解説

昆虫の複眼を規範とした視覚システムとその応用

Visual Systems Inspired by the Insect Compound Eye

星 野 一 憲* *東京大学大学院情報理工学系研究科

Kazunori Hoshino* *The University of Tokyo, Graduate School of Information Science and Technology

1. はじめに

本稿では、筆者らがこれまでにやってきた複眼型マイクロ光学システムとその応用に関する研究について述べる。昆虫の複眼に関しては、レンズアレイの光学特性[1]や、視覚神経における情報処理[2][3]などの分野において、非常に多くの研究が行われている。特にハエは、飛行中に必要とされる高度な情報の多くを複眼から得ていると考えられ、なおかつ入手・実験が容易であることから、研究例も多く、工学応用が期待される様々な知見が得られている。一方、近年のMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 研究においては、ちょうどハエの複眼と同じ、数十~数百 [μm] ミクロン程度の寸法の機能素子を集積したマイクロシステムの応用研究が活発になされている。

本稿前半は、ハエ複眼の構造・機構面に注目し、これを規範とした微小視覚センサを設計・構築する試みについて述べる。後半は、立体画像ディスプレイなど、複眼型光学システムの研究成果からの展開が期待される、新しい情報機器技術について述べる。

2. 複眼型視覚センサ

2.1 複眼のモデル

ハエ複眼は、数千のマイクロレンズとその下の網膜とが薄膜状に眼を覆う構造となっている。この網膜は、網膜全体を前方中央部に引き付けるための筋肉と、後方に引き戻すための腱が接続された構造になっていることが知られている。歩行中のハエの観察において、レンズが固定された状態で背後の受光部が微小な振動をし、数度程度の視軸の走査を行っていることが確認されている[4]。このように、レンズ、筋肉、神経系などの微小な要素が高度に集積された複眼の機能を考察することは、マイクロレンズ、アクチュエータ、センサ、トランジスタなどから工学的に構成されたマイクロ光学システムを構築する際の設計指針として有

図1 複眼型視覚センサのモデル

用であると考えられる。

図1に複眼型視覚センサのモデルを示す。生物の複眼においては、一つのレンズといくつかの受容器が個眼と呼ばれる一単位を構成している。例えば、ハエの複眼には一つのレンズに対して七つの光受容器があり、光の波長に対して異なる感度特性を示す複数種の視細胞が含まれている。また、カ的一种においては、比較的大きいレンズに対して、数十の受容器を持つものもある[5]。レンズや受光素子の大きさや密度によって複眼全体の大きさや解像度が定まることになる。ここでは、一つのレンズと一つの光センサが対応したモデルを考える。

この視覚センサにおいては、網膜微動は光センサアレイの回転運動としてモデル化することができる。このセンサの運動によって、多数の個眼の視軸がそれぞれの視野を同位相で走査することになる。

2.2 ラージスケールセンサ

図2は小型移動ロボットへの搭載を目的として試作した複眼型の視覚システムである。直径1[mm]のレンズが左右30個ずつ並べられ、各レンズの背後にフォトダイオードがそれぞれ一つずつ配置されている。曲面上にダイオードを配列するために、ポリイミドのフレキシブル基板を用いている。また、板バネとピエゾアクチュエータによってフォトダイオードアレイを振幅25 [μm]、周波数20 [Hz]で走査することができる。レンズと受光素子の間隔は焦点距離に等しく、1[mm]である。1回の走査で約3度の範囲を走査することになる。CCDなどの撮像素子を用いた視覚システムと異なる点は、それぞれの受光素子が独立に動作

原稿受付 2004年10月8日

キーワード: Compound Eye, MEMS, Visual Sensor, 3D Display, Scanning

*〒113-8656 文京区本郷 7-3-1

*Bunkyo-ku, Tokyo

(a)

(b)

図2 ラージスケール複眼型視覚センサ

するため、並列信号処理に適した構成となっている点である。ここでは、受光素子ごとに増幅回路とノイズフィルタリング、微分処理を行っている。

この視覚センサにおいては、受光素子に入力される光信号の微分成分を取り出すことによって物体を検知し、さらに、隣接する受光素子に入ってくる物体情報の時間差から物体までの距離を計測するモデルを用いた。例えば、障害物までの距離が近ければ、物体の存在を示す信号が短い間隔で隣接する個眼から出力される。このセンサを200[mm]ほどの移動ロボットに搭載した実験で、障害物回避を実現した[7]。

2.3 マイクロスケールセンサ

複眼センサにおいては、個々のレンズが小さくなると、画素の集積密度が増える一方で、光の回折の影響によりレンズの光学的な分解能は低下する。このトレードオフから、効率のよいレンズの大きさはおよそ定まることになる。生物の複眼に注目しても、レンズの大きさは種によって若干違いはあるものの、一般には数十[μm]の大きさであることが普通である。

一方、数十[μm]程度の大きさのマイクロレンズを製作することは比較的容易であり、各種のマイクロ光学システムに実際に応用がなされている。これらをMEMSアクチュエータやフォトダイオードと組み合わせることで、昆虫の複眼と同じ寸法の視覚システムを構築することが可能である。図3に、我々が試作したマイクロスケールの複眼型センサ[7]の構成を示す。マイクロレンズ、可動スリット、フォ

図3 マイクロスケールセンサの構成

図4 受光素子の微動機構を集積した受光素子アレイ

トダイオードの組み合わせによって、個眼ごとの視軸の走査を可能としている。図4は、フォトダイオードと静電アクチュエータによって微動する、スリットアレイを集積した受光素子アレイの写真である。受光素子ごとに並列して信号処理を行う人工網膜チップの研究は多く報告されている[8]~[10]が、このように、機械的に制御できる光学素子を受光素子ごとに並列することで、取り入れる光の物理的条件を変化させることができるため、さらに柔軟な画像取得システムが構築できる。

この網膜チップでは、直径120[μm]のマイクロレンズアレイと組み合わせることで、各画素が3度程度の視野を走査して光源の位置を計測するシステムを構築することができた。

3. 複眼型光学系を持つディスプレイへの展開

網膜、受光素子の微小振動機構を持つことの利点は、比較的少ない受光素子であっても、機械的な運動に合わせて時系列で信号を取得し、結果として高解像度の画像を得ることができる点である。一方、現在デジタルカメラ用途の撮像素子の普及によって、安価な撮像素子であってもロボット用途などを含む一般的なアプリケーションには十分な画質の画像が得られるようになっている。現状では、撮像装

図5 IP (インテグラルフォトグラフィー) の原理

置に関しては、受光部に機械的な駆動機構を導入する必要性が大きいという側面も指摘できる。

一方、撮像素子と逆の役割を果たす画像表示装置に注目すると、液晶、EL、プラズマなど様々な方式が実用されているが、撮像素子のようにシリコンプロセスのみで基板上に発光・制御回路を集積することが困難であることから、撮像素子と比較して、その集積度は決して高くない。特に、近年実用化の始まっている立体画像表示装置のように、表示のために非常に多くの画像情報を必要とする光学システムには機械的な走査による解像度の向上が有効であると考えられる。

図5に、1908年に考案されたIP (インテグラルフォトグラフィー) と呼ばれる立体画像の撮影、表示方法の原理[11]を示す。IPは、光線再生と呼ばれる方法に基づいている。マイクロレンズアレイの個々のレンズの下にそれぞれ異なる画像情報(図中では a_1, a_2, a_3)を与えることで、空間上の点(図中ではA)から光が発しているように光線を再生でき、結果として立体画像が観察される。この方法は元来、印画紙と組み合わせて立体写真を撮影するための方法であったが、コンピュータグラフィックスとの組み合わせによりこの方法が再び注目されている。土肥らのグループは、この立体画像を手術中の患者にかぶせて表示して手術支援を行う方法[12]を提案している。

IPでは、一つのレンズの下により多くの発光素子に対応させて配列する必要があるため、様々な方向から画像を観察できる立体感と引き換えに、画像の精細さが失われるという特徴がある。このシステムに発光素子の機械的な微動機構を組み込めば、比較的少ない発光素子で立体画像表示を実現できるため、高解像度でなおかつ立体感のある画像を表示できることになる。次に、立体画像表示装置に発光素子の微動機構を導入するための試みについて述べる。

図6は筆者らが試作した、アクティブなマイクロレンズアレイ[13]である。レンズの駆動によって、受光素子の微動と同じ効果を得ることを目的としている。PET (polyethy-

図6 高分子材料によるアクティブ光学フィルタ

lene terephthalate) フィルム上に導電性高分子による電極をパターンニングし、その上に微小な水滴を配列し、レンズとして構成している。電極間に電圧を加えることによって、静電気力で水滴を微小に動かすことができる。さらに、水滴の位置を一定に保つため、基板表面に撥水製のフッ素化合物をパターンニングしてある。このように、液体の位置、形状の制御によって微小な光学系を構築して応用する技術としては、この例のほかにもディスプレイ発光部やカメラの焦点調節機構などの研究例[14][15]をあげることができる。

図6に示すシステムは、材料としてシリコン、ガラス、金属などを用いておらず、高分子材料のみによって構成されていることが特徴である。近年 MEMS 研究分野においても、高分子材料や有機材料からなるマイクロ素子[16]や発光素子[17]など新しい微小システムの研究が行われ始めている。これらの材料を用いることで、シリコンプロセスに基づいた現在の MEMS デバイスの制限を離れ、多様な環境に応用することのできる微小機械システムが実現できることが期待される。

4. お わ り に

ここで述べた複眼型光学システムの第一の特徴は、受光・発光素子の機械的な走査機構を内部に持つことである。網膜の走査機構は哺乳類や両生類など、複眼を持たない生物においても観察されており、微小な光学システムにおける光信号処理の方法として有効であると考えられる。図4に

おいて示した MEMS アクチュエータは半導体プロセスと同様の方法で製作できることから、シリコンチップ上に様々な形で集積することが可能である。今後、このような複眼型光学システムの研究から発展して、光学素子、受光素子、信号処理部が高度に集積された光情報システムが実用化される可能性がある。

一方、生物における複眼のもう一つの特徴は、薄型のマイクロレンズアレイが球面上を覆うことで、広い視野を小さい体積で実現していることである。マイクロレンズアレイ自体は比較的以前から工業的に応用されており、レーザープリンタの光学系や CCD 受光素子の集光の目的で用いられている。しかし、これらはガラスや樹脂などの硬い材料でできた平面の基板上に製作されたレンズアレイであり、様々な曲面上に自在に配置されたマイクロレンズアレイの応用はいまだ考えられていない。筆者らが試作において用いてきた導電性高分子や有機半導体材料は、柔軟なシステムを安価に量産できる材料である。複眼のように、曲面型のマイクロレンズアレイ光学系の実現を目指すことによって、部屋や車内の内装や、衣服など、大きな面積を覆い、なおかつ様々な形状に柔軟に変化する新しい撮像装置やディスプレイへと発展させていきたいと考えている。

参考文献

- [1] G.A. Horridge: "The Separation of Visual Axes in Apposition Compound Eyes," *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, vol.285, pp.1-59, 1978.
- [2] N. Franceschini, J.M. Pichon and C. Blanes: "From Insect Vision to Robot Vision," *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, vol.337, pp.283-294, 1992.
- [3] M.G. Nagle and M.V. Srinivasan: "Structure from Motion: Determining the Range and Orientation of a Surface by Image Interpolation," *Journal of Optical Society of America*, vol.13, pp.25-34, 1996.
- [4] N. Franceschini and R. Chagneux: "Repetitive Scanning in the Fly Compound Eye," *Proc. 25th Göttingen Neurobiology Conference* eds Elsner & Wässle, p.279, 1997.
- [5] E. Buschbeck, B. Ehner and R. Hoy: "Chunk Versus Point Sampling: Visual Imaging in a Small Insect," *Science*, vol.286, pp.1178-1180, 1999.
- [6] K. Hoshino, F. Mura, H. Morii, K. Suematsu and I. Shimoyama: "A Small-Sized Panoramic Visual Sensor Inspired by the Fly's Compound Eye," *Proc. IEEE ICRA '98*, Leuven, Belgium, pp.1641-1646, 1998.
- [7] K. Hoshino, F. Mura and I. Shimoyama: "A One-Chip Scanning Retina With an Integrated Micromechanical Scanning Actuator," *Journal of Microelectromechanical systems*, vol.10, pp.492-497, 2001.
- [8] C. Mead: *Analog VLSI and Neural Systems*. Addison Wesley, 1989.
- [9] I. Ishii, Y. Nakabo and M. Ishikawa: "Target Tracking Algorithm for 1 ms Visual Feedback System Using Massively Parallel Processing," *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1996.
- [10] T. Bernard and F. Paillet: "Output Methods for an Associative Operation of programmable Artificial Retina," *Proc. IROS 97*, pp.752-757, 1997.
- [11] M.G. Lippmann: "Epreuves reversibles donnant la sensation du relief," *J. de Phys.*, vol.7, 4th series, pp.821-825, 1908.
- [12] Y. Masutani, T. Dohi, Y. Nishi, M. Iwahara, H. Iseki and K. Takakura: "VOLUMEGRAPH An Integral photography based enhanced reality visualization system," *Proc. of CAR*, p.1051, 1996.
- [13] K. Hoshino, A. Nakai and I. Shimoyama: "An All-Polymer Thin-Film Scanning Optical Filter for 3D-Image Displays," *IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, pp.487-490, 2002.
- [14] S. Kwon and L.P. Lee: "Focal Length Control by Microfabricated Planar Electrodes-based Liquid Lens," *Proc. Transducers*, pp.1348-1351, 2001.
- [15] A. Wolter, D. Kunze, W. Doleschal, H. Lanker and G. Zimmer: "The Moving Liquid Mirror Spatial Light Modulator: Simulation and Measurement of The Optical Performance," the 2000 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, pp.437-442, 2000.
- [16] Y. Xia, E. Kim, X.M. Zhao, J.A. Rogers, M. Prentiss and G.M. Whitesides: "Complex Optical Surfaces Formed by Replica Molding Against Elastomeric Masters," *Science*, vol.273, pp.347-349, 1996.
- [17] M. Granström, M. Berggren and O. Inganäs: "Micrometer- and Nanometer- sized Polymeric Light emitting Diodes," *Science*, vol.267, pp.1479-1481, 1996.

星野一憲 (Kazunori Hoshino)

1972 年 5 月 7 日生。1995 年東京大学工学部機械情報工学科卒業。2000 年同大学大学院工学系研究科機械情報工学博士課程修了。2003 年より同大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻講師。MEMS、マイクロ光学システム、高分子材料を用いたマイクロデバイスの研究などに従事。IEEE 会員。(日本ロボット学会正会員)