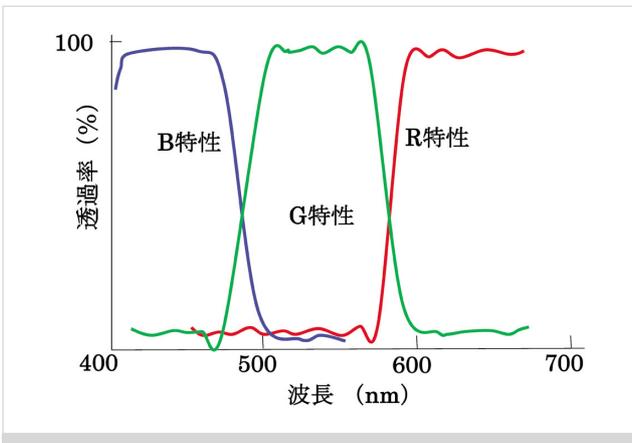


図2 ダイクロイックフィルタによる色分解特性の一例

固定する技術が加わり、色ずれがないカメラを作ることができるようになった。

図1でわかるように、青反射プリズムと赤反射プリズムの間に空気層を設けて、赤光線を全反射できるようにしたほか、プリズムの途中の結像画像に影響のない位置にくさびを設けて、迷光やフレアによる画像劣化を防ぐような手段が設けられている。

一方、撮像レンズの互換性を保つことができるように、ARIB(電波産業会)では表1に示すような規格²⁾を設定している。

ダイクロイックプリズム単独での3色の色分解特性は図2に示すような急峻な特性が得られる。しかし、厳密にはこの特性では撮像特性としては不十分なため、RGB各チャンネルにトリミングフィルタを挿入して、特性の補正が行われる。また、イメージセンサでは近赤外領域にも感度を有するため、不要な光線を遮断するために図3に示すような近赤外カットフィルタが設けられる。多層干渉膜と色ガラスを用いる場合があり、前者は退色等の変化が少ないが、特性が急峻過ぎる。

この色分解プリズムが登場する前には平行光学系が用いられていた。

3. 色フィルタアレイ (CFA)

単一のイメージセンサで色情報を取り出すために、色フィルタアレイ (Color Filter Array: CFA) が用いられる。3原色信号をダイレクトに取り出す手段では原色フィルタ、信号処理回路を介して取り出す手段では補色フィルタが用いられる。

3.1 Bayer 配列

原色フィルタの代表例が図4(a)に示すBayer配列である。Bayer配列は緑透過のGフィルタを市松状に配列し、残りの部分に赤透過のRフィルタと青透過のBフィルタをそれぞれ市松状に配列したものである。Kodak社のBayerによって発明された³⁾ので、Bayer方式と呼ばれる。

Bayer配列の色フィルタ構成は図5(b)~図5(d)に示すように、色成分ごとに欠如部分が異なる。この欠如部分を補間する方法をDemosaicking⁴⁾といい、画像の特徴を抽出、計算の上で補間する方法がとられる。

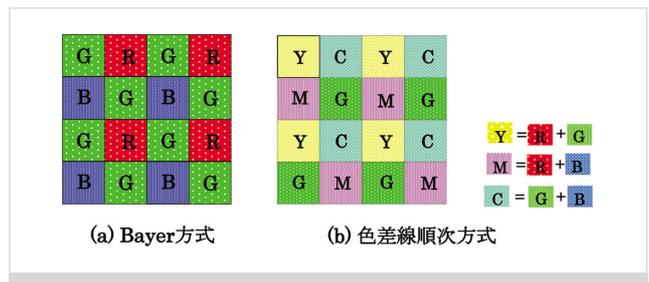


図4 色フィルタアレイの一例

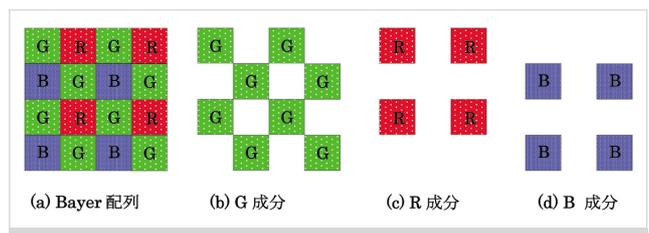


図5 Bayer方式の色構成

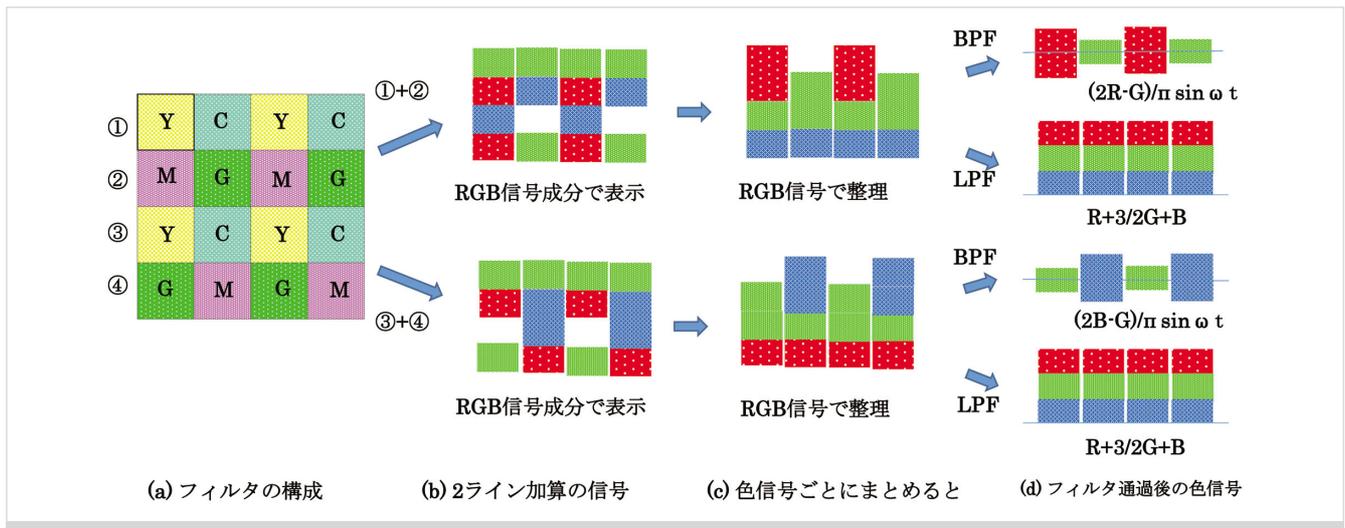


図6 色差線順次方式の色分離

単純な方式は周囲の画素の平均化を行う。図5 (b) のG画素については周囲の隣接4画素の平均値で補間する、図5 (c)、図5 (d) のR、B画素では隣接画素が上下、左右、周囲の3通りがある。これらの単純な平均化の補間はLPFであり、いわゆるスムージングの効果にとどまり、解像感が損なわれる。

そこで、図5 (b) のG画素の補間の場合に、上下、左右の隣接画像をみて、相関の強い画像を優先して加算して補間する、図5 (c) のR画素の補間の場合に、存在していたG画素の中から、その近傍の画素からRGB成分の比率を計算して、G画素中のR画素成分を算出して補間する、などの方法を採用することによって、画素を生成して補完することができ、解像度の向上を図ることができる。

いずれにせよ、Demosaickingの評価は偽信号と解像度の両面から行う必要がある。

Bayer方式は解像度に寄与するG画素が多いこと、RGB画素とも2次元に対称に配列され、画像処理がしやすいこと、色のS/Nが良いことなどの特徴があり、デジタルカメラ、ビデオカメラ、携帯電話など各種のカメラに使われている。

Bayer配列のG画素の一つをW(透明、全色透過)に置き換えて、WRとGBの繰り返し配列として、光の利用効率を向上したものもある⁵⁾⁶⁾。

3.2 色差線順次配列

補色フィルタの代表例が図4 (b) に示す色差線順次配列⁷⁾⁸⁾である。赤と緑を透過するY (Yellow: 黄色) フィルタと緑と青を透過するC (Cyan: シアン) フィルタを水平方向に交互に配列し、次に、赤と青を透過するM (Magenta: マゼンタ) フィルタと緑透過のGフィルタを交互に配列する。次に、1ライン目と同じYCを繰り返した後、2ライン目のGとMを入れ替えて、GとMを交互に配列する。2×4画素の繰り返しとみることができる。

色分離の詳細を図6に示す。基本的に2ライン加算読出しで信号を取出し、インタレース(飛び越し走査)では加算の組合せを変えて信号を取出している。加算読出しの信号は図6 (b) のようになるが、これを色成分で整理すると図6 (c) になる。この信号からBPFを介して基本波成分を取りだし、LPFを介して直流成分を取出すと、図6 (d) になる。基本波成分は(2R-G)信号と(2B-G)信号の2種類の色信号が交互に、すなわち、線順次に得られる。直流成分はR+3/2G+Bの構成の広帯域信号が常に得られる。

補色を用いているため、光の利用率が良いこと、インタレース信号が必要であったビデオカメラに適していることで、ビデオカメラに広く用いられた。

しかし、最近はイメージセンサの画素数が増加したため、順次走査で信号を得ることが多くなり、画像処理との適合性が良いことからBayer方式が主流となっている。

3.3 CFAの構成

CFAの材料は多層干渉膜、染料、顔料がある。初期のビデオカメラでは撮像管を用いていたため、フェースプレートに多層干渉膜をエッチングして色フィルタをストライプ状に形成し、その上に、透明電極、光導電膜を形成していた⁹⁾。熱工程にも耐えられる素材が必要であったためである。

イメージセンサがCCDに置き換わった当初は、ガラス基板上に設けられたCFAをCCD感光面上に接着する、いわゆる張り合わせで形成することが行われた。その後、イメージセンサが形成された半導体基板上にダイレクトにCFAを形成する手法が開発され、一貫生産が可能になった。

最近のCFAは染料タイプと顔料タイプで、退色が小さい点から顔料が多く用いられている。染料は水、油、溶剤などに溶ける性質を持つ有機材料で、顔料は水、油、溶剤などに溶けない性質を持つ微粉状の粒子である¹⁰⁾。

当初はゼラチン、カゼインなどの天然蛋白質を用いて染色が行われた。その後、より安定な樹脂に代わり、さらに、

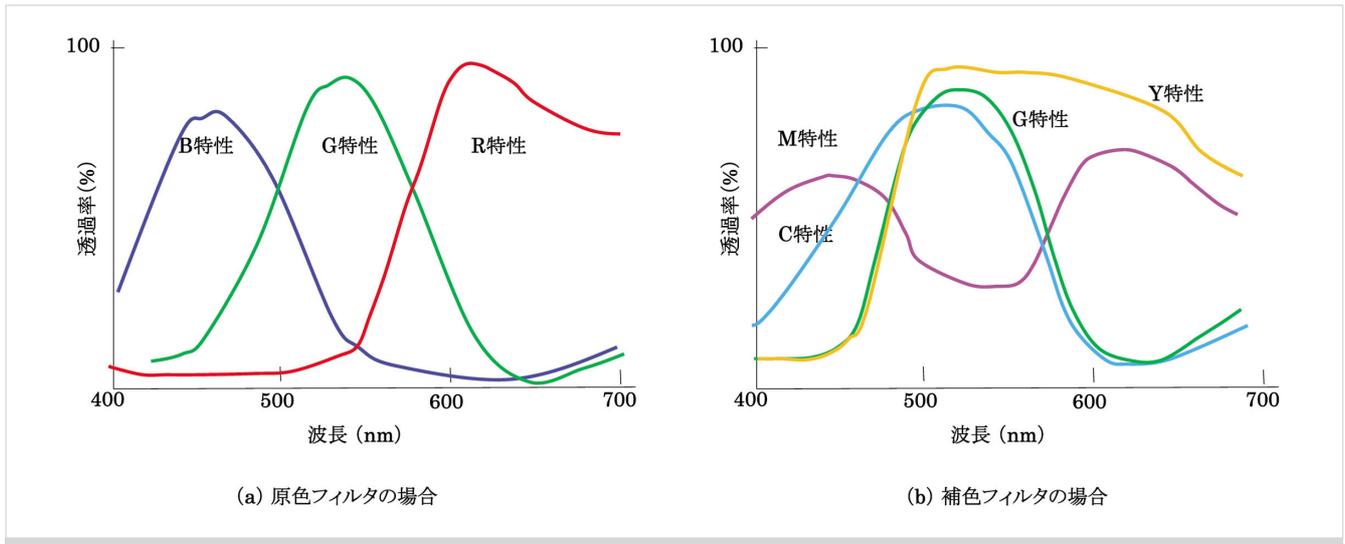


図8 色フィルタアレイ分光特性の一例

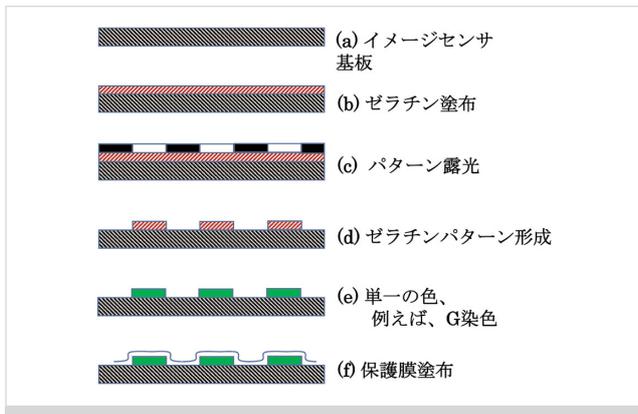


図7 色フィルタアレイ(CFA)の製法(染色の場合)

染料や顔料が含有されたフォトレジストが用いられるようになった。製法の一例を図7に示す。G染色工程の次に、R染色、B染色の工程が繰り返される。染料・顔料が含有されたフォトレジストを用いると図7の染色工程が省略でき、製法も簡略化される。

CFAの透過特性の一例を図8に示す。CFAでは退色が小さい材料で透過特性が高いことが必要になる。また、近赤外線に対して透過特性を有するため、図3の近赤外カットフィルタが必要である。

4. 光学LPF

CCDやCMOSイメージセンサでは画素が離散的に配置されていて、空間的にサンプリングされた信号が得られる仕組みになっている。このため、サンプリング周波数より高い空間周波数成分が、イメージセンサに結像される光学像に存在すると偽信号が発生する。図9はこの関係を示したもので、サンプリング周波数 f_{sc} を中心に変調信号の空間周波数帯域は左右に広がっている。ここに、直流成分の信

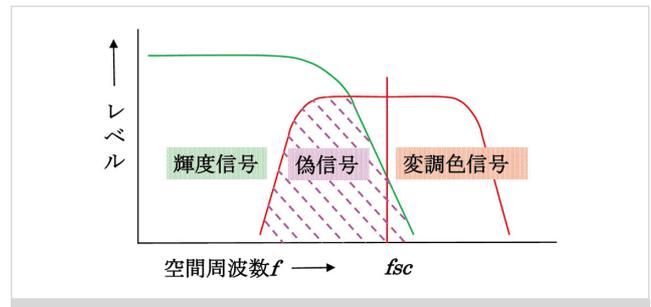


図9 偽信号発生要因

号が広がって入り込むと斜線部分に両信号が混在する。この部分が輝度信号では偽信号、変調信号では復調時に偽信号となって現れる。そこで、この斜線部分を極力光学像の段階で処理する必要がある。このために光学LPFが用いられる¹¹⁾。

光学LPFには表2に示すようにいくつかの種類があるが¹²⁾、現在は人工水晶の複屈折を用いるものが多い¹³⁾。

図10は人工水晶を用いて、二重像を作ってLPF効果を得る原理を示したものである。水晶の厚さ t 、常光線の屈折率 n_o 、異常光線の屈折率 n_e とすると、分離幅 d は次式で表される。

$$d = \frac{n_e^2 - n_o^2}{n_e^2 + n_o^2} t$$

分離幅は使用するCFAやイメージセンサの画素ピッチで決まる。水平、垂直、斜めなど各方向に複数の水晶フィルタが必要に応じて使用される。画素ピッチが小さくなり、撮像レンズのMTFが下がると不要になる場合がある。

5. マイクロレンズアレイ

カメラ用マイクロレンズアレイは当初、フォトダイオー



表2 MMT 標準化の主な出来事(文献12)より作成)

種類	構成	特徴
水晶板	人工水晶, 方解石など結晶の複屈折を利用.	厚さを選定することにより所望のカットオフ特性が得られる. 設置位置の依存性がない.
位相フィルタ	位相差を与える透明な薄膜をストライプ状に形成.	特定の色に対して所望のカットオフ特性が得られる. レンズの瞳位置に設ける.
レンチキュラ	かまぼこ型円筒レンズを多数平行に配列.	レンズの曲率, ピッチを選定する. レンズの瞳位置に設ける.
クリスチャンセンフィルタ	特定の波長で異なる特性を示す散乱物質を液体などに分散.	特定の色に対して所望の特性が得られる. 方向性が出しにくい.

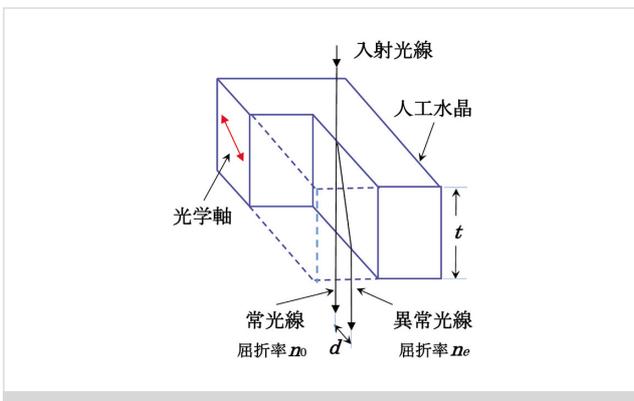


図10 光学LPFの原理

下に有効に光が入射するように、集光作用を持たせるために用いられてきた¹⁴⁾が、その後、撮像レンズを通る光の角度に着目して¹⁵⁾、さまざまな用途に広く用いられるようになった。

5.1 集光用

マイクロレンズは直径数ミクロンの微小レンズで、イメージセンサの感度向上のために用いられる。IT-CCD（インタライン転送CCD）では、感度に寄与するフォトダイオードに隣接して、本来、光を遮蔽したい垂直転送CCDが配置されている。CMOSイメージセンサでもAI配線など感度に寄与しない部分がある。そこで、光電変換に寄与しない無効部分に到達する光をフォトダイオード上に集光することにより、光の利用効率、フィルファクタは改善できる。このため水平方向に集光作用があるかまぼこ型のレンチキュラが用いられてきた。その後、図11(a)に示すような、垂直方向にも集光作用があるマイクロレンズアレイが用いられるようになる。光軸近くと周辺では光の入射角度が変わるため、光の入射角度によってマイクロレンズとフォトダイオードの相対位置を変えることにより、効率よく光が利用できるように工夫されている。

実際にイメージセンサの集光用に使われているマイクロレンズアレイの一例を図12に示す。画素ピッチ1.4 μmの

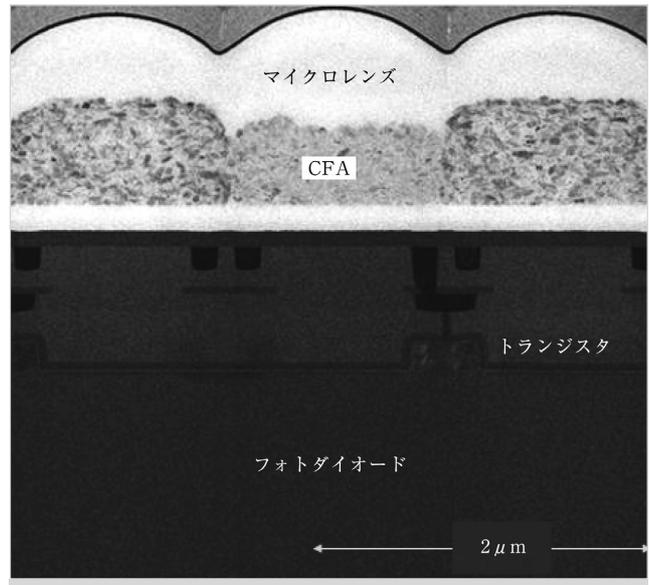


図12 マイクロレンズアレイの一例(提供: 東芝)

SEM (Scanning Electron Microscope:走査型電子顕微鏡) による断面写真である¹⁶⁾。

5.2 立体カメラ用

立体カメラは、左右2個の撮像レンズを用いるものが多いが、図11(b)に示すように、マイクロレンズを用いると、撮像レンズの左半分を通る光による画像と、右半分を通る光による画像を分離して得ることができる。レンズの口径の範囲でしか、左右の視差を得ることができないが、立体画像が不要の場合には左右画素を加算することにより、1台のカメラで自然な標準の撮像画像を得ることができる¹⁷⁾¹⁸⁾。

5.3 像面位相差AF用

図11(c)は、位相差AF (Auto Focus)¹⁹⁾²⁰⁾用マイクロレンズアレイである。立体カメラと同じように、左右の画像が得られるので、左右の画像の位相差を検出して自動フォーカスに活用できる。イメージセンサの中に位相差AFに使う画素を設けるものを像面位相差AFという²¹⁾。これは2010年にコンパクトカメラで実用化され²²⁾、のちに一眼レフカメラにも使われていった。図11(b)の2画素を用いる構成でも像面位相差AFは可能だが、図11(c)ではフォトダイオードを二つに分割し、像面位相差AFとして利用し、両画素を加算すれば標準の画像信号を得ることができる²³⁾。

位相差AF用画素はイメージセンサの内部にランダムに設ける、直線状に設ける、有効画素と兼用するなど各種行われている。合焦のスピードはコントラストAFより速く、0.05秒のものもある²⁴⁾。

5.4 Light-field Camera (Plenoptic Camera) 用

図11(d)は、撮像レンズを通った光の方向(撮像レンズのどの部分を通った光か)を積極的に利用して、新たな画像を得ようとするLight Field²⁵⁾を利用したマイクロレンズアレイである。今までの例と違って、1個のマイクロレン

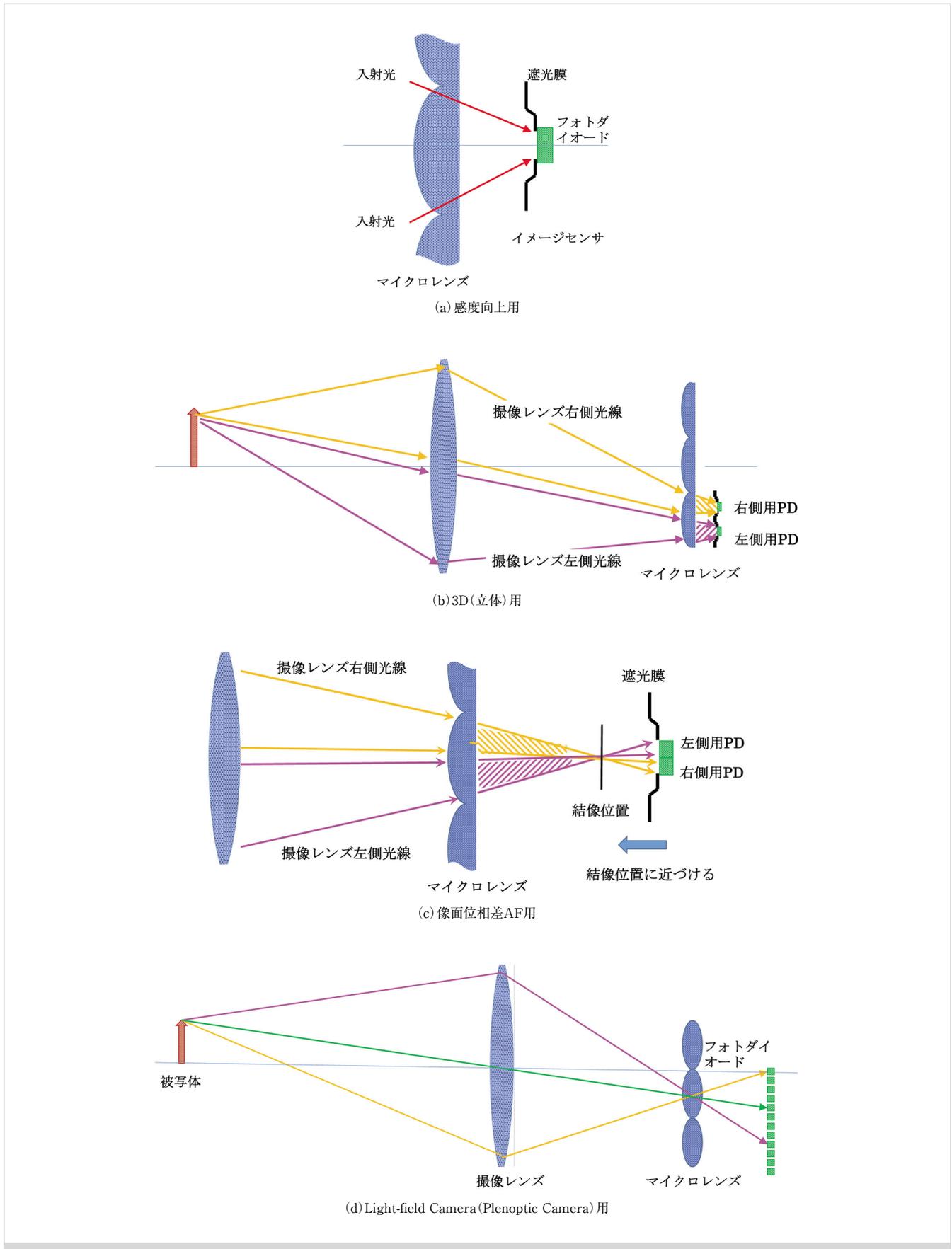


図11 マイクロレンズアレイの用途



ズに対して複数のフォトダイオード (PD), 例えば, 3×3 個, 9個のPDが配置される. 9個のPDはそれぞれ一つの画素の中で, 撮像レンズのどの位置を通った光かを区別して結像される. 図11(d)ではレンズ上端のMで示した光線, 中央のGで示した光線, 下端のYで示した光線の3種類の画像が得られる状況を示している. そこで, 同一の位置を通った画素だけを集めて画像を作ることにより, 9種の異なる被写体画像が得られる. 実際にはもう少し多くのPDを対応させている.

この画像は3Dカメラ, 好みの位置にピントが合わせられる全フォーカスカメラなど数々の活用方法がある. 米国ではLytroカメラが売り出されている²⁶⁾ 27).

日本でも研究開発が行われ²⁸⁾, 製品化の動きがある. この分野は従来, カメラを多数並べる多眼カメラとして研究開発が進められてきたが²⁹⁾, イメージセンサの画素数が飛躍的に増加したこと, 画像処理の演算速度が上がり, メモリーが増加したことで, 新たな可能性が見出されてきたものである. 今後, 我が国の技術力を生かした斬新なカメラの出現を期待したい.

なお, 今回限られたスペースで充分説明しきれなかった技術が多々ある. 第5回講座の範囲の参考図書には下記のものがあり, 参照頂ければ幸いである.

- (1) 寺西信一監修, 電子情報通信学会編: 画像入力とカメラ, 現代電子情報通信選書知識の森, オーム社刊, 2012年6月刊.
- (2) 蚊野浩監修, 映像情報メディア学会編: デジカメの画像処理, オーム社刊, 2011年4月刊.
- (3) 竹村裕夫: CCD・CMOSカメラ技術入門, コロナ社刊, 2008年4月.
- (4) 畑田豊彦, ほか: 眼・色・光より優れた色再現を求めて, 日本印刷技術協会刊, 2007年12月.
- (5) 映像情報メディア学会編, 和久井孝太郎監修: テレビジョンカメラの設計技術, コロナ社, 1999年8月.
- (6) 竹村裕夫: ビデオカメラ技術の系統化, 国立科学博物館技術の系統化調査報告, 2013年3月28日.

(2014年1月30日受付)

〔文 献〕

- 1) ヘンドリーグデラング, ジースベルタスプーフイス: “対物レンズを背後に配設させた色分離プリズム系を具えるテレビジョン撮像装置”, 特公昭38-23724, 1963年12月7日 (優先権主張1960年8月2日オランダ)
- 2) ARIB (電波産業会): “技術資料高精度テレビジョン方式スタジオ機器の相互接続”, BTA S-1005B, p.6/p19 (Apr. 1998), http://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/4-BTA_S-1005_v_B.pdf
- 3) B.E. Bayer: "Color Imaging Array", U.S. Patent, 3,971,065 (July 1976), 国内は特開昭51-112228があるが, 1980年5月20日拒絶査定
- 4) B.K. Gunturk, J. Glotzbach, Y. Altunbasak, R.W. Schafer and R.M. Ersereau: "Demosacking: Color Filter Array Interpolation", IEEE Signal Processing Magazine, 44, 1, pp.44-54 (Jan. 2005)

- 5) H. Honda, Y. Iida, G. Ito and Y. Egawa: "A Novel White-RGB Color Filter Array for CMOS Image Sensors", Electronic Imaging, Proc. SPIE, 6492, pp.6492J1-10 (Feb. 2007)
- 6) Eastman Kodak News Release (June 14, 2007)
- 7) 曾根賢朗, 石川清次, 橋本進, 黒田隆男, 大久保祥雄: “フィールド蓄積モードCCDの単板カラー化方式”, テレビ誌, 37, 10, pp.855-862 (Oct. 1983)
- 8) 森村淳: “改良型色差線順次単板カラー方式”, テレビ誌, 37, 10, pp.847-854 (Oct. 1983)
- 9) 舟橋幸平, 竹村裕夫, 本山博: “クロミコン～ストライプフィルタ内蔵ビジコン～”, 東芝レビュー, 28, 9, pp.1017-1022 (Sep. 1973)
- 10) 畑田豊彦ほか: “眼・色・光より優れた色再現を求めて, 2-4色材・顔料”, 染料の発色 (五十嵐幹雄著), 日本印刷技術協会, pp.97-107 (Dec. 2007)
- 11) 佐柳和男: “Optical Noise Filter”, 応用物理, 27, 10, pp.623-632 (Oct. 1958)
- 12) 竹村裕夫: “CCDカメラ技術”, 表6.4光学LPF, p.115, ラジオ技術社 (1986) (廃刊)
- 13) 竹村裕夫: “CCD・CMOSカメラ技術入門”, 4.2.6光学LPF, pp.105-108, コロナ社 (Apr. 2008)
- 14) Y. Ishihara and T. Tanigaki: "A High Photosensitivity IL-CCD Image Sensor with Monolithic Resin Lens Array", IEDM Tech. Digest, pp.497-500 (Dec. 1983)
- 15) 日浦慎作: “招待論文コンピュータショナルフォトグラフィ概観”, 映像学技報, 36, 18, pp.17-21 (Mar. 2012)
- 16) 幸山裕亮, 山下浩史: “高S/NのCMOSイメージセンサを実現する画素技術”, 東芝レビュー, 67, 10, pp.6-9 (Oct. 2012)
- 17) 寺西信一監修, 電子情報通信学会編: “画像入力とカメラ, 4-6 1レンズ方式単眼立体カメラ (竹内幸一著)”, 現代電子情報通信選書『知識の森』, pp.265-268, オーム社 (June 2012)
- 18) E.H. Adelson and J.Y.A. Wang: "Single Lens Stereo with Plenoptic Camera", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14, 2, pp.99-106 (Feb. 1992)
- 19) L. Leitz: "Photoelectric Precision Camera Range Finder with Optical Verification", USP 3,529,528 (Sep. 22, 1970) (Dec. 6, 1966優先権主張)
- 20) N.L. Stauffer: "Focus Detecting Apparatus", USP 3,875,401 (Apr. 1, 1975) (July 9, 1973出願)
- 21) 例えば, 近藤健一, 丹羽雄吉, 堺信二, 嵯峨吉博: “固体撮像装置”, 特許第3592147号, 2004年9月3日登録, 1999年7月26日出願
- 22) 富士フイルム, <http://www.fujifilm.co.jp/corporate/jobs/aboutus/technology/03/review10.html>
- 23) キヤノン, <http://cweb.canon.jp/eos/lineup/70d/feature-speedy.html>
- 24) “光学式20倍ズームデジタルカメラ「FinePix F1000EXR」”, 富士フイルムニュースリリース, 2014年1月13日
- 25) R. Ng, M. Levoy, M. Bredif, G. Duval, M. Horowitz and P. Hanrahan: "Light Field Photography with a Hand-Held Plenoptic Camera", Stanford University Computer Science Tech Report CSTR 2005-02 (Apr. 2005)
- 26) LYTRO, <https://www.lytro.com/camera/>
- 27) 蚊野浩: “ライトフィールドカメラLytroの動作原理とアルゴリズム”, 日本学術振興会, 光エレクトロニクス第130委員会, 「光の日」公開シンポジウム講演予稿集, pp.1-6 (Mar. 2013)
- 28) R. Ueno, K. Suzuki, M. Kobayashi, H. Kwon, H. Honda and H. Funaki: "Compound-Eye Camera Module as Small as $8.5 \times 8.5 \times 6.0$ mm for 26 k-Resolution Depth Map and 2-Mpix", 2D Imaging, IEEE Photonics Journal, 5, 4, pp.1-12 (Aug. 2013)
- 29) V. Vaish, B. Wilburn, N. Joshi and M. Levoy: "Using Plane + Parallax for Calibrating Dense Camera Arrays", Proc. of CVPR (2004)



竹村 裕夫 1957年, 都立小山台高校卒業. 早稲田大学第一理工学部電気通信学科を卒業後, 東京芝浦電気(株)(現(株)東芝)入社. カラー撮像方式の研究開発に従事. この間, 電気通信大学, 東京工芸大学など非常勤講師. 平成24年度国立科学博物館主任調査員. IEEE Fellow. 工学博士. 当会フェロー認定会員.

3次元画像入力デバイスの基礎

正会員 浜本 隆之†

1. まえがき

近年、イメージセンサの高性能化、高機能化の検討が盛んに行われている。200 dBを超えた広ダイナミックレンジ化や毎秒10 Mフレーム以上の高フレームレート化といった撮像性能の向上の実現だけでなく、動きベクトル検出やモーメント演算等といった処理をイメージセンサ内に集積したものもある。このような新しいイメージセンサは、従来と異なる画素回路やデバイス構造を採用したり、撮像以外の画像処理回路を実装することで実現されており、その多くは本講座の第3回で解説されたCMOSイメージセンサの技術を用いている¹⁾。これは、半導体プロセスの工程が簡単であることに加え、1つのデバイス上に撮像用回路とともに画素並列あるいは列並列の処理回路の集積が容易である、画素ごとに異なるパラメータで撮像が可能である、などの利点があるためである。

さまざまな機能を有するイメージセンサの中で最も盛んに検討されているものの1つが、3次元の距離情報を取得するためのイメージセンサである。近年、Kinect²⁾やLeap Motion³⁾のような、3次元距離情報を取得する安価な装置が販売され、その開発環境が無償で提供されており、誰でも簡単に3次元画像処理システムの構築が可能になっている。これらで用いられている方式以外にも、3次元距離情報を取得するさまざまな方式があるが、最も普及しているのは2つのカメラを水平(あるいは垂直)に配置したステレオ法によるものであり、そのための装置やモジュール⁴⁾も多く販売されている。今後、さらに小型な装置で、測定可能な距離範囲が広く精度が高い装置の実現が期待されている。

本稿では、このような背景の下、3次元距離を計測することを目的としたさまざまな機能を集積したイメージセンサについて紹介する。光の速度はきわめて速いので、高い精度で距離推定をするためには、高い時間分解能が求めら

れる。しかし、時間分解能が高いと1フレームあたりの入射光量が少なくなり、高いSNRで撮像する工夫が必要になる。ここに、3次元距離計測用のイメージセンサを開発する意義がある。以下では、3次元距離計測の代表的な方式について簡単に説明する。さらに、3次元距離計測のための機能を有する4つのイメージセンサについて紹介する。

2. 3次元距離計測の方式

画像情報により3次元距離を計測する方式は大きく、受動的なものと同動的なもの2つに分けられ、それぞれにいくつかの方式が検討されている⁵⁾。表1にその代表的な方式を示す。

受動的な方式の代表例はステレオ法で、2つ(あるいは3つ以上)のカメラを用いて撮像した際に、同じ被写体の位置が画像間でずれ、視差が生じることを利用する。被写体が近いほど視差が大きく、遠いほど視差が小さくなるので、3角測量の原理から距離を求めることができる。焦点ボケ量による方式は、焦点が合った距離の被写体はボケがなくクリアな像を作るが、焦点位置から離れるほどボケの量が増えることを利用する。これには、Depth from Focus (DFF)とDepth from Defocus (DFD)の2つの方式がある。DFFでは、焦点位置をずらしながら撮影した多数の画像列の中で、最もピントの合った画像を選択することで距離を求める。DFDは、焦点位置の異なる数枚の画像を撮影して、光学ボケのモデル関数でボケ量をフィッティングし、被写体に最もピントが合うであろう位置を推定することで距離

表1 3次元距離計測の代表的な方式

方式の種類		測距の原理
受動的な方式	ステレオ*	3角測量
	焦点ボケ量*	光学ボケ
	動き量	3次元幾何
能動的な方式	スポット光投影	3角測量
	スリット光投影*	3角測量
	パターン光投影	3角測量
	光飛行時間測定*	光時間差 光位相差

* 本稿で取り上げる方式

† 東京理科大学 工学部 電気工学科

"Fundamentals of Image Input Device Technologies (The Last Chapter): Introduction of Three Dimensional Image Capturing Devices" by Takayuki Hamamoto (Faculty of Engineering, Tokyo University of Science, Tokyo)



を求める。その他に、1枚の画像のみに高度な画像処理を行い、各部位の焦点ボケ量を推定し距離を求めるものもある。また、動いている被写体を撮影したときに、手前にあるものほど動きが大きく、遠いほど小さいなどといった特徴量を求め、その特徴量と距離の関係を学習し距離を求める方式などもある。

受動的な方式は、カメラでシーンを撮像するだけなのに対し、能動的な方式は、レーザ光やLED光を計測器側から照射し、その応答を用いて距離を計測する。その際に、光の波長を可視光の外に設定すれば、例えば、可視光カメラで一般のカラー映像を取得しながらその映像を害することなく、別の赤外光カメラを用いて距離計測を行うこともできる。能動的な方式は三角測量による方式と光飛行時間測定 (Time of Flight) による方式の大きく2つに分けられる。三角測量による方式は、ステレオ法のカメラの片方を光源に変えたものであり、投影する光の種類にスポット光、スリット光、パターン光などがある。光を照射する位置を、スポット光では2次元に、スリット光では1次元にスキャンして動かす必要があるが、パターン光では空間符号化された少数のパターンを画面全体に照射する。したがって、スポット光<スリット光<パターン光の順に並列度が上がり、高速に距離計測ができる。光飛行時間測定による方式では、カメラ側から照射した光が被写体で反射して、再度カメラ側に戻ってくるまでの時間に基づいて距離を求める。このような能動的な方式の処理は、光源から与えられた光の応答を検出するだけなので処理量は少ない。しかし、照射する光の方向を制御する機械的な仕組みを有する光源が必要な場合は、システム規模が大きくなる。また、近距離では精度が高いが、遠距離では反射する光の大きさが小さくなるので精度が悪くなる傾向がある。

以上のように、距離計測には受動的な方式や能動的な方式があるが、そのための機能を集積したイメージセンサの検討が行われている。これは、光は高速であること、動いている物体を対象とするにはビデオレート (毎秒60フレームや30フレーム) 程度の速さで計測が行えること等が必要で、高速で高感度なイメージセンサが求められているためである。以下では、表1に*印をつけた4つの方式を取り上げ、距離計測の原理を説明した後、それを実現するためのイメージセンサの例を紹介する。

3. ステレオ法による距離計測

3.1 ステレオ法の原理

同一物体が左カメラの画像と右カメラの画像で結像する位置が、カメラから物体までの距離に応じて異なるため、その位置ずれ (視差) がわかれば、距離を求めることができる。図1では2つのカメラが水平で平行に配置されており、被写体 $P(X, Y, Z)$ を撮像している。 (X, Y, Z) の原点は2つのカメラの光学中心の中央にあり、カメラ間の距離 (基線

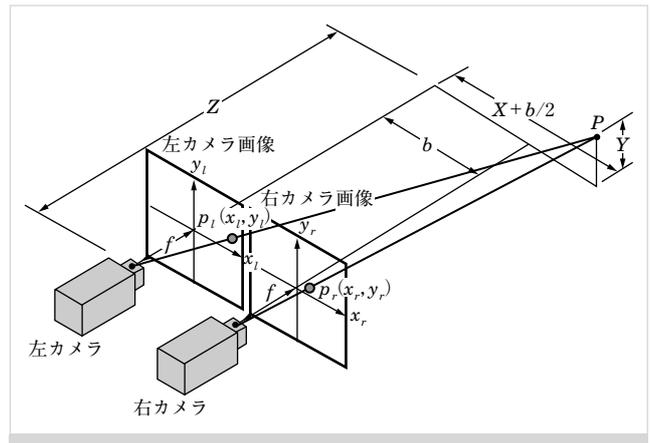


図1 ステレオ法の概念図

長) が b 、焦点距離が f である。被写体 P の2つのカメラ画像内の位置が、それぞれ $p_l(x_l, y_l)$ 、 $p_r(x_r, y_r)$ であるとすると、三角測量の原理から以下の式が成り立つ。

$$\begin{aligned} X &= b(x_l + x_r) / 2(x_l - x_r) \\ Y &= b(y_l + y_r) / 2(x_l - x_r) \\ Z &= b f / (x_l - x_r) \end{aligned} \quad (1)$$

よって、この方式では基線長 b や、水平方向の画素数、画角などによって、推定される距離の精度が異なる。対象とする距離範囲によっては、十分な基線長が必要となる。また、視差量 $(x_l - x_r)$ と距離 Z は反比例の関係にあるため、カメラから離れるにしたがって精度が劣化する。この視差量 $(x_l - x_r)$ を求めるために、2つの画像間でマッチング処理を行い、同じ被写体の同じ部分であるかを正確に判定する必要がある。この処理量を削減するために、階層的にマッチング処理を行うことが多い。さらに、精度を向上するために画像の拡大処理をしてからマッチングを行い、その結果を非線形な関数で近似することで、小数画素精度の視差量を求める。

3.2 ステレオ法による距離計測用イメージセンサ

1つのデバイス上に2つのフォトダイオードアレイを集積したイメージセンサが検討されている。図2は、2眼での撮像だけでなく、動物体を抽出した後、その距離を計測する機能を有するイメージセンサのレイアウトと片眼の構成である⁶⁾。紙面構成の都合上90°回転しているが、実際には水平方向の両端に2眼がある。図2右のブロック図の回路が左右に対照的に配置されており、その中央部分に、単一動物体の中心座標を求める回路や、左右の両方の中心座標から視差を計算する回路が別にある。このイメージセンサでは、両眼の間の距離 (基線長) が9mm未満と短い。計測する距離の範囲に応じて基線長を長くする必要があるので、光学系の工夫が必要になる。一方、光学系とイメージセンサの配置関係を正確に調整できれば、視差量を求めるための処理は簡単になる。

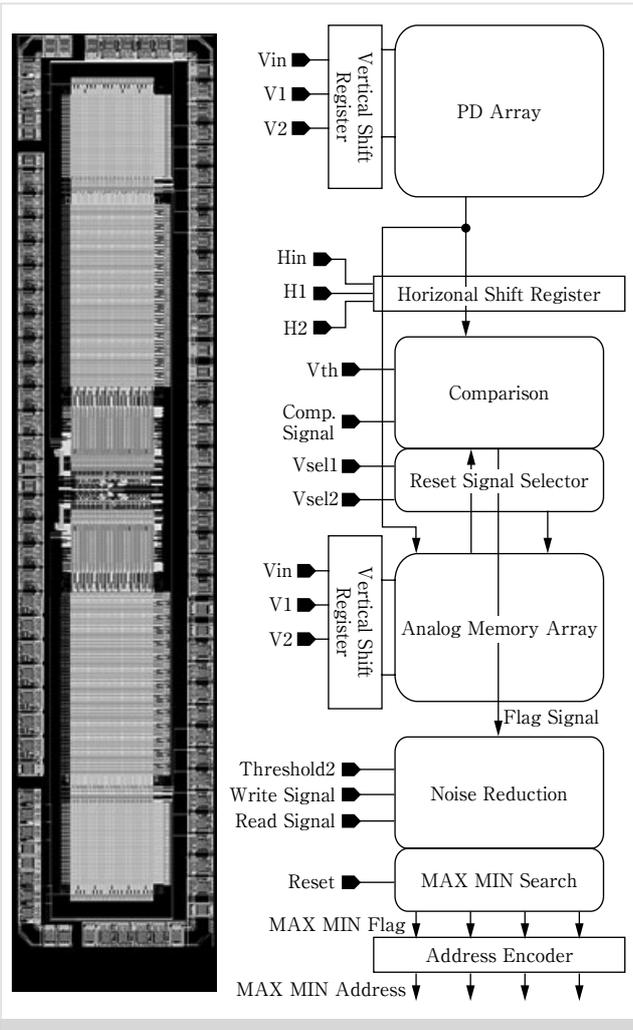


図2 ステレオ法による距離計測用イメージセンサのレイアウトと片眼の構成

4. 焦点ボケ量による方式による距離計測

4.1 焦点ボケ量による方式の原理

1つのカメラの焦点位置を徐々に動かしながら撮像すると、被写体の置かれた距離に応じて光学ボケが重畳された連続画像（多重フォーカス画像）を得ることができる。図3は、異なる距離に紙と板を置き、81の異なる焦点位置で、紙にあいた3つの丸い穴から奥にある板の様を撮像した画像の一部である。81枚のうち、奥の板は図3(b)で、手前の紙は図3(c)で、それぞれ焦点が合っている。このような光学ボケは、一般にガウス関数で表現された点拡がり関数の畳込みで表現されることが多いが、合焦位置よりも手前にあるときの光学ボケと奥にあるときの光学ボケの大きさは、合焦位置から同じ距離で異なり対称でないことが知られている。したがって、前述したDFDではそのことに配慮する必要がある。

図3の奥にある板の1つの画素に対して、空間エッジの強度を計算した結果を図4に示す。図4では、26番目の焦点位置で出力値が最も大きくなるため、この最大位置を検出すれば距離が求まることになる。

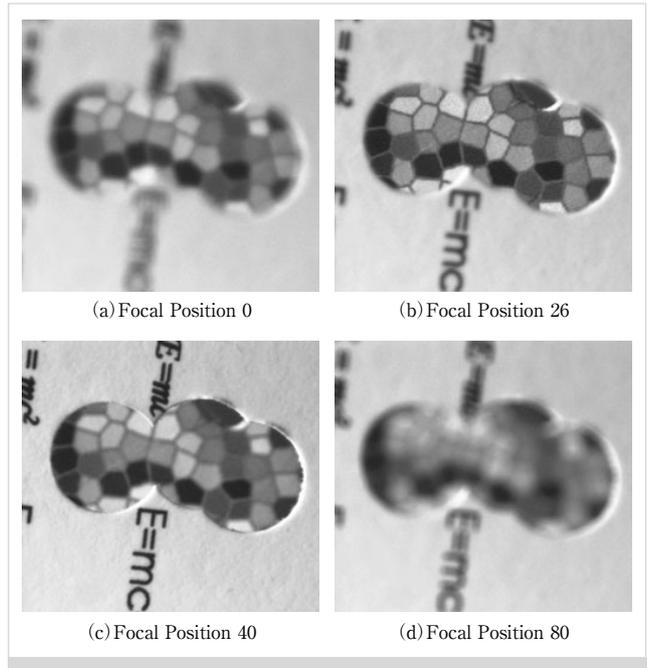


図3 多重フォーカス画像の例

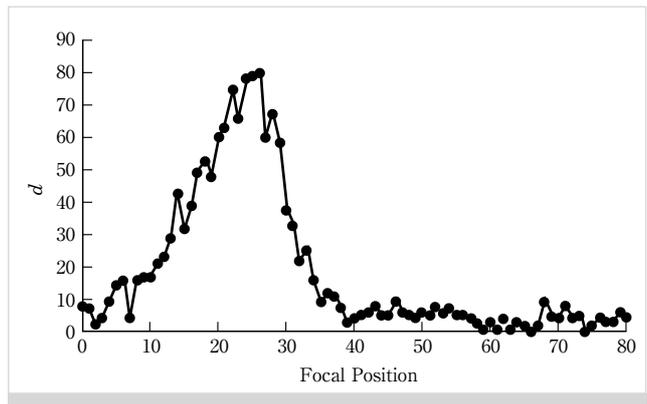


図4 板の部分の光学ボケ量の変化

4.2 合焦判定による距離計測用イメージセンサ

図3のような多重フォーカス画像から合焦フレームを判定して距離計測する場合は、その精度を上げるために、焦点位置を細かく変化させて、多数の画像を撮像する必要がある。さらに被写体が動くことを考えると、高いフレームレートで撮像し、高速に処理することが求められる。図5は光学ボケ量を算出し、合焦フレームを判定する機能を有するイメージセンサの構成である⁷⁾。図4のような光学ボケ量を求めるために、次式に示すフィルタを用いる。

$$d = |l(x+1, y) + l(x-1, y) - 2l(x, y)| + |l(x, y+1) + l(x, y-1) - 2l(x, y)| \quad (2)$$

l ：輝度値, x, y ：画素座標

式(2)はラプラシアンをベースにした空間的なエッジ量を求めているので、焦点位置が変わると光学ボケ量に応じて出力値が変化する。図5では、Processor回路で列並列に求

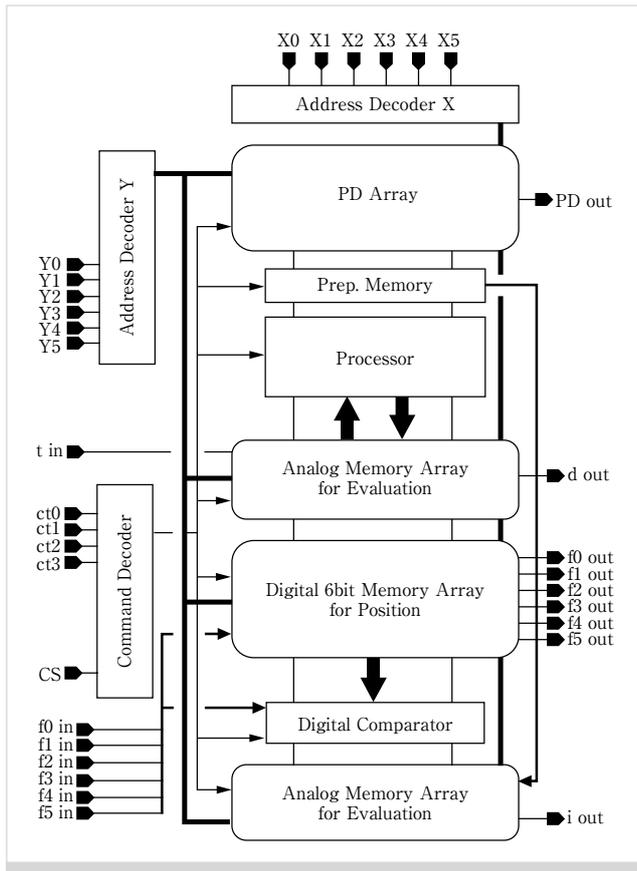


図5 合焦判定による距離計測用イメージセンサの構成

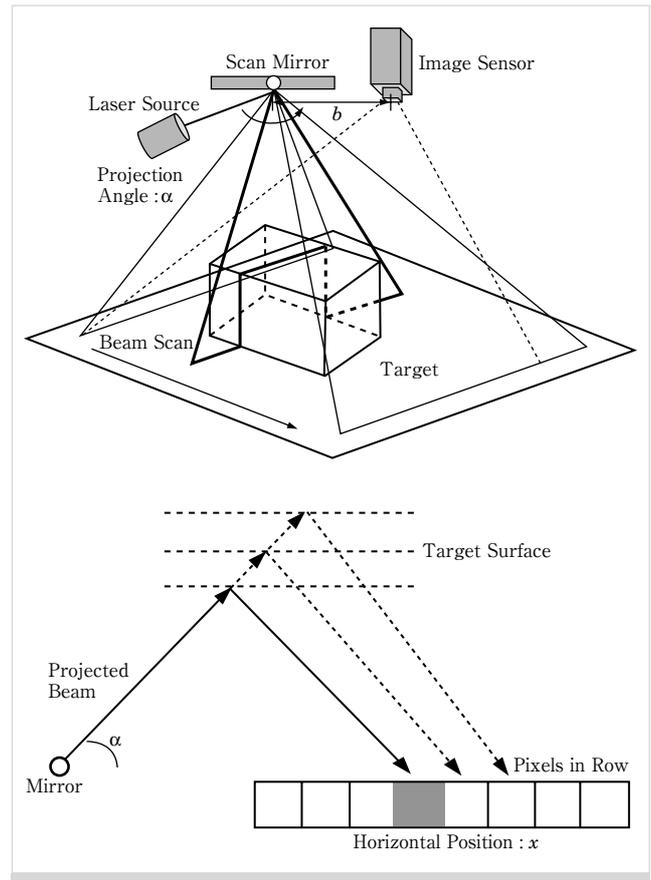


図6 スリット光投影による方式の概念図

める。なお、本イメージセンサの回路は毎秒約1,000フレームで動作する。

5. スリット光投影による距離計測

5.1 スリット光投影による方式の原理

図6に、スリット光投影による方式(光切断法とも呼ばれる)による距離計測の構成を示す。前述したステレオ法では図1のように、2つのカメラで構成されていたが、その片方を光源に置き換えスリット光を被写体に投射する。ミラーを回転させることで光の入射角度 α を変化させ、水平方向に動くスリット光が被写体の表面を通過する様子をカメラで撮像する。距離の計測には、ステレオ法のような2つの画像間でのマッチング処理が不要で、各行ごとにシート光がどの画素の上を通過しているかを検出すればよく、簡単である。

距離は、ステレオ法と同様に、3角測量の原理により以下の式で求めることができる。

$$Z = \frac{b \times f}{x + f \times \frac{1}{\tan \alpha}} \quad (3)$$

ここで、 Z は距離、 b はカメラとミラー間の距離(基線長)、 f はカメラの焦点距離、 x はスリット光が通過している対象点の画像中心からの水平位置である。

5.2 スリット光投影による距離計測用イメージセンサ

前節で説明したように、画素ごとにスリット光が通過する時間がわかれば距離が求まる。イメージセンサの機能としては、フレーム毎に各行内で最も明るい画素の位置を決められれば良い。式(3)からもわかるように、カメラと対象点間の角度 α を細かく変えながら計測し、かつスリット光が通過している位置 x を小数画素精度で求めることで、距離を精度よく計測できることがわかる。このようなシート光の通過位置を検出する機能を持った高速なイメージセンサが多く検討されている⁸⁾⁹⁾。

図7は、時間方向の画素値の変化をアナログ演算により求めることで、距離を計測するイメージセンサの画素回路である⁸⁾。各画素は受光回路以外に、現フレームから過去に向かって4つのフレームの値を保持するメモリー回路、比較回路、オフセット値を除去する回路を有している。

水平方向にスキャンされたシート光が当該画素にかかると入射光量が一時的に増加し、シート光がはずれると入射光量は元に戻る。このような変化で、画像信号が最も大きくなった時刻を求めたい。したがって、連続した4つのフレームの画素値を $I_n, I_{n-1}, I_{n-2}, I_{n-3}$ とすると、スイッチ群を順に制御することで $(I_n + I_{n-1}) - (I_{n-2} + I_{n-3})$ を求め、その値がある大きさよりも大きくなった際に、シート光が通過したと判定する。

このようなアナログ回路によりスリット光の通過位置を

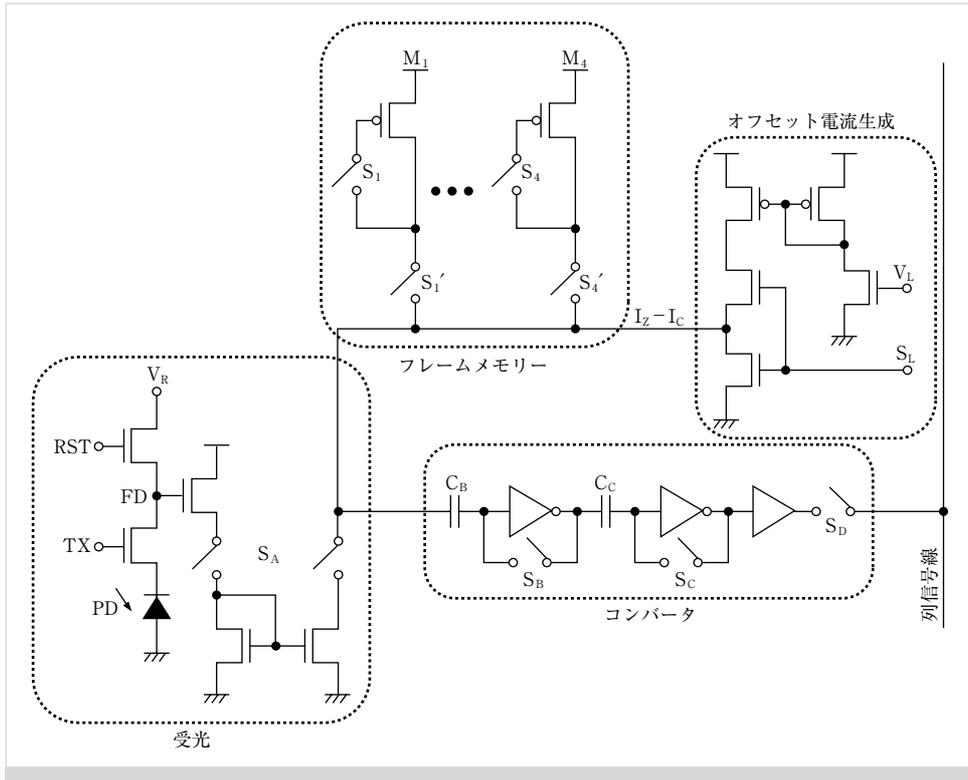


図7 スリット光投影による距離計測用イメージセンサの画素回路

検出するもの以外に、デジタル回路により検出するものも検討されている。シート光が通過している画素とその近隣の画素のみが1となるように2値化すれば、1の画素数は画像の総画素数と比べて少ない。1の画素の水平アドレス情報のみが必要なので、それを高速に読出せればよい。例えば、4進木スキャン方式や行並列2進木スキャン方式などの検討がある。

6. 光飛行時間測定による距離計測

6.1 光飛行時間測定による方式の原理

図8に、光飛行時間測定による方式¹⁰⁾による距離計測の構成を示す。カメラレンズの周辺に配置したLED光源モジュールとその反射光をとらえるカメラから構成される。スリット光投影による方式のように部分的に光を照射するのではなく、全体に光を照射する。ただし、照射光は三角波や正弦波、パルス波状に変調されている。光の飛行時間は、光の遅延量を直接計測する方式や、照射する変調光と反射光との位相差から求める方式などが検討されている。

図9は、三角波で変調された入射光とその反射光の関係を示した図である。ここで、計測した光の飛行時間(照射してから戻るまでの時間)を T_d 、光速を c とすると、距離 Z は以下の式で求まる。

$$Z = \frac{c \times T_d}{2} \quad (4)$$

時刻 $t=a$ と $t=b$ の反射光の強度をそれぞれ I_a 、 I_b とすると、その2つの比 R_{ab} から、距離 Z は以下の式で求まる。

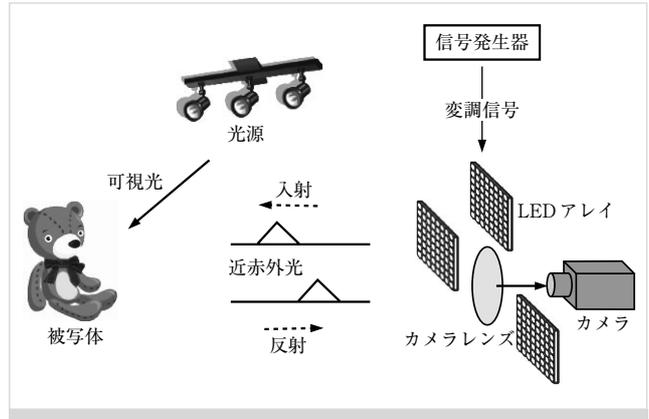


図8 光飛行時間測定による方式の概念図

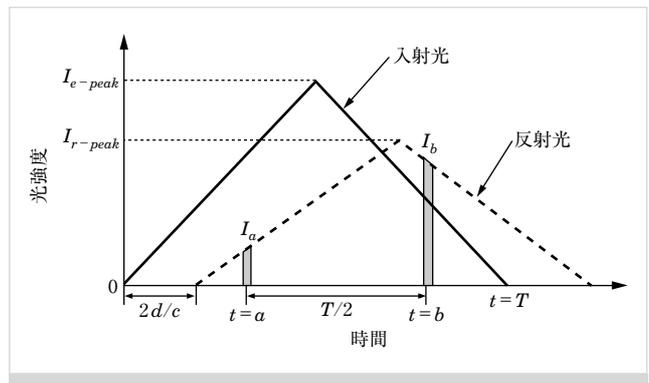


図9 変調された入射光とその反射光の関係

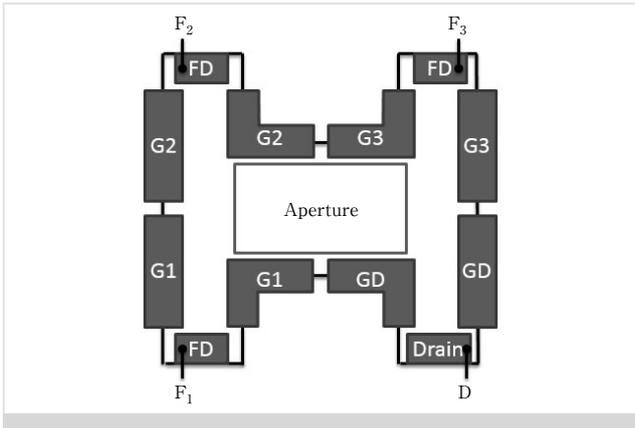


図10 光飛行時間測定による距離計測用イメージセンサの画素構造

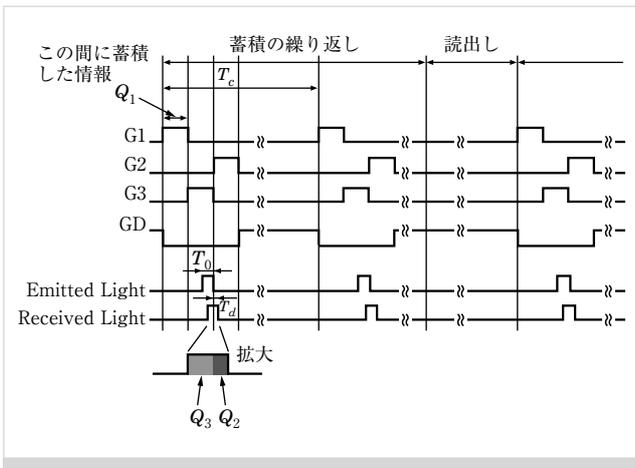


図11 図10の動作タイミング

$$Z = \frac{c}{2} (a - (T \times R_{ab} / 2(R_{ab} + 1))) \quad (5)$$

ただし、三角波の周期を T , $R_{ab} = I_a / I_b$ とする。

6.2 光飛行時間測定による距離計測用イメージセンサ

前節で説明したように、光を照射してからその反射光が到着するまでの時間を計測できれば距離が求まる。しかし、光速は毎秒 3×10^8 m と速いため、充分高い時間解像度が必要である。また、一般的には照射する光の波長と同じ成分が太陽光や照明光にも存在するため、それが雑音となり飛行時間の計測精度に影響する。したがって、高速、高感度で、環境光の影響を抑えることが可能なイメージセンサが求められている。

図10は、CCDイメージセンサと同様な埋め込みチャンネルによる高速電荷転送の技術を活用したイメージセンサの画素構造である¹¹⁾。4つのゲートG1, G2, G3, GDに、図11のようなタイミングにて、正バイアスHighあるいは負バイアスLowを印加することで、光電変換により得られた電荷を3つのフローティングディフュージョン(FD)あるいは排出端子Drainへ転送できるようにしている。

照射光のパルス幅を T_0 、反射光が遅れる時間を T_d 、G1, G2, G3がHighの期間に F_1 , F_2 , F_3 に転送された電荷をそ

れぞれ Q_1 , Q_2 , Q_3 とする。光飛行時間がより長くなると、 Q_3 が減り、 Q_2 が増える。したがって、距離 Z が以下の式で求まる。

$$Z = c \times T_0 (Q_2 - Q_1) / 2(Q_2 + Q_3 - 2Q_1) \quad (6)$$

G1, G2, G3がすべてLowの期間の電荷は不要のため、排出端子から捨てられる。また、このような計測を複数回を行いその結果を平均することで、時間分解能は犠牲にするが、実効的に計測精度が向上する。

7. むすび

本稿では、3次元距離計測の4つの方式を取り上げ、その原理について説明した。また、それらの方式を用いて高精度に距離を推定するために、さまざまな機能を集積したイメージセンサの技術について簡単に紹介した。

本稿で紹介したもの以外にも、可視光と同時に近赤外の情報を撮像できるイメージセンサ¹²⁾など、新しいデバイスの検討が進んでいる。今後もこのようなイメージセンサの高機能化により、距離計測技術のさらなる向上が期待できる。

(2014年4月7日受付)

〔文献〕

- 1) 相澤清晴, 浜本隆之編著: “CMOSイメージセンサ”, 第5章, コロナ社 (2012)
- 2) <http://www.xbox.com/ja-JP/kinect/>
- 3) <https://www.leapmotion.com/>
- 4) 例えば, http://www.semicon.toshiba.co.jp/product/new_products/sensor/1325631_37639.html
- 5) 佐藤宏介: “3次元画像計測”, 計測と制御, 47, 1, pp.4-9 (2008)
- 6) 長尾祥一, 浜本隆之: “動物体抽出と距離推定を行う2眼イメージセンサの設計”, 信学技報, 102, 340, pp.71-76 (2002)
- 7) H. Kashiyama, T. Yoshida and T. Hamamoto: "Smart Image Sensor for Detection of Well-focused Position using Multiple Focused Images", IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS), D2-6, pp.282-285 (2003)
- 8) S. Yoshimura, T. Sugiyama, K. Yonemoto and K. Ueda: "A 48 kframe/s CMOS image sensor for real-time 3-D sensing and motion detection", ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.94-95 (2001)
- 9) T. Matsushima and M. Ikeda: "CMOS Image Sensor for 3-D Range Map Acquisition with Pixel-Parallel Correlation in Region of Interest", International Image Sensor Workshop, pp.353-356 (2013)
- 10) 河北真宏, 菊池宏: “実時間距離検出3次元カメラ:Axi-Vision Camera”, 日本ロボット学誌, 23, 3, pp.286-289 (2005)
- 11) 韓相萬, 高澤大志, 赤堀知行, 安富啓太, 香川景一郎, 川人祥二: “画素内背景光キャンセル機能を有する横電界制御型ToF距離画像センサ”, 映情学技報, 38, 15, pp.27-30 (2014)
- 12) S. Koyama, Y. Inaba, M. Kasano and T. Murata: "A Day and Night Vision MOS Imager with Robust Photonic-Crystal-Based RGB-and-IR", IEEE Transactions on Electron Devices, 55, 3, pp.754-759 (2008)



はまもと たかゆき
浜本 隆之 1992年, 東京理科大学工学部電気工学科卒業。1997年, 東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。現在, 東京理科大学工学部電気工学科教授, 画像情報処理, コンピュータショナルイメージセンサ等の研究に従事。博士(工学)。正会員。