



# イメージセンサ

安藤 隆 男

静岡大学電子工学研究所 〒432 浜松市城北 3-5-1

(1983年6月11日受理)

## Image Sensor

Takao ANDO

Research Institute of Electronics, Shizuoka University,  
3-5-1, Jyohoku, Hamamatsu 432

### 1. はじめに

われわれの身のまわりには数多くの光の情報がいり乱れている。人間の眼はこの光の情報を空間的な光の分布、すなわちイメージとして受け入れ、脳は伝え、行動や判断を制御している。イメージセンサはこのような光学情報を検知し、電気信号に変換するちょうど人間の眼と同じ働きをする入力デバイスで、画像の遠方への伝送(テレビ、ファクシミリなど)や画像情報の判断機能をもつ自動化機械に数多く応用されている。

従来、2次元的な情景や画像情報を撮るいわゆる画像の入力デバイスは撮像装置とか撮像デバイスと呼ばれているが、最近ではこれら入力デバイスがたんにテレビ技術の分野だけでなく、広い範囲に使用されコンピュータ技術と結びついて画像の計測や認識機能をもつ装置の視覚機能的な使われ方をされることも多い。そこで、光学的な画像情報をとらえる一般的な名称として視覚代行的な感覚をもつイメージセンサという言葉が最近使われる。

現在、画像入力デバイスとしてはビジコンを代表とする撮像管が主流である。しかし **Table 1** で指摘するように、撮像管にない多くの優れた特長をもつ固体のイメージセンサは、たんに画を撮るだけでなく広範囲の応用が考えられる。

ここでは近年技術的發展が目覚ましいこの固体イメージセンサについて、リニア(1次元)センサ、エリア(2次元)センサ、さらに広い意味の信号処理機能をも集積した多機能イメージセンサの最近の成果を述べる。

固体イメージセンサの研究は1960年代から始まり、1967年にフォトダイオードとMOST (metal oxide semiconductor transistor) スイッチを組み合わせたXYアドレス型のイメージセンサが発表されてから本格的な開発が始まった<sup>1)</sup>。

とくに、1970年に電荷結合素子(CCD; charge-coupled devices)が発表され<sup>2)</sup>、これを走査機能素子として用いた固体イメージセンサが考案されるに及んで加速度的に技術が発展してきた。現在ではいくつかの特性面で撮像管を凌ぐ固体イメージセンサも報告されるに至った。

### 2. リニアイメージセンサ

最近、オフィスオートメーション(OA)時代に入り、OA機器の代表的な装置であるファクシミリや画像ファイルの入力デバイスにこのイメージセンサが使われる。リニアイメージセンサは一方向の機械的走査と併用してきわめて高速に、高分解能で画像の入力ができる点に大きな魅力がある。

リニアセンサはその構成からMOS (metal oxide semiconductor) 型とCCD型に分けられる。MOS型センサは **Fig. 1** に等価回路を示すように、シフトレジスタからの順次走査パルスによって各画素のMOSTスイッチを順次オン状態にしてフォトダイオードに蓄えられた信号電荷を映像信号として出力側に読み出す。このセンサはMOSICプロセスによって容易に作られ、1,728画素のものが開発されているが、走査パルスによってMOSTスイッチを開閉する際に発生するスパイク雑音

Table 1 固体イメージセンサの特長

1. 画素位置が正確で、図形歪が本質的に少ない
2. 空間分解能が画面で一様
3. 多重出力、2カ以上の同時アドレスができ、高度な信号処理が可能
4. 画素が独立しており、多重化技術が使える
5. 低残像
6. 動作周波数の変更が容易
7. 小型・軽量
8. 機械的に堅牢
9. 低消費電力・長寿命

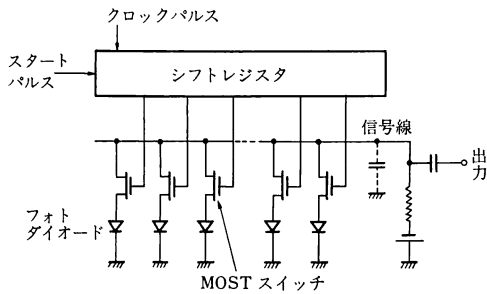


Fig. 1 MOS型1次元センサの構成

が信号線に混入して雑音が大きいの。

CCD型リニアセンサはフォトダイオードに光によって生じた信号電荷を一定期間蓄えた後、同時にCCDシフトレジスタに移し、この電荷をCCDの電荷転送作用で出力部に導き映像信号を得る。Fig. 2に代表的なCCD型センサの構成を示す。CCD型センサは低雑音で、 $10^3$ 程度のダイナミックレンジをもち、B4サイズの画像を16 lines/mmの分解能で読みとれ、16段階の中間調が再現できる。4,096画素のものが開発されている。センサの分解能をきめるフォトダイオードのピッチは両側に設けられたCCDシフトレジスタのビット密度で制限される。XeroxはFig. 3に示すようにフォトダイオードの両側に各2チャンネルの信号転送用のレジスタを配置し、フォトダイオードピッチ $8\mu\text{m}$ を実現し

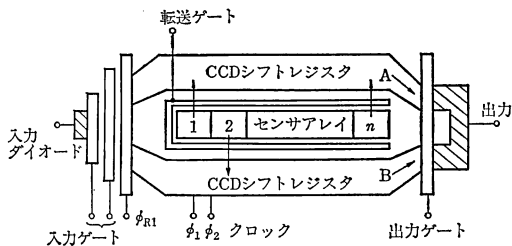


Fig. 2 CCD型1次元センサの構成

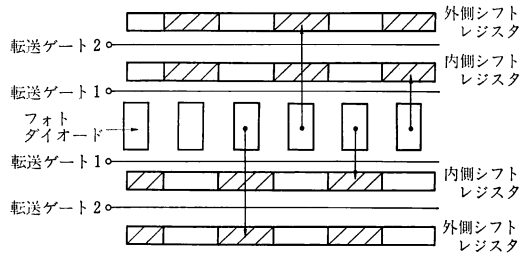


Fig. 3 4本のシフトレジスタをもつ高密度センサ

た<sup>3)</sup>。

ここに説明した単結晶半導体ICによるセンサでは長尺のものを実現できない。装置に応用する場合、縮小結像のために光学系が必要となり、その光路長を保つ必要上装置を小型に作れない欠点がある。そこでFig. 4に示すように画像原稿幅とリニアセンサの長さを1対1に対応させて画像情報を入力する密着型リニアセンサの研究開発が進められている。このセンサの光電変換部にはTable 2に示す特長から水素添加のアモルファスシリコン(a-Si:H)膜が使われる。a-Si:H膜はアモルファスでありながら高い構造感性を示し、可視光に対して高い感度をもつ( $3 \times 10^{-8} \text{ A/mm}^2$ , 35 lux)<sup>4)</sup>。また、p-i-n, ITO(透明電極)-a-Si<sub>x</sub>N<sub>1-x</sub>-i-a-Siなどのブロッキング接触構造を設けることにより、暗電流を $3 \times 10^{-11} \text{ A/mm}^2$ 以下に抑えることができる<sup>4)</sup>。

現在、画素1,728、ピッチ8画素/mmのリニアセン

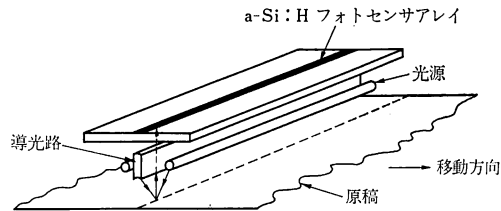


Fig. 4 密着型1次元イメージセンサの構成

Table 2 a-Si:H膜の特長

1. 大面積(長尺)センサが可能
2. 人間の視感度に近い分光感度
3. 高感度(可視部の光吸収がSi単結晶より大)、高応答
4. 高抵抗
5. 200°Cくらいまでの高温に耐える
6. 無公害
7. ガラスなど安価な基板が使用可能

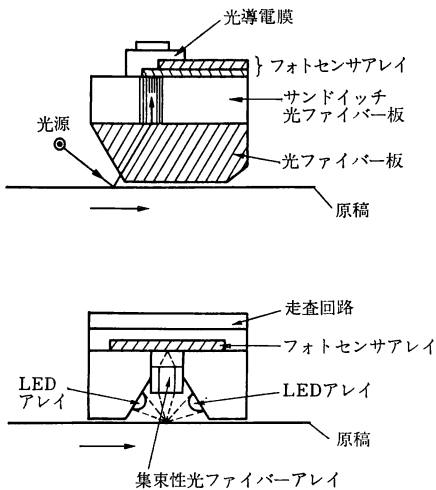


Fig. 5 密着型イメージセンサの光学系

サで 100 lux の照明のもと 5 ms/line のデータレートが得られている<sup>6)</sup>.

密着型センサでも一方は機械的に動かす必要があるうえ、なんらかの形で外部より画像を照明しなければならないので、センサと原稿を完全に密着させるわけにはゆかない。そこで可能な限り短い光路長で画像情報をセンサ面に導くため、Fig. 5 に示すような光学ファイバーを使用する。

### 3. エリアセンサ

エリアイメージセンサをデバイス構成上の特長で分類すると、フレーム転送 CCD 型、インターライン CCD 型、MOS 型ならびに CPD (charge priming device) 型に分けられる。

#### 3.1 フレーム転送 (frame transfer) CCD センサ

FTCCD センサの基本構成を Fig. 6 に示す。光電変

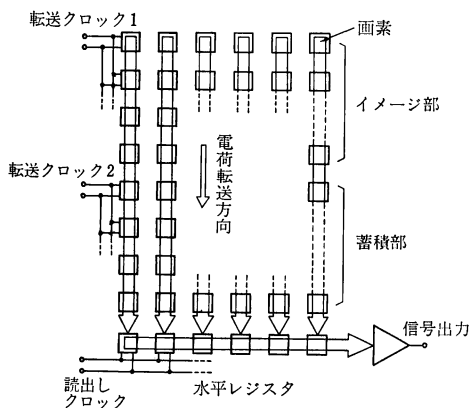


Fig. 6 FTCCD センサの基本構成

換を行なうイメージ部と信号電荷の一時記憶と順次読出しを行なう蓄積部からなる。垂直ブランキング期間にイメージ部から送り込まれる一画面分の信号電荷を蓄積部にいったん蓄えた後、ゆっくりと最下部の水平 CCD に 1 行ずつ送り順次読み出す。このセンサは構造が簡単であるが、蓄積部の面積だけチップ面積が大きくなるうえ、MOS キャパシタのゲート電極を通して光を入射するために青感度が低い。また画素が光電変換と電荷転送の二つの役割を時分割で行なうために、垂直方向にスマアが生ずる。最近、あまり目立った動きはない。

#### 3.2 インターライン (inter-line) CCD センサ

ILCCD センサは Fig. 7 のようにフォトダイオードからなる光電変換部と埋込みチャンネルの垂直レジスタおよび水平レジスタによって構成される。1 フレーム期間フォトダイオードに蓄えられた信号電荷を垂直ブランキング期間に転送ゲートを開けて一斉に垂直 CCD に送る。転送ゲートを閉じた後、順次下方に電荷転送され、水平 CCD を通して出力端で読み出される。垂直 CCD に加えるクロック電圧を Fig. 8 のように 3 値で駆動すれば、転送ゲートと CCD の転送電極とを共用できる<sup>6)</sup>。

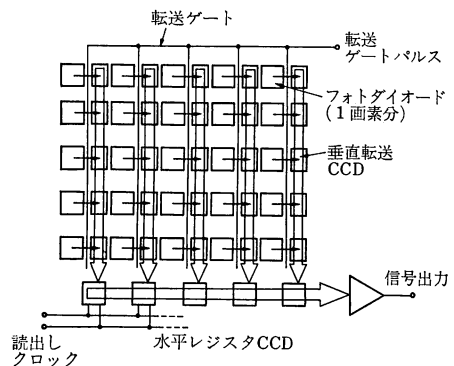


Fig. 7 ILCCD センサの基本構成

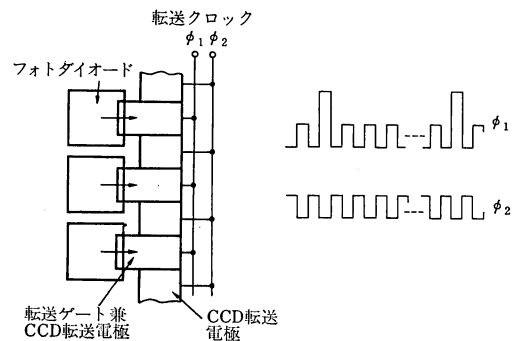


Fig. 8 転送ゲートと CCD 転送電極の共用 (a) とクロックパルス波形 (b)

光電変換をフォトダイオードで行なうことによる光感度の向上とオンチップアンプの低雑音化で感度  $0.085 \mu\text{A}/\mu\text{W}$  (550 nm), 等価雑音電子数 48 エレクトロンを得ている<sup>7)</sup>.

受光面が  $8.8 \text{ mm (H)} \times 6.6 \text{ mm (V)}$  程度のなかに水平 385 程度, 垂直 480 程度の画素を集積したセンサが市販され始めた。最近, 高い性能を狙ったセンサとして開口率 40%,  $768 \times 490$  画素のものを開発し, 水平解像度 560 TV本を実現した報告がある<sup>7)</sup>。このほかに限られた画素数を有効に利用して実効的な解像度を高める目的で空間絵素ざらし<sup>8)</sup>なども発表されている。

ブルーミング, スミアは固体イメージセンサにとって大きな問題である。ブルーミングは飽和レベル以上の強い入射光により発生した電荷が隣接画素にあふれ出す現象である。この対策としてオーバフローレインと呼ぶ特殊な構造を設け, あふれた電荷を吸いとる方法<sup>9)</sup>が一般的であるが, Fig. 9 に示す構造を採り, 過剰電荷を下部の基板に捨てると開口率の低下を生じないので注目される<sup>6)</sup>。この方法を縦型オーバフローレインと呼ぶ。この方法によりブルーミングに関してはほぼ完全に抑圧できる。またこの構造に伴って, 光電変換に寄与する活

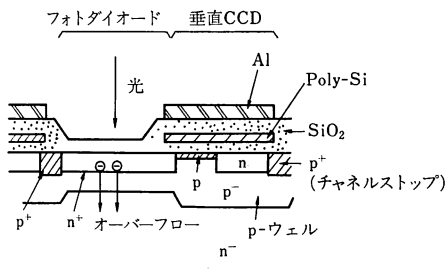


Fig. 9 縦型オーバフローレインの構造

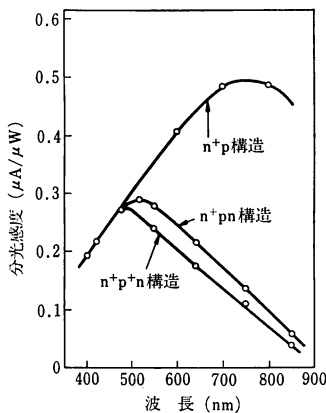


Fig. 10 フォトダイオードの分光感度特性

性層の厚さを薄くでき, 赤外感度を抑えて人間の視感度に近い分光感度が得られる (Fig. 10 参照)。

スミアは強い光入射によってセンサの基板深部で発生した電荷が拡散によって信号読出し部に漏れる結果, 明るい被写体が上下にうすく広がって見える現象である。このスミアは光入力に比例して増加するので, 信号電流の  $10^{-5}$  程度に抑える必要がある。現在, スミア低減のために, 掃き出し駆動<sup>10)</sup>, 基板構造の検討<sup>11)</sup>, フレームインターライン CCD<sup>12)</sup> などの対策が報告されている。この結果, 現状ではスミア比を  $10^{-4}$  程度まで抑えることが可能になった。

### 3.3 MOS 型センサ

このセンサの基本構成を Fig. 11 に示す。フォトダイオードと蓄積電荷を読み出す垂直・水平スイッチおよび垂直・水平シフトレジスタ回路とで構成される。このセンサでは MOS 型リニアセンサと同様, Fig. 12 に示すように水平シフトレジスタからの走査パルスでスイッチ MOS をオンするとき同期性の雑音が信号線に混入するので, 画面上に縦の細かなずじとなる固定パターン雑音 (FPN) が生じやすい。Fig. 13 に示すように水平走査の 1 クロック周期にわたって信号スパイク雑音を積分する回路を付けることにより 15~20 dB の低雑音化ができて<sup>13)</sup>。

MOS 型センサでは複数の画素を同時にアドレスし, その信号も複数の信号線から同時に読み出せる。この構

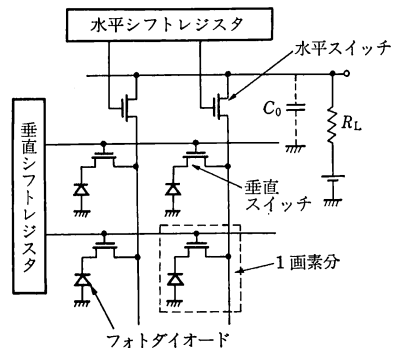


Fig. 11 MOS 型エリアセンサの基本回路

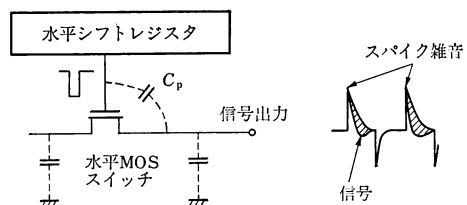


Fig. 12 MOS 型センサのスパイク雑音

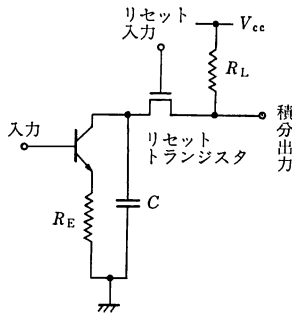


Fig. 13 スパイク雑音を低減する積分回路

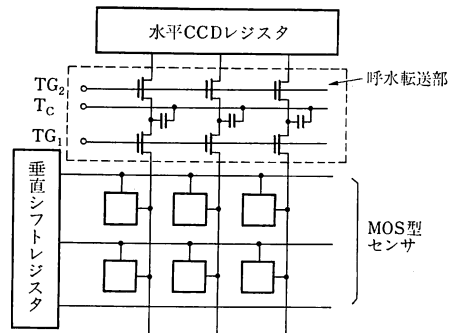


Fig. 15 CPD型センサの基本構成

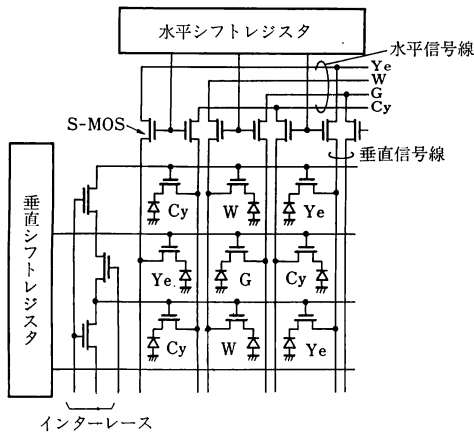


Fig. 14 4線出力・2線同時読出し方法による MOS型単板カラー用センサの構成

成上の特長は高度な信号処理が容易に行なえる可能性をもつ。この点を利用した4線出力、2行同時読出し方法による単板カラー用デバイスの構成を Fig. 14 に示す。出力端よりただちに白信号と三つの補色信号が得られる<sup>14)</sup>。また、水平解像度を向上させたセンサ構成の報告もある<sup>15)</sup>。

### 3.4 CPD型センサ

このセンサは受光部の構成が MOS 型で、水平の読出しを CCD 型で行なう<sup>16)</sup>。MOS 型センサの垂直信号線に現われる微弱な信号電荷を静電容量の大きな垂直信号線から効率よく高速で水平 CCD に転送するために、この二つの間に Fig. 15 に示す呼び水転送 (charge priming transfer) という転送部を設けてある。この結果、MOS 型センサで生じやすい固定パターン雑音やランダム雑音が小さくでき、低雑音増幅器のオンチップ化とあわせて高い SN 比が得られる。また、MOS 型センサでの開口率が広い特長がそのまま使えるのでダイナミックレンジが大きくできる特長がある。

CPD 型センサでも呼び水転送部の駆動法を中心にス

ミア対策として垂直信号線に信号電荷を移す前に信号線上のスミア成分をあらかじめ除去するスイープドレイン<sup>17)</sup>、読出しを奇偶二つの水平 CCD に分けて読み出しスミア成分と信号とを分離する方法<sup>16)</sup>などが報告されている。

CCD 型、MOS 型ならびに CPD 型センサについては、ホームビデオ用ならびに工業用カメラとして十分実用化しうる水準にまで達している。

### 3.5 光導電膜積層型センサ

これまで述べたセンサはいずれも光電変換部と信号伝送路が同一平面上に形成されているため、画素数を増すに従い光電変換部の面積利用率が減り、感度が下がる欠点がある。さらに、信号電荷が信号通路にも入るため本質的にスミア、ブルーミングが避けがたい。そこで、Fig. 16 に示すように光電変換と走査読出しとを基板の厚み方向に機能分散させたデバイスが報告されている。ここでは光電変換は撮像管用に開発した光導電膜を使いそこで発生した光電荷を下側の ILCCD<sup>18)</sup> や MOS アレイ<sup>19)</sup>に移し、読み出そうとするものである。

現在は研究開発の段階であるが、センサのほぼ全面を受光面積に使えるため感度が高く、とれ、チップ寸法も小さくできる。また光は光導電膜のみで吸収されるのでブルーミングやスミアは本質的に少ない<sup>20)</sup>。光導電材料の

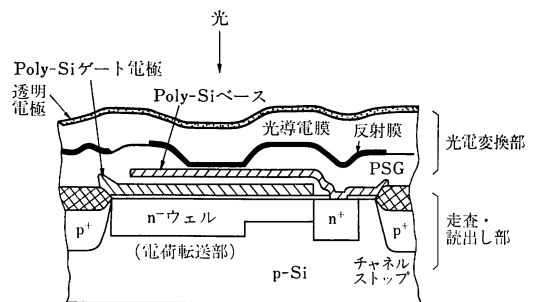


Fig. 16 光導電膜積層型センサの画素断面構造

選択, 処理過程の工夫によって, 任意の分光感度分布のセンサが期待できる. エリアセンサが今後さらに画素数を増して高精細画像を扱うデバイスに発展するとともに, 次に述べるセンサ内になんらかの信号処理機能を含むスマートセンサへ発展すると考えるとセンサの3次元構造は避けられない. この意味でこのデバイス概念は注目される. しかし現状では光導電膜による残像や製作工程が複雑になるなどの問題がある.

4. 多機能イメージセンサの動き

固体イメージセンサは, 光電変換機能だけでなく記憶機能や何らかの演算処理を行なう回路を同一チップ上に付加して撮像面での2次元画像処理機能をもたせることも可能である.

4.1 スマートセンサ

Nudd は CCD を用いて Fig. 17 に示す3×3の最近接画素間のコンボルバ演算処理回路を提案し, 入力変換の過程でフィルタ操作や微分演算のような画面全体に対する一様演算をほどこす実験を行なっている<sup>21,22</sup>. 輪廓

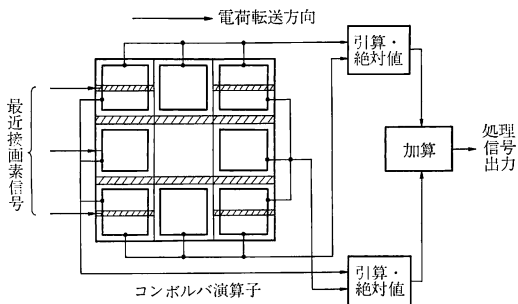


Fig. 17 CCD を利用した Sobel 演算回路

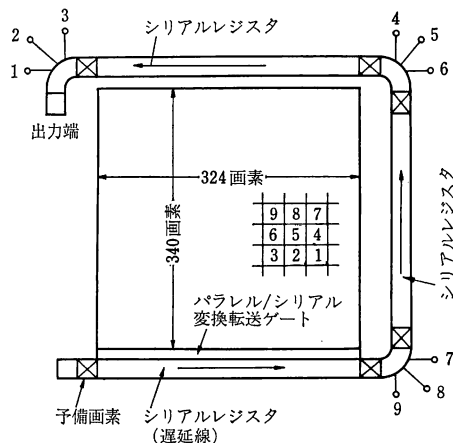


Fig. 18 多重出力型 CCD イメージセンサ

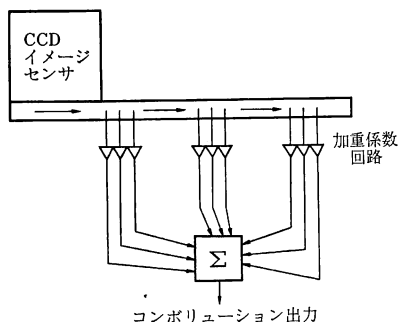


Fig. 19 3×3 要素コンボルバの動作原理

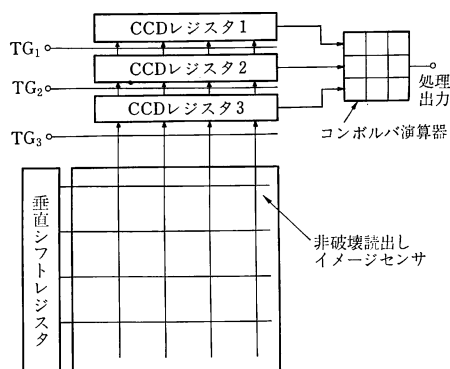


Fig. 20 非破壊読出しセンサとコンボルバ演算回路との組合せ

抽出, 局所平均, 2 値化, 平滑化などがコンピュータ処理よりも 100~200 倍の高速でできる.

このコンボルバ演算子に並列的に画像信号を供給しうる多重出力型 CCD イメージセンサ<sup>23</sup>の構成を Fig. 18 に示す. 通常の水平 CCD レジスタに加えて 1 行分の画素信号を遅延できるシリアルレジスタを 2 本イメージ部の周囲に連続して配置し, それぞれのレジスタの終段より 3 本ずつの映像出力線を設ける. これを Fig. 19 に示すようにコンボルバ演算子と同一チップ上に集積して結ばればリアルタイムで新しい処理画像信号が得られる<sup>24</sup>. 同様な考えから, Fig. 20 に示す信号の非破壊読出しを使ったセンサの提案もある<sup>25</sup>.

4.2 画像メモリを内蔵したイメージセンサ

光学像の光電変換とともに同じ画素内に記憶することもできるイメージセンサ実験の報告がある<sup>26</sup>. このセンサの 1 画素の構造を Fig. 21 に示す. MNOS (metal nitride oxide semiconductor) ゲートに信号を不揮発性で記憶する. この記憶情報は任意時刻に読み出せると同時に, 新たに入射する画像情報を内蔵メモリ情報で制御しながら読み出した<sup>27</sup>, 入射画像とメモリ画像間で画面

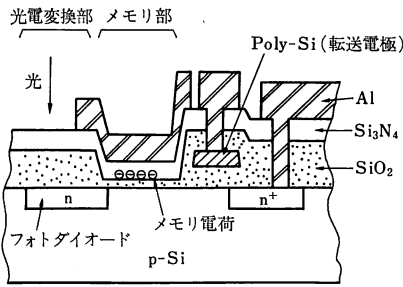


Fig. 21 不揮発性画像メモリデバイスの画素断面構造

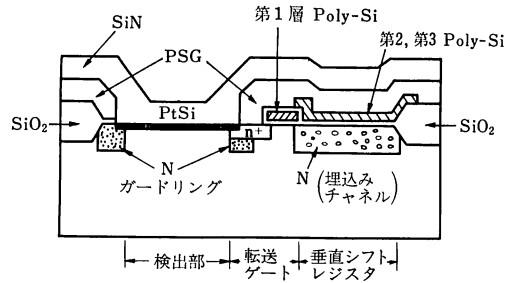


Fig. 23 PtSi/P-Si ショットキ障壁形 IRCCD の画素断面構造

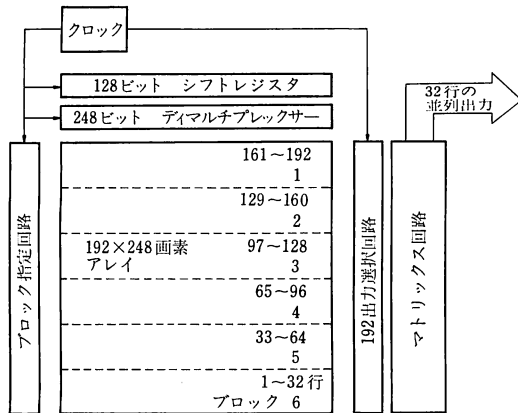


Fig. 22 高速画像入力デバイス

全体に対して同時に減算ならびに乗算(相関)<sup>28)</sup>を行なうことが可能である。この結果は移動画像情報の検出や前画面と異なる画像情報のみの検出が高速で行なえる可能性を示唆する。

4.3 並列読出し高速画像入力デバイス

これは高速度現象の解析用に開発されたもので Fig. 22 に示すように 192×248 画素を垂直方向に6ブロックに分割し、32 行の信号を並列に読み出す。全画素を 2,000 フレーム/秒、部分的な画像では 12,000 フレーム/秒で高速度撮像することが可能である<sup>29)</sup>。

4.4 IR (赤外線) イメージセンサ (IRCCD)

赤外線の画像化はたんに撮るよりも画像の認識ならびに計測が主体となるから知能化センサの中核技術となる。現在、HgCdTe などの化合物半導体を用いたもの<sup>30)</sup>や SiCCD を基礎とした PtSiSB ダイオード<sup>31)</sup>を使用したセンサが研究されている。後者では Fig. 23 の画素構造をもつ 256×256 画素の ILCCD センサが発表され、500 K で 4×10<sup>8</sup>V/W の感度を得ている<sup>32)</sup>。

このような新しい機能を付加したセンサの研究はまだ緒についたばかりで、今後、画像処理技術、知能ロボッ

トなどの進展とともに活発化するものと考える。

5. む す び

固体イメージセンサは OA 分野やホームビデオ分野の成長に呼応して急進展し、市販され始めた。今後も集積回路技術の進歩に支えられて高精細度画像に対応するより画像数の多いイメージセンサに向かうと考えられる。超 LSI の先端量産技術予測に従えば 1990 年には 1,000×1,000 画素のイメージセンサを実現することも不可能ではないといえる。一方、固体イメージセンサの本質的な特長や撮像面処理の並列・瞬時性などから、画像処理を撮像面上で行なうインテリジェントイメージセンサも重要になると考える。

文 献

- 1) IEEE Trans. Electron Devices, **ED-15** (1968) Solid-State Imaging Issue.
- 2) W. S. Boyle and G. E. Smith: Bell. Syst. Tech. J., **49** (1970) 587.
- 3) L. S-P. Sheu, N. Kadekodi, T. Ngo and A. Ibrahim: *Int. Solid-State Circ. Conf. Dig. of Tech. Pap.* (1983) p. 252.
- 4) S. Kaneko, M. Sakamoto, F. Okumura, T. Itano, H. Kataniwa, Y. Kajiwara, M. Kanamori, M. Yasumoto, T. Saito and T. Ohkubo: *Tech. Dig. Int. Electr. Devices Meet.* (1982) p. 328.
- 5) T. Ozawa, M. Takenouchi, T. Hamano, H. Ito, M. Fuse and T. Nakamura: *Proc. 1982 International Microelectronics Conference* (1982) p. 132.
- 6) 織田英嗣, 石原保雄, 河野明啓, 寺西信一: テレビ学会全国大会予稿集 (1981) p. 57.
- 7) E. Oda, I. Akiyama, T. Kamata, Y. Ishihara, A. Kohno, K. Arai and T. Kitagawa: *Int. Solid-State Circ. Conf. Dig. of Tech. Pap.* (1983) p. 264.
- 8) 山中成介, 山崎博司, 橋本武夫, 阿部元昭, 越智成之: テレビ学会誌, **33** (1979) 516.
- 9) C. H. Séquin: Bell Syst. Tech. J., **51** (1972) 1293.
- 10) 遠藤幸雄, 原田 望, 吉田興夫: テレビ学会全国大会予稿集 (1981) p. 5.
- 11) 松本茂則, 黒田隆男, 栗山俊寛, 広島義光, 堀居賢樹, 国井孝雄: テレビ学会全国大会予稿集 (1982) p. 27.

- 12) 黒田隆男, 堀居賢樹, 松本茂則, 国井孝雄: テレビ学会全国大会予稿集 (1982) p. 35.
- 13) S. Ohba, M. Nakai, H. Ando, S. Hanamura, S. Shimada, K. Satoh, K. Takahashi, M. Kubo and T. Fujito: IEEE Trans. Electron Devices, **ED-27** (1980) 1682.
- 14) 青木正和, 安藤治久, 大場信弥, 竹本一八男, 長原修策, 谷口彬雄, 久保証治, 藤田 努: テレビ学会全国大会予稿集 (1980) p. 31.
- 15) 高橋健二, 小沢直樹, 青木正治, 竹本一八男, 鈴木敏樹, 宮沢敏夫, 長原修策: テレビ学会技報, **5** (1982) ED-623.
- 16) 曾根賢次, 石川清次, 橋本 進, 大前昌軌, 平木政夫, 寺川澄雄, 大久保祥雄: テレビ学会技報, **5** (1982) ED-621.
- 17) 山田隆博, 宮川八州美, 藤本 真, 森村 淳, 田中大通, 寺川澄雄: テレビ学会全国大会予稿集 (1982) p. 107.
- 18) T. Chikamura, S. Fujiwara, T. Shibata, Y. Miyata, Y. Terui, K. Wada, Y. Ohta and M. Fukai: IEEE Trans. Electron Devices, **ED-29** (1982) 999.
- 19) 馬路 徹, 下元泰治, 松丸治男, 田中靖夫, 小池紀雄, 秋山俊之, 笹野 晃, 塚田俊之: テレビ学会技報, **5** (1982) ED-606.
- 20) T. Chikamura, Y. Miyata, Y. Ohta, S. Fujiwara and M. Fukai: IEEE Trans. Electron Devices, **ED-29** (1982) 1857.
- 21) G. R. Nudd, P. A. Nygaard, G. D. Thurmond and S. D. Fouse: Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., **155** (1978) 15.
- 22) G. R. Nudd, P. A. Nygaard and C. L. Jiang: *Int. Conf. CCD's* (1978) p. 43.
- 23) J. E. Hall, J. F. Breitzmann, M. M. Blouke and J. T. Carlo: *Tech. Dig. Int. Electr. Devices Meet.* (1978) p. 415.
- 24) J. T. Carlo and J. E. Hall: Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., **178** (1979) 154.
- 25) 神戸秀夫, 梶井 清, 安藤隆男: テレビ学会全国大会予稿集 (1981) p. 35.
- 26) 鈴木裕巳, 田中 均, 安藤隆男: テレビ学会全国大会予稿集 (1982) p. 49.
- 27) 鈴木裕巳, 安藤隆男: 電子通信学会技報, **ED-82** (1982) 138.
- 28) 安藤隆男: 電気四学会連合大会 S-18 (1983) 発表予定.
- 29) T-H. Lee, T. J. Tredwell, B. C. Burkey, C. Anagnostopoulos, J. S. Hayward, T. M. Kelly, P. P. Khosla, D. L. Losee and J. P. Lavine: IEEE Trans. Electron Devices, **ED-29** (1982) 1469.
- 30) D. D. Buss, R. A. Chapman, M. A. Kinch, S. R. Borrello, A. Simmons and C. G. Roberts: *Tech. Dig. Int. Electr. Devices Meet.* (1978) p. 496.
- 31) W. F. Kosonocky: Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., **344** (1982) 66.
- 32) M. Kimata, M. Denda, N. Yutani, N. Tsubouchi, H. Shibata, H. Kurebayashi and S. Uematsu: *Int. Solid-State Circ. Conf. Dig. of Tech. Pap.* (1983) p. 254.