

■8群-4編-1章

1-8 垂直色分離型センサ

(執筆著者：相原 聡) [2010年12月 受領]

現在のテレビジョン (TV) カメラやデジタルカメラに組み込まれているイメージセンサには、小型で信頼性に優れる Charge Coupled Device (CCD) や Complementary Metal-Oxide Semiconductor (CMOS) センサが用いられており、画素微細化・高集積化技術の進展により、高い画質を実現している。しかし、画素サイズが小さくなると1画素当たりの入射光量が減少するため、微細化が進むほど感度やダイナミックレンジが低下するという課題を抱えている。また、カラー画像を取得する方式として、プリズムを用いて光を3原色に分離し、3枚の撮像デバイスでそれぞれを受光する方式(3板式;放送用カメラなどに適用)と、1枚の撮像デバイス表面に光の3原色に対応したカラーフィルタを分散的に配置する方式(単板式;デジタルカメラなどに適用)があるが、3板式はカメラの小型軽量化に限界があり、単板式は3板式と比較して感度や解像度の劣化をまねくという問題がある。

そこで、上記の問題を抜本的に解決するために、光の進行方向で3原色を順次分離する機能をもたせた垂直色分離型センサの開発が進められている。本節では、垂直色分離型センサの動作原理を述べるとともに、シリコンや有機材料を光電変換部に用いた垂直色分離型センサについて解説する。

1-8-1 構造・動作

図 1-90 に、垂直色分離型センサの動作原理図を示す。ここでは、センサに入射した光が青、緑、赤の順に色分離される場合の動作について説明する。

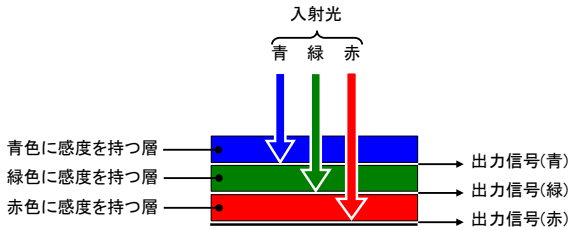


図 1-90 垂直色分離型センサの原理図

このセンサに光が入射すると、青色に感度をもつ層で青色の光が吸収され、ここで吸収された光の量に対応した電荷が生成されるとともに、この電荷が外部に読み出される。また、青色以外の光、すなわち緑色、赤色の光はこの層を透過し、次の緑色に感度をもつ層に達する。以下、緑色に感度をもつ層、及び赤色に感度をもつ層でも同様な動作が繰り返され、最終的に、入射光は各層で光の3原色に分離されるとともに電荷に変換され、外部に出力される。このように垂直色分離型センサでは、入射した光を、デバイスの深さ方向、すなわち光の進行方向で3原色に分離しているため、カラーフィルタを用いた色分解方式に比べて光の利用率が格段に高く、原理的には、入射光のほとんどすべてを利用することができる。

1-8-2 シリコンフォトダイオードによる垂直色分離型センサ

シリコン (Si) の吸収係数には波長依存性があるため、Si 基板内部への光の侵入深さが色ごとに異なる。例えば、白色光が Si 基板に照射されると、波長の短い青色の光は基板表面近傍でほぼ吸収されるが、赤色の光は基板深くまで侵入する。この性質を利用し、フォトダイオードの深さ方向で色分解を行うイメージセンサ¹⁾が開発された。

このセンサの1画素の断面構造模式図を図1・91に示す。p形Si基板上にnpn接合層が形成されており、基板表面のnp接合層で青色光、中間のpn接合層で緑色光、最も深いnp接合層で赤色光に由来する信号電荷が発生する。それぞれの層から信号電荷を取り出すことで、1画素から青、緑、赤の色情報を得ることができる。一方で、光電変換材料にSiを用いているため、青色光用のnp接合層近傍でも実際には緑や赤色光が吸収されるなどのことから、分光感度はカラーフィルタやプリズムと比較してブロードになる。そのため、色再現には信号処理による補正が必要である。このイメージセンサは2002年に実用化され、その後も開発が進められており、現在、製品化されている唯一の垂直色分離型カラーイメージセンサである。

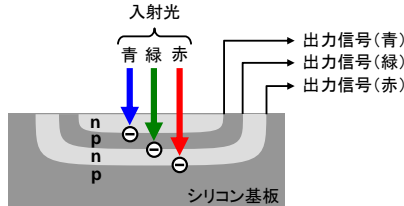


図1・91 シリコンフォトダイオードによる垂直色分離型センサの断面構造模式図

1-8-3 有機光導電膜による垂直色分離型センサ

青、緑、赤色光のそれぞれにのみ感度を有し、かつ、ほかの色の光は透過する有機光導電膜を3層積層することで、3板式と同様な高画質を得ることのできる垂直色分離型イメージセンサの実現を目指した研究開発が進められている。

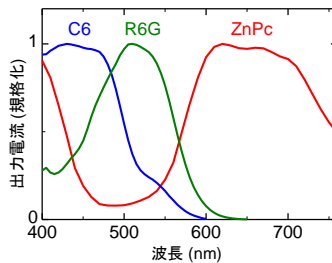


図1・92 有機光導電膜の分光感度特性例

青色用、緑色用、赤色用の光導電材料に、クマリン6 (C6)、ローダミン6G (R6G)、亜鉛フタロシアニン (ZnPc) をそれぞれ用いた有機光導電膜の分光感度特性の一例²⁾を図1・92に示す。クマリンやローダミンは色素レーザー用の色素として、フタロシアニンは感光体の材

料として広く使われている材料である。これらの材料はそれぞれ青、緑、赤色光に対する応答があり、用いた光導電材料の光吸収に起因する出力電流が得られている。この結果は、光の3原色に吸収極大をもつ有機材料を選択することで、図1・90の構造をもつ垂直色分離型センサが実現できることを示している。また、これらの有機材料は、感度をもたない色の光に対する透過率が高いため、各光導電膜の積層順に制限がないことも特長である。この例のほかに垂直色分離型センサ用光導電材料として報告されたものには、青色用材料ではポルフィリン化合物³⁾やフルオレン化合物⁴⁾、緑色用材料ではキナクリドン化合物^{3),5)}などがある。

有機光導電膜を用いて高い解像度を有する動画を撮像できることは、撮像管を信号読み出し部に用いた評価実験により示された⁶⁾。有機光導電膜を組み込んだハイビジョン撮像管(有機膜の有効走査面積: 垂直5.4 mm×水平9.6 mm, 垂直有効走査線数: 1080本)での画像評価実験により、ハイビジョンに対応可能な高い解像度が得られることが実証され、有機光導電膜を用いることで、高精細で、かつ撮像面の全領域で光電変換が可能な(有機膜を画素に分割する必要がない)イメージセンサが実現できることが明らかとなった。

3層それぞれの有機光導電膜からの信号読み出しには、光透過率の高い薄膜トランジスタ(TFT)による信号読み出し回路を各有機膜層に備える方法⁷⁾や、CMOS読み出し回路を最下層部に集積し、各有機膜層からの信号はビアプラグを介して読み出す方法⁵⁾などが提案されている。最近になって、光透過性の高い信号読み出し回路として酸化亜鉛(ZnO) TFTを用い、ZnO TFT回路を形成した3枚のガラス基板上に青色用、緑色用、赤色用有機膜を個別に成膜した素子を、光の入射側から青・緑・赤の順に積層したデバイス(各色128×96画素)によるカラー映像が報告され、有機膜を用いた垂直色分離型センサの原理実証がなされた⁸⁾。

また、有機光導電膜を用いたイメージセンサ応用として、垂直色分離型ではないが、1層のパンクロ感光性有機膜(可視域全域に感度をもつ有機膜)をCMOS読み出し回路上に形成し、カラーフィルタで色を分離することによりカラー画像を取得する方法も提案されている⁹⁾。光の利用効率では3層構造に劣るが、開口率が高く光吸収係数が大きいという有機膜の特長を活かしているため、裏面照射型を含む現状の単板式センサと比較して画素微細化と高画質との両立に有利な構造といえる。

■参考文献

- 1) R. B. Merrill, U. S. Patent No. 5,965,875, "Color separation in an active pixel cell imaging array using a triple-well structure," 1999.
- 2) S. Aihara, Y. Hirano, T. Tajima, K. Tanioka, M. Abe, N. Saito, N. Kamata, and D. Terunuma, "Wavelength selectivities of organic photoconductive films: Dye-doped polysilanes and zinc phthalocyanine/tris-8-hydroxyquinoline aluminum double layer," *Appl. Phys. Lett.*, vol.82, no.4, pp.511-513, 2003.
- 3) H. Seo, S. Aihara, T. Watabe, H. Ohtake, M. Kubota, and N. Egami, "Color Sensors with Three Vertically Stacked Organic Photodetectors," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.46, no.49, pp.L1240-L1242, 2007.
- 4) T. Fukuda, M. Komoriya, R. Kobayashi, Y. Ishimaru, and N. Kamata, "Wavelength-Selectivity of Organic Photoconductive Devices by Solution Process," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.48, no.4, 04C162, pp.04C162.1-04C162.4, 2009.
- 5) S. Takada, M. Ihama, and M. Inuiya, "CMOS Image Sensor with Organic Photoconductive Layer Having Narrow Absorption Band and Proposal of Stack Type Solid-State Image Sensors," *Proc. SPIE* 6068, 60680A, 2006.
- 6) S. Aihara, K. Miyakawa, Y. Ohkawa, T. Matsubara, T. Takahata, S. Suzuki, N. Egami, N. Saito, K. Tanioka, N. Kamata, and D. Terunuma, "Image Pickup from Zinc Phthalocyanine/Bathocuproine Double-Layer Film Using

- Pickup Tube,” Jpn. J. Appl. Phys., vol.42, no.7B, pp.L801-L803, 2003.
- 7) 相原 聡, “有機光電変換膜を用いた撮像デバイス,” 光学, vol.35, no.11, pp.585-587, 2006.
 - 8) 瀬尾北斗, 相原 聡, 渡部俊久, 大竹 浩, 久保田 節, 江上典文, 平松孝浩, 松田時宜, 古田 守, 平尾 孝, “128x96 画素 RGB 積層有機撮像デバイスの試作,” 2010 映情学年次大, 5-7, 2010.
 - 9) 竹内 豊, 後藤 崇, 三ツ井哲朗, 野村公篤, 前原佳紀, 猪股 浩, 井浜三樹男, “画素サイズの微細化に適したバンクろ感光性有機光導電膜積層型 CMOS イメージセンサ,” 映情学技報, vol.33, no.30, pp.9-12, 2009.

■8群-4編-1章

1-9 人工網膜

(執筆者：太田 淳) [2011年2月 受領]

人工網膜 (Retinal Prosthesis, Artificial Retina) とは、外界画像を取得し、その画像パターンに応じて網膜を電気刺激することで光覚パターンを誘発し、それにより失明患者の視覚再建を目指す視覚補綴デバイスである¹⁾。全体の基本構成は、**図 1・93** に示すように、刺激デバイスを体内に埋植し、電力やデータ供給を無線で行う場合が多い²⁾。

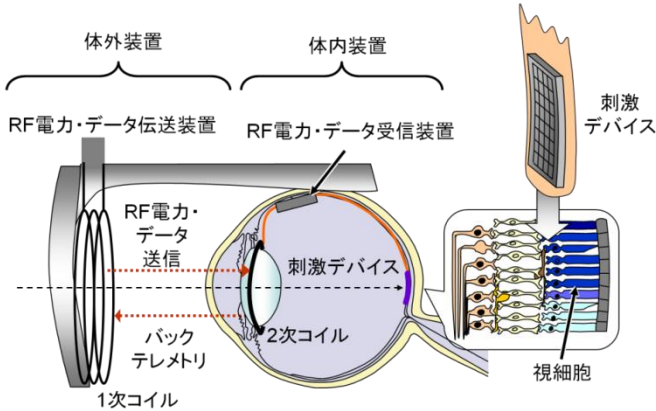


図 1・93 人工網膜システムの基本構成

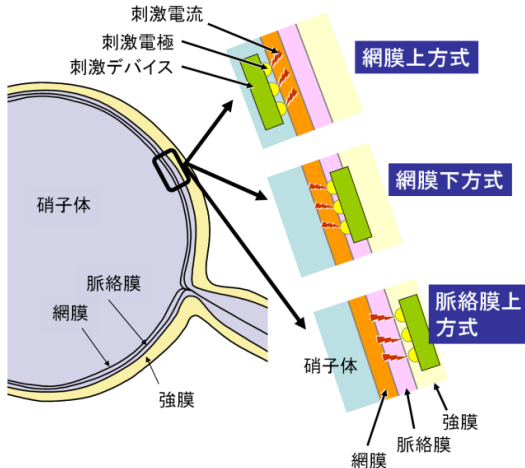


図 1・94 網膜刺激型人工網膜の種類

網膜の刺激位置により網膜上, 網膜下, そして脈絡膜上の3方式で大別される(図1・94)。なお, 網膜から視神経を経て, 外側膝状体, 大脳視覚野に至る視覚経路である神経系のいずれかの部位を刺激することでも光覚パターンを誘起できる。これらを総称して人工視覚(Visual Prosthesis, Artificial Vision, Artificial Sight)や人工眼(Artificial Eye)と呼ぶことがあるが, 用法が一定しているわけではない。現在開発が一番進んでいるのは網膜刺激型であるが, 視神経刺激型や大脳視覚野刺激型も古くから開発が進められており臨床試験がすでに実施されている。本節では特に撮像素子技術の人工網膜応用について限定をして解説を行い, 人工視覚一般については2群2編で解説する。

図1・95は撮像から刺激までの流れを示したものである。まず外界情報を, 撮像系を通じて取得する(光電変換)。画像データを2値化やビンニング処理など適宜信号処理した後, 網膜細胞刺激電流パターンとする。電極と細胞間インピーダンスに影響されずに網膜細胞を有効に刺激し光覚を得るために, 通常定電流とすることが多い。また, 生体内での電荷蓄積を防ぐため, 電荷注入後に電荷を引き抜く正負のバイフェイジックパルスとする必要がある。適切な電荷量とパルス幅, 繰り返し周期をもつ電流パルスを生成する回路が刺激パルスパターン生成回路となる。生成された刺激電流は刺激電極を通じて出力される。出力された電流は帰還電極を通じて流れることになる。

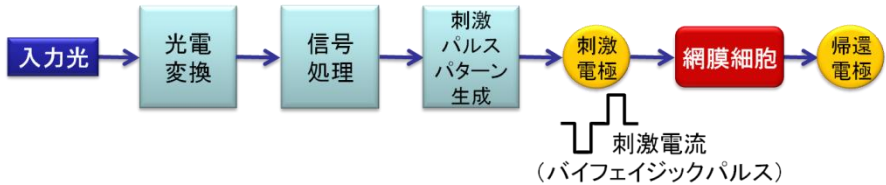


図1・95 人工網膜における撮像から刺激までの流れ

図1・96は撮像素子の配置場所の観点から人工網膜システムを分類したものである。図1・96(a)は撮像素子体外設置型であり, 撮像素子が実装されたカメラシステムを体外に設置し, 撮像データ体内に埋植した刺激デバイスに無線送信する。主として網膜上方式³⁾や脈絡膜上方式⁴⁾の人工網膜で用いられる方式である。この場合, 撮像素子は患者が装着するバイザーなどに設置されることが多く, 小型軽量であることが求められる以外には, 制約はあまりない。現状では刺激電極数は100点以下であるため, 適宜画素数を減らす処理がなされる。また, 網膜刺激として現状では光覚をオン・オフする2値刺激となっているため, 画像データも2値化されることが多い。その場合, 背景光量により2値化の閾値を変化させる順応機能も求められる。いずれにしても画素数が少ない場合, この方式はシステムへの要求は高くなく実現が容易といえる。現在開発が一番進んでいるのが撮像素子体外設置型の網膜上方式である³⁾。

刺激点数が100点近くになると, この構成の場合, 図1・96(a)に示すように刺激電流生成回路から刺激電極アレイまでを直接接続することが配線の引き回しの観点から困難となり, Multiplexer (MUX) などの切り替えスイッチが必要となる。更に刺激点数が多くなる場合, この方式では実現が困難となる。まずMUXから刺激電極への配線数が多くなり, 眼内という狭い空間での接続が難しくなる。また, 画素数が増えた場合, 体外に設置したカメラから

の画像データの無線通信でも高いデータレートが要求されるため、無線システム設計要件が厳しくなり、例えばデータ通信と電力通信系で通信方式を変え、またコイルも別々に設置するなどの工夫が必要とされる。また、広い視野角を実現する場合には、患者の視点を検出しそれに伴い撮像点を移動する必要も出てくるため、システムとして複雑な構成となる懸念がある。なお、高速のデータ伝送に赤外光を用いる方式もある。

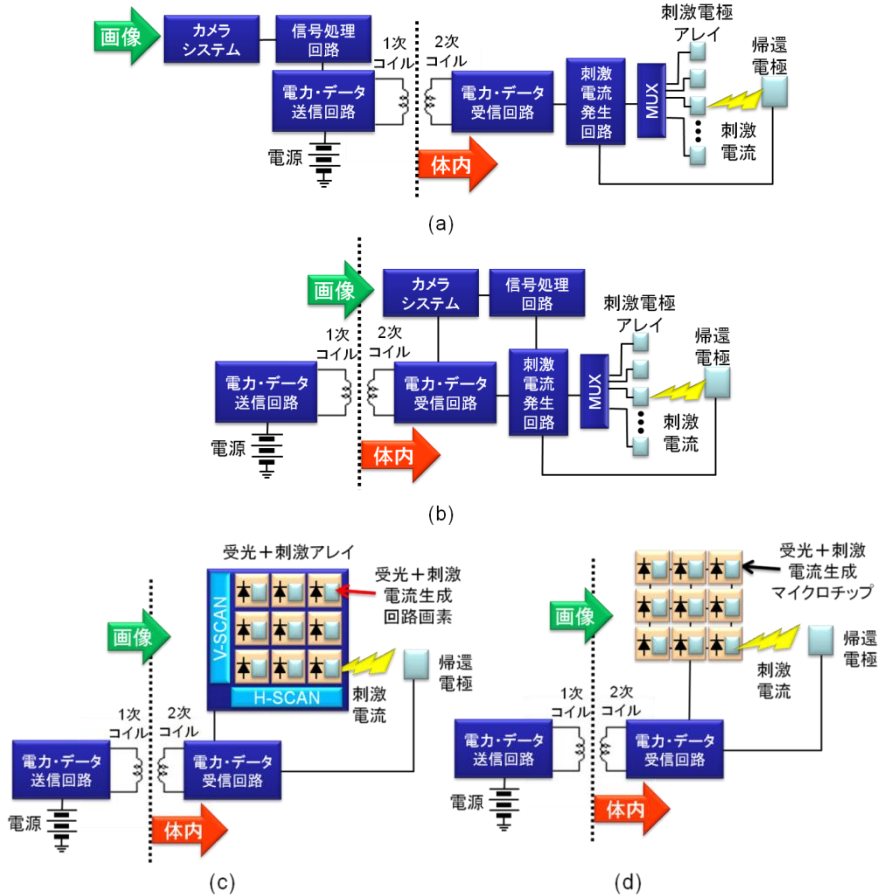


図 1・96 人工網膜システムの構成

視点検出を不要とするのが、撮像システムを体内に埋植する方式である。表 1・5 は、撮像素子を体内に設置する方式に関する報告をまとめたものである。図 1・96(b) は小型カメラシステムを体内に設置する方式である。兔眼内にマイクロカメラを埋植し、視神経刺激を行う報告例がある。光学系は眼光学系をそのまま用いている。現状では侵襲性が極めて高いが、実装方法や低消費電力化が達成できれば有望な方式といえる。ただし実装形態や刺激場所によっては、次に述べる撮像素子を体内に設置する方式に近づくともみすこともできる。

撮像素子を体内に設置する方式が図 1・96(c)である。主として網膜下方式に用いられる。このような構成の場合、前述の Multiplexer は不要となりシステム構成としては簡単となり、埋め込みデバイスにとっては大きな利点となる。また、視線検出が不要となる利点もある。ただし、デバイスを網膜下に埋め込む必要があり、手術としては網膜上や脈絡膜上に比べて難しくはなる。

表 1・5 撮像素子を体内に設置する方式の人工網膜

| 構成 | 方式 | 刺激部位 | 機関 | 参考文献 |
|----------------------|-------------------------|--------------|--------------------|-------------------|
| 小型カメラ 眼内埋め込み | CMOS イメージセンサ | 視神経 | C-Sight | (5) |
| マイクロフォト ダイオードアレイ | 太陽電池モード | 網膜下 | Optobionics | (6) |
| | 近赤外光変換 | 網膜下 | Stanford 大 | (7) |
| 撮像・電極集積化 CMOS センサ | 順応機能付対数センサ | 網膜下 | Retina Implant | (8)~(10) |
| | 3次元集積化チップ | 網膜上 | 東北大 | (11) |
| | PFM-, APS- ベースフォトセンサ | 網膜下, 脈絡膜上 | 大阪大/奈良先端大/ ニデック | (2), (12)-(15) |

図 1・96(c)の方式で一番簡単な構造としてマイクロフォトダイオードアレイ (MPD) を用いる報告がある⁶⁾。PD (フォトダイオード) の光電流を網膜刺激電流として用いるものであり、太陽電池モードではバッテリーが不要という利点がある。しかしながら太陽電池モードでは、日常の照明光下で光覚を誘起するために十分な刺激電流を確保できないこと、また光電変換だけでは有効な網膜刺激に必要なバイフェージック電流を得ることが難しいことなどから開発が中断された。これらの問題を解決するため、画像情報を近赤外光に変換して十分な光量を取り、また PD へのバイアス条件を工夫してバイフェージック動作を可能とした報告がなされている⁷⁾。ただしこの場合、MPD への電力供給や制御データが必要となるため、体外からの電力・データ伝送が必要となる。

撮像素子と刺激電流発生回路を集積化した画素を用いることで、光覚を誘起できる網膜刺激電流が生成可能となる。図 1・96(c)は、そのような画素をアレイ化した方式である。通常のイメージセンサの各画素に刺激電流源を集積化した構造とみすことができる。ただし、通常のイメージセンサが画像信号をチップ外に出力する必要があるのに対して、人工網膜では各画素から独立に出力することが異なる。これまで 1500 画素を集積化したデバイスが網膜下に埋植され、臨床試験では物体の認識などが可能など良好な結果が報告されている^{8)~10)}。網膜下方式では網膜剥離を人工的に行い、デバイスを挿入するため、組織と電極との密着性が良好である一方、デバイスサイズが大きいと網膜剥離が再発するなどの懸念がある。眼球のカーブに沿ってデバイスが曲がらない点も問題である。今後の慢性臨床の結果が注目される。

上述の問題を解決する方式として、図 1・96(c)に示すような分散型配置方式が提案されている²⁾。この場合、1 個のマイクロチップ上に 1 個ないしは数個の画素が搭載されている (図

1・96(d)では1個)。各マイクロチップには刺激電流生成回路のほか制御回路も集積化されており、制御データにより刺激電流を流すかどうか、流す場合、その大きさなどを制御することが可能である。実際に刺激電流源を搭載したマイクロチップが試作され兔眼内に埋植して網膜刺激を行い、その有効性を実証した報告がある^{12),15)}。

今後画素数が増加し、また刺激領域が広がった場合、画像処理が重要になってくると予想される。特に周囲光に応じて刺激量を調整することは重要となろう。すでにこのような機能を内蔵した報告例もあるが⁸⁾、その効果については不明である。今後の研究が期待される。

■参考文献

- 1) M. S. Humayun, J. D. Weiland, G. Chader, and E. Greenbaum (Eds.), "Artificial Sight," Springer, New York, 2007.
- 2) J. Ohta, T. Tokuda, K. Kagawa, T. Furumiya, A. Uehara, Y. Terasawa, M. Ozawa, T. Fujikado, and Y. Tano, "Silicon LSI-Based Smart Stimulators for Retinal Prosthesis," *IEEE Eng. Med. & Biol. Magazine*, 25 (5), pp.47-59, 2006.
- 3) A. K. Ahuja, J. D. Dorn, A. Caspi, M. J. McMahon, G. Dagnelie, L. daCruz, P. Stanga, M. S. Humayun, and R. J. Greenberg, Argus II Study Group, "Blind subjects implanted with the Argus II retinal prosthesis are able to improve performance in a spatial-motor task," *Br. J. Ophthalmol.*, bjo.2010.179622, Published Online First: 29 September 2010 doi:10.1136/bjo.2010.179622.
- 4) 田野保雄, "人工視覚システムの臨床応用を目指して," *日本眼科学会誌*, 113 (3), pp.315-343, 2009.
- 5) X. Chai, L. Li, K. Wu, C. Zhou, P. Cao, and Q. Ren, "C-Sight Visual Prosthesis for the Blind," *IEEE Eng. Med. Bio. Mag.*, vol.27, no.5, pp.20-28, 2008.
- 6) A. Y. Chow, M. T. Pardue, V. Y. Chow, G. A. Peyman, C. Liang, J. I. Perlman, and N. S. Peachey, *IEEE Trans. Neural Sys. & Rehabilitation Eng.*, 9 (1), pp.86-95, 2001.
- 7) A. Asher, W. A. Segal, S. A. Baccus, L. P. Yaroslavsky, and D. V. Palanker, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 54 (6), pp.993-1004, 2007.
- 8) A. Dollberg, H. G. Graf, B. Hoefflinger, W. Nish, J. D. Schulze Spuentrup, K. Schumacher, and E. Zrenner, *Proc. Int'l Conf Biomed. Eng., Salzburg*, pp.255-260, Jun. 2003.
- 9) A. Rothermel, L. Liu, N. P. Aryan, M. Fischer, J. Wuenschmann, S. Kibbel, and A. Harscher, "A CMOS Chip With Active Pixel Array and Specific Test Features for Subretinal Implantation," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol.44 (1), pp.290-300, 2009.
- 10) E. Zrenner, K. U. Bartz-Schmidt, H. Benav, D. Besch, A. Bruckmann, V.-P. Gabel, F. Gekeler, U. Greppmaier, A. Harscher, S. Kibbel, J. Koch, A. Kusnyerik, T. Peters, K. Stingl, H. Sachs, A. Stett, P. Szurman, B. Wilhelm, and R. Wilke, "Subretinal electronic chips allow blind patients to read letters and combine them to words," *Proc. Royal Soc. B*, Nov. 3, 2010, doi: 10.1098/rspb.2010.1747.
- 11) T. Tanaka, K. Sato, K. Komiya, T. Kobayashi, T. Watanabe, T. Fukushima, H. Tomita, H. Kurino, M. Tamai, and M. Koyanagi, "Fully Implantable Retinal Prosthesis Chip with Photodetector and Stimulus Current Generator," *IEEE International Devices Meeting (IEDM)*, pp.1015-1018, Dec. 2007.
- 12) J. Ohta, T. Tokuda, K. Kagawa, S. Sugitani, M. Taniyama, A. Uehara, Y. Terasawa, K. Nakauchi, T. Fujikado, and Y. Tano, "Laboratory Investigation of Microelectronics-Based Stimulators for Large-Scale Suprachroidal Transretinal Stimulation (STS)," *J. Neural Eng.* 4 (1), S85-S91, 2007.
- 13) K. Kagawa, K. Yasuoka, D. C. Ng, T. Furumiya, T. Tokuda, J. Ohta, and M. Nunoshita, "Pulse-domain digital image processing for vision chips employing low-voltage operation in deep-submicron technologies," *IEEE Selected Topics Quantum Electron.*, 10 (4), pp.816-828, 2004.
- 14) T. Furumiya, D. C. Ng, K. Yasuoka, K. Kagawa, T. Tokuda, M. Nunoshita, and J. Ohta, "Functional verification of pulse frequency modulation-based image sensor for retinal prosthesis by in vitro electrophysiological experiments using frog retina," *Biosensors and Bioelectronics*, 21 (7), pp.1059-1068, 2006.
- 15) T. Tokuda, K. Hiyama, S. Sawamura, K. Sasagawa, Y. Terasawa, K. Nishida, Y. Kitaguchi, T. Fujikado, Y. Tano,

and J. Ohta, "CMOS-based multichip networked flexible retinal stimulator designed for image-based retinal prosthesis," IEEE Trans. Electron Devices, 56 (11), pp.2577-2585, 2009.

■8群-4編-1章

1-10 シミュレーション

(執筆著：武藤秀樹) [2011年1月 受領]

イメージセンサの性能向上やセルサイズの縮小を行ううえで、光学及び電気特性シミュレーションは極めて重要である。以下に、イメージセンサの光学及び電気特性シミュレーションの計算モデルと解析例について述べる。

1-10-1 計算モデル

(1) 電気特性シミュレーション

光による電荷の生成を考慮しながら以下のポワソン方程式と電流連続式を連立して解く¹⁾。

$$\nabla(\varepsilon\nabla\phi)+q(p-n+N_D-N_A)=0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t}+\nabla(\mu_n n\nabla\phi-D_n\nabla n)-GR=0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t}-\nabla(\mu_p p\nabla\phi+D_p\nabla p)-GR=0 \quad (3)$$

ただし、 ϕ は電位、 n と p は電子濃度とホール濃度、 N_D と N_A はドナーとアクセプタ濃度、 μ_n と μ_p は電子とホールの移動度、 D_n と D_p は電子とホールの拡散係数、 GR は生成消滅レートを表す。

電荷の生成消滅には、必要に応じて、光のほかに暗電流の生成源として SRH (Shockley-Read-Hall) 項や衝突イオン化を考慮する。マイクロレンズや色フィルタなどのシリコン基板上の膜を含めた総合的な光学電気特性は、光による生成消滅レートとして、光学シミュレーションの計算結果を用いる。

(2) 光学シミュレーション

解析対象が入射光波長に比べて充分大きく、薄膜による光の干渉や、遮光膜端の回折が問題とならないような場合には、光線追跡が用いられるが、 $2\mu\text{m}$ 以下のセル構造や反射防止膜のような薄膜による干渉、もしくは遮光膜端の回折を考慮しなければならない場合には、FDTD (Finite Difference Time Domain) 法、境界要素法や局所境界要素法による波動光学シミュレーションが必要になる。解析対象に応じてこれらの解析方法を使い分ける必要がある。

(a) 光線追跡法

多数の光線を対象構造に入射し、物質境界面において Snell の法則に基づいて屈折角を求める。すなわち、屈折率 n_1 と n_2 の物質境界で入射角 θ_1 、屈折角 θ_2 の屈折が生じる場合、

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (4)$$

の関係が成り立つ。このとき、物質境界面における反射率 R 及び透過率 T は、以下の Fresnel の式を用いて、入射角と屈折角から算出する²⁾。

$$R = \{ \tan^2(\theta_2 - \theta_1) / \tan^2(\theta_2 + \theta_1) + \sin^2(\theta_2 - \theta_1) / \sin^2(\theta_2 + \theta_1) \} / 2 \quad (5)$$

$$T = \{ 1 + 1/\cos^2(\theta_2 - \theta_1) \} \sin 2\theta_2 \sin 2\theta_1 / \sin^2(\theta_2 + \theta_1) / 2 \quad (6)$$

(b) FDTD 法

電界を \mathbf{E} 、磁界を \mathbf{H} で表し、 μ 、 ε 、 σ をそれぞれ透磁率、誘電率、導電率とすると、電流

\mathbf{J} は $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ で置き換えられるので、Maxwell の方程式は以下の式で表される。

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = -\frac{\sigma}{\varepsilon} \mathbf{E} + \frac{1}{\varepsilon} \nabla \times \mathbf{H} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{E} \quad (8)$$

これらの方程式を解くために差分法を用いて時間及び空間の離散化を行う。電界と磁界を空間的に半セルずれた位置で、時間軸において半ステップずれた時刻で定義する。入射光に対応する境界条件を設定し、一定時間経過するまで電界と磁界を交互に逐次代入することにより、時間に依存した電界と磁界を求めることができる³⁾。

(c) 境界要素法及び局所境界要素法

境界要素法及び局所境界要素法は以下の Helmholtz の方程式を基本とする⁴⁾。

$$\nabla^2 \phi + k^2 \phi = 0 \quad (9)$$

ただし、 k は波数、 ϕ は電場または磁場の一成分を表し、どちらも複素数である。

式(9)はグリーン関数を含んだ積分方程式に変換できるので、物質境界にのみ離散化した電磁場要素を設けることにより、この積分方程式を解く。

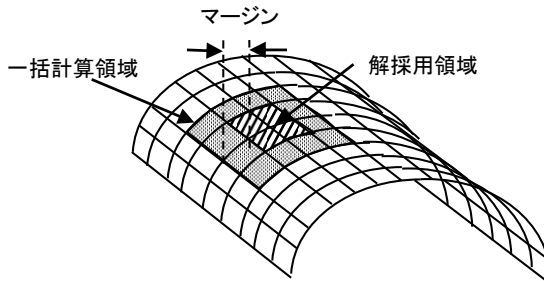


図 1・97 局所境界要素法の計算要素

図 1・97 に局所境界要素法に用いるメッシュ、すなわち面要素の設定を示す。通常の境界要素法では界面にのみ要素を設け、全要素間の相互作用を考慮して全要素上の電磁場を一括して求める。局所境界要素法では一括して電磁場を求める領域を限定し、限定された領域で領域内外の要素上の電磁場の影響を考慮しながら領域内の電磁場を一括して求める。一括計算領域の周辺部を除いて中央領域のみを正しい電磁場の解として採用し、順次上記の領域をシフトさせながら電磁場を求めることにより、全要素上の電磁場を求めることができる。一括計算領域を各界面内でシフトしながら最上層から最下層まで計算し、必要に応じて複数回の繰り返し計算を全層に対して行う。この方法を用いると、使用するメモリ空間を極めて小さくでき、従来の境界要素法に比べて計算時間を著しく小さくすることができるので、現在の計算機でも 3 次元の波動光学計算が十分実用的になる⁵⁾。

1-10-2 解析例

電気特性シミュレーションの解析例として CMOS イメージセンサのフォトダイオード電荷読み出し特性解析を、光学シミュレーションの解析例として、局所境界要素法による光導

波路構造の集光率とクロストーク解析を示す。

(1) CMOS イメージセンサのフォトダイオード電荷読み出し特性解析⁶⁾

図 1・98 に解析を行った CMOS イメージセンサのセルのレイアウト図と等価回路を示す。セルサイズは $5 \mu\text{m}$ で、フォトダイオード部は暗電流と残像の低減のために埋め込みフォトダイオード構造を採用している。図中の Δ_p は埋め込みフォトダイオード表面の P⁺マスク端と読み出しゲート端の距離を、 Δ_g はフォトダイオードの左端と読み出しゲートの右端との距離すなわち読み出しゲートの張り出し量を示す。セルは P 基板上に一つの埋め込みフォトダイオードと読み出し、リセット、選択、増幅の四つの MOS トランジスタから構成されている。読み出しゲートのゲート長は $0.75 \mu\text{m}$ 、そのほかのゲート長は $0.5 \mu\text{m}$ 、電源電圧は 3.3V に設定した。

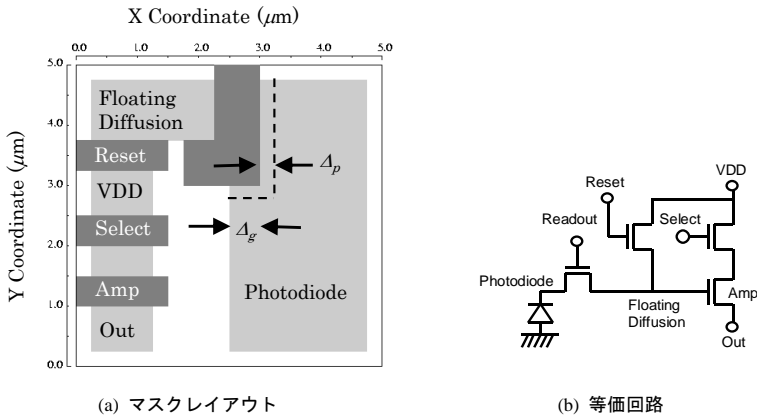


図 1・98 解析に用いた CMOS センサのマスクレイアウトと等価回路

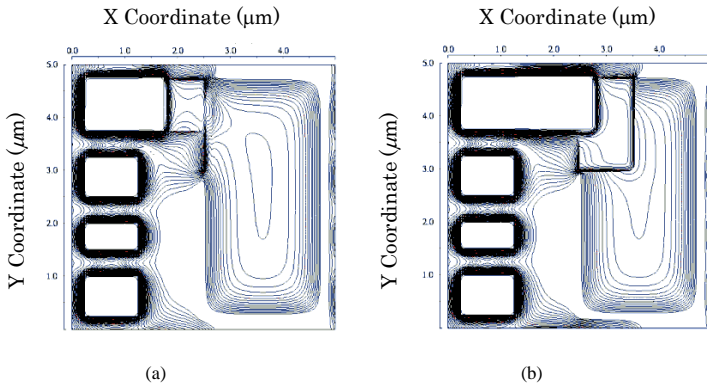


図 1・99 XY 平面最大電位 ((a) : $\Delta_g = 0, \Delta_p = 0.25$, (b) : $\Delta_g = 1.0, \Delta_p = 0.1$)

図1・99に、 $\Delta_g = 0$, $\Delta_p = 0.25$ の場合(a)と、 $\Delta_g = 1.0$, $\Delta_p = 0.1$ の場合(b)のXY平面最大電位分布を示す。ゲートの張り出しがない($\Delta_g = 0$)場合(a)、読み出しゲートの幅が $1\mu\text{m}$ と小さいために、狭チャネル効果によってフォトダイオード出口に電位障壁が生じ、同時に読み出しゲート下に電位ディップが発生していることが分かる。これに対し、ゲートの張り出しがある場合(b)は電位障壁(バリア)も電位の窪み(ディップ)も存在しないことが分かる。

(2) 局所境界要素法による光導波路構造の集光率とクロストーク解析⁵⁾

図1・100にクロストークの解析に用いた構造を示す。画素を二つ並べて、左側の画素のマイクロレンズのみに光を照射し、左右の画素の光感度領域に入射する光量の比でクロストーク量を定義した。導波路外側が SiO_2 (屈折率1.5)で、セルサイズ w が0.5, 1, 及び $2\mu\text{m}$ のときに、クロストークと集光率の導波路内側物質屈折率依存性を求めた。

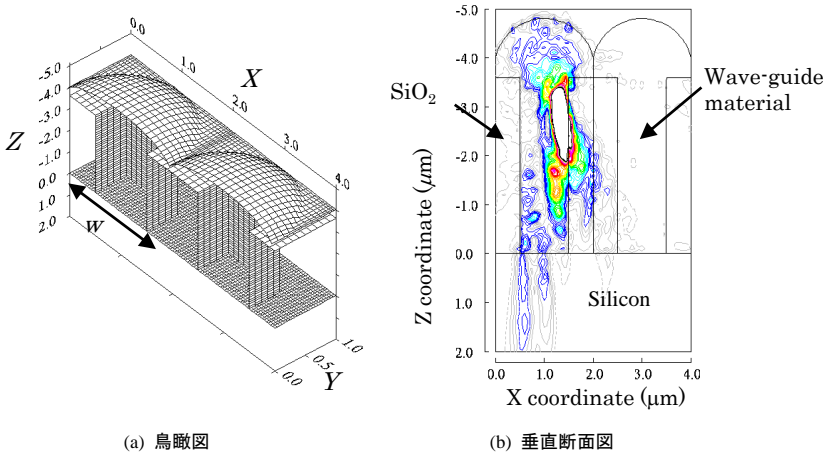


図1・100 クロストークの導波路屈折率依存性解析構造

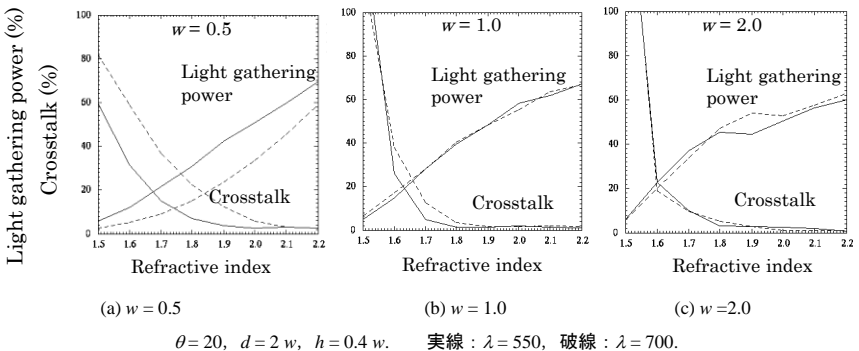


図1・101 クロストークと集光率の導波路内側物質屈折率依存性

図 1・101 に入射光波長 λ が 550 nm (実線) 及び 700 nm (破線) のときの導波路外側物質が SiO₂ の場合のクロストークと集光率の導波路内側物質屈折率依存性を示す. 光入射角 θ は 20 度とした. セルサイズ w が 1 μ m 以上の場合, 屈折率が 1.5 から 1.8 に増大するに従って, クロストークが急激に減少し, 集光率が増大することが分かる. 導波路外側物質が SiO₂ の場合, 内側物質の屈折率としては 1.8 以上が望ましいと考えられる.

■参考文献

- 1) 檀 良, “プロセス・デバイス・シミュレーション技術,” 産業図書, pp.91-106, 1988.
- 2) 石黒浩三, “光学,” 共立全書, pp.26-32, 1977.
- 3) 宇野 亨, “FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析,” コロナ社, pp.1-32, 1998.
- 4) 田中正隆, 田中道彦, “境界要素解析の基礎,” 培風館, pp.149-165, 1984.
- 5) H. Mutoh and S. Sugawa, “Three-Dimensional Wave Optical Simulation for Image Sensors by Localized Boundary Element Method,” IEEE Trans. Electron Devices, vol.56, pp.2473-2480, 2009.
- 6) H. Mutoh, “3-D Optical and Electrical Simulation for CMOS Image Sensors,” IEEE Trans. Electron Devices, vol.50, pp.19-25, 2003.

■8群-4編-1章

1-11 距離画像センサ

(執筆者：奈良部忠邦) [2011年1月 受領]

1-11-1 距離画像センサの背景

撮像デバイスへの要求仕様には、画質に関係するものとして、解像度、感度、色再現性、ノイズ、取り扱い電荷量、フレームレート、ダイナミックレンジ、光学サイズ、画素サイズ、画素レイアウトなどがあり、機能に関係するものとして、部分読み出し、画素加算、移動物体検知、などがある。更に、商品化するにあたっては、消費電力、コスト、信頼性の特性も重要である。

これらの項目は、撮像デバイスの技術の進歩により、それらの特性が向上してきた。その中で、光の波長からくる分解能の限界により、撮像デバイスの発明以来、その進歩が極めて著しかった画素サイズの微細化のスピードが、近年、飽和しつつある。それに伴い、画素サイズの微細化以外の特性向上や機能の追加の実現が求められるようになってきている。

このような中で、映像情報への更なる情報付与という観点から見ると、被写体までの距離情報を把握すること、及び、被写体の光の波長ごとの強度を把握することなどの研究、開発、実用化が進められている。

これらを実現する手段は様々な方式があり、例えば、複数台のカメラを使用してこれらの情報を把握するというのも可能ではあるが、ここでは、光学系、撮像素子、信号処理の三つが連携する撮像デバイスという観点から、被写体までの距離情報を把握する機能を加えた撮像デバイスについて距離画像センサとして述べる。

撮像デバイスに距離情報を把握する機能が加わることにより、撮影した情報を基に、距離情報を画像に反映させた、距離画像を作成できるとともに、立体画像を作成することや、任意の距離にある被写体に焦点があった画像を作成すること、あるいは、広範囲の距離にある被写体のすべてに対して焦点の合った画像を時間の推移とともに作成することなどが可能となる。

1-11-2 被写体までの距離情報を把握する手法の分類

距離情報を把握する手段は、光を使用するもの以外をも含めれば、マイクロ波を使用するもの、光を使用するもの、超音波を使用するものに大別できる¹⁾。

ここでは、撮像デバイスという観点から、これら三種類の距離情報把握手段の中で、光を使用する手段を取り扱う。

光を使用して距離情報を把握する手段は、幾何学的に測定をするもの、光飛行時間 (Time of Flight) を測定するもの、光の干渉を利用するものに大別できる。

幾何学的に測定をするものは更に大きく二つに分類できる²⁾。一つは、光源と撮像素子の両方を有して光源から発せられた光の被写体からの反射光を撮像素子で受光するアクティブ型であり、光切断法や空間位相変調型がこれに属する。他方は、光源を使用せず被写体からの光を撮像素子で受光するパッシブ型である。パッシブ型は更に三種類に分けられる。複数のカメラを使用した多視点カメラ、撮像素子の画素の直前で光線を分割する手法、カメラのレンズの絞り位置で光線を分割する手法である。

光飛行時間を測定するものには、光源にパルス波を使用するものと、連続波の強度変調を用いるものがある。光源にパルス波を使用する光飛行時間法には、光飛行時間を直接測る直接 TOF 法と、画素の読み出しを複数回行い、それらの複数の出力値を比較することによって、光飛行時間を算出する、間接 TOF 法がある³⁾。

以上のような被写体までの距離情報を把握する手法の分類を図 1・102 に示す。

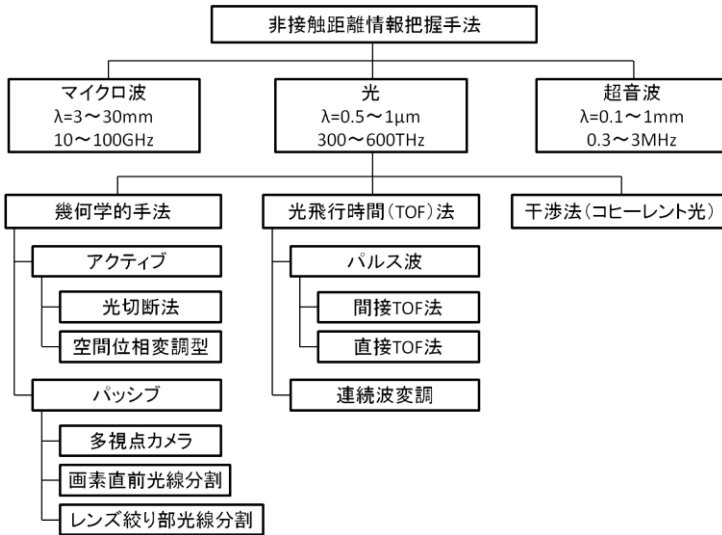


図 1・102 被写体までの距離情報を把握する手法

光を使用して距離情報を把握する手段には、このように多くの手段があり、それぞれの研究・開発が進められているとともに、用途の目的に応じて最も適したものが実用化されている。

光を使用して距離情報を把握する手段を考察するうえで、特性上重要な比較項目としては、(1) 距離情報を把握する対象物までの有効距離、(2) 距離情報を把握するために要する時間、(3) 距離情報を出力できる単位時間当たりの情報量、(4) 距離情報の精度、(5) 照明条件、(6) 距離情報と実画像情報の情報量の差異、(7) 3次元空間における死角情報の量、(8) システムの大きさや重さ、(9) 人体への安全性、

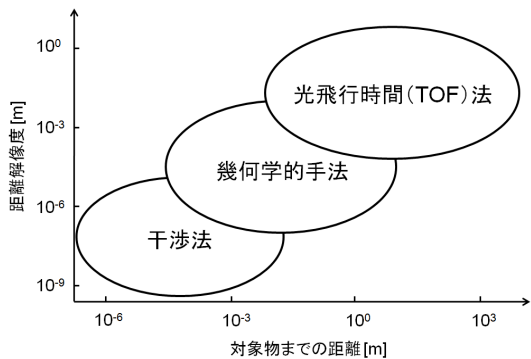


図 1・103 光を使用して距離情報を把握する手段の比較

(10)耐震性, などがあげられる^{4),5)}.

距離情報を把握する対象物までの有効距離と距離情報の精度の観点からみた, 幾何学的測定手法, 光飛行時間法, 干渉法の三種類の手法のそれぞれの特徴を図 1・103 に示す²⁾.

本節では, 幾何学的手法と光飛行時間法の二つに関して, 以下の項で説明する.

1-11-3 幾何学的手法による距離情報の把握

(1) アクティブ型

光源と撮像素子の両方を有し, 光源から発せられた光が被写体からの反射してくる光を撮像素子で受光して, 三角測量の原理に基づいて距離情報を把握するアクティブ型には, 光切断法と空間位相変調型⁶⁾がある.

光切断法は, 撮像素子から一定の距離離れたところにある光源からスリット状の光を被写体に少しずつずらしながら照射し, その反射光を撮像素子が受光することによって距離情報を求める方法である. この光切断法の原理を図 1・104 に示す. この原理を用い, 産業機器用の測定機器として製品化されているものがある⁷⁾.

通常の撮像素子を使用してこの光切断法を行うと, スリット状の光による被写体からの反射光を撮像し, 読み出し, 計算をするのに時間を要するため, 光切断法に適した撮像素子を開発し, 距離を計算する手法が報告されている^{8),9),10)}.

空間位相変調型は, 時間相関イメージセンサと呼ばれる, 光源と時間的相関をもたせた信号検出を行う撮像素子¹¹⁾を使用することによって, フレームレートで距離情報が得られる手法である. 被写体に照射する照明は, 普通の直流点灯型が利用でき, 変調の手法は, わずかにパターンの異なる二種類の透過型格子を用いる方法と格子パターンを移回転させる方法がある⁶⁾.

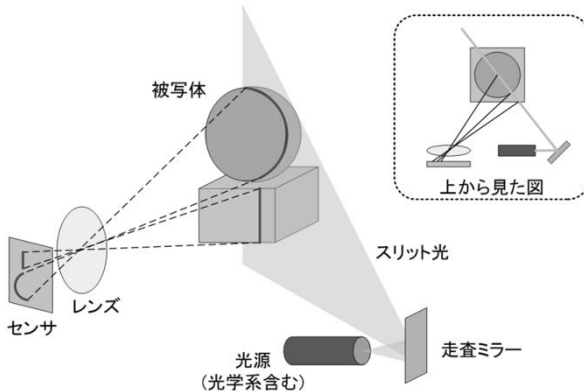


図 1・104 光切断法の原理

(2) パッシブ型

光源を使用せず被写体からの光を撮像素子で受光して得られる情報を基に距離情報を把握するパッシブ型について, ここでは, Lightfield の概念を用いて説明する¹²⁾.

空間における光線の場を Lightfield という. この光線の情報を取得する考え方は Integral

Photographs として Gabriel M. Lippmann が 1908 年に提案しているが¹³⁾、近年、ようやく実用化できる技術となってきた。

光線の情報を取得する方法には大きく分けて三種類の手法がある¹⁴⁾。

ひとつは、多視点で撮像するものであり、1 台のカメラの位置をずらしながら撮影するもの¹⁵⁾、複数台のカメラを使用して撮影するもの¹⁶⁾、撮像素子の前にカメラの主レンズとなるレンズアレイを設置して 1 個の撮像素子から多視点画像の信号を出力するもの¹⁷⁾などが具体的な手段として研究、開発されている。また、撮像素子そのものの開発においても一つのチップの中に、二つの撮像領域を搭載し、実画像と距離情報とを得る研究も報告されている^{18), 19)}。

二つめは、撮像素子の撮像面の直前で光線を分割することにより、被写体のある 1 点から発せられる光線を複数の隣接する画素領域において光線を取得するものである。この手法は更に二つの方法がある。ひとつは、撮像素子の直前にマイクロレンズアレイを置くものであり^{20), 21), 22)}、他方は撮像素子の直前にパターンマスクを置くものである^{23), 24)}。

三つめは、カメラのレンズの開口部で光線を分割するものである。この手法は、レンズの絞り部分の開口部を部分的に遮光する方法²⁵⁾、レンズ開口部付近にプリズムとレンズを設置して光線を分割する方法²⁶⁾、レンズ開口部に色フィルタを挿入する方法²⁷⁾などが開発されている。レンズの絞り部分の開口部を部分的に遮光する方法の例を図 1・105 に示す。

以上述べてきた三種類の手法の中で、ここでは、撮像デバイスという観点から、一つめの多視点撮像におけるレンズアレイを設置したものと、二つめの撮像素子の直前にマイクロレンズアレイを置いて光線を分割するものの二つの手法に関して、より詳細に説明する。

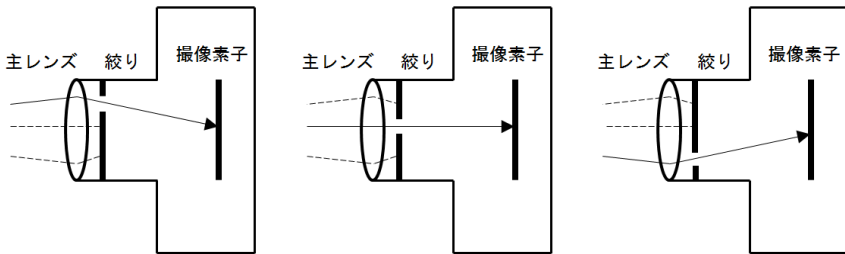


図 1・105 レンズの絞り部分の開口部を部分的に遮光して光線を分割する手法

(a) Thin Observation Module by Bound Optics (TOMBO)

薄型撮像システム TOMBO (Thin Observation Module by Bound Optics)¹⁷⁾ は、撮像素子と信号分離隔壁、レンズアレイが一体となった撮像デバイスであり、多視点撮像を 1 個の撮像素子で実現できる。多視点撮像装置としては薄型であり、小型でもある。この TOMBO の構成を図 1・106 に示す。撮像素子から出力される多視点画像を信号処理することにより、1 枚の画像を作成することや、3 次元情報の取得、超解像などが可能となる。

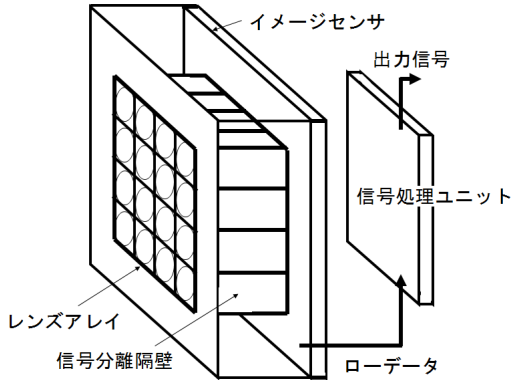


図 1・106 TOMBO (Thin Observation Module by Bound Optics) の構成

(b) Focused Plenoptic Camera 撮像デバイス

先に述べた TOMBO が多視点カメラにおける多視点撮像装置であり、カメラの主レンズがレンズアレイとして複数存在しているのに対し、カメラの主レンズは一つで撮像素子の直前に更にマイクロレンズアレイを置くことによって、撮像面の直前で光線を分割し、光線を取得する手法として Plenoptic Camera がある。

最初に提案された Plenoptic Camera は、カメラの主レンズの結像面にマイクロレンズアレイがあり、マイクロレンズの焦点距離に撮像素子がある構成である²⁰⁾。その後、この Plenoptic Camera を基に、Focused Plenoptic Camera が提案され、解像度の向上が図られている²⁸⁾。

これらの二つの方式の比較を図 1・107 に示す。

撮像素子とマイクロレンズアレイを含めた撮像デバイスの構造としては、撮像素子とマイクロレンズアレイとの間隔が変わるが、大きな違いはない。この撮像デバイスの構成²²⁾を図 1・108 に示す。

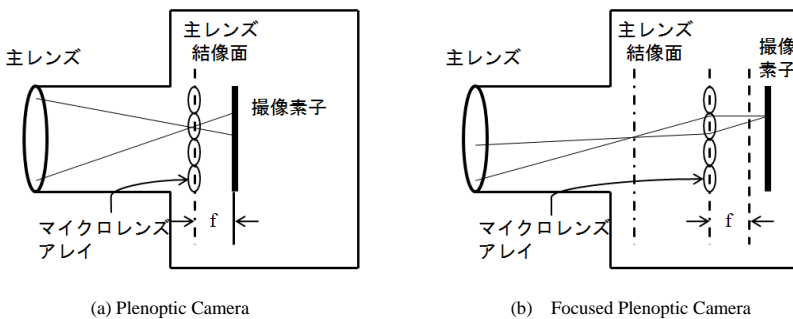


図 1・107 Plenoptic Camera と Focused Plenoptic Camera の比較

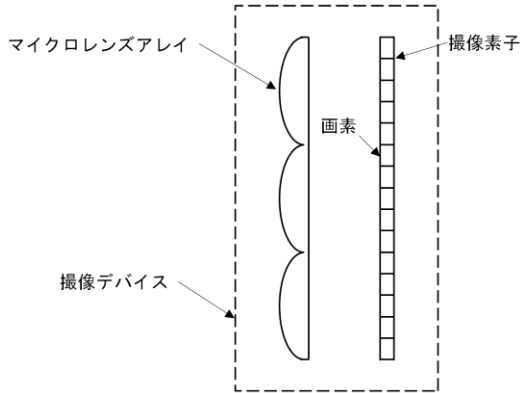


図 1・108 Plenoptic Camera 及び Focused Plenoptic Camera に使用される撮像デバイスの構成

1-11-4 光飛行時間 (TOF) 法

光飛行時間 (Time of Flight) 法は、光源から放出された光が対象物に当たり、反射して戻ってくるまでの時間を測定して距離を把握する手法である。

半導体技術の進歩によって、光源の高速スイッチングや変調ができるようになってるとともに、被写体から反射して戻ってきた光の位相差を高速で検出できる撮像素子が開発され、光飛行時間法による距離計測技術は 1995 年頃から報告されている²⁹⁾。

光飛行時間を測定するものには、光源にパルス波を使用するものと、連続波に正弦波の強度変調を用いるものがある。

光源にパルス波を使用する光飛行時間法には、画素からの電荷読み出しを複数回行い、それらの複数の出力値を比較することによって、光飛行時間を算出する間接 TOF 法³⁰⁾と、光飛行時間を直接測る直接 TOF 法とがある。

間接 TOF 法に使用されるセンサの基本構造と動作原理を図 1・109 に示す³¹⁾。一つの光電変換部にゲート 1 とゲート 2 のように複数の読み出しゲートを設ける。これら二つの読み出しゲートを開くタイミングを、最初はゲート 1 を開き、次に、ゲート 1 が閉じると同時にゲート 2 を開くように設定する。光源から発せられた光が対象物に当たって、ゲート 1 とゲート 2 が開いている時間をまたぐように光電変換部に戻ってくる (実線) と、これら二つの出力信号は等しくなる。光がこれよりも遅れて戻ってくる (破線) と、ゲート 2 の出力が大きくなり、ゲート 1 の出力が小さくなる。すなわち、ゲート 1 とゲート 2 の出力信号は光飛行時間に依存しており、これらを測定し計算することで、光が戻ってくるまでの時間を求めることができる。光源から発せられた光が対象物に当たりセンサに戻ってくるまでの時間を t_d 、光速を c 、センサから対象物までの距離を L とすると、対象物までの距離 L は次式で求められる。

$$L = \frac{ct_d}{2} \quad (1)$$

この動作をセンサの各画素で行うことによって、距離画像の動画も可能となる。この間接 TOF 法を用いたセンサにおいて、背景光によって発生する電荷を排出し、背景光の影響を軽

減する CMOS 距離画像センサ³²⁾ や、光電変換部の暗電流を抑圧するために光電変換部に Pinned フォトダイオードを搭載した CMOS 距離画像センサ³³⁾ が試作されている。

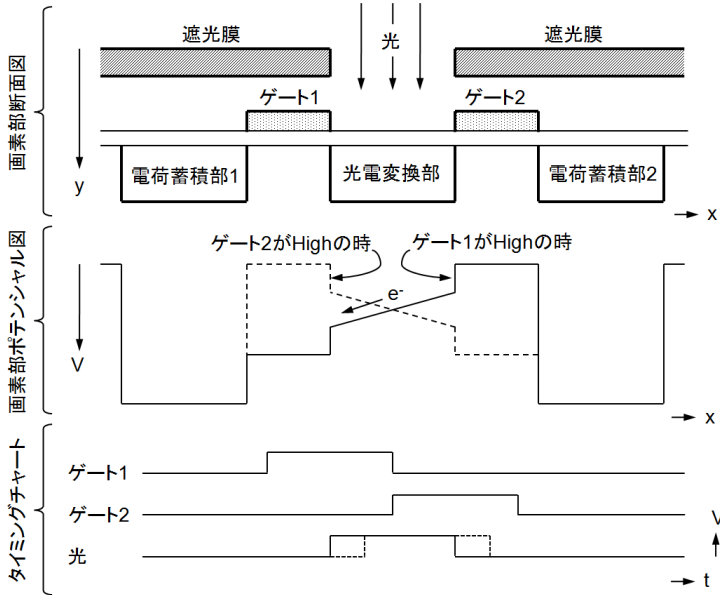


図 1・109 光飛行時間 (Time of Flight) 法に使用されるセンサの基本構造と動作原理

直接 TOF 法は、Time-to-Digital Converter をオンチップしたクロノメーターで、光源から発せられた光が対象物に当たってセンサに戻ってくるまでの時間を直接測定するものである。この方式のセンサとして、単一フォトンのアバランシェフォトダイオード (Single-Photon Avalanche Diode : SPAD) を用いたものが報告されている^{34), 35), 36)}。

正弦波の強度変調を行った光源を使用した光飛行時間法のセンサは、光源の強度変調の一周期に 4 回のサンプリングを行う機能をもったセンサとレンジファインダが開発されている³⁷⁾。4 回サンプリングされた出力を A_0, A_1, A_2, A_3 とすると、光源から発せられた光と対象物に当たってセンサに戻ってきた光との位相差 ϕ は、次式で与えられる。

$$\phi = \arctan \left(\frac{A_0 - A_2}{A_1 - A_3} \right) \quad (2)$$

これにより、光源の強度変調周波数を f とすると、対象物までの距離 L は次式で求められる。

$$L = \frac{c\phi}{4\pi f} \quad (3)$$

単一フォトンのアバランシェフォトダイオード (SPAD) を用いたセンサにおいても、正弦波の強度変調を行った光源を使用した光飛行時間法のセンサが開発されている³⁸⁾。

■参考文献

- 1) P. Seitz, "Review of Optical 3D Ranging Techniques and Key Design Challenges for Required Image Sensors," IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. 2011/Forum/F5: Image Sensors for 3D Capture, 2011.
- 2) T. Oggier, "Image Sensor Technologies for 3D Time-of-flight Range Imaging," 2009 Int. Image Sensor Workshop, Session 08: 3D Range Imaging, 2009.
- 3) P. Magnan, "3D Time-Of-Flight Image Capture with Pulsed Illumination," IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. 2011/Forum/F5: Image Sensors for 3D Capture, 2011.
- 4) 佐藤幸男, 柴田 進, "実用化が進む高速レンジファインダ," 日本ロボット学会誌, vol.23, no.3, pp.278-281, 2005.
- 5) 谷内出悠介, 池田 誠, 浅田邦博, "時分割投射光による実時間高速高精度 3次元モデル取得のための複数視点システム," 映像学誌, vol.62, no.3, pp.392-397, 2008.
- 6) 来海 暁, 安藤 繁, (太田 淳監修), "CMOS イメージセンサの最新動向," 第9章 時間関連イメージセンサ, pp.173-175, 2007.
- 7) 有泉昌弘, 河野利夫, 阿部芳久, 原田孝仁, "非接触 3次元形状測定に関する技術開発," Konica Minolta Technology Report, vol.2, pp.187-192, 2005.
- 8) T. Sugiyama, S. Yoshimura, R. Suzuki, and H. Sumi, "A 1/4-inch QVGA Color Imaging and 3-D Sensing CMOS Sensor with Analog Frame Memory," Dig. Tech. Papers, IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. 2002, pp.434-435, 2002.
- 9) Y. Oike, M. Ikeda, and K. Asada, "A 375×365 3D 1k frame/s Range-finding Image Sensor with 394.5 kHz Access Rate and 0.2 Sub-pixel Accuracy," Dig. Tech. Papers, IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. 2004, pp.118-119, 2004.
- 10) S. Mandai, T. Nakura, M. Ikeda, and K. Asada, "Ultra High Speed 3-D Image Sensor," 2009 Int. Image Sensor Workshop, Session 08: 3D Range Imaging, 2009.
- 11) S. Ando and A. Kimachi, "Correlation Image Sensor: Two-Dimensional Matched Detection of Amplitude-Modulated Light," IEEE Trans. Electron Devices, vol.50, no.10, pp.2059-2066, 2003.
- 12) 日浦慎作, "コンピュータショナルフォトグラフィ," 映像学誌, vol.63, no.3, pp.274-278, 2009.
- 13) G. Lippman, "Epreuves reversibles," J. Phys. 7, pp.821-825, 1908.
- 14) 坂東洋介, "多機能化に向かう次世代カメラ," EDN Japan 2010年11月号, 2010.
- 15) M. Levoy and P. Hanrahan, "Light field rendering," Proc. ACM SIGGRAPH 96, pp.31-42, 1996.
- 16) B. Wilburn, N. Joshi, V. Vaish, E.-V. Talvala, E. Antunez, A. Barth, A. Adams, M. Horowitz, and M. Levoy, "High performance imaging using large camera arrays," ACM Trans. Graphics 24 (3), pp.765-776, 2005.
- 17) J. Tanida, T. Kumagai, K. Yamada, S. Miyatake, K. Ishida, T. Morimoto, N. Kondou, D. Miyazaki, and Y. Ichioka, "Thin observation module by bound optics (TOMBO): concept and experimental verification," Applied Optics, 40, pp.1806-1819, 2001.
- 18) T. Kato, S. Kawahito, K. Kobayashi, H. Sasaki, T. Eki, and T. Hisanaga, "A Binocular CMOS Range Image Sensor with Bit-Serial Block-Parallel Interface Using Cyclic Pipelined ADC's," Dig. Symp. VLSI Circuits, pp.270-271, 2002.
- 19) R. M. Philipp and Ralph Etienne-Cummings, "A 128×128 33mW 30frames/s Single-Chip Stereo Imager," Dig. Tech. Papers, IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. 2006, pp.506-507, 2006.
- 20) E. H. Adelson and J. Y. A. Wang, "Single lens stereo with a plenoptic camera," IEEE Trans. PAMI, 14 (2), pp.99-106, 1992.
- 21) R. Ng, M. Levoy, M. Bredif, G. Duval, M. Horowitz, and P. Hanrahan, "Light field photography with a hand-held plenoptic camera," Tech. Rep. CSTR 2005-02, Stanford Computer Science, 2005.
- 22) K. Fife, A. El Gamal, and H.-S. P. Wong, "A 3MPixel Multi-Aperture Image Sensor with 0.7 μm Pixels in 0.11 μm CMOS," Dig. Tech. Papers, IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. 2008, pp.48-49, 2008.
- 23) A. Veeraraghavan, R. Raskar, A. Agrawal, A. Mohan, and J. Tumblin, "Dappled photography: mask enhanced cameras for heterodyned light fields and coded aperture refocusing," ACM Trans. Graphics 26 (3), pp.69:1-69:12, 2007.
- 24) A. Wang, P. R. Gill, and A. Molnar, "An Angle-Sensitive CMOS Imager for Single-Sensor 3D Photography," Dig. Tech. Papers, IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. 2011, pp.412-413, 2011.

- 25) C.-K. Liang, T.-H. Lin, B.-Y. Wong, C. Liu, and H. H. Chen, "Programmable aperture photography: multiplexed light field acquisition," *ACM Trans. Graphics* 27(3), pp.55:1-55:10, 2008.
- 26) T. Georgeiv, K. C. Zheng, B. Curless, D. Salesin, S. Nayar, and C. Intwala, "Spatio-angular resolution tradeoff in integral photography," *Proc. Eurographics Symposium on Rendering*, pp.263-272, 2006.
- 27) Y. Bando, B.-Y. Chen, and T. Nishita, "Extracting depth and matte using a color-filtered aperture," *ACM Trans. Graphics* 27(5), pp.134:1-134:9, 2008.
- 28) A. Lumsdaine and T. Georgiev, "The focused plenoptic camera," *Proc. IEEE Int. Conference on Computational Photography*, 2009.
- 29) T. Spirig, P. Seitz, O. Vietze, and F. Heitger, "The lock-in CCD-two-dimensional synchronous detection of light," *IEEE J. Quantum Electronics*, vol.31, issue 9, pp.1705-1708, 1995.
- 30) R. Miyagawa and T. Kanade, "CCD-based range-finding sensor," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol.44, no.10, pp.1648-1652, 1997.
- 31) 川人祥二, "3次元レンジファインダの最新動向," *映情学誌*, vol.62, no.3, pp.313-316, 2008.
- 32) S. Kawahito, I. A. Halin, T. Ushinaga, T. Sawada, M. Homma, and Y. Maeda, "A CMOS time-of-flight range image sensor with gates-on-field-oxide structure," *IEEE Sensors Journal*, vol.7, no.12, pp.1578-1586, 2007.
- 33) C. Tubert, L. Simony, F. Roy, A. Tournier, L. Pinzelli, and P. Magnan, "High Speed Dual Port Pinned-photodiode for Time-Of-Flight Imaging," 2009 Int. Image Sensor Workshop, Session 08: 3D Range Imaging, 2009.
- 34) C. Niclass, C. Favi, T. Kluter, M. Gersbach, and E. Charbon, "A 128×128 Single-Photon Image Sensor With Column-Level 10-Bit Time-to-Digital Converter Array," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol.43, no.12, pp.2977-2989, 2008.
- 35) J. Richardson, R. Walker, L. Grant, D. Stoppa, F. Borghetti, E. Charbon, M. Gersbach, and R. K. Henderson, "A 32×32 50ps Resolution 10 bit Time to Digital Converter Array in 130nm CMOS for Time Correlated Imaging," 2009 Int. Image Sensor Workshop, Session 08: 3D Range Imaging, 2009.
- 36) R. J. Walker, J. A. Richardson, and R. K. Henderson, "A 128×96 Pixel Event-Driven Phase-Domain $\Delta\Sigma$ -Based Fully Digital 3D Camera in 0.13 μ m CMOS Imaging Technology," *Dig. Tech. Papers, IEEE Int. Solid-State Circuits Conf.* 2011, pp.410-411, 2011.
- 37) B. Buttgen, T. Oggier, M. Lehmann, R. Kaufmann, and F. Lustenberger, "CCD/CMOS Lock-In Pixel for Range Imaging: Challenges, Limitations and State-of-the-Art," <http://www.mesa-imaging.ch/publications.php>
- 38) C. Niclass, C. Favi, T. Kluter, F. Monnier, and E. Charbon, "Single-Photon Synchronous Detection," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol.44, no.7, pp.1977-1989, 2009.